

中美能源效率和空气质量战略：
建筑、交通和工业的最佳实践回顾
U.S.-China Energy Efficiency and Air Quality Strategies:
A Review of Best Practices in
Buildings, Transportation, and Industry

加州-中国气候研究院与劳伦斯伯克利国家实验室合作发布的报告

2021.6.30

关于作者:

ABOUT THE AUTHORS:

加州-中国气候研究院:

Robert B. Weisenmiller博士、Hae Jeong Cho、Jennifer Perron、Fan Dai博士

劳伦斯伯克利国家实验室:

Hongyou Lu、Nina Khanna、Nan Zhou博士、Lynn Price

致谢:

ACKNOWLEDGEMENTS:

编制本报告前，我们采访了不少加利福尼亚州的官员，感谢他们的帮助。我们采访了加州公共事业委员会委员、加州空气资源委员会现任主席Liane Randolph、加州公共事业委员会委员Cliff Rechtschaffen、加州能源委员会委员Andrew McAllister、加州空气资源委员会负责规划、货运和有毒物质的执行副总裁Edie Chang、和加州环境保护局副局长Ashley Conrad-Saydah。此外，我们还要感谢为本研究而举行的公共和私人圆桌会议的演讲者和参与者，包括但不限于，中国环境科学研究院、中国建筑材料科学研究总院、中国水泥协会、北京大学、中华人民共和国生态环境部对外合作与交流中心、北京理工大学、北京市生态环境局、中华人民共和国国家发展和改革委员会以及国家应对气候变化战略研究和国际合作中心。最后，我们还要感谢中国能源基金会的大力支持，使这项研究成为可能，包括对刘欣和简文泰的审阅。

ABOUT CALIFORNIA-CHINA CLIMATE INSTITUTE

州-中国气候研究院简介

加州-中国气候研究院于2019年9月成立，是加州大学伯克利分校法学院（通过其法律、能源和环境中心）与劳瑟自然资源学院联合发起的一项加州大学计划。该研究院的主席是加利福尼亚州前州长**Jerry Brown**，副主席是美国加利福尼亚州空气资源委员会前任主席**Mary Nichols**。该研究院还与加州大学其他分校、其他部门和领导保持着紧密的合作关系。该研究院通过推动加州和中国开展联合研究、培训和对话，旨在为政策制定者提供信息，推动建立合作与伙伴关系，并促进各层级制定气候问题解决方案。

目录

首字母缩写词和缩略词	5
1. 前言	9
2. 能源效率措施的协同效益概述	15
3. 加州的空气质量得益于能源效率和电气化	17
4. 美国能效和空气质量战略	20
4.1 联邦能效和空气质量战略	20
4.1.1 概述	20
4.1.2 特朗普执政期间的变化（2017—2021）	21
4.1.3 拜登政府的变化（自2021年开始）	24
4.2 加州能效和空气质量战略	24
4.2.1 加州气候政策中的能效	24
4.2.2 范围界定计划	27
4.2.3 州实施计划	31
4.2.4 减少温室气体排放背景下的能效反思	36
4.2.5 建筑和电器	36
4.2.6 储能解决方案	46
4.2.7 交通运输	53
5. 国际先进经验及其在中国应用的潜力	59
5.1 重型卡车的能源效率及其可能产生的空气质量协同效益	59
5.1.1 市场、政策和技术概况	59
5.1.2 政策概况	61
5.1.3 技术概况	62
5.1.4 零排放技术评估	63
5.1.5 国际先进经验	65
5.1.6 低排放区	67
5.1.7 地方在目标设定方面发挥着领导作用	68
5.1.8 能源效率提高和空气质量协同效益可能给中国重型卡车带来的好处	68
5.1.9 可能产生的能量、二氧化碳和空气质量协同效益结果	71
5.2 水泥行业	75
5.2.1 中国水泥行业概况	75
5.2.2 水泥行业的国际最佳实践计划	84
5.2.3 水泥行业重要的零排放措施	85
5.2.4 中国水泥厂的能效节约潜力与潜在积极影响	91
6. 结论	98
7. 附件	104
References	116
8. 免责声明	127

首字母缩写词和缩略词

AB	议会法案
AMP	海上电力替代系统
APCD	空气污染控制局
AQMD	空气质量管理局
AQMP	空气质量管理规划
BAAS	电池租用服务
BAT	最佳实用技术
BESS	电池储能系统
BTM	电表后端
BTO	美国能源部建筑技术办公室
CAA	清洁空气法案
CACO ₃	碳酸钙
CAFE	企业平均燃油经济性标准
CAMx	CAMx空气质量模型
CARB	加州空气资源委员会
CAISO	加州独立系统运营商
CalEPA	加州环境保护局
CAO	氧化钙
CCS	碳捕获与封存
CCUS	碳捕获、利用与储存
CEC	加州能源委员会
CEIDARS	加州温室气体排放清单编制及报告制度
CEPA	控制排放预测算法
CEPAM	加州温室气体排放预测分析模型

CEQA	加州环境质量法案
CHP	热电联产
CH ₄	甲烷
CMAQ	社区多尺度空气质量模型
CNBM	中国建材集团
CO	一氧化碳
CO ₂	二氧化碳
CPUC	加州公共事业委员会
DOE	美国能源部
DPF	柴油颗粒过滤器
DREAM	资源与能源需求分析模型
DV	设计值
EE	能源效率
EPD	环保产品声明
ETS	排放交易制度
EU	欧盟
EV	电动车辆
EERE	美国能源部能量效率与可再生能源办公室
EPIC	电力投资收费项目
EPRI	美国电力研究院
F-gases	氟化气体
FYP	五年计划
GHG	温室气体
GWP	全球变暖潜值
HERS	家庭能源评级系统
HFC	氢氟烃
HVAC	采暖、通风和空气调节

ICE	内燃机
IEA	国际能源署
IEPR	综合能源政策报告
IOU	投资者所有的公用事业
ITC	投资税收抵免
Lb.	磅
LCFS	低碳燃料标准
LNG	液化天然气
MCE	海洋清洁能源
MOU	谅解备忘录
MSW	城市固体废弃物
MUA	多用途应用
NAAQS	美国国家环境空气质量标准
NEV	新能源汽车
NEM	净电量计量
NF ₃	三氟化氮
NH ₃	氨
NHTSA	美国高速公路安全管理局
NO _x	氮氧化物
NSP	新型悬浮预热器-分解炉回转窑
PFC	全氟化碳
PG&E	美国太平洋燃气电力公司
PM _{2.5}	直径2.5微米以下的细颗粒物
PM ₁₀	直径10微米以下的细颗粒物
POU	公营公用事业
PPB	十亿分之一
Pv	光伏

REES	区域能源效率战略
ROG	活性有机气体
RPS	可再生能源发电配额制度
SB	参议院法案
SCC	碳的社会成本
SCE	南加州爱迪生电力公司
SCG	南加州瓦斯公司
SDG&E	圣地亚哥燃气电力公司
SF ₆	六氟化硫
SGIP	自发电激励计划
SIP	州实施计划
SO ₂	二氧化硫
SMOKE	稀疏矩阵排放清单处理系统
TAP	技术进步计划
TOU	分时电价
U.S.	美国
USD	美元
U.S. EPA	美国环境保护署
VOC	挥发性有机化合物
V2B	电动汽车与楼宇双向充放电
V2G	电动汽车与电网双向充放电
WHR	余热回收
ZEV	零排放车辆
ZNE	净零能源

1. 前言

加利福尼亚州和中国长期致力于解决空气质量问题，但现在不断加剧的温室气体排放问题亟待解决。去年九月，中国国家主席习近平提出，中国计划到2060年实现净零碳排放，在2030年前实现碳达峰。加州议会法案³² 设定了到2020年将温室气体排放量降至1990年水平的目标（该目标已于2017年实现）。参议院法案³² 设定了到2030年将温室气体排放量降低至1990年水平40%以下的目标。加州州长Jerry Brown签署了行政令（B-55-18），其中确立了到2045年实现零净碳的目标。

尽管中国和加州采取了不同的管控手段，但双方都出台了类似的管控政策来解决空气质量和温室气体排放问题。自20世纪60年代以来，加州已认识到其空气质量问题与交通运输（以及洛杉矶盆地的大气化学和频繁逆温现象）有关，现在，加州意识到其超过50%的温室气体排放也来自交通运输。中国的电力生产、燃料工业以及部分城市的供暖都依赖煤炭，2019年¹，煤炭占中国基础能源消耗的58%，并引发了空气质量问题（特别是北京等地出现了逆温现象），现在中国同样意识到，煤炭燃烧是其温室气体排放的主要来源。因此，减少温室气体排放同时进一步改善空气质量可以为加州和中国带来巨大的协同效益。

影响空气质量的污染物和温室气体均有多种：空气质量问题来自细颗粒物（PM_{2.5}）、氮氧化物、挥发性有机化合物和臭氧，而排放的温室气体不仅包括二氧化碳，还包括甲烷、黑碳以及其他短期气候污染物。事实上，控制传统空气污染物排放的根本问题在于控制策略本身，以及是应该侧重于个别污染物还是采取多污染物控制策略。² 多污染物策略虽然更难设计，但成本更低。传统的空气质量法规通常侧重于尾气控制技术方面，但随着尾气控制技术接近饱和，最终必须采取更复杂的策略。例如，在20世纪70年代，加利福尼亚州空气资源委员会提倡对汽车进行催化剂控制，而其当前战略首先是建立在之前的催化剂控制基础之上，其次采取其他措施如，汽车电气化、提升车辆效率、出台低碳燃料标准以及土地利用政策。与此类似，加利福尼亚州空气资源委员会目前正在努力制定并实施一项既可以控制空气质量，还可以解决影响气候变化的多种污染物问题的战略。

¹ 美国能源信息管理局。（日期不详）加州-中国气候研究院。美国能源信息管理局。检索日期：2021年5月5日，来源：<https://www.eia.gov/international/analysis/country/CHN>。

² Wang, A., Shen, S., & Pettit, D.（2020年）。《空气污染与气候变化的协同治理：加州经验的启示》。加利福尼亚大学洛杉矶分校法学院。<https://law.ucla.edu/news/coordinated-governance-air-climate-pollutants-lessons-california-experience>

³ Wang, L., Chen, H., & Chen, W.（2020年）。《从成本效益角度看中国二氧化碳和空气污染物排放的共同控制》。《全球变化的缓解与适应战略》：25(7), 1177 - 1197。<https://doi.org/10.1007/s11027-019-09872-7>

虽然本文标题为“最佳实践”，但事实上，本文所提及的是在控制温室气体和空气污染物排放中寻求协同效益并考虑节能措施的总体方法。一般来说，节能措施能以较少的能源投入，提供相同水平的能源服务（如照明、供暖、制冷和烹饪）。在本研究中，我们还考虑了储能技术。具体的排放控制方法必须适合当地实际情况。Alex Wang、Siyi Shen and David Pettit为本报告做了优秀的补充研究——撰写了一部题为《空气污染与气候变化的协同治理：加州经验的启示》（2020年）的书籍，该书是关于加州空气和气候污染物治理的一部优秀入门书。在空气污染物控制方面，许多联邦和州法律规定了美国环境保护署、加利福尼亚州空气资源委员会和地方空气管理局（如南海岸空气质量管理局、圣华金河谷空气污染控制局以及湾区空气质量管理局）之间的监管合作关系和监管范围。A. Wang等人指出，虽然这三个空气质量管理局均采用协调规划来控制空气污染物的排放，但他们可以采用不同的策略。例如，南海岸空气质量管理局和圣华金河谷空气污染控制局都强调了氮氧化物的污染控制（相对于挥发性有机化合物而言），因为臭氧和PM2.5污染管控与氮氧化物的污染控制相关联，从而能产生更大的效益。而湾区空气质量管理局在近期重点控制挥发性有机化合物造成的污染，因为其监管范围内臭氧和PM2浓度相对较低。⁵ 制定空气污染控制的⁵最佳策略必须考虑到当地污染水平、来源、地理位置因素、经济因素、大气化学、协同效益以及其他因素。虽然存在如何解决这些问题的最佳方案，但却没有一种能够适用于所有情况的解决方案。

A. Wang等人也探讨了加州气候污染物治理战略——由加州空气资源委员会制定的加州气候变化界定计划。该计划自2008年首次采用以来，为加州实现温室气体排放目标铺平了道路。如图1所示，2017年的界定计划几乎涵盖了加州经济的方方面面，因此涉及了加州的大部分州立机构。该计划的切实实施不仅需要加州空气资源委员会，还需要加州能源委员会（CEC）、加州公共事业委员会（CPUC）、加州独立系统运营商（CAISO）以及其他环境控制机构和联邦政府机构的协调行动，特别是汽车技术法规方面的协调行动。

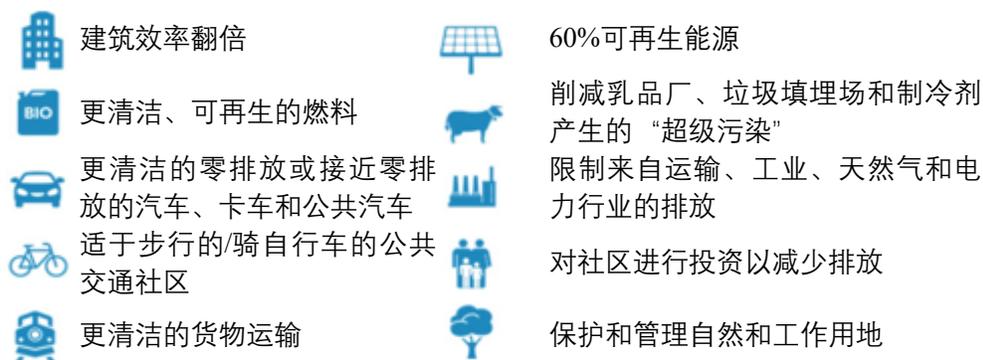


图1：加州空气资源委员会气候组合方案

来源：加州空气资源委员会（2020年）⁴

⁴ 加州空气资源委员会。（2020年10月28日）。《加州气候变化界定计划》。（报告）

图2显示，加州既实现了经济增长（在新冠疫情前加州经济总量世界排名第五），同时又减少了温室气体排放（低于1990年的水平）。

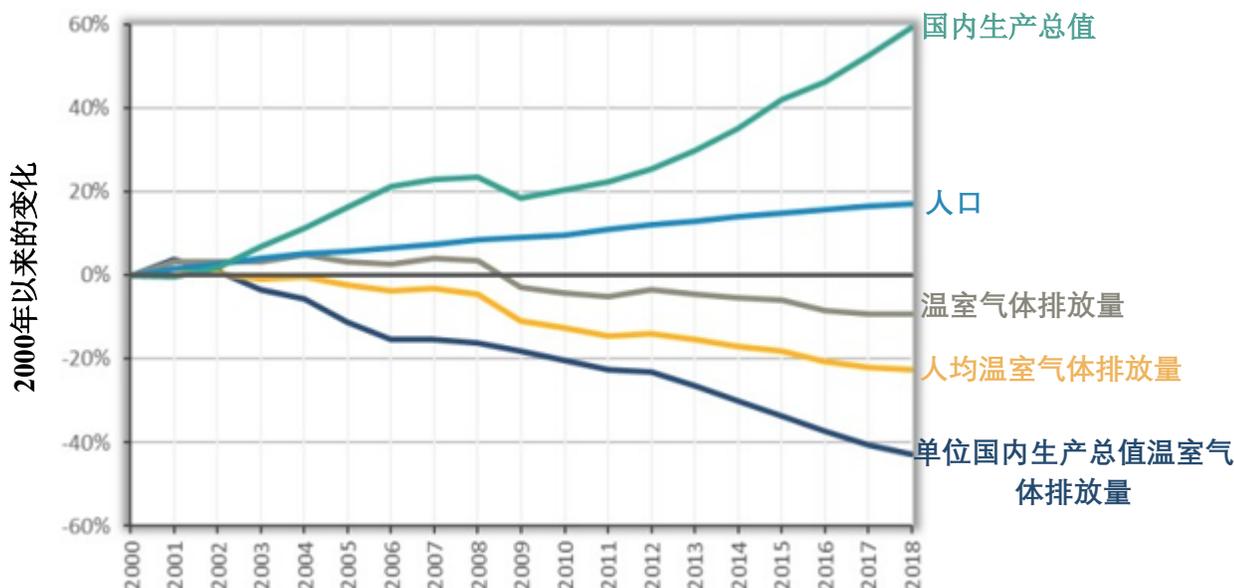


图2。加州减少温室气体排放的成果

数据来源：加州空气资源委员会（2020年）⁵

作为加州气候与空气质量管控的中枢，加州空气资源委员会考虑了空气污染物控制和气候调节之间的相互作用，最大限度地减少污染物控制成本，最大限度地提高气候调节的效率。

此外，加州气候和空气质量问题开始出现反馈循环。数百万棵树木死于常年干旱、过高的气温以及树皮甲虫虫害。气候变化进一步加剧了加州应对森林大火风险的脆弱性。森林火灾导致温室气体和PM2.5的排放量大幅增加。2020年，加利福尼亚州发生了大约9600起火灾，烧毁了近420万英亩土地，造成31人死亡，排放了相当于大约1.12亿吨二氧化碳的温室气体。⁶这相当于2420万辆汽车行驶一年的温室气体排放量。⁷火灾还摧毁了上万户家庭，这不仅导致温室气体排放量增加，

⁵ 加州空气资源委员会。（2020年）。《2000年至2018年加州温室气体排放情况：排放量和其他指标趋势》。加州空气资源委员会。https://ww3.arb.ca.gov/cc/inventory/pubs/reports/2000_2018/ghg_inventory_trends_00-18.pdf

⁶ 加州空气资源委员会。（2020年）。《征求公众意见稿——当代森林火灾、计划烧除以及森林经营管理活动产生的温室气体排放》。

加州空气资源委员会。

https://ww3.arb.ca.gov/cc/inventory/pubs/ca_ghg_wildfire_forestmanagement.pdf

⁷ Dooley, E.C.（2021年1月5日）。《加州2020年森林火灾产生的碳排放量相当于2400万辆汽车的碳排放总和》。彭博法律。<https://news.bloomberglaw.com/environment-and-energy/californias-2020-wildfire-emissions-akin-to-24-million-cars>

而且燃烧产生了大量有毒物质。⁸ 森林火灾产生的细颗粒物排放量相当于美国西部细颗粒物排放量的一半。⁹ 因此，加州在改善空气质量方面的进展正受到气候变化的阻碍。

与此同时，加州的气候战略基于一种整体策略。界定计划的核心是通过碳总量管制和交易制度为碳定价。该制度规定了该州降低温室气体排放的上限，并大幅提高了收入，为减少温室气体排放的新制度提供资金，如表1所示。但是，与其他实施排放交易制度的地区相比，加州的碳价相对较低，因为加州的碳价受到建筑行业标准和可再生能源采购等互补性的能源规划的影响，这也减少了在过去十年中加州的温室气体排放量。¹⁰

管理机构	项目	比例（百万美元） ^{4,5}		
		2019~20 财年前 累计拨款	2019~20 财年累计 拨款	累计总额
加州空气资源委员会	社区空气保护	\$556	\$291	\$847
	氟化气体减排激励措施	-	\$1	\$1
	农业减排替代措施	\$197	\$65	\$262
	低碳运输	\$1724	\$492	\$2216
	指定的火灾烟雾监测	\$6	\$2	\$8
	减少木材烟尘	\$8	-	\$8
加州海岸委员会	海岸恢复力规划	\$3	\$2	\$5
加州保护团	培训和劳动力发展	\$27	\$14	\$41
加州社区服务和发展部	低收入人口冷暖协助	\$202	\$10	\$212
加州鱼类和野生动物部	湿地与流域恢复	\$46	<\$1	\$47
加州食品与农业部	乳业甲烷	\$260	\$34	\$294
	土壤健康	\$13	\$28	\$41
	可再生替代燃料	\$3	-	\$3
	加州用水效率加强	\$66	-	\$66
加州林业和消防部	社区消防规划和准备	-	\$10	\$10
	防火	\$107	\$85	\$192
	森林碳计划实施	\$25	\$35	\$60
	林业可持续发展	\$454	\$170	\$624
加州资源回收部	垃圾转移	\$134	\$25	\$159
加州运输部	动态交通	\$10	-	\$10
	低碳交通行动计划	\$459	\$66	\$525
加州水资源部	加州涡轮机水利工程	\$20	-	\$20
	水能源资助	\$50	-	\$50
加州能源委员会	粮食生产投资	\$124	-	\$124
	低碳燃料生产	\$13	-	\$13
	农业可再生能源	\$10	-	\$10
加州环境保护局	碳中和和经济转型计划	-	\$3	\$3

加州州长紧急服务办公室	野火反应及准备	\$50	\$1	\$51
加州高速铁路管理局	高铁工程 ⁶	\$2523	\$330	\$2853
加州自然资源局	区域性森林和消防能力	\$20	-	\$20
	城市绿化	\$127	\$30	\$157
加州海岸保护协会	适应气候变化	\$7	-	\$7
加州运输局	运输和城际铁路投资计划	\$1029	\$132	\$1161
加州水资源控制委员会	饮用水公平和恢复力	-	\$100	\$100
加州战略发展委员会	负担得起的住房和可持续社区	\$1877	\$263	\$2014
	可持续的农业用地保护			
	气候变化研究	\$29	\$5	\$34
	技术援助	\$4	\$2	\$6
	气候转型社区	\$190	\$60	\$250
加州野生物种保护委员会	气候适应和恢复力	\$20	-	\$20
加州劳动力发展委员会	低碳经济和劳动力	-	\$35	\$35
旧金山湾保护和发展委员会	气候恢复力计划	\$1	\$2	\$3
共计		\$10395	\$2292	\$12687

表1。加州气候投资累积拨款来源：加州气候投资公司（2020）¹¹

⁸ Aquilera, R. Corringham, T., Gershunov, A., & Benmarhia, T. (2021年)。《森林火灾产生的细颗粒物比其他来源的细颗粒物对呼吸系统健康的危害更甚》。 *Nature Communications*, 12, 1493。

<https://doi.org/10.1038/s41467-021-21708-0>

⁹ Barboza, T. (2021年1月13日)。《研究表明，森林火灾产生的烟雾约占美国西部细颗粒物排放量的一半》。洛杉矶时报 <https://www.latimes.com/california/story/2021-01-13/wildfire-smoke-fine-particle-pollution-western-us-study>

¹⁰ Abrell, J., Betz, R. Kosch, M., Kardish, C. Mehling, M. (2020年12月)。“加州碳排放交易系统与电力市场：市场结构与市场监管对碳市场的影响”，《气候变化》，49

在中国，气候和空气质量问题在国家和地方的决策中变得愈加重要，过去十年，中国发布了多项国家战略和计划。中国在国内和国际上均就缓解气候变化方面做出了重要承诺，包括碳达峰、减少二氧化碳排放强度、提高非化石能源占能源消费比重以及近期设定的2060年实现碳中和的目标。中国气候战略的重点是在各部门数十年来提高能源效率的基础上再接再厉，并通过电力部门改革和最终使用部门的燃料转换，提供采用可再生能源利用率，以代替煤炭等污染更严重的燃料。与此同时，随着一些面积最大、人口最稠密地区的空气质量问题加剧，人们也开始逐步淘汰污染严重的散煤，特别是用于农村供暖和工业锅炉的煤炭，并采取终端措施，减少移动点源产生的空气污染物。

在交通运输方面，中国同时采用了越来越严格的燃油经济性标准和车辆排放标准，以提高车辆能效，限制轻型和重型车辆的空气污染物排放量。与此同时，还通过试点项目和各种支持政策，包括财政激励、税收优惠政策和基础设施支持，共同努力推广更清洁的插电式混合动力车辆、纯电动车辆和氢燃料电池新能源车辆。因此，中国现在是轻型新能源车辆销售的全球领导者，深圳等城市在很短的时间内就实现了市政用车的全面电气化。中国在制定气候战略时已认识到需要利用新能源车辆剩余的能效收益，并基于最新可用技术部署更多清洁新能源车辆，而针对重型车辆的空气质量战略重点是逐步淘汰不符合更加严格排放标准的老式、低效且污染严重的柴油卡车。

在水泥行业方面，中国水泥行业通过采用节能技术（如新型悬浮预热器-分解炉回转窑和余热回收技术）以及实施供给方政策（如逐步淘汰小型低效产能以及限定产量）提高了能源效率。以上举措为改善空气质量做出了巨大贡献，减少了目标地区硫氧化物、氮氧化物和细颗粒物等主要污染物的排放。展望未来，中国水泥工业将面临多方面的挑战，不仅要降低能源消耗、淘汰落后产能、提高能源利用率，而且需要继续减少主要空气污染物，降低二氧化碳排放量，为实现中国的“双碳”目标而不懈努力。

¹¹ 向立法机构提交的关于加州气候投资使用碳限额和交易拍卖资金的年度报告。加州气候投资公司，2020年3月，第iv-v页。

2. 能源效率措施的协同效益概述

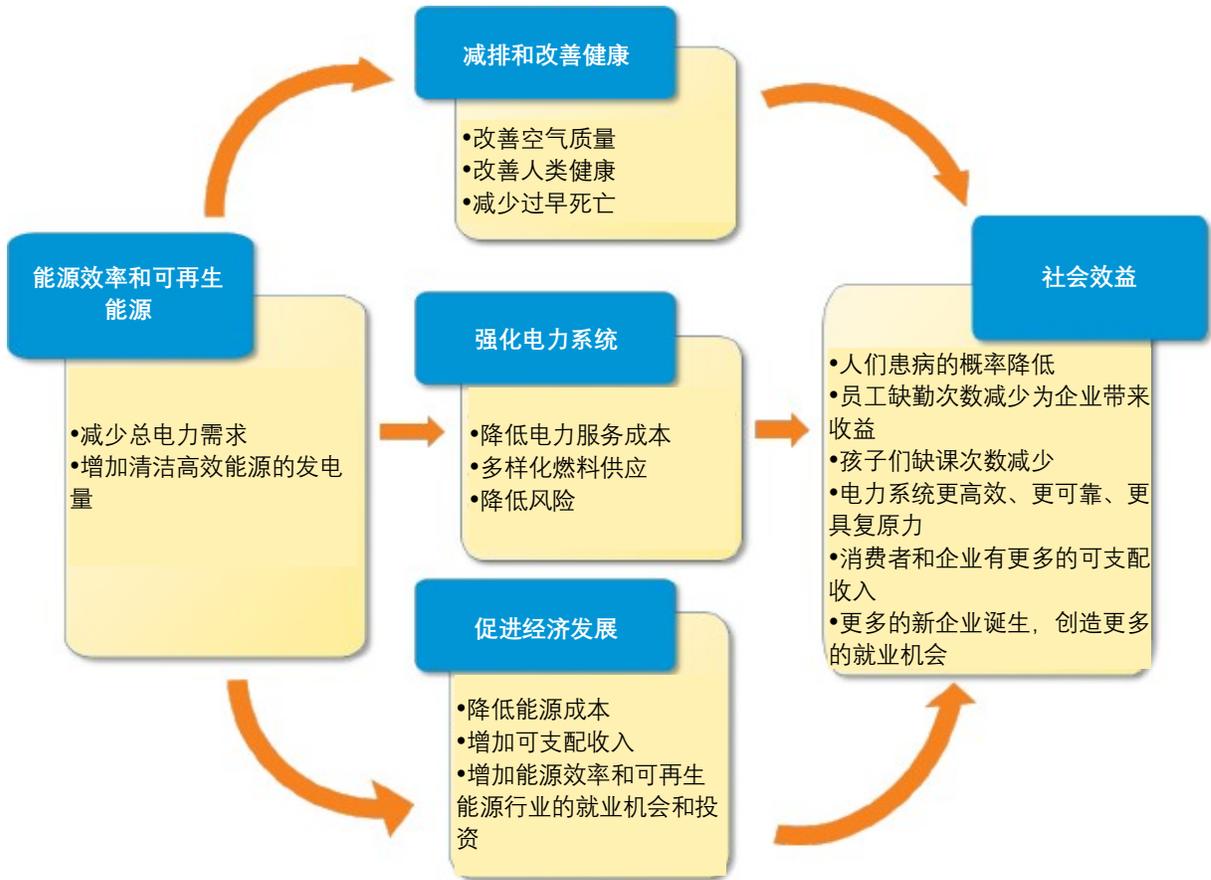


图3。能源效率和可再生能源的多重效益

数据来源：美国环境保护署（2018年）¹²

图3显示了能源效率、可再生能源和能源储存的直接和间接效益。能源效率带来的好处是多方面的：减少温室气体和污染物排放、通过减少居民和企业的公用事业费用来推动经济、提供就业机会并通过避免建造新的发电厂和输电线路来节省资金。能源储存可以在时间和/或空间上改变电力生产方式，使其减少对可再生能源的限制，可以驱动汽车的电动机。

下文总结了上文所述的能源效率与可再生能源发电相结合带来的效益，并在美国环境保护署发布的2018年版《量化能源效率和可再生能源的多重效益：国家和地方政府指南》中得到证实。

- “电力系统效益：能源效率和可再生能源举措与需求响应措施相结合，有助于保护发电商和消费者免受系统新增容量成本增加、能源供应中断、能源价格波动以及其他可靠性与安全性风险的影响。
- 排放和健康效益：化石燃料发电是空气污染的来源之一，空气污染对人类健康构成威胁，包括细颗粒物污染和地面臭氧引起的呼吸道疾病。在美国，燃烧化石燃料发电也是人类活动产生的最大温室气体排放源，这也导致全球气候变化。提高能源效率并增加可再生能源的使用可以减少化石燃料发电及其对健康和环境造成的危害。
- 经济效益：上述电力系统效益、排放和健康效益为国家带来了整体经济效益。其中包括，为消费者、企业和政府节省能源和燃料成本；支持或使用能源效率和可再生能源（如建筑、制造业和服务业）的公司创造了新的工作岗位、更多的利润，为政府创造了更多税收收入；员工和学生的病假减少，工作效率更高。”（节选自美国环境保护署（2018年））

2019年国际能源署的一份报告也同样阐述了能源效率带来的多重效益。国际能源署的报告显示，能源效率是最重要的“第一能源”，而且提取成本低廉。¹⁴ 在其带来的多重效益中，本报告侧重于与温室气体和空气污染物减排相关的效益。在加州存在一种资源的“使用顺序”，从能源效率开始，然后是可再生资源，最后是化石燃料资源，化石燃料资源又从天然气开始，最后是煤炭。¹⁵ 本文下一部分对加州通过能源效率和电气化措施实现温室气体减排的规模以及带来的空气质量效益评估研究进行了总结。

¹² 美国国家环境保护局。（2018）。《能源效率和可再生能源的多重效益：国家和地方政府指南》第一部分：能源效率和可再生能源的多重效益 1-7页。

¹³ 同上

¹⁴ 国际能源署。（2019年12月19日）。《能效是最重要的第一能源，需要加速提升能效的步伐。》国际能源署。www.ica.org/commentaries/energy-efficiency-is-the-first-fuel-and-demand-for-it-needs-to-grow.

3. 加州的空气质量得益于能源效率和电气化

加州的长期空气质量和气候战略是大体上完成电气化——采用更清洁的输电网（到2045年实现百分之百可再生能源发电），不仅为住宅和商业建筑供电，也为其运输车队供电。

加州研究了在整个经济领域中大量电气化以及采用可再生能源电网的情况下产生的空气质量效益和经济成本。电气化为南海岸和内陆地区的中央山谷（该州空气质量未达标区域中两个空气质量最差的区域）带来了巨大的空气质量效益。

在2013年至2015年间，对加州七家投资者所有的公用事业公司（电力和天然气供应商）实施的能源效率计划进行了研究，发现电力和天然气行业的效率提高大幅减少了二氧化碳、氮氧化物和其他传统空气污染物的排放。据估计，这些能效计划在三年间（2013~2015年）减少了约410多万吨二氧化碳和160万磅氮氧化物的排放。¹⁶

Zhao等人（2019年）研究发现，利用电气化和可再生能源的深度脱碳道路项目可减少80%的温室气体排放（到2050年，在1990年的温室气体排放水平上减少80%），同时也能减少33%的PM2.5、34%的氮氧化物、37%的二氧化硫、34%的氨和18%的活性有机气体排放。

¹⁵ 地球正义。（2012年1月12日）《加州监管机构为标志性的清洁能源政策增光添彩》该文总结了加州公共事业委员会在长期采购计划中的一项决策。（Rulemaking 10-05-006）。这一决策为1980年实施的加州能源委员会政策注入了活力。

¹⁶ 加州公共事业委员会。（2018年5月）。《能源效率组合方案报告》。
<https://www.cpuc.ca.gov/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=6442459323>

¹⁷ Zhao、B.等人（2019年）。《加州深度脱碳之路的空气质量与健康协同效益》。《环境科学与技术》53(12), 7163-7171。 <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02385>.

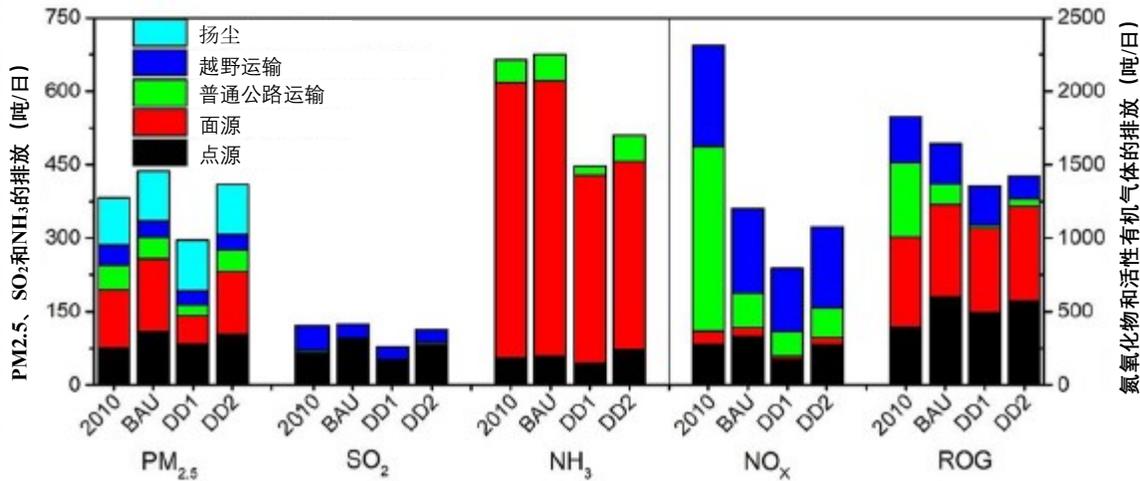


图4 2010年加州全州主要空气污染物排放量和2050年不同情况下主要空气污染物排放量。在DD1条件下具有较高的电气化率。

数据来源: Zhao、B.等人 (2019年)

Zhu等人 (2020年) 发现, 清洁能源电器替代家用燃气器具的电气化方案将减少环境中的PM_{2.5}浓度, 每个县的平均PM_{2.5}浓度将减少0.11微克/立方米 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)。这一方案会改善室外空气质量, 进而减少加州约354例死亡病例 (全因死亡率)、304例慢性支气管炎死亡病例以及596例急性支气管炎死亡病例。¹⁸

美国电力研究院在2020年进行的一项研究对高效电气化方案的空气质量协同效益进行了分析, 研究显示, 该方案预计在2045年实现加州脱碳目标 (到2030年达到目标的40%, 2050年达到80%) 和清洁电力目标, 到2050年电力达到加州最终能源消费份额的55% (图5)。¹⁹

¹⁸ Zhao、B.等人 (2020年4月) 《加州居民燃气器具对室内外空气质量和公众健康的影响》。加利福尼亚大学洛杉矶分校费尔丁公共卫生学院。 <https://ucla.app.box.com/s/xyzt8jclixnetiv0269qe704wu0ihif7>

¹⁹ Knipping, E., Bistline, J., Blanford, G. (2020年)。《加州高效电气化: 能源系统和空气质量影响评估》。美国电力研究院。 <https://www.epri.com/research/products/3002019494>

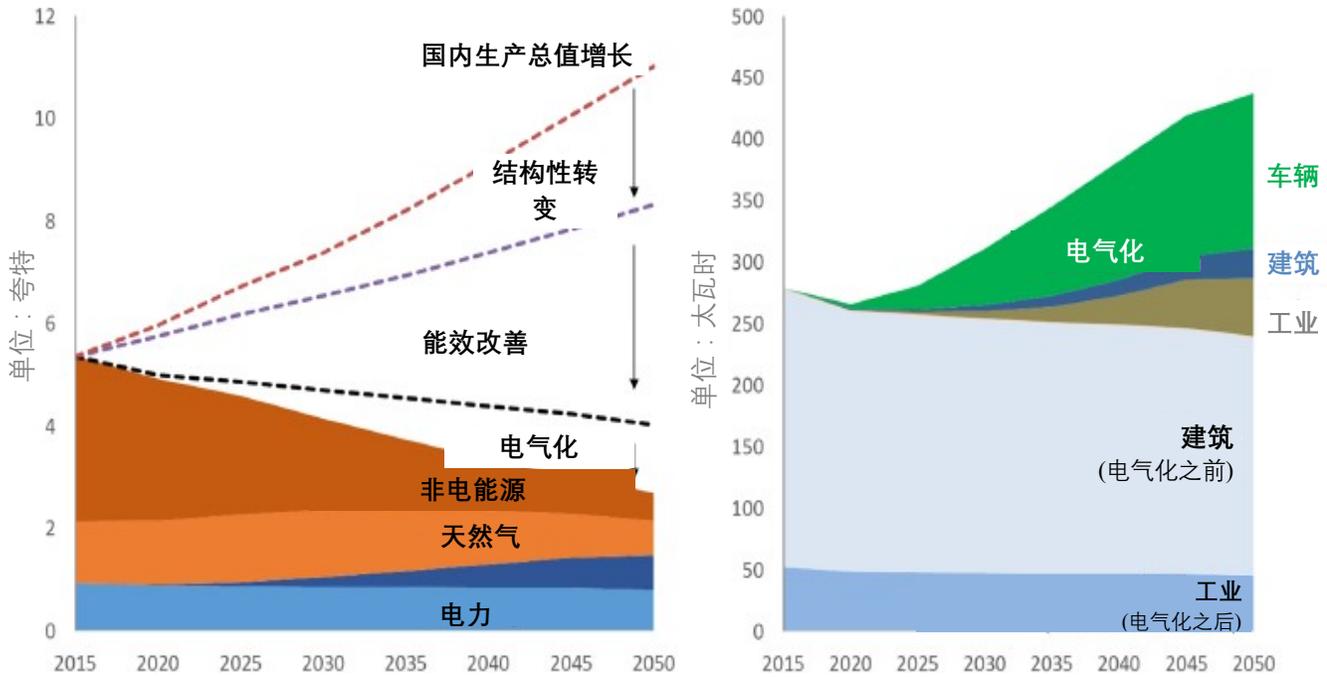


图5. 加州最终能源需求按燃料分类（左）和电力需求按部门分类（右）
数据来源：美国电力研究院（2020年）

研究发现，2015年到2050年，CO、NO_x和SO₂的排放量将减少；2015年到2050年，NH₃、PM₁₀和PM_{2.5}的排放量将增加；2015年到2035年，VOC排放量将减少，而2035年到2050年VOC排放量会增加。由于非燃烧活动的增加产生的工业设施粉尘、道路粉尘和农业粉尘导致污染物排放量增加。对美国未达标地区之一的加州南海岸空气盆地地区的臭氧和PM_{2.5}进行更加详细的空气质量建模，结果表明，电气化通过降低NO_x排放来降低臭氧浓度，从而显著改善空气质量（图6）。电气化还将抑制二次PM_{2.5}的形成，但如果不对日益增加的非电气化生产活动加以控制，电气化带来的效益将被抵消（图7）。

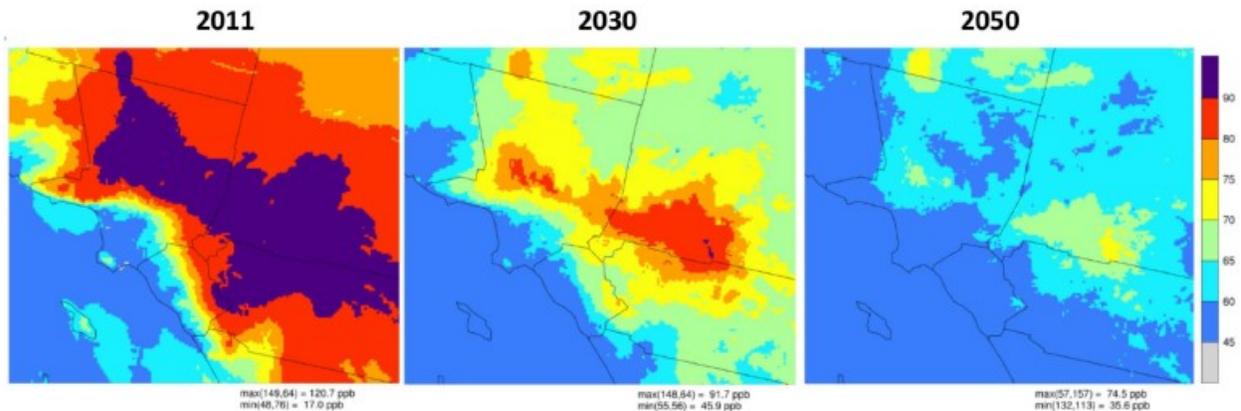


图6 南海岸空气盆地地区臭氧浓度设计值为20ppb
数据来源：美国电力研究院（2020年）

²⁰ 全年排名第四的每天最大8小时平均浓度超过了三年的平均值。

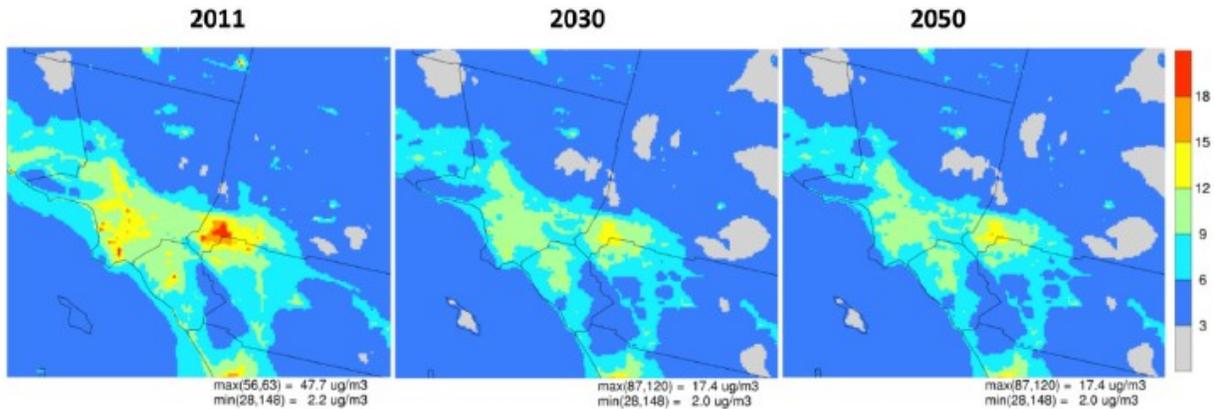


图7. 南海岸空气盆地地区PM_{2.5}浓度设计值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
数据来源: 美国电力研究院 (2020年)

4. 美国能效和空气质量战略

4.1 联邦能效和空气质量战略

4.1.1 概述

联邦《清洁空气法案》(CAA) 是美国关于空气污染和温室气体排放的主要框架。该法案授权美国环境保护署制定六种空气污染物 (“标准污染物”) 的国家环境空气质量标准 (NAAQS), 这六种污染物是: 颗粒物 (PM_{2.5}、PM₁₀)、臭氧、二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳 (CO) 和铅。美国环保署定期根据最新科学证据更新这些标准。²¹ 前面提到, A. Wang 等人对加州的联邦、州和地方空气质量监管进行了全面评估。2009年, 环保署得出结论, 包括二氧化碳、甲烷、一氧化二氮和含氟气体在内的温室气体有损公众健康和福祉, 因此其有责任监管温室气体排放。²²

基于这一结论, 美国环保署与美国国家交通安全管理局 (NHTSA) 联合制定了轻型车辆温室气体排放标准, 作为现有企业平均燃料经济性 (CAFE) 标准的补充。²³

能源部 (DOE) 的能效和可再生能源局 (EERE) 负责在联邦层面牵头, 提高能源效率, 增加可再生能源发电。该局还资助交通、可再生能源和能效等新兴能源技术研究, 特别是早期研究。

⁵ Wang, A., Shen, S. 和 Pettit, D. (2020)。空气和气候污染物的协调治理: 加州经验的教训。加州大学洛杉矶分校法学院艾美特气候变化与环境研究所。 <https://law.ucla.edu/news/coordinated-governance-air-climate-pollutants-lessons-california-experience>

⁶ 美国环境保护署。空气污染: 当前和未来的挑战。

<https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/air-pollution-current-and-future-challenges>

⁷ 美国环境保护署。乘用车和卡车温室气体排放监管。 <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-greenhouse-gas-emissions-passenger-cars-and>

这些研究主要在国家实验室实施，如劳伦斯伯克利国家实验室和国家可再生能源实验室。能效和可再生能源局下设的建筑技术办公室（BTO）负责执行60多类电器和设备的联邦节能标准。能效和可再生能源局的数据显示，这些标准涵盖的产品约占家庭能源使用的90%、商业建筑使用的60%以及工业能源使用的30%。²⁴下文还将提到，为了减少制造商的监管负担，联邦标准将优先于州和地方电器标准。

联邦政府还为能源投资提供各种税收减免优惠，包括商用和住宅建筑的太阳能投资税减免（ITC）。与太阳能设备一同安装的储能设备也能够享受太阳能投资税减免优惠。2019年安装的住宅和商用太阳能光伏项目，优惠金额为成本的30%。税收优惠金额自2020年起逐年递减，住宅物业的优惠将于2022年结束。

但2020年12月通过的第二项新冠肺炎救济法案将太阳能税收优惠的期限延长了两年。在2020年、2021年或2022年动工的太阳能项目将有资格获得26%的投资税减免，而对于2023年动工的项目，该比例减少到了22%。2025年后投入使用的项目仅能够享受10%的投资税减免。^{25 26}

拜登的基础设施计划提出了进一步延长太阳能税收减免优惠和制定独立的储能税收减免优惠等方案。²⁷随着对立法语言的不断改进和讨论，需要持续关注这方面的动向。

4.1.2 特朗普执政期间的变化（2017—2021）

据《华盛顿邮报》报道，截至2020年10月，特朗普政府废除了超过125项环境法规，其中42项涉及空气污染和温室气体排放。²⁸下面列举了对空气质量、温室气体排放和能效产生了负面影响的法规废除：

⁸ 美国能源部（2017年1月）。《根据美国的电器和设备标准节约能源和资金》。

https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/01/f34/Appliance%20and%20Equipment%20Standards%20Fact%20Sheet-011917_0.pdf

⁹ Martin, K. 阁下（2020年12月）。可再生能源税收减免优惠延期。诺顿罗氏律师事务所。

<https://www.projectfinance.law/publications/2020/december/renewable-energy-tax-credits-extended/>

¹⁰ 美国能源部（2015年5月15日）。《住宅和商用ITC概况表》。

<https://www.energy.gov/eere/solar/downloads/residential-and-commercial-itc-factsheets>

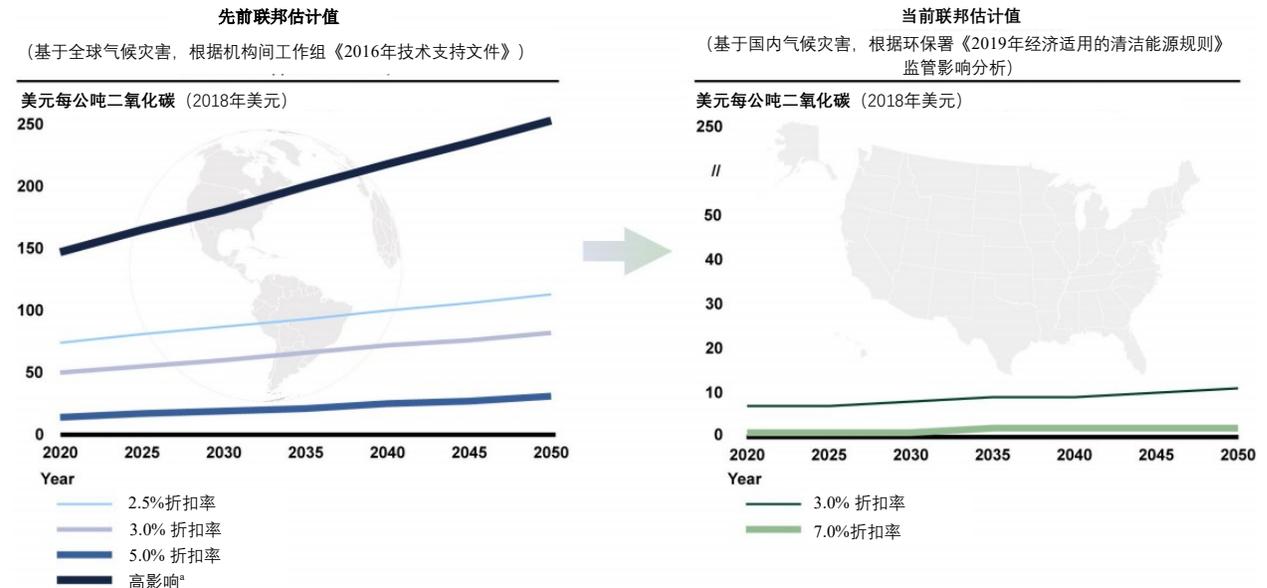
¹¹ Martin, K. 阁下（2021年4月）。《基础设施计划：在国会的前景》诺顿罗氏律师事务所。

<https://www.projectfinance.law/publications/2021/april/infrastructure-plan-outlook-in-congress/>

¹² Eilperin, J.、Dennis, B. 和 Muysken, J.（2020年10月20日）。特朗普废除125项气候和环境政策，拜登需要多年方可恢复。华盛顿邮报。

<https://www.washingtonpost.com/graphics/2020/climate-environment/trump-climate-environment-protections/>

- 以《经济适用的清洁能源规则》取代《清洁能源计划》，该计划本将严格限制燃煤和燃气工厂的碳排放。²⁹
- 通过利用国内而非全球气候变化损害，以及采用更高的贴现率范围，削减用于评估监管成本和效益的碳排放社会成本（SCC）。以2018年美元计算，特朗普政府估计2020年每吨二氧化碳（tCO₂）排放的社会成本在1至7之间。³⁰（图8）



来源：政府问责局对温室气体社会成本机构间工作组（IWG）和环境保护署（EPA）数据的分析。GAO-20-254

图8：特朗普执政前和执政期间的联邦碳排放社会成本估计 来源：政府问责局（2020）

- 制定了一项规则，要求美国环保署细化预期的健康收益，以明确所计划的法规直接对污染物减少形成的效益与其他间接“协同效益”之间的差异。³¹

¹³ 参见《经济适用的清洁能源规则》，美国环境保护署，<https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution/affordable-clean-energy-rule>。2021年1月19日，哥伦比亚特区巡回法院撤销了《经济适用的清洁能源规则》，并将其发回环境保护署，以便按照该法院的意见进一步处理。

¹⁴ 美国政府问责局（2020）。《碳排放社会成本：确定一个联邦实体负责，处理国家科学院的建议有助于强化监管分析》，第16页。美国政府问责局。<https://www.gao.gov/assets/710/707871.pdf>。

¹⁵ Reilly, S. (2020年12月9日)。特朗普的新成本效益规则将遏制环保署的监管权力。科学杂志。<https://www.sciencemag.org/news/2020/12/trump-s-new-cost-benefit-rule-will-curb-epa-s-regulatory-power>

- 废除了花洒、洗衣机、烘干机、洗碗机和灯泡的能效标准。³²
- 建议大幅削减能效和可再生能源局及能源部其他应用能源研发项目的预算，³³但这些建议普遍遭到国会拒绝。
- 通过《更安全的经济适用省油车辆规则》，削弱了轻型车辆的燃料经济性标准，并质疑加州制定本州更严格标准的权利。³⁴
- 此外，在协同效益主题方面，特朗普政府的环保署建议在决定是否监管发电厂的汞污染时，不再考虑所有间接的环境和公共健康效益。管理和预算局将协同效益定义为“【某项】规则的有利影响，通常与制定规则的法定目的无关或具有次要关系。”³⁵在汞规则的成本效益分析中，减少发电厂汞排放直接取得的货币化效益为每年400万至600万美元（其他多项公共健康效益的价值尚不能货币化）。据估计，减少颗粒物排放取得的年协同效益为360亿至890亿美元。控制技术的成本估计在每年74亿至96亿美元之间。³⁶尽管美国环保署以往的惯例是包括协同效益，但特朗普政府的环保署认为，如果《清洁空气法案》和监管的重点是减少汞排放，那么减少颗粒物取得的协同效益就不应当计算在内。同时，特朗普政府的国家交通安全管理局在《更安全的经济适用省油车辆规则》中提出，降低汽车燃料经济性标准有助于降低新车的成本，促使安全程度较低的旧车被取代，进而提升安全性。特朗普的这些规则主要因考虑到了安全方面的协同效益而获得支持。总的来说，特朗普的做法是，只要能使减少监管合理，就包括或排除协同效益或成本。³⁷

¹⁶ Delaski, A. (2021年3月8日)。《拜登，各州开启了电器能效标准的关键一年》| 美国节能经济委员会。
<https://www.aceee.org/blog-post/2021/03/biden-states-kick-pivotal-year-appliance-efficiency-standards>

¹⁷ 美国物理联合会 (2020年3月26日)。《2021财年预算要求：美国能源部应用能源研发》。美国物理联合会。
<https://www.aip.org/fyi/2020/fy21-budget-request-doe-applied-energy-rd>

¹⁸ 美国国家公路交通安全管理局 (2021)。SAFE 更安全的经济适用型节能‘SAFE’车辆规则。美国国家公路交通安全管理局。
<https://www.nhtsa.gov/corporate-average-fuel-economy/safe>

¹⁹ 第A-4号通知，“监管影响分析：初步分析” (reginfo.gov)。第7页。（“辅助效益”的定义）

²⁰ Raso, C. (2019年4月1日)。《审议环保署关于排除汞监管协同效益的建议》布鲁金斯学会。
<https://www.brookings.edu/research/examining-the-epas-proposal-to-exclude-co-benefits-of-mercury-regulation/>

²¹ Raso, C. (2019年4月1日)。《审议环保署关于排除汞监管协同效益的建议》布鲁金斯学会。
<https://www.brookings.edu/research/examining-the-epas-proposal-to-exclude-co-benefits-of-mercury-regulation/>

4.1.3 拜登政府的变化（自2021年开始）

拜登总统在就职当天签署了一项行政命令，要求立即审查特朗普执政期间采取的所有不利于或可能不利于公共健康和环境保护的行政行为，其中包括轻型车辆的燃料经济性标准。³⁸该命令还恢复了温室气体社会成本机构间工作组，该工作组应在2022年1月前公布最终的碳排放社会成本、一氧化二氮社会成本和甲烷社会成本。以2020年美元汇率计算，2021年2月公布的碳排放社会成本临时数值为每吨二氧化碳排放51至76美元。³⁹我们预计，拜登政府将恢复实行传统的协同效益政策，甚至有可能强化该政策。⁴¹

新政府在2022财年的预算要求中，提出大幅增加美国能源部（DOE）和环保署的建议预算。新政府为能源部提出的2022年全权预算要求为461亿美元，比2021年公布的水平增加了43亿美元，增幅达到10.2%，具体包括：19亿美元用于制定新的能效和清洁电力标准，及培养清洁能源人才；80亿美元用于发展清洁能源技术，如先进的核能、电动汽车、绿色氢气以及创新空调制冷技术；10亿美元用于开展先进研究项目；以及74亿美元用于气候变化和清洁能源技术的基础研究。新政府为环保署提出的预算要求是112亿美元，比2021年增加了20亿美元，增幅达到21.3%，其中1.1亿美元用于恢复工作人员的能力，18亿美元用于实施减少温室气体排放的项目。⁴¹

此外，拜登政府重新加入了巴黎协定，将气候因素纳入其整体的执政计划，并提出了数万亿美元的基础设施计划，其中包含重要的气候内容。

4.2 加州能效和空气质量战略

4.2.1 加州气候政策中的能效

²² 白宫（2021年1月20日）。《关于保护公共健康和环境并恢复科学应对气候危机的行政命令》。总统行政办公室。<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/01/20/executive-order-protecting-public-health-and-environment-and-restoring-science-to-tackle-climate-crisis/>

²³ 白宫（2021年2月）《白宫技术支持文件：根据行政命令13990对碳、甲烷和一氧化二氮排放社会成本的暂时估计》美国政府温室气体社会成本机构间工作组。https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/02/TechnicalSupportDocument_SocialCostofCarbonMethaneNitrousOxide.pdf

²⁴ Friedman, L.（2021年5月14日）。《拜登政府废除旨在遏制环保署权力的特朗普规则》纽约时报<https://www.nytimes.com/2021/05/13/climate/EPA-cost-benefit-pollution.html>

²⁵ 白宫（2021年4月9日）。《总统自由裁量权资金申请概要》。总统行政办公室。<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/04/FY2022-Discretionary-Request.pdf>。

加州最早分别在1976年和1978年制定了首个电器能效标准和首个建筑能效标准，可以说加州将能效纳入政策由来已久。加州的顺序排列表将能效和需求响应作为满足本州日益增长的能源需求的首选方式，而后再利用可再生能源和分布式发电满足仍未得到满足的需求。⁴²该州还将投资人拥有的公用事业单位（IOU）的收入与销售脱钩，消除这些企业的顾虑，鼓励节省能源。⁴³下文的图9显示了加州自20世纪70年代至今采取的主要能效和气候政策措施的时间轴。

²⁶ 加州公用事业委员会（2013年7月）。《能效政策手册》，第1页。加州能源委员会。
https://www.cpuc.ca.gov/uploadedfiles/cpuc_public_website/content/utilities_and_industries/energy_-_electricity_and_natural_gas/eepolicymanualv5forpdf.pdf

²⁷ 加州公用事业委员会（2016）。限制公用事业成本和费率上涨的行动 — 《公用事业法》第913.1条向州长和立法机构报告，第5页。加州公用事业委员会。
<https://www.cpuc.ca.gov/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=6442457283>

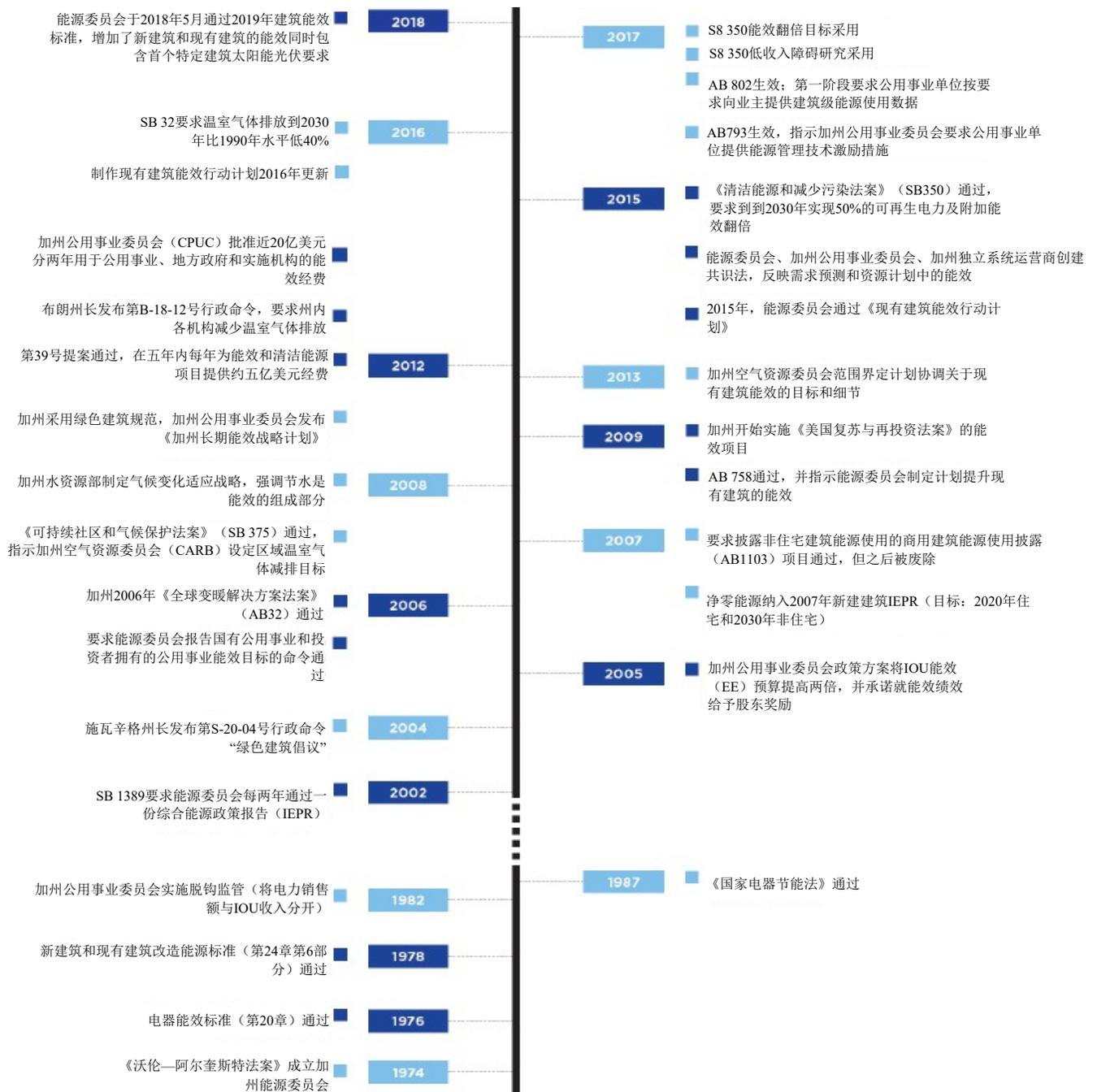


图9：加州主要能效政策时间轴。来源：加州能源委员会（2018）⁴⁴

²⁸ 加州能源委员会（2018年9月）。跟踪进展：《能源效率》，第4页。加州能源委员会。
https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2019-12/energy_efficiency_ada.pdf

依托这些能效措施，特别是建筑和电器能效标准，加州的人均能源消费量自20世纪80年代以来保持平稳（图10），目前排名第48位。⁴⁵

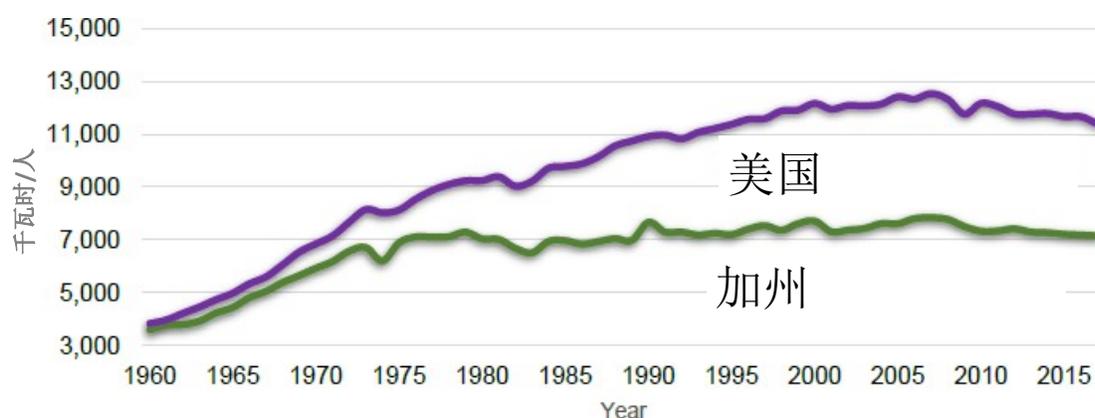


图10：美国和加州人均耗电量 来源：加州能源委员会（2019）⁴⁶

2015年，《2015年清洁能源和减少污染法案》（SB 350, De León, 2015年法规汇编第547章）设定了一个雄心勃勃的目标，即到2030年1月1日，实现全州节能及电力和天然气终端用量需求减少额累计达到2015年的两倍，该目标随后纳入了2017年范围界定计划。

4.2.2 范围界定计划

根据AB 32号法案，加州空气资源委员会（CARB）负责制定一项范围界定计划，以明确实现“在可行范围内，以具有成本效益的方式，最大限度减少温室气体排放”⁴⁷，并就此提出建议，该计划须至少五年更新一次。自2008年首次通过以来，该计划已更新了两次。加州空气资源委员会目前正在制定以碳中和为重点的2022年范围界定计划。⁴⁸该委员会还负责维护该州的温室气体清单（图11），该清单有助于跟踪相关措施的实施情况，在必要时作出调整，及起草下一项范围计划。

²⁹ 美国能源信息署（2021）。《加州概况和能源估计》。美国能源信息署。

<https://www.eia.gov/state/data.php?sid=CA#ConsumptionExpenditures>.

³⁰ 加州能源委员会（2019年11月）。2019年《加州节能行动计划》，第16页。

加州能源委员会。<https://www.energy.ca.gov/filebrowser/download/1900>

⁴⁷ AB-32。

⁴⁸ 加州空气资源委员会2020年10月28日的陈述。

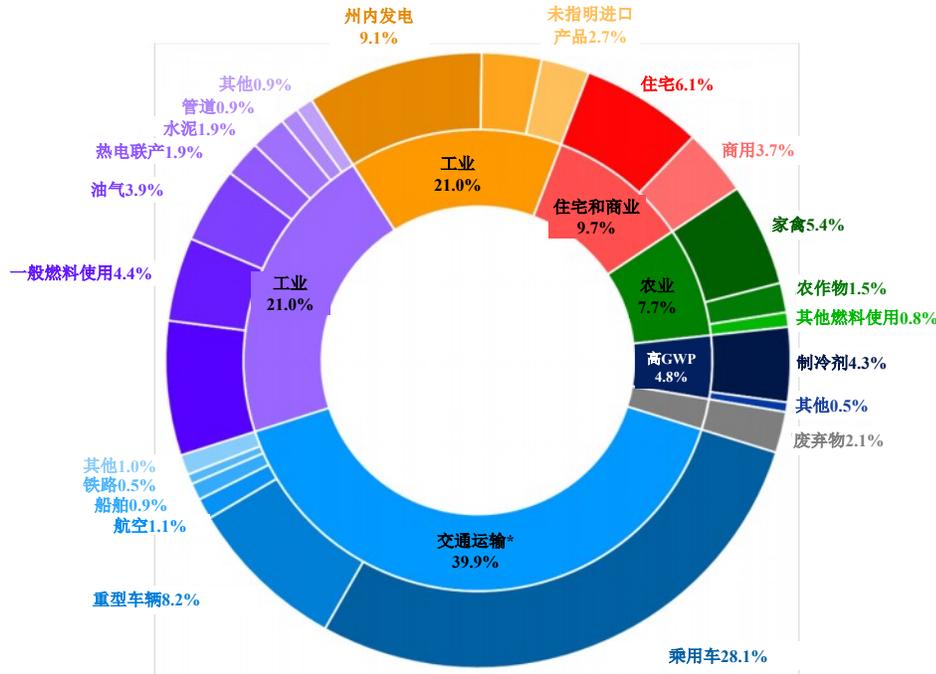


图11：加州2018年温室气体排放清单⁴⁹
来源：加州空气资源委员会（2020）

2008年首次制定的范围界定计划明确了加州为了实现到2030年将温室气体排放量减至1990年水平这一目标，而需要在各部门采取的具体措施。⁵⁰该计划于2014年第一次更新，介绍了截至当时取得的进展，以及建议在具体部门采取的行动，以实现到2050年温室气体排放量比1990年水平低80%的长期目标。⁵¹计划中有关能源的部分讨论了能效、需求响应和储能三大措施，这些措施有助于降低加州开发新能源的需要，减少峰值需求，并提高该州管理太阳能和风能频繁发生的广泛变化的能力。计划建议在能源部门采取以下行动：

- “制定适用于灵活需求响应资源的标准和规则，以参与批发市场并整合可变的可再生能源，减少对新的灵活火电的需要。”

⁴⁹ 加州空气资源委员会（2020）。《加州温室气体排放清单：2000 - 2018》加州空气资源委员会。第6页。
<https://ww2.arb.ca.gov/ghg-inventory-data>

⁵⁰ 加州空气资源委员会（2008年12月）。《气候变化范围界定计划：变革框架》加州空气资源委员会。
https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/cc/scopingplan/document/adopted_scoping_plan.pdf 第ES-3-4页。

⁵¹ 加州空气资源委员会（2014年5月）。《气候变化范围界定计划第一次更新》加州空气资源委员会。
https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/cc/scopingplan/2013_update/first_update_climate_change_scoping_plan.pdf 第5页。

- 扩大区域平衡机构对CAISO能源不平衡市场及其他平衡机构合作潜在方法的参与，这些方法提供了低成本、低风险的手段，在确保支持温室气体减排计划的同时，实现提高可变可再生能源渗透性所需的实时运行效率和灵活性。
- 通过AB 758号法案的流程，加州能源委员会（CEC）将制定一项计划，鼓励能源评估 — 特别是在建筑物或单位在预定日期前出售时实施的评估 — 以及能源使用披露要求。
- 加强能效和需求响应方案，包括制定教育/推广方案，并制定可靠的方法监测、评估这些项目的有效性。在2015年底前制定好方法，2016年底前完成强化方案程序。
- 实行一项加州公用事业委员会（CPUC）程序，继续简化州司法管辖互连过程，在2015年底前建立分布式发电的部长级低成本互连过程。加州能源委员会将探索类似的简化过程，以便在国有公用事业（POU）系统中实现分布式发电互连。在这些程序中，加州公用事业委员会和加州能源委员会将适时咨询 CAISO的意见。
- 加州空气资源委员会将评估扩大安装热电联产系统目前存在的阻碍，并（在与州能源机构协商后）提出解决方案，实现州长的目标和热电联产初步范围界定计划的温室气体减排目标。未来的热电联产措施可以规定新的或升级后的高效热电联产系统的要求。
- 评估加州碳捕获和封存（CCS）的潜力，减少能源和工业来源的二氧化碳排放。加州空气资源委员会将与石油、天然气和地热资源处、加州能源委员会和加州公用事业委员会合作，考虑在2017年前在加州使用碳捕获和封存量化方法。”⁵²（节选自2014年范围界定计划）

加州空气资源委员会制定了2017年范围界定计划，其中明确了各种途径，以实现行政命令B-30-15中规定的最新的加州温室气体减排目标，即到2030年温室气体排量比1990年低40%。⁵³

该计划包含了通过最新立法制定或要求的补充措施，这些措施的目标日期是2030年，包括扩展LCFS，到2020年后实现碳强度减少18%，以及SB 350中提出的将可再生能源比例增加到50%

⁵² 加州空气资源委员会（2014年5月）。《气候变化范围界定计划第一次更新》加州空气资源委员会。

https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/cc/scopingplan/2013_update/first_update_climate_change_scoping_plan.pdf

⁵³ 加州空气资源委员会（2017）。《加州2017年气候变化范围界定计划》加州空气资源委员会。

https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/cc/scopingplan/scoping_plan_2017.pdf

第2页。

并使节能翻一番的要求。图12显示了2017年范围界定计划中包含的措施以及关于这些措施将对温室气体减排的影响的预测。

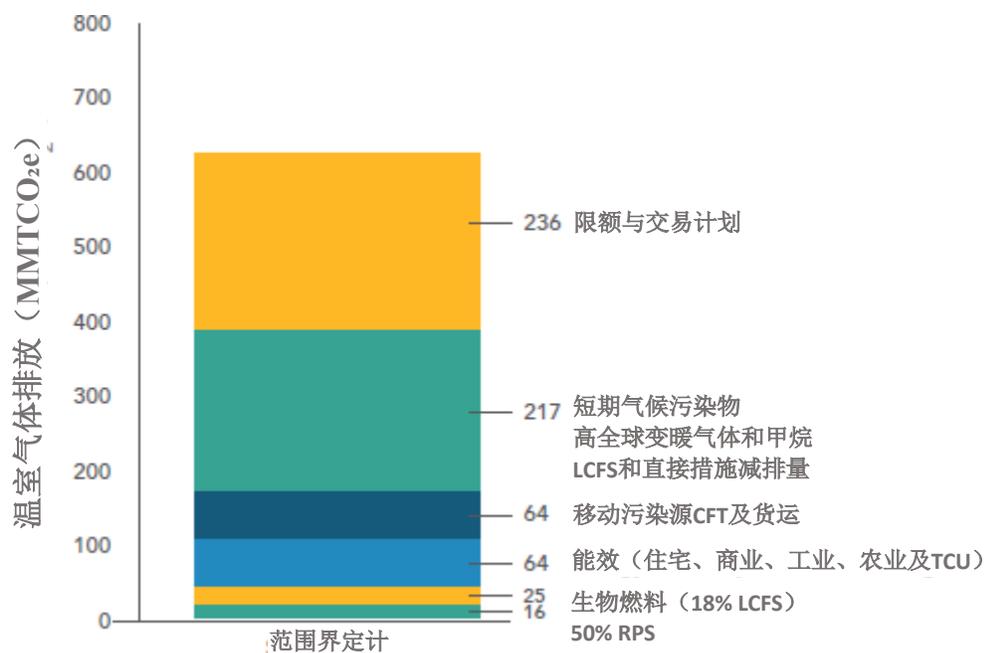


图12: 2017年范围界定计划影响预测 来源: 加州空气资源委员会 (2017)⁵⁴。

范围界定计划还须估计这些措施预计将实现的空气污染减少的范围, 以弄清是否有任何措施会增加标准污染物或有毒空气污染物的排放。对于范围界定计划中的措施, 加州空气资源委员会利用温室气体减排量向标准污染物和有毒污染物分配类似减排量 (即两种污染物之间的变化关系为1: 1), 进而估计空气质量效益。⁵⁵

据预计, 2017年范围界定计划中提出的各项措施将减少48-73吨/天的氮氧化物、5.1-7.3吨/天的挥发性有机化合物、1.4-2.4吨/天的PM_{2.5}和5-10吨/天的柴油颗粒物排放, 其中大部分减排是通过移动源战略实现。同时, 预计节能翻一番将减少0.4-0.5吨/天的氮氧化物和0.5-0.7吨/天的挥发性有机化合物的排放。⁵⁶

⁵⁴ 加州空气资源委员会 (2017)。《加州2017年气候变化范围界定计划》加州空气资源委员会。
https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/cc/scopingplan/scoping_plan_2017.pdf 第28页。

⁵⁵ 加州空气资源委员会 (2017)。《加州2017年气候变化范围界定计划》。加州空气资源委员会。
https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/cc/scopingplan/scoping_plan_2017.pdf 第38页。

⁵⁶ 同上。

加州空气资源委员会还认识到了范围界定计划中的措施带来的潜在健康效益，这些效益主要来自于颗粒物排放的减少和主动运输增加的身体活动。展望未来，加州空气资源委员会正在启动一个过程，力求深入了解如何将健康分析广泛地纳入其气候变化项目的设计和实施之中，从而实现健康效益最大化。⁵⁷

4.2.3 州实施计划

州实施计划（SIP）是非常全面的计划，阐述了臭氧、颗粒物、一氧化碳、氮氧化物和硫氧化物处于不健康水平的非达标区如何达到国家环境空气质量标准（NAAQS）。州实施计划并非单一的文件，而是各种计划、方案、地区条例、州法规和联邦控制措施的汇编。区域性空气污染控制区（APCD）和空气质量管理区（AQMD）负责制定空气质量管理计划（AQMP），这些计划在经加州空气资源委员会和美国环保署审批后，纳入州实施计划。

加州共有35个区域性空气污染控制区（APCD）和空气质量管理区（AQMD）固定污染源的空气污染由这些地方性空气盆地机构负责监管，而移动污染源（包括道路和非道路污染源，如乘用车、摩托车、卡车、公共汽车、重型施工设备、休闲车、船舶、草坪和花园设备以及小型通用引擎）的空气污染则由加州空气资源委员会监管。空气质量管理计划将包括监管固定污染源和移动污染源的措施，但需要与加州空气资源委员会和美国环保署密切合作，确保移动污染源的排放达标。这些机构的收入主要来自许可证相关费用、车辆登记费以及联邦和州发放的补助，而这些资金将用于教育、财政等激励措施以及公共采购。

下一节将介绍加州的三大空气质量管理区/空气污染控制区，分别是：南海岸空气质量管理区、圣华金河谷空气污染控制区和湾区空气质量管理区。这三大管理区均依赖这些机构对各自计划的影响的估计，监测加州能源机构的活动，并试图将这些活动的影响纳入州实施计划。所有机构的最新计划都是2016年或2017年的计划，不过各机构目前正在准备更新。正如本文中所述，加州的能源法律法规对电网的运营以及建筑、工业和交通产生了重大影响。其中电网的变化最为明显，可再生能源的使用和能效的提升大幅降低了电网的化石燃料消耗量，从而减少了电网的温室气体和标准污染物排放。

⁵⁷ 加州空气资源委员会（2017）。《加州2017年气候变化范围界定计划》加州空气资源委员会。
https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/cc/scopingplan/scoping_plan_2017.pdf第50页。

南海岸空气质量管理区

该处负责管理橙县以及洛杉矶、圣贝纳迪诺和河滨县城区（包括科切拉谷地）的空气质量。该地区未达到国家臭氧和PM2.5标准，其空气质量管理计划包括了固定和移动污染源策略，力求达到这些标准，并侧重于处理氮氧化物方面的措施。

2016年的空气质量管理计划列出了所有固定污染源氮氧化物措施、固定污染源挥发性有机化合物措施和移动污染源措施，以及这些措施在适用情况下预计将实现的减排量。该计划中编号为“CMB”（燃烧污染源）和“MOB”（移动污染源）的措施提出了淘汰老旧的化石燃料型电器和车辆。南海岸空气质量管理区因此推出了各种激励方案，支持淘汰车辆和设备以及安装电动车充电器。⁵⁸编号为“ECC”（能源和气候变化项目）的措施认可其他温室气体减排和能效项目产生的协同效益。⁵⁹附件1提供了2016年空气质量管理计划中包括的ECC措施。

这些措施表明了南海岸空气质量管理区如何致力于鼓励和最大化能源部门持续转型产生的协同效益：将更多可再生资源投入电网；广泛采用零排放汽车（ZEV）技术；开发、实施储能技术；加强能效措施；使用替代性低排放燃料；以及开拓新的能源市场，确保这些新技术不断发展。⁶⁰

2016年空气质量管理计划附件三详细描述了南海岸空气质量管理区在估计当前排放量和实施建议措施后的受控排放量时采用的方法。⁶¹为了预计实施建议控制措施后的减排量和剩余排放量，南海岸空气质量管理区采用了一种数学算法，称为受控排放预测算法（CEPA）。该算法用于计算特定控制情景下的预计剩余排放量和/或减排量。⁶²该算法在控制因素概况和预计基准排放量的基础上，估计各项污染物未来几年的减排量和剩余排放量（即夏季的挥发性有机化合物和氮氧化物；冬季的一氧化碳和二氧化氮；以及挥发性有机化合物、氮氧化物、一氧化碳、硫氧化物和PM10的年均日量）。

⁵⁸ 激励措施和项目（aqmd.gov）。

⁵⁹ 南海岸空气质量管理区（2016）2016年最终空气质量管理计划。南海岸空气质量管理区。

<https://www.aqmd.gov/home/air-quality/clean-air-plans/air-quality-mgt-plan/final-2016-aqmp>

⁶⁰ 南海岸空气质量管理区。（2016）2016年最终空气质量管理计划。南海岸空气质量管理区。

<https://www.aqmd.gov/home/air-quality/clean-air-plans/air-quality-mgt-plan/final-2016-aqmp> 第10-30页。

⁶¹ 南海岸空气质量管理区（2016）2016年最终空气质量管理计划。南海岸空气质量管理区。

<https://www.aqmd.gov/home/air-quality/clean-air-plans/air-quality-mgt-plan/final-2016-aqmp> 第III-2-89页。

⁶² 同上。

控制因素是衡量已通过的空气质量法规对特定污染源类别的控制水平的指标，根据法规制定过程中的估算预计计算得出。⁶³

圣华金河谷空气污染控制区

该区由加州中央河谷的八个县组成：圣华金、斯坦尼斯劳斯、默塞德、马德拉、弗雷斯诺、金斯、图拉雷以及克恩县圣华金河谷空气盆地部分，这八个县均以农业活动为主。该区的地理环境和气象条件（如高温、大气停滞、逆温）、夏季野火和人口快速增长，是空气污染形成并滞留的主要原因。⁶⁴ 由于农业设备和重型车辆产生的移动排放，该地区未达到国家臭氧和PM2.5标准。根据该空气区的《1997年、2006年和2012年PM2.5标准的2018年计划》，移动污染源排放量占该空气盆地氮氧化物排放量的85%以上。⁶⁵因此，该区的很多激励项目均是针对农业设备、非道路设备和重型卡车的转换。⁶⁶

虽然能效项目的空气质量协同效益或空气污染物控制措施的温室气体协同效益并未量化，但这两项协同效益均是该空气区最新的两项空气质量管理计划中的内容（《2008年8小时臭氧标准的2016年计划》和《1997年、2006年和2012年PM2.5标准的2018年计划》）。温室气体效益主要来自于加州空气资源委员会的移动污染源战略，即全州移动污染源排放框架，该战略不仅是为了达到联邦空气质量标准，也是为了实现温室气体减排目标，并减少石油消耗。⁶⁷此外，圣华金河谷空气污染控制区实施了技术振兴项目（TAP），旨在通过拨款、推广项目和地方能力建设，明确并加速部署创新清洁空气技术。该项目的三大重点领域是可再生能源、废弃物解决方案和移动污染源，这些领域也具有一定的温室气体协同效益。⁶⁸

⁶³ 南海岸空气质量管理区（2016）2016年最终空气质量管理计划。南海岸空气质量管理区。

<https://www.aqmd.gov/home/air-quality/clean-air-plans/air-quality-mgt-plan/final-2016-aqmp> 第III-2-6页。

⁶⁴ 圣华金河谷空气污染控制区（2016）《2008年8小时臭氧标准的2016年计划》，第二章。圣华金河谷空气污染控制区（2016）。http://www.valleyair.org/Air_quality_Plans/Ozone-Plan-2016.htm

⁶⁵ 圣华金河谷空气污染控制区（2018）。《1997年、2006年和2012年PM2.5标准的2018年计划》圣华金河谷空气污染控制区。<http://valleyair.org/pmplans/documents/2018/pm-plan-adopted/2018-Plan-for-the-1997-2006-and-2012-PM2.5-Standards.pdf> 第4-9页。

⁶⁶ 圣华金河谷空气污染控制区（2021）《补助和激励项目》圣华金河谷空气污染控制区。<https://valleyair.org/grants/>

⁶⁷ 加州空气资源委员会（2016）。《2016年移动污染源战略》。加州空气资源委员会。<https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/2016-mobile-source-strategy>

⁶⁸ 圣华金河谷空气污染控制区（2018）。《1997年、2006年和2012年PM2.5标准的2018年计划》圣华金河谷空气污染控制区。<http://valleyair.org/pmplans/documents/2018/pm-plan-adopted/2018-Plan-for-the-1997-2006-and-2012-PM2.5-Standards.pdf> 第F-1页。

2010年1月通过的区域能效战略（REES）承认了空气质量协同效益。区域能效战略是一种非监管方法，旨在鼓励和激励全区的住宅、商业、市政和工业等部门提高能效，实现节能。⁶⁹根据区域能效战略，该地区的供暖和制冷天数多于加州其他地区，而且截至2010年，有一半以上的房屋是在引入第24章建筑规范之前建造，因此具有巨大的节能潜力。该战略包含了多个宣传、教育和信息项目；有效的能源决策工具和方案；以及补助和激励资金。⁷⁰

该空气区最近两项空气质量管理计划的附件十描述了用于估计当前和未来排放清单的方法。对于臭氧和PM2.5，加州排放清单开发和报告系统（CEIDARS）为开发空气质量模型所需的、更加精细的（每小时、具体网格单元）排放输入值提供了基础，该系统由加州空气资源委员会负责维护，包含了排放信息及其他有用信息，用于生成县、空气盆地和地区级别的排放估计总值。该系统的基准年清单是加州排放预测系统的主要数据来源，称为加州排放估算分析模型（CEPAM）。该模型产生预测的排放量，而后排放量被网格化，作为空气质量模型的排放输入值。

由控制措施实现的减排量（按污染源分类），作为减排因数在稀疏矩阵算子内核排放（SMOKE）模型中实施。对于2024年和2025年的氮氧化物和PM2.5，分别指定了各个污染源的减排因数。将具体的减排因数输入SMOKE模型内含的一个程序之中，该程序将按排放清单代码，将减排量均匀地分配给全区的各个污染源。⁷¹

⁶⁹ 圣华金河谷空气污染控制区（2010年1月21日）。《关于：批准本区的区域能效战略》圣华金河谷空气污染控制区。

http://www.valleyair.org/Board_meetings/GB/agenda_minutes/Agenda/2010/January/Agenda_Item_7_Jan_21_2010.pdf 第3页。

⁷⁰ 圣华金河谷空气污染控制区（2010年1月21日）。《关于：批准本区的区域能效战略》圣华金河谷空气污染控制区。

http://www.valleyair.org/Board_meetings/GB/agenda_minutes/Agenda/2010/January/Agenda_Item_7_Jan_21_2010.pdf。第7页。

⁷¹ 圣华金河谷空气污染控制区（2018）。《1997年、2006年和2012年PM2.5标准的2018年计划》圣华金河谷空气污染控制区。 <http://valleyair.org/pmplans/documents/2018/pm-plan-adopted/2018-Plan-for-the-1997-2006-and-2012-PM2.5-Standards.pdf> 附件。

湾区空气质量管理区

该空气区涵盖环绕旧金山湾的九个县：阿拉米达县、康特拉-科斯塔县、马林县、纳帕县、旧金山县、圣马特奥县、圣克拉拉县、西南索拉县诺和南部索诺玛县。该地区未达到部分国家和州臭氧和PM2.5标准。与其他两个空气质量管理区不同的是，湾区空气质量管理区根据不同的地理条件（无逆温）和主要排放源（大型炼油厂），重点减少挥发性有机化合物（VOC）和反应性有机气体（ROG）的排放。

该区的空气质量管理计划即《2017年清洁空气计划》，明确将通过控制空气污染物保护空气质量和健康及通过减少温室气体排放保护气候这两大目标联系在一起。更具体地说，湾区空气质量管理区的控制措施有以下四个关键主题：

- 减少所有关键污染源的标准空气污染物和有毒空气污染物的排放；
- 减少甲烷、黑碳和氟化气体等“超级温室气体”的排放；
- 通过提升效率和减少对车辆出行和高碳消费的需求，降低对化石燃料（汽油、柴油和天然气）的需求；以及
- 通过无碳发电和电气化，实现能源系统去碳化。⁷²

据此，交通、能源和建筑等部门的能效措施均纳入了空气质量管理计划，做到针对“所有污染物”。附件2列出了这三个部门以及超级温室气体的部分能效相关措施。⁷³

湾区空气质量管理区使用了两个公开的空气质量模型：美国环保署的社区多尺度空气质量（CMAQ）模型和安博英环美国公司的扩展综合空气质量模型（CAMx）。两种模型都能够处理臭氧、有毒物质和颗粒物等多种污染物。在2017年空气质量管理计划中，该空气区使用了CAMx模型模拟空气有毒物质，并使用CMAQ模型同时模拟臭氧和PM2.5。

这两种模型的排放清单和气象学输入值使用几个专门的计算机程序进行准备。同时，使用美国环保署的稀疏矩阵算子内核排放（SMOKE）程序准备人为排放，作为空气质量模型的输入值。

报告的附件八虽然讨论了各项控制措施的估计减排量，但并未说明计算方法。⁷⁴

⁷² 湾区空气质量管理区（2017年4月）。《2017年最终清洁空气计划》，第ES-5页。湾区空气质量管理区。<https://www.baaqmd.gov/~media/files/planning-and-research/plans/2017-clean-air-plan/attachment-a-proposed-final-cap-vol-1-pdf.pdf> 第ES-5页。

⁷³ 注：1.虽然有些措施无法估计排放量，但预计所有措施都会直接或间接减少空气污染物和/或温室气体的排放。2.估计温室气体排放时，采用100年的时间范围。

⁷⁴ 湾区空气质量管理区（2017年4月）。《2017年最终清洁空气计划》，第ES-5页。湾区空气质量管理区。<https://www.baaqmd.gov/~media/files/planning-and-research/plans/2017-clean-air-plan/attachment-a-proposed-final-cap-vol-1-pdf.pdf> 附件D，第D-1页。

4.2.4 减少温室气体排放背景下的能效反思

加州能源委员会的《2019年加州节能行动计划》强调，需要实行新的模式，在一天中温室气体排放相对较高的特定时段，实现节能和需求弹性。加州已经增加了大量的间歇性风能和太阳能可再生资源，事实上，在有些时期该州必须缩减可再生资源，或向邻近地区付费获得可再生电力。下文的图13表明，随着可再生资源日益融入电网，电网供电的碳含量每月、每小时都在发生变化。加州的能源政策越来越重视温室气体减排，而能效项目停滞不前，也暴露了项目历来采用的设计方式的缺陷。⁷⁵

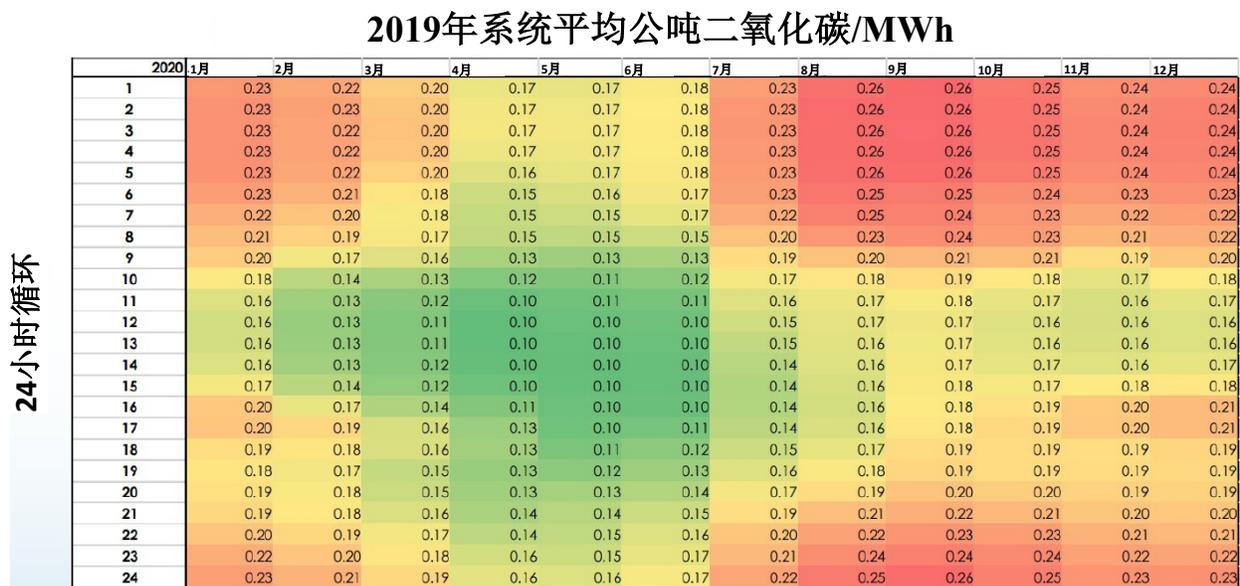


图13：加州每小时碳含量热图 来源：加州能源委员会（2020）

4.2.5 建筑和电器

2017年，加州的建筑存量占全州温室气体排放的24%，包括现场消耗的化石燃料（例如，供暖用天然气或丙烷）和电力消耗（例如，照明、电器和制冷用电）。⁷⁶ 天然气分别占住宅和商用建筑部门直接温室气体排放的78%和50%（图14），

⁷⁵ 加州能源委员会（2019年11月）。《2019年加州节能行动计划》，第70页。

加州能源委员会。<https://www.energy.ca.gov/filebrowser/download/1900>

⁷⁶ 加州能源委员会（2020）。《已通过的2019年综合能源政策报告》，第43页。加州能源委员会。

<https://efiling.energy.ca.gov/getdocument.aspx?tn=232922>

第3页。

其中主要是用于热水和空间供暖。因此，供暖终端用途的电气化，可以大幅减少燃烧和甲烷泄漏产生的二氧化碳排放。由于燃气用具会排放一氧化碳、氧化亚氮、颗粒物和甲醛等空气污染物，建筑业的电气化也可以改善室内空气质量和健康效益。⁷⁷

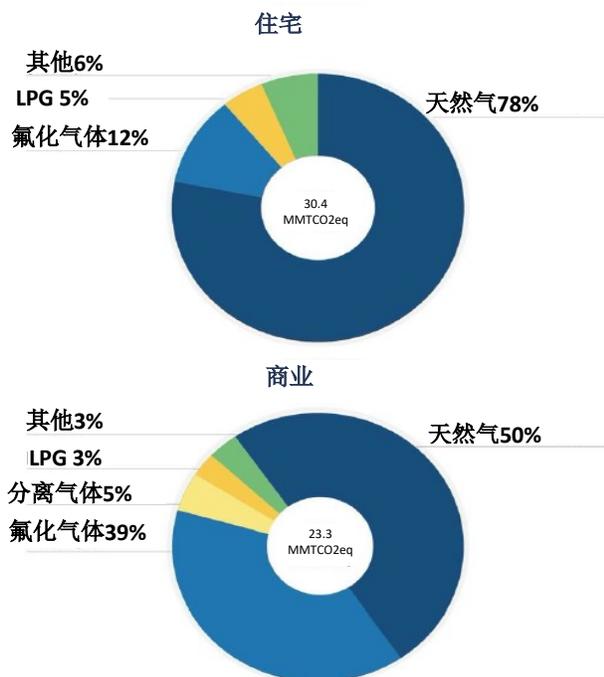


图14：2017年住宅和商用建筑部门直接温室气体排放⁷⁸
来源：加州能源委员会（2020）

本节介绍了加州在通过建筑节能标准、电器节能标准、鼓励节能改造项目和需求弹性减少建筑业能源消耗和日益增多的温室气体排放方面的努力。

建筑能效标准（第24章）

建筑能效标准（加州法规第24章）规定了住宅和非住宅建筑新建、扩建和改建的规则，该标准由加州能源委员会每三年更新一次。由于其气候的多样性，加州被划分为

⁷⁷ Zhu等人（2020年4月）。《加州住宅燃气用具对室内外空气质量和公众健康的影响》加州大学洛杉矶分校菲尔丁公共卫生学院。<https://ucla.app.box.com/s/xyzt8jclixnetiv0269qe704wu0ihif7>。第6页。

⁷⁸ 加州能源委员会（2020）。《已通过的2019年综合能源政策报告》，第43页。加州能源委员会。<https://efiling.energy.ca.gov/getdocument.aspx?tn=232922> 第46页。

16个气候区（图15），这决定了能源预算⁷⁹和多项能效标准，如特定气候区内建筑围护结构（门窗）材料的标准。同时，加州还制定了适用于所有建筑的强制性要求（如：节能、设计、施工、安全等要求）。⁸⁰各项标准中提出的节能措施必须在建筑的30年寿命中对业主产生成本效益：所节约的能源和维护成本必须大于所增加的建筑成本。自2005年以来，非住宅类建筑都要接受验收测试，即由现场技术人员验证新装设备或建筑元素是否按照设计运行及是否达标。⁸¹家庭能源评级系统（HERS）项目虽然并非强制性要求，但使房主能够请注册评级员验证房屋是否达标并对房屋的能源性能进行评级。⁸²

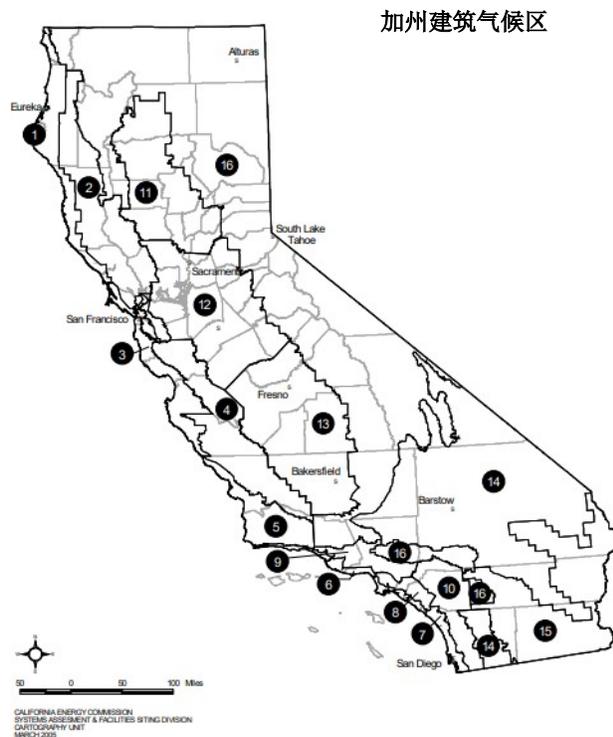


图15：加州16个气候区 来源：加州能源委员会（2018）

⁷⁹ 能源预算指基于时间依赖性估值（TDV）能源，一栋拟建建筑或一栋建筑的一个部分所设计的最大能耗，具体使用《替代计算方法批准手册》规定的、经委员会批准的合规软件计算。（《2019年住宅和非住宅类建筑的建筑节能标准》加州能源委员会，2018年12月。第64页）

⁸⁰ 法律、能源和环境中心（2019）。加州气候政策情况说明书：建筑能效。加州大学伯克利分校。2021年2月23日，查阅网址：www.law.berkeley.edu/wp-content/uploads/2019/12/Fact-Sheet-Building-Energy-Efficiency.pdf。

⁸¹ 加州能源委员会（2021）。《验收测试技术员认证提供商计划常见问题》2021年4月5日，查阅网址：<https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/acceptance-test-technician-certification-provider-program/acceptance-0>

⁸² 加州能源委员会（2021）。《家庭能源评级系统项目—HERS》。加州能源委员会。2021年4月5日，查阅网址：<https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/home-energy-rating-system-hers-program>

2020年1月1日生效的2019年标准规定了智能住宅光伏系统、防止热量在室内和室外互传的高性能围护结构、住宅和非住宅通风要求以及非住宅照明要求等要求。该标准要求，三层以下的独户住房和多户住宅须安装太阳能电池板，或由附近的太阳能电池阵供电。⁸³因此，根据2019年标准建造的房屋将减少约7%的能源消耗，再加上太阳能供电要求，电网用电比根据2016年标准建造的房屋减少53%。⁸⁴太阳能供电要求是实现零净能源（ZNE）目标的重要一步。⁸⁵据加州能源委员会预计，新标准将在三年内减少70万吨二氧化碳排放，相当于道路上减少11.5万辆化石燃料汽车。⁸⁶

目前，2022年建筑能效标准正在制定之中，此次标准制定过程开放、公开⁸⁷，公众可以参与研讨会或观看录像并提交意见。下一批标准将于2023年1月1日生效，重点针对多户建筑和商用建筑，⁸⁸其中还将规定热泵的标准设计要求（基准要求）。热泵将是实现建筑去碳化的关键技术，取代天然气在空间和热水供暖中的使用。此外，加州能源委员会的目标是使用一个经过改进的温室气体指标，准确评价建筑避免温室气体排放的情况。⁸⁹加州能源委员会认识到，零净能源建筑每年产生的能源多于所消耗的能源，而且由于前面提到的电网供电的碳含量每月、每小时都在变化，如果核算时忽略了能源产生、现场消耗和出口到电网的时间，那么零净能源建筑并不一定能减少排放。

热泵有一个问题是，全球变暖潜能值（GWP）较高的制冷剂气体可能发生泄漏。氟化气体（称为“F-气体”）—氢氟烃（HFC）、

⁸³ 加州能源委员会（2021）。《加州清洁能源2020年鉴》。加州能源委员会2021年2月22日，查阅网址：<https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-02/2020%20-%20CEC%20-%20CCEA%2002.04.21%20ADA.pdf>。

⁸⁴ 加州能源委员会（2020）。《2019年建筑能效常见问题》。加州能源委员会2021年2月23日，查阅网址：www.energy.ca.gov/sites/default/files/2020-03/Title_24_2019_Building_Standards_FAQ_ada.pdf。

⁸⁵ <https://www.cpuc.ca.gov/ZNE/>。零净能源建筑指在源能源的基础上，年实际能耗小于或等于现场可再生发电量的节能建筑。

⁸⁶ 加州能源委员会（2019年11月）。《2019年加州节能行动计划》，第16页。加州能源委员会。<https://www.energy.ca.gov/filebrowser/download/1900> 第A-14页。

⁸⁷ 加州能源委员会（2021）。《2022年建筑能效标准》。加州能源委员会。www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/building-energy-efficiency-standards/2022-building-energy-efficiency

⁸⁸ 2021年5月6日，加州能源委员会提出了2022年能源法规修改。已就这些修改举办了多次研讨会，并在6月21日前征询意见。相关修改可能根据所征集的意见进行修正，而后在8月由加州能源委员会审议通过。详见加州能源委员会（2021年5月）。《2022年建筑能效标准》。www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/building-energy-efficiency-standards/2022-building-energy-efficiency。

⁸⁹ 加州能源委员会（2019年11月）。《2019年加州节能行动计划》，第16页。加州能源委员会。<https://www.energy.ca.gov/filebrowser/download/1900> 第14页。

全氟化碳（PFC）、六氟化硫（SF₆）和三氟化氮（NF₃）的全球变暖潜能值达数万。⁹⁰ 特别是，氢氟烃通常用于冰箱和空调，其排放量分别占有商用和住宅建筑总排放量的17%和6%。⁹¹ 随着使用氢氟烃的电热泵取代传统的供暖系统，建筑物中的氢氟烃存量预计将有所增加。氢氟烃的管理，及全球变暖潜能值较低的替代制冷剂，将是未来的重点领域。与建筑和电器能效标准一样，加州在氢氟烃监管方面也一直处于领先水平。参议院第1383号法案要求加州到2030年减少氢氟烃的排放量，达到比2013年水平低40%；而且加州最近批准了一项法规，自2022年起要求新的制冷和空调系统达到全球变暖潜能值限值。⁹² 热泵引发的另一项难题是在生命周期内实现成本效益，这将需要在加州和中国加大研究力度并扩大生产规模。

电器能效标准（第20章）

电器能效标准（第20章）适用于在加州销售的电器，并规定了能耗和耗水量的最低能效水平。加州率先于1976年制定了电器标准。到了1987年，根据《国家电器节能法》，在加州等多个州先前制定的标准的基础上，出台了首批国家标准。⁹³ 此后，联邦法律制定了50多种产品的能效标准，这些产品约占家庭能源使用的90%、商用建筑能源使用的60%和工业能源使用的30%。⁹⁴ 美国禁止各州对联邦标准已经涵盖的产品采用自己的标准，⁹⁵ 因此加州继续制定其他产品的能效标准。加州能源委员会近期制定的部分标准涵盖了计算机、计算机显示器、便携式电动水疗池、发光二极管（LED）灯泡、洒水器和一般照明用灯等产品。

⁹⁰ 美国环境保护署。（2021）。《温室气体概况》。美国环境保护署。

<https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#fluorinated-sources>

⁹¹ 加州能源委员会（2018年9月）。《跟踪进展：能效》。加州能源委员会。

https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2019-12/energy_efficiency_ada.pdf

⁹² 加州空气资源委员会（2020年12月10日）。《加州推出开创性项目，减少气候超级污染物》。

加州空气资源委员会2020年2月16日，检索网址：ww2.arb.ca.gov/news/california-introduces-groundbreaking-program-reduce-climate-super-pollutants。

⁹³ 美国节能经济委员会（2020）。《2020年国家节能记分卡》，第117页。美国节能经济委员会。

<https://www.aceee.org/research-report/u2011>

⁹⁴ 美国环境保护署（2017）。《环保署能源和环境行动指南》。第四章

4.《能效政策：国家电器能效标准》，第4-74页。美国环境保护署。

https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-06/documents/guide_action_chapter4.pdf

⁹⁵ 在产品被纳入NAECA范围之前制定的州能效标准，自联邦标准生效之日（即制造商必须遵守该标准之日）起被取代，但各州可以申请该取代的豁免权。（《环保署能源和环境行动指南》。第四章。能效政策：国家电器能效标准。环境保护署，2017年。第4-77页）。

“电器标准的力量在于数字。”⁹⁶ 电器标准的节能量已经超过了加州公用事业和公共机构的建筑能效标准和能效项目。⁹⁷ 新出台的计算机和显示器以及通用LED灯和小直径定向灯的标准，预计每年将分别节约用电2,332GWh和3,144GWh。⁹⁸ ⁹⁹下文的图16显示了最新电器能效标准的节能量。

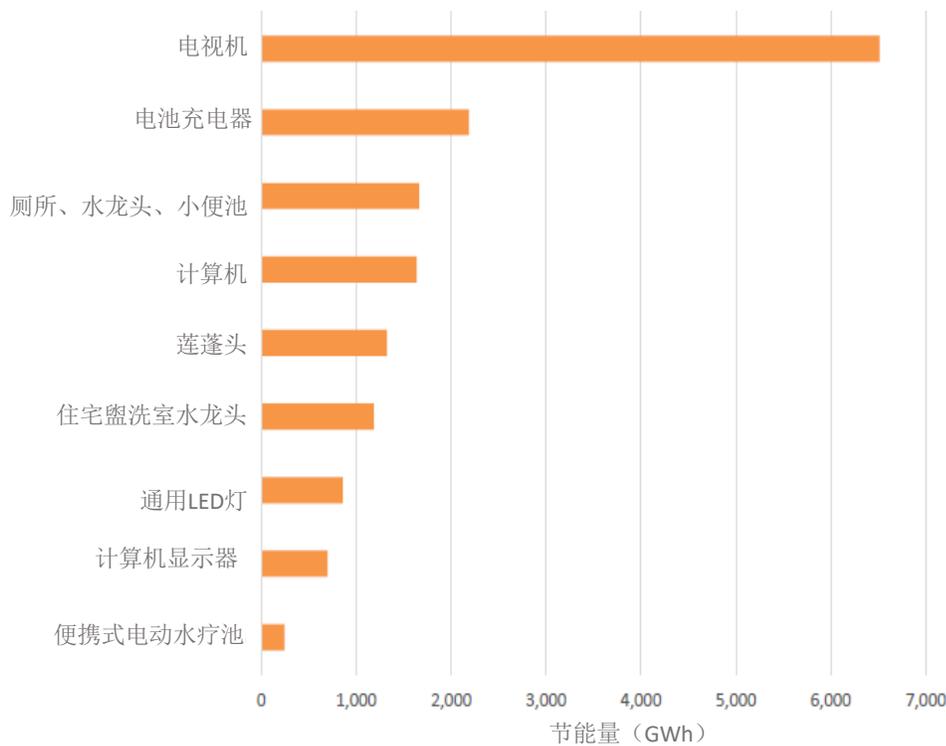


图16: 加州电器标准近期节能量; 来源: 加州能源委员会 (2018) ¹⁰⁰

⁹⁶ 美国节能经济委员会 (2020)。《2020年国家节能记分卡》，第117页。美国节能经济委员会。
<https://www.aceee.org/research-report/u2011>

⁹⁷ 加州能源委员会 (2018) —《跟踪进展》，第6页。加州能源委员会

⁹⁸ 加州能源委员会 (2019年11月)。《2019年加州节能行动计划》，第16页。

加州能源委员会。<https://www.energy.ca.gov/filebrowser/download/1900> 第A-16页。

⁹⁹ duVair, P.H., 《节电数字—第20章电器能效标准》。Robert Weisenmiller于2021年4月20日收到。

¹⁰⁰ 加州能源委员会 (2018) —《跟踪进展》，第6页。加州能源委员会

提高现有建筑的能效

1000万栋独户建筑中的近一半和340万栋多户建筑中的一半以上均是在建筑能效标准出台之前（1978年以前）建造。¹⁰¹ 这些现有建筑在提高能效方面具有巨大的潜力。

建筑业主对节能效益缺乏认识，往往是实施深度节能改造的一大障碍。由加州能源委员会管理的建筑能源基准项目正在努力解决这个问题，该项目要求建筑业主每年报告建筑特征、能源使用数据和建筑使用信息（图17）。该项目还要求总建筑面积超过5万平方英尺的商用（无住宅单元）和多户建筑（17户以上住宅单元）公开披露能源使用情况。¹⁰² 基准管理有助于衡量建筑物的性能，并让业主了解其建筑是否节能。这些信息最终是为了帮助当前和未来的建筑业主和住户在购买、租赁、维护和升级方面做出更明智的决策。¹⁰³

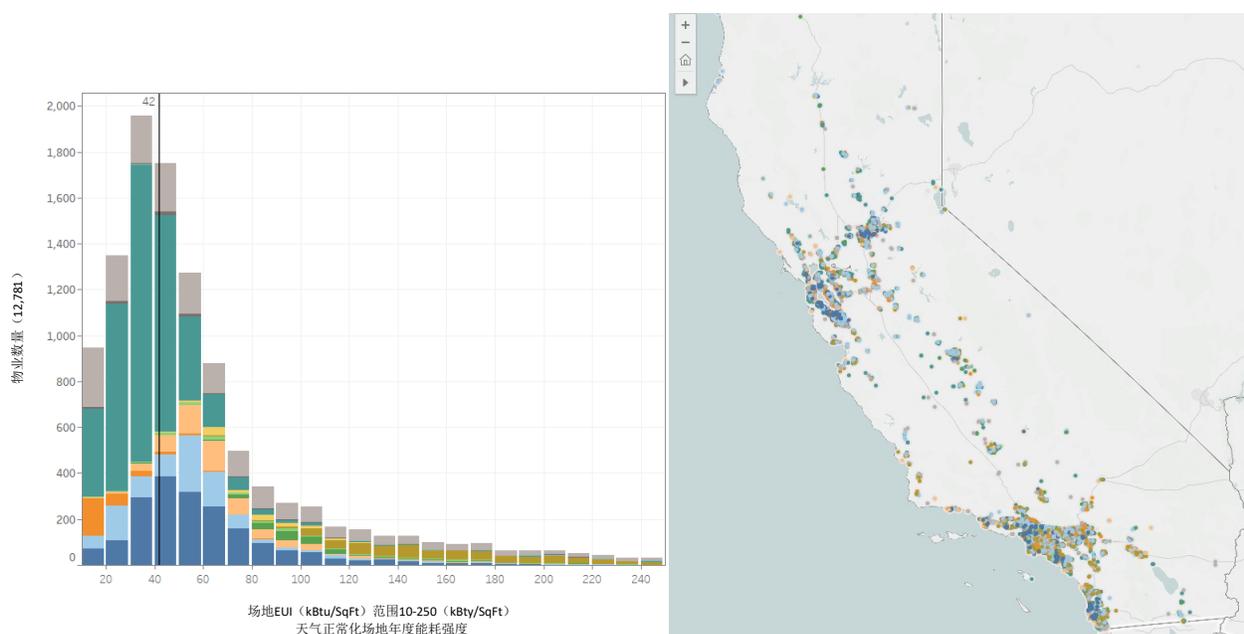


图17：加州建筑能源基准项目2019年数据；来源：加州能源委员会¹⁰⁴

¹⁰¹ 加州能源委员会（2019年11月）。《2019年加州节能行动计划》，第16页。

加州能源委员会。<https://www.energy.ca.gov/filebrowser/download/1900> 第23页、第27页。

¹⁰² 加州能源委员会（2021）。《建筑物能源基准项目常见问题》。加州能源委员会。

<https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/building-energy-benchmarking-program/building-energy-benchmarking>

¹⁰³ 加州能源委员会（2021）。《建筑物能源基准项目常见问题》。

加州能源委员会。<https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/building-energy-benchmarking-program/building-energy-benchmarking>

¹⁰⁴ 加州能源委员会（2019）。《加州建筑能源基准项目》。加州能源委员会

加州公用事业委员会负责监督由纳税人资助并由四家投资人拥有的公用事业单位（IOU）管理的项目— 太平洋天然气和电力公司（PG&E）、南加州爱迪生公司（SCE）、南加州天然气公司（SCG）和圣地亚哥天然气和电力公司（SDG&E）；两个区域能源网络 — BayREN和SoCalREN；一个社区选择聚合项目¹⁰⁵ — 马林清洁能源项目；以及第三方管理机构。¹⁰⁶ 国有公用事业单位（POU）必须每四年确定一次所有可行的、具有成本效益的节能措施，并向其用户和加州能源委员会提供其节能项目投资信息和节能成果。¹⁰⁷ 这些项目鼓励用户采用超过标准的新技术，并实行财政激励措施（例如，节能援助、退税、贷款）、行为项目以及教育和推广。2019年，在加州公用事业委员会的节能投资组合（6.39亿美元支出）中，分别有38%和23%用于住宅和商用领域（表2）。加州公用事业委员会注意到行为项目近期获得了一定的成功，这些项目要求公用事业单位向用户提供家庭能源报告，其中比较用户和邻居的能源使用情况。这些项目促使每户家庭节能1%以下到3%，预计未来将在节能总量中占较大比例。¹⁰⁸

2019年能效组合绩效

行业	2019年支出	总支出%	组合第一年节能量总计			组合TRC	二氧化碳减排（吨）
			GWH	MW	百万小卡		
住宅	\$243,930,367	38%	726	129.42	21	1.15	409,709
商业	\$147,236,438	23%	166	35.37	6	0.71	109,714
公共	\$80,122,476	13%	69	7.33	1	0.44	31,802
工业	\$36,740,784	6%	44	3.29	6	1.17	56,425
农业	\$15,026,680	2%	21	6.83	0	0.54	11,592
总计	\$523,056,745	82%	1,026	182	35	n/a	619,242
横截面	\$116,254,402	18%	1,712	372.45	49	1.81	1,060,035
总计	\$639,311,147	100%	2,738	555	84	1.44	1,679,277

https://tableau.cnra.ca.gov/t/CNRA_CEC/views/EnergyEfficiencyBenchmarkingDashboard/BenchmarkingDashboard?iframeSizedToWindow=true&%3Aembed=y&%3AshowAppBanner=false&%3Adisplay_count=no&%3AshowVizHome=no&%3AshowShareOptions=false

¹⁰⁵ 社区选择聚合指允许地方政府在从其现有公用事业供应商处获得输配电服务的同时，代表其居民、企业和市政账户向替代供应商采购电力的项目。（[社区选择聚合 | 绿色电力合伙 | 美国环保署](#)）

¹⁰⁶ 加州公用事业委员会（2018年5月）。《能效投资组合报告》，第8页。加州公用事业委员会。
<https://www.cpuc.ca.gov/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=6442459323>.

¹⁰⁷ 加州能源委员会（2019年11月）。《2019年加州节能行动计划》，第16页。
加州能源委员会。<https://www.energy.ca.gov/filebrowser/download/1900> 第A-1页。

¹⁰⁸ 加州能源委员会（2019年11月）。《2019年加州节能行动计划》，第16页。
加州能源委员会。<https://www.energy.ca.gov/filebrowser/download/1900> 第A-37页。

表2：加州公用事业委员会2019年能效投资组合绩效；来源：加州公用事业委员会（2020）¹⁰⁹

由州政府和地方政府拥有的公共建筑，发挥着节能和需求弹性技术生活实验室的作用。截至2019年7月，共有28栋公共建筑获批为零净能源建筑。¹¹⁰ 具体而言，加州能源委员会实施了多个面向学校的节能项目，如光明校园项目，该项目为计划改造现有建筑的学校提供技术援助；或校园节能激励项目，该项目将提供资金，升级公立学校的暖通空调（HVAC）系统并更换不符合要求的卫生洁具。

需求弹性

即使采取了最严格的能效措施，建筑以及交通领域的电气化仍将对现有配电系统构成巨大挑战。同时，电网需要整合快速增长的可再生资源，适应净载荷（总载荷减太阳能和风能发电）的日常变动。¹¹¹ 在这一背景下，需求弹性与清洁能源供应和节能相结合，成为了实现加州长期建筑去碳化的三个关键因素之一。¹¹²

根据SB 49（Skinner，2019年法规第697章），加州能源委员会正在制定弹性需求电器标准，目标是帮助安排、转移和缩减一天中不同时间段的能源使用，并最终更好地协调用户和电力系统需求。现有的公用事业需求响应项目要求参与用户响应经济激励措施、价格信号或其他条件，改变电力需求较高的特定时段的用电模式（通常是减少用电，或将用电转移到当天的其他时段）。¹¹³ 根据即将制定的弹性需求电器标准，这种用电模式的变化将每天发生，涉及大量用户，并且不会给用户造成不便。例如，经过用户同意后，利用自动通信和控制技术，将各种最终使用载荷（如水池泵、空间暖通空调设备、制冷、电动车服务设备、电动干衣机、洗碗机和电热水储罐加热器）自动转移至

¹⁰⁹ 加州公用事业委员会（2020）。《加州公用事业委员会能效项目有哪些影响？2019年成果和2020年展望》，第2页。加州公用事业委员会。<https://www.cpuc.ca.gov/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=6442465530>

¹¹⁰ 加州能源委员会（2019年11月）。《2019年加州节能行动计划》，第38页。

加州能源委员会。<https://www.energy.ca.gov/filebrowser/download/1900>

¹¹¹ 加州能源委员会（2020）。《已通过的2019年综合能源政策报告》，第2页。加州能源委员会。<https://efiling.energy.ca.gov/getdocument.aspx?tn=232922>

¹¹² 加州能源委员会（2020）。《已通过的2019年综合能源政策报告》，第43页。加州能源委员会。<https://efiling.energy.ca.gov/getdocument.aspx?tn=232922>

¹¹³ 加州公用事业委员会（2021）。《消费者DR信息和常见问题》。加州公用事业委员会。<https://www.cpuc.ca.gov/General.aspx?id=5923>

非高峰时段，而用户将享受较低的电费。¹¹⁴ 中国有一支非常活跃的电器标准小组，而加州和中国一直在大力协调双方的工作。加州采用电器标准的时间远早于中国，因此中国方面最初借鉴了加州的标准。而近期，加州则在中国标准的基础上制定了计算机显示器标准。加州希望中国协助开发低成本通信和控制技术，推进加州在载荷弹性方面的工作。

SB 350到2030年实现节能量翻一番

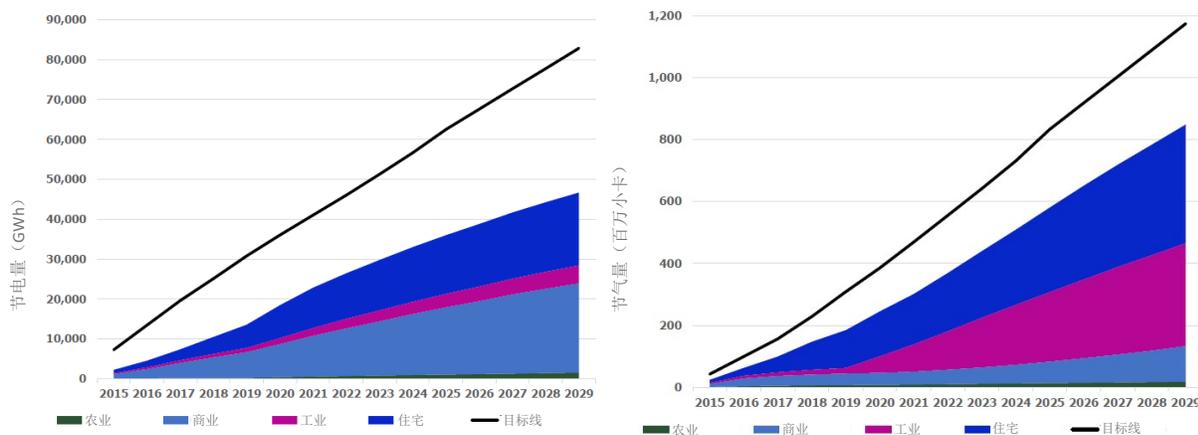


图18: SB 350将电力(左)和天然气(右)能效目标翻倍。

来源: 加州能源委员会(2019)¹¹⁵

前面提到，SB350规定了在2030年1月1日之前达到全州电力和天然气终端使用节能量比2015年翻一番的目标，并且假设该目标将在2017年范围界定计划中实现。然而，应当注意的是，根据加州能源委员会《2019年加州节能行动计划》，该州预计电力和天然气节能量将分别出现44%和28%的缺口(图18)。¹¹⁶ 考虑到加州自20世纪70年代以来在节能方面的长期努力，以及翻倍目标背后的分析不足，实现这一目标存在诸多困难并不足为奇。因此，该州正在从全力关注节能翻倍目标，转而将减少温室气体排放作为最终目标。此外，《2019年节能行动计划》除了节能翻倍目标外，还制定了另外两个目标：对低收入和弱势社区公平采用节能升级措施，以及减少建筑的温室气体排放。

¹¹⁴ 加州能源委员会(2020)。《弹性需求电器标准介绍》，第5页。加州能源委员会2020年12月9日，查阅网址：<https://efiling.energy.ca.gov/GetDocument.aspx?tn=235899> ¹¹⁵ 加州能源委员会。(2019年11月)。

《2019年加州节能行动计划》，第2-3页。

加州能源委员会。<https://www.energy.ca.gov/filebrowser/download/1900>

¹¹⁶ 加州能源委员会(2019年11月)。《2019年加州节能行动计划》，第2页。

加州能源委员会。<https://www.energy.ca.gov/filebrowser/download/1900>

4.2.6 储能解决方案

储能是将日益增多的太阳能和风能发电纳入电网的另一个工具。虽然可再生能源不属于本研究范围，但加州通过增加大量间歇性可再生能源，从根本上重塑了其电网的运行。2019年，加州有36%的电力零售额来自可再生能源，其中又有62%来自太阳能和风能，不包括表后（BTM）或离网太阳能发电（图19）。¹¹⁷

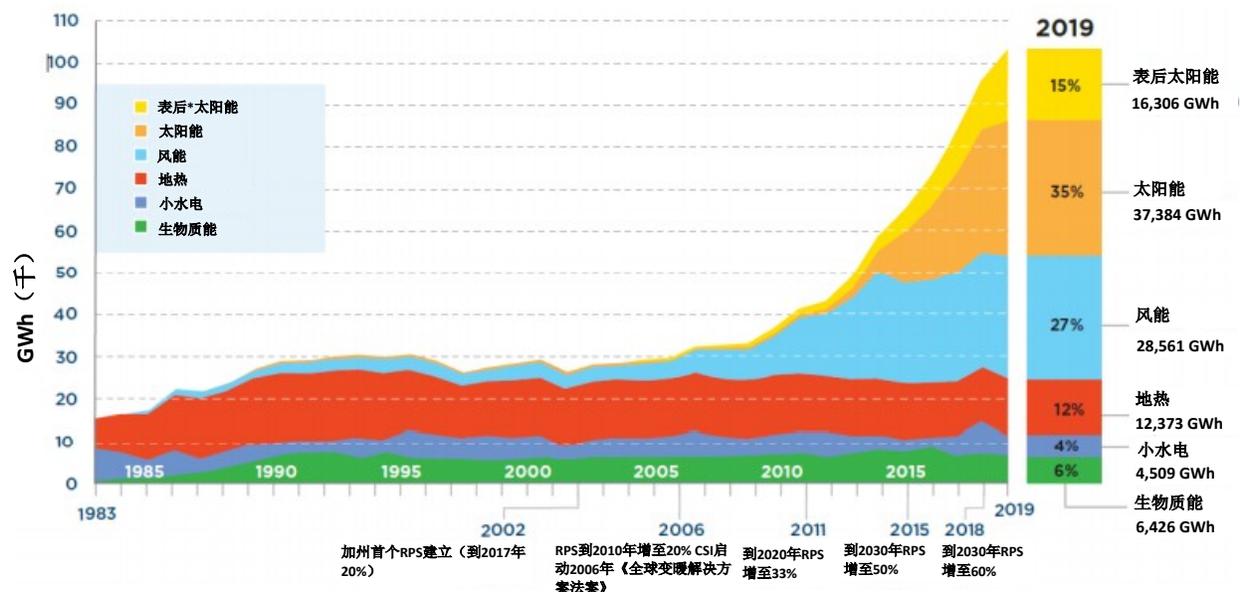


图19：加州负荷的可再生能源发电总量 来源：加州能源委员会 (2020)¹¹⁸

储存多余的可再生能源（在阳光充足和风力强劲时），有助于减少或避免可再生能源缩减的情况，并取代化石燃料，特别是“超高峰”电厂在能源需求过高无法通过其他能源满足时使用的化石燃料。减少或避免缩减，还有助于提高可再生能源项目的盈利能力。在加州，储能可以在应对2020年8月因电力需求飙升导致的停电情况中发挥重要作用，并且储能和现场太阳能光伏装置结合，还可用于应对火灾危险导致的停电。

储能方案在技术（电池、飞轮、压缩空气、抽水蓄能和热能）、放电持续时间（从几分钟到几天）、功率输出（从瓦特到千兆瓦）和位置（传输系统、

¹¹⁷ 加州能源委员会（2019）。《跟踪进展：可再生能源》。加州能源委员会。
https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2019-12/renewable_ada.pdf

¹¹⁸ 加州能源委员会（2019）。《跟踪进展：可再生能源》，第5页。加州能源委员会。
https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2019-12/renewable_ada.pdf

配电系统或表后互联)方面大相径庭。¹¹⁹ 本节将介绍加州的储能解决方案,这些解决方案重点关注公用事业(“表前”)和用户(“表后”)的锂离子电池。

公用事业级电池储能

2013年,经AB 2514号法案的授权,加州公用事业委员会为该州三家IOU制定了到2020年储能采购量达到1,325MW的目标。¹²⁰ AB 2868号法案进一步要求这三家IOU提出项目和投资方案,以加速总容量不超过500MW的分布式储能系统的广泛部署¹²¹,其中至少75%必须与配电系统联网。¹²²

这三家IOU均已达到AB 2514号法案规定的1,325MW的目标。加州公用事业委员会表示,其已批准采购超过1,533 MW的新存储容量,其中506MW的容量正在运行。¹²³ 2020年12月,全球最大的锂离子电池储能系统(BESS)在加利福尼亚州蒙投入运行,该系统的容量为300MW/1,200MWh。该项目的二期工程将在2021年8月前增加100MW/400MWh容量。¹²⁴ 根据能源充足性合同,PG&E将按月向发电商Vistra Energy支付固定的能源充足性费用,以帮助维持电网的可靠性。这只是加州正在建设或运行的多个BESS项目之一。下文的图20显示了加州建设电网级电池的规模和速度。加州计划仅2021年一年就安装1.7GW的电池存储容量。¹²⁵

¹¹⁹ 加州能源委员会(2018年8月)。《跟踪进展:储能》。加州能源委员会。

https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2019-12/energy_storage_ada.pdf

¹²⁰ 加州公用事业委员会(2021)。《储能》。加州公用事业委员会。

<https://www.cpuc.ca.gov/General.aspx?id=3462>。

¹²¹ “分布式储能系统”指连接至配电系统或位于电表用户侧的、使用寿命至少为10年的储能系统。(AB 2868号法案)

¹²² 加州立法机构(2016年9月26日)。《议会法案第2868号—储能》。加州立法机构。

https://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billTextClient.xhtml?bill_id=201520160AB2868。

¹²³ 加州公用事业委员会(2021)。《储能》。加州公用事业委员会

<https://www.cpuc.ca.gov/General.aspx?id=3462>。

¹²⁴ Patel, S. (2020年1月14日)。《瑞致达为加州天然气厂大型1.2千兆瓦时电池系统供电》。电力杂志。

<https://www.powermag.com/vistra-energizes-massive-1-2-gwh-battery-system-at-california-gas-plant/>

¹²⁵ Baker, D. (2021年4月1日)。《加州将测试大型电池能否阻止夏季停电》。

彭博社。<https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-04-01/to-avoid-blackouts-california-s-installing-more-big-batteries-than-all-of-china>

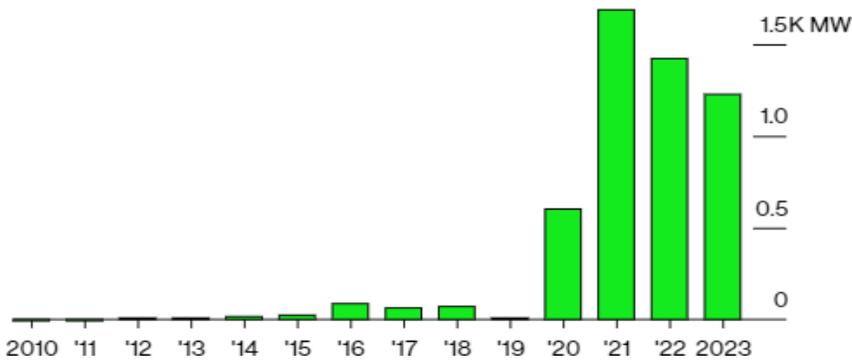


图20: 加州到2023年的电池增建 来源: 彭博新能源财经 (2021)¹²⁶

电网级系统之所以能够快速扩张, 原因是锂离子电池价格急剧下跌, 这也是电动汽车市场的溢出效应之一。锂离子电池价格从2010年的1,183美元/kWh降至2019年的156美元/kWh, 实际降幅达到87% (图21)。¹²⁷2020年, 该价格相比2019年再次下跌13%, 至137美元/kWh。据彭博新能源财经预测, 到2024年, 平均价格将降至100美元/kWh以下, 并且中国的电动公交电池已经出现了低于100美元/kWh的价格。¹²⁸

锂离子电池价格自2010年起下跌87%

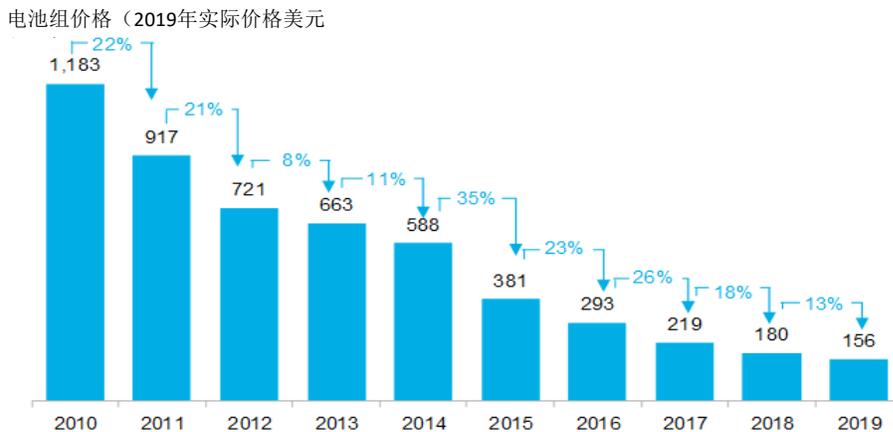


图21: 2010年至2019年锂离子电池价格 来源: 彭博新能源财经 (2020)

¹²⁶ Baker, D. (2021年4月1日)。《加州将测试大型电池能否阻止夏季停电》。

彭博社。 <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-04-01/to-avoid-blackouts-california-s-installing-more-big-batteries-than-all-of-china>

¹²⁷ 彭博新能源财经 (2019年12月3日)。《在市场升温背景下, 电池组价格反而下降, 2019年市场均价达156美元/千瓦时》。

彭博新能源财经。 <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/>

¹²⁸ 彭博新能源财经 (2020年12月16日)。《2020年, 电池组价格首次降至100美元/千瓦时以下, 市场均价为137美元/千瓦时》。彭博新能源财经。 <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>

表后（BTM）电池储能

表后电池储能将发挥越来越重要的作用，特别是2019年在与表后太阳能资源结合后，在加州可再生能源发电量中的比例达到了15%。¹²⁹ 加州已经实施了财政激励措施，降低表后储能设备的安装成本，并采用鼓励用户安装表后储能系统的电费设计。

自行发电激励项目（SGIP）

该项目于2001年推出，通过为表后安装的合格系统提供退税优惠，刺激新兴分布式能源的发展。该项目最初用于支持现场太阳能光伏，但到了2009年又获准支持独立储能系统。2018年，加州公用事业委员会授权该项目延期五年，项目资金高达8.3亿美元，其中约80%（下图22中的公平弹性¹³⁰、大规模储能和住宅储能）分配给了储能领域。该项目在提高现场太阳能发电和储能普及率方面发挥了重要作用。

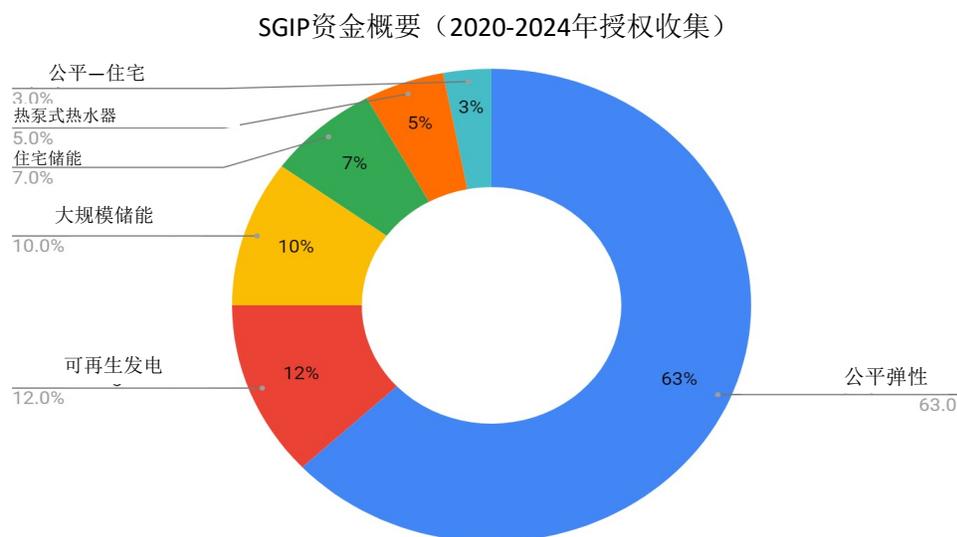


图22：SGIP到2024年资金概要 来源：加州公用事业委员会（2020）¹³¹

¹²⁹ 加州能源委员会（2019）。《跟踪进展：可再生能源》，第5页。加州能源委员会。

https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2019-12/renewable_ada.pdf

¹³⁰ 分配给公平弹性的资金将用于支付为医疗弱势群体、低收入社区以及火灾和停电风险较高社区提供储能系统的成本。

¹³¹ 加州公用事业委员会（2020年1月）。《根据SB 700及其他项目变化修订自行发电激励项目》。

加州公用事业委员会。 <https://docs.cpuc.ca.gov/PublishedDocs/Published/G000/M325/K979/325979689.PDF>

电费设计

主要有三种电费设计影响着消费者是否部署太阳能光伏和/或储能系统的决策，即：分时电价（TOU）、净用电电费（NEM）和按需电费。

- 分时电价指，电费因一天中的时段、季节和日期类型（工作日或周末/假日）而异。需求高峰时段电费较高，通常是加州的工作日下午和晚上，而非高峰时段电费则较低。¹³²2016年至2017年，所有商业、工业和农业用户以及与加州IOU签订了净用电电费协议的住宅用户（参见下文）都必须采用分时电价。¹³³该电费计划激励用户在中午生产和储存太阳能以留到需求高峰时段使用，并鼓励用户普遍实施节能和需求弹性措施。
- 大多数公用事业单位都允许采用净用电电费，但在细节设计方面可能有所不同。净用电电费允许自行发电的用户（“用户—发电商”）直接在现场满足自身的能源需求，并就反馈给公用事业单位的任何剩余能源在用户的电费单上提供财务信用额。¹³⁴前面提到，三家主要的IOU均要求净用电电费用户采用分时电价计划，因为不分时的财务信用额虽然有助于鼓励太阳能安装，但并不能鼓励储能安装。
- 按需电费按美元/kW的价格，根据用户需求收费，需求高峰时段的费用最高，同时还按美分/kWh的价格对已用电量收费。¹³⁵按需电费在商业、工业和农业中较为常见。¹³⁶与分时电价一样，按需电费可以激励用户通过太阳能光伏、储能以及节能和需求弹性等措施管理自身的载荷。

研发和部署

加州能源委员会已经资助了大量储能示范项目，其中以微电网为主。随着火灾和停电风险日益加剧，

¹³² 加州公用事业委员会《什么是分时电价？》加州公用事业委员会。

<https://www.cpuc.ca.gov/General.aspx?id=12194>。

¹³³ 同上。

¹³⁴ 加州公用事业委员会（2021）。《净用电电费（NEM）》。加州公用事业委员会。

<https://www.cpuc.ca.gov/NEM/>。

¹³⁵ 千瓦（kW）指在某一时刻使用的电力流。例如，如果上述的一台洗衣机运行10个载荷，即表示该家庭将使用10千瓦时（kWh）。

如果有10台洗衣机同时运行，该家庭或企业将需要10千瓦，尽管用电量仍为10千瓦时。

¹³⁶ 加州公用事业委员会（2021）。《我的账单如何计算？》加州公用事业委员会。

<https://www.cpuc.ca.gov/General.aspx?id=12188>。

微电网必须能够在电网停电期间通过复杂的控制系统实现孤岛化并维持临界载荷，这一点至关重要。此外，随着电池和光伏成本持续下降，微电网的使用将越来越普及。截至2018年8月，加州能源委员会已经资助了31个微电网示范项目。¹³⁷2018年，加州能源委员会宣布向10个新的微电网示范项目及先前资助的可以广泛复制的7个微电网项目提供拨款（表3）。¹³⁸

项目名称	地点	测试*
现有项目（7个）		
蓝湖牧场社区	蓝湖	创建社区级系统，支持孤岛模式的红十字会避难所。
博雷戈温泉	博雷戈温泉	开发由IOU拥有、运营的表前系统，提高位于受电网停电影响的配电线路末端的社区的电网弹性。
博世直流电建筑	奇诺	通过直流电照明、风扇和可充电叉车大幅减少一座配送设施的能源使用。
费尔蒙市消防站	费尔蒙	启用三座消防站的建筑级功能，降低能源成本，并提供弹性。
拉古纳污水处理厂**	圣罗莎	支持停电期间的弹性，并为电网和批发市场提供辅助服务
拉斯波西塔校区（社区大学）	利弗莫尔	在支持停电期间的关键载荷的同时，提高能源可靠性，减少需求，并提供辅助服务。
凯撒医疗中心***	里士满	在电网停电时维持医院的生命安全功能，并减少电网运行中的电力需求。

¹³⁷ 加州能源委员会（2018年8月）。《跟踪进展：储能》，第18页。加州能源委员会。
https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2019-12/energy_storage_ada.pdf

¹³⁸ 同上。

项目名称	地点	测试*
规划项目（10个）—港口、部落、军队、弱势群体等		
长滩港***	长滩	在港口的关键响应设施提供长期孤岛，并部署移动电池，以便在电网停电或发生紧急情况时支持关键载荷。
圣地亚哥港***	圣地亚哥	支持对公用事业关键峰值价格事件的响应，并维持对国防部战略港口和圣地亚哥国际机场喷气燃料储存的供电。
米拉玛海洋航空站	圣地亚哥	通过垃圾填埋场气体发电和储能，提供航线弹性。
帕克斯军营	都柏林	创建一个嵌套式模块化系统，实现电力系统现代化，并以100%可再生能源满足关键载荷。
怀尼米港海军服务器群大楼	怀尼米港	在支持一座重要军事设施的同时，解决并网发电和孤岛模式过渡期间的快速电力不稳问题。
红木海岸机场	麦金利维尔	开发一个由当地社区选择聚合机构和IOU拥有、运营的社区级表前系统，支持一座机场和美国海岸警卫队航空站。
虚拟广域***	斯托克顿、丰塔纳、里士满	利用带有集成DER的标准软件包对五个分布式系统进行虚拟控制，覆盖多个客户群、多个电表及不同的公用事业区域。
里亚尔托***	布卢明顿	创建一个系统，利用食物残渣和污水污泥产生的电力，支持一家具有无限期孤岛潜力的污水处理厂。
切梅韦维印第安人保留地	哈瓦苏湖	为250位中低收入居民创建一个社区级系统，在IOU线路的末端供电。
圣罗莎专科学校	圣罗莎	支持一个在发生紧急情况时为校园和社区供电的弹性供电系统，并减少正常运行期间的电力需求。

来源：加州能源委员会工作人员

*所有微电网都至少配有太阳能光伏、电池和一个控制器

**拉古纳污水处理厂的微电网预计将在2018年底上线。

***弱势群体

表3：加州可复制微电网项目 来源：加州能源委员会（2018）

加州能源委员会还通过其电力项目投资费用（EPIC）计划广泛支持各种研发项目，譬如资助耐久性机械电池（飞轮）、液流电池、锌混合阴极电池、车辆到电网（V2G）和车辆到建筑（V2B）服务以及存储价值估算工具等项目。详情可查阅加州能源委员会官网上发布的《跟踪进展——储能和EPIC年度报告》。

未来挑战

虽然储能部署已经在快速增加，但要达到SB 100要求的在100%清洁电网中发挥关键作用，仍然存在挑战。首先，在规模上存在问题：为了完全适应间歇性可再生能源，加州能源委员会、加州公用事业委员会和加州空气资源委员会估计，

加州还需要50GW的电池储能，才能实现SB 100规定的到2045年实现100%清洁电力的政策目标。¹³⁹ 其次，需要开发长期储能技术（可以储能100小时或更长时间，直至整个季节），应对长期无风无阳光的情况。抽水蓄能、液流电池或氢气可能是潜在解决方案。第三，电池在生命周期内的环境足迹令人担忧。锂离子电池中使用的原材料钴、锂和稀土元素的开采，与当地的土壤/空气/水污染、密集用水和恶劣的工作条件有着一定的联系。¹⁴⁰ 据估计，零排放车辆（ZEV）电池的寿命为10至20年。¹⁴¹ 因此，废旧电池的回收或再利用将是一大难题。AB 2832号法案要求加州环境保护局成立一个咨询小组，就汽车用锂离子电池的回收利用政策提出建议。¹⁴² 最后，制定市场规则，允许储能系统提供多样化服务¹⁴³（例如，按需电费管理、能源充足性、分时电价优化），将有助于储能充分实现经济价值。2018年，加州公用事业委员会批准了11项规则，支持储能的多用途应用（MUA）。¹⁴⁴ 通过叠加多种服务实现经济可行性，将对零售电价低于加州的美国其他各州和中国产生更加重大的影响。

4.2.7 交通运输

交通运输业占加州温室气体排放的比例超过了50%（不仅包括直接排放，还包括燃料生产和提炼的间接排放），占标准污染物的比例达到80%以上，占柴油颗粒物排放的比例更是高达97%。¹⁴⁵ 因此，交通运输排放是加州气候和空气质量监管的重中之重：在加州空气资源委员会制定的十个气候政策组合（图1）中，就有五个涉及交通运输。加州的交通运输排放来自2800万辆汽车及重型车辆的货物运输，特别是从长滩港和洛杉矶港到

¹³⁹ 加州空气资源委员会、加州能源委员会和加州公用事业委员会（2021年3月）。《2021年SB 100联合机构报告》，第86页。加州空气资源委员会、加州能源委员会和加州公用事业委员会。

<https://efiling.energy.ca.gov/EFiling/GetFile.aspx?tn=237167&DocumentContentId=70349>

¹⁴⁰ Tabuchi, H和Plumer, B.（2021年5月19日）。《电动汽车有多环保？》纽约时报

<https://www.nytimes.com/2021/03/02/climate/electric-vehicles-environment.html>

¹⁴¹ 加州环境保护局（2021）《锂离子汽车电池回收利用咨询小组》。

加州环境保护局。<https://calepa.ca.gov/climate/lithium-ion-car-battery-recycling-advisory-group/>。

¹⁴² 同上。

¹⁴³ 落基山研究所（2015年10月）。《电池储能经济学》，第6页。落基山研究所。<https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/03/RMI-TheEconomicsOfBatteryEnergyStorage-FullReport-FINAL.pdf>

¹⁴⁴ 加州公用事业委员会（2021）。《储能》。加州公用事业委员会。

<https://www.cpuc.ca.gov/General.aspx?id=3462>。

¹⁴⁵ 加州空气资源委员会（2013）。《ARB 2013年年鉴 — 第二章：当前排放和空气质量，2-3

和2-6》。加州空气资源委员会。<https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/resource-center/technical-assistance/air-quality-and-emissions-data/almanac-2>

穿过南海岸前往全美各个县的运输。加州是货物从环太平洋地区运往美国的门户。这两个港口是加州经济中的重要组成部分，事实上，货物运输在南加州经济中的比重约为三分之一，同时也是最大的单一污染源。¹⁴⁶虽然加州已经在2017年之前实现了到2020年将整体温室气体排放减至1990年水平的目标，但在2013年到2017年间，交通运输排放已经持续增加了5%。¹⁴⁷

加州的总体战略是推广更节能、电气化程度更高的汽车，采用更合适的燃料（降低碳强度，激励淘汰化石燃料），及改善运输方案（缩短行驶里程，建设交通基础设施）。本节将讨论加州交通运输系统整改方案，首先是轻型车辆（轿车和面包车），之后是在其港口活动的重型车辆。本节的讨论是对加州—中国气候研究院的一份工作文件的补充。¹⁴⁸

轻型车辆

至少自20世纪60年代起，加州就开始治理轻型车辆空气污染问题，并且已经通过某种形式的尾气排放技术达到了饱和。加州正在探索一种空气质量和气候控制协调方法。既然制定了100%清洁电力和63%电力来自非化石能源的目标¹⁴⁹（图23），加州自然而然注意到了零排放汽车。

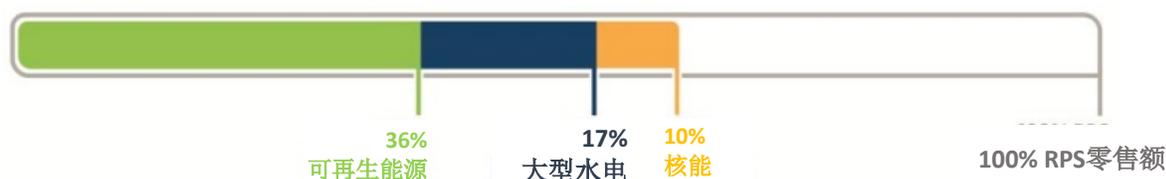


图23：2019年63%的电力零售额来自非化石能源
来源：加州能源委员会（2020）¹⁵⁰

¹⁴⁶ 加州能源委员会（2020）。《加州发布货运系统最终改造计划》。加州能源委员会2020年5月20日，查阅网址 <https://calenergycommission.blogspot.com/2016/07/state-releases-final-plan-to-transform.html>

¹⁴⁷ 加州空气资源委员会（2021年2月21日）。《改进的项目衡量指标将帮助加州开展更具战略性的工作，助力实现加州气候变化目标》。加州空气资源委员会

¹⁴⁸ 加州—中国气候研究院（2020年9月）。《迈向零排放：加州和中国的零排放汽车关键伙伴关系》。加州—中国气候研究院。<https://ccci.berkeley.edu/sites/default/files/ZEV%20Paper%20-%20September2020.pdf>

¹⁴⁹ 加州空气资源委员会、加州能源委员会和加州公用事业委员会（2021年3月）。《2021年SB 100联合机构报告》，第40页。加州空气资源委员会、加州能源委员会和加州公用事业委员会。<https://efiling.energy.ca.gov/EFiling/GetFile.aspx?tn=237167&DocumentContentId=70349>

¹⁵⁰ 加州能源委员会（2019）。《跟踪进展：可再生能源》，第2页。加州能源委员会。https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2019-12/renewable_ada.pdf

加州实行了各种措施，鼓励购买零排放汽车和开发充电/加油基础设施。加州的零排放汽车数量约占全美的一半，而中国的零排放汽车数量几乎占到全球总量的一半。加州的大部分零排放汽车均采用电池驱。加州能源委员会正在努力保持充电和加油基础设施的增长，以匹配零排放汽车的预期增长。¹⁵¹2012年，布朗州长发布了第B-16-12号行政命令，确立了到2025年零排放汽车达到150万辆的目标。2018年，布朗州长又发布了第B-48-14号行政命令，制定了到2030年零排放汽车达到500万辆以及到2025年安装25万个公用电动汽车（EV）充电站和200个氢气加注站（包括10,000个直流快速充电器）的目标。2020年，纽森州长发布了第N-79-20号行政命令，要求到2035年加州销售的所有新乘用车和卡车全部为零排放车，及到2045年所有中型和重型车辆全部为零排放车。但是，2019年，电动汽车仅占全州当年新车销量的8.26%，而且其整体销量同比下降了12%，其中有部分原因是联邦对向主要制造商采购给予的税收减免优惠到期。¹⁵²

除了激励购买零排放汽车的措施外，加州还实行了各种补充性交通运输政策。首先，制定了一系列可以同时减少空气污染物和温室气体排放的企业平均燃料经济性（CAFE）标准。¹⁵³ 燃料经济性或效率是衡量汽车在一定距离内消耗的燃料量的指标，在美国以“英里/加仑”表示，自1975年以来，美国国家交通安全管理局和环保署制定了多项乘用车和轻型卡车的CAFE标准。加州拥有制定本州尾气温室气体排放标准的豁免权，这在特朗普执政期间颇受争议，并且面临被废除的威胁。而现在，拜登政府正在解决这些争议。

其次，加州的低碳燃料标准（LCFS）降低了交通运输燃料的碳强度。¹⁵⁴ 该标准不仅减少了温室气体排放，而且通过要求开发低碳替代燃料，减少了空气污染物排放。该标准要求燃料供应商限制其销售的燃料的碳强度（以所生产能源的每兆焦耳（MJ）二氧化碳当量表示）。燃料供应商可以选择将燃料限制在规定的强度水平，或通过购买信用额度实现合规。生产低碳强度燃料的供应商可以获得信用额度，而这些信用额度可以出售给不符合要求的燃料供应商，或者“存”起来，以供未来使用。

¹⁵¹ 加州能源委员会（2021年1月）。《议会法案第2127号—电动汽车充电基础设施评估：分析2030年充电需求，支持零排放汽车》，1.加州能源委员会。<https://efiling.energy.ca.gov/getdocument.aspx?tn=236237>

¹⁵² 加州—中国气候研究院（2020年9月）。《迈向零排放：加州和中国的零排放汽车关键伙伴关系》，第5页。加州—中国气候研究院。

<https://ccci.berkeley.edu/sites/default/files/ZEV%20Paper%20-%20September2020.pdf>

¹⁵³ Wang, A、Shen, S、Pettit, D.（2020年7月）。《空气和气候污染物的协调治理：加州经验的教训》，第52页。加州大学洛杉矶分校法学院。<https://law.ucla.edu/news/coordinated-governance-air-climate-pollutants-lessons-california-experience>

¹⁵⁴ Wang, A、Shen, S、Pettit, D.（2020年7月）。《空气和气候污染物的协调治理：加州经验的教训》，第53页。加州大学洛杉矶分校法学院。<https://law.ucla.edu/news/coordinated-governance-air-climate-pollutants-lessons-california-experience>

该低碳燃料标准规定，加州的平均燃料碳强度应逐年下降，到2020年时比2010年水平低10%，到2030年时比2010年水平低20%。（图24）加州空气资源委员会采用生命周期评估方法，确定燃料途径产生的排放，包括开采、生产、加工、运输和消费等途径。

2011-2019年低碳燃料标准绩效

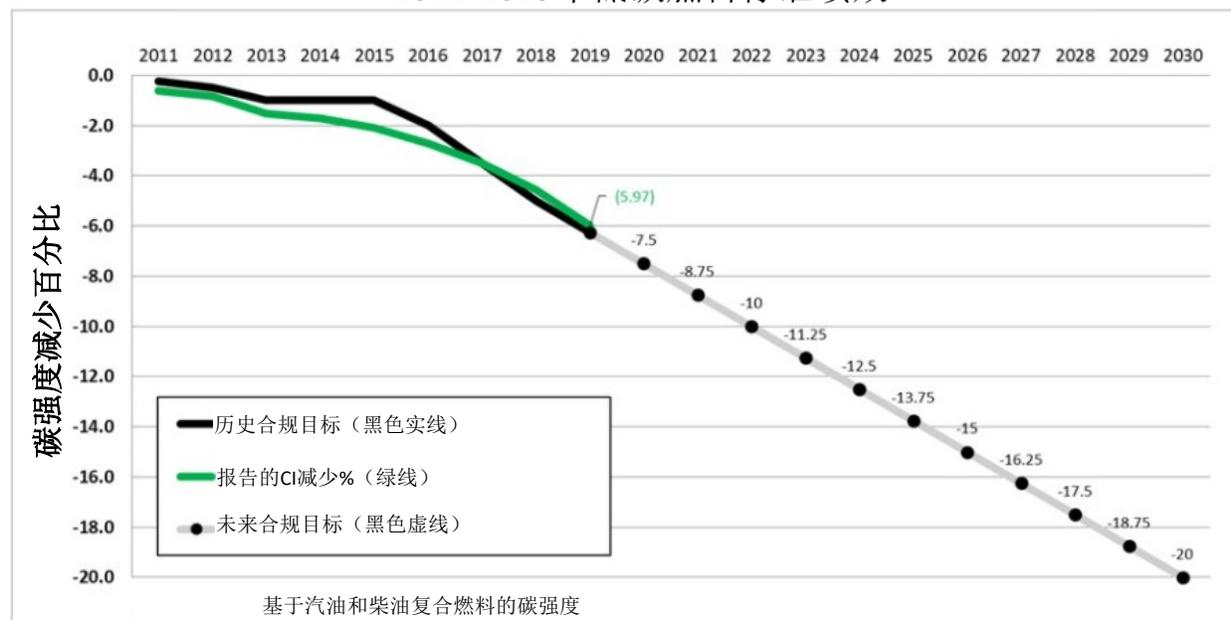


图24：2011-2019年LCSF绩效 来源：加州空气资源委员会（2020）¹⁵⁵

该低碳燃料标准还分别定义了汽油和柴油的碳强度计量指标。中轻型车辆的燃料通常被认为是汽油替代品，而重型车辆的替代燃料被认为是柴油替代品。该标准的替代燃料包括气体（天然气和沼气）、乙醇、生物柴油、可再生柴油、电力、氢气等。

如上图24所示，该标准通过扩大替代燃料供应，大幅降低了加州燃料市场的整体碳强度。截至2019年，该标准已实现以替代燃料供应取代了近33亿加仑石油柴油燃料。

第三，加州一直在尝试利用土地使用规划缩短车辆行驶里程，进而减少温室气体和空气污染排放。¹⁵⁶ 加州SB 375号法案

¹⁵⁵ 加州空气资源委员会（2021）。《数据仪表盘图》。加州空气资源委员会。

<https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/dashboard/dashboard.htm>。

¹⁵⁶ Wang, A、Shen, S、Pettit, D.（2020年7月）。《空气和气候污染物的协调治理：加州经验的教训》，第53页。加州大学洛杉矶分校法学院。<https://law.ucla.edu/news/coordinated-governance-air-climate-pollutants-lessons-california-experience>

试图协调土地使用和交通规划，以实现加州的气候变化目标。该协调的目标是，增加工作场所附近的住房建设，而不是郊区，郊区住房将延长通勤时间。要求地方都市规划组织制定可持续社区战略，作为联邦规定的区域交通计划的组成部分。根据加州《环境质量法》（CEQA），将对符合可持续社区战略的项目实行简化程序。

另外，加州司法部长等人利用《环境质量法》相关诉讼，推广密集型城市住房，并遏制郊区扩张。《环境质量法》要求对拟建的住房项目开展全面的环境影响分析，包括温室气体排放分析。该法还要求在可行范围内减轻对环境的负面影响。对于新的郊区住房开发项目，该法要求开发商做出建造并维护“净零”项目的承诺，并且该承诺可以强制执行。净零状态指取暖和烹饪设备全部接电、所有房屋铺设电动车充电线路、公共交通便利以及提高能效超过建筑规范要求等。

重型车辆和货物运输

洛杉矶港和长滩港是环太平洋地区特别是中国向美国运输货物的门户，各种货物通过这两大港口，再穿过南海岸，运往全美各县。这两座港口表示，他们仅在所在的城市就提供了约19万个工作岗位，而其中的进出货物更是关系到全美300万个工作岗位。¹⁵⁷ 这两座港口也是大洛杉矶地区最大的单一空气污染源。这两座港口主要从事各种车船设备的物流业务，包括：满载货物的集装箱船、油轮、拖船、船岸起重机、滚动堆垛机、集装箱顶升机、叉车、拖拉机、货运列车和大约16,000辆卡车。几乎所有车辆都使用柴油或石油类燃料。¹⁵⁸

2017年，洛杉矶市长和长滩市长制定了使港口实现零排放的目标。他们承诺，到2030年将码头上所有货物装卸设备转换为零排放车辆，及到2035年将所有来往卡车转换为零排放车辆。这些承诺提出到2030年使港口的温室气体排放比1990年水平低40%，到2050年比1990年水平低80%。¹⁵⁹

¹⁵⁷ Vock, D.C. (2019年5月20日)。《州和地方未来治理，美国最大港口能否变绿》，第5页。Governing.com。 <https://www.governing.com/archive/gov-california-ports-emissions-air-pollution.html> ¹⁵⁸ Vock, D.C. (2019年5月20日)。《州和地方未来治理，美国最大港口能否变绿》，第5页。Governing.com。 <https://www.governing.com/archive/gov-california-ports-emissions-air-pollution.html> ¹⁵⁹ Vock, D.C. (2019年5月20日)。《州和地方未来治理，美国最大港口能否变绿》，第6页。Governing.com。 <https://www.governing.com/archive/gov-california-ports-emissions-air-pollution.html>

港口电气化

两座港口最大的空气污染源是每年停靠的近4,000艘船只。洛杉矶港在使用替换航海电力系统（AMP）（有时称为岸边电力或船舶接用岸电）减少空气污染物和温室气体排放方面一直处于领先水平。船舶接入AMP网络时，主引擎和辅助引擎全部关闭。洛杉矶港于2004年8月开通了首个AMP网络。2007年，加州空气资源委员会规定，所有停靠洛杉矶港和长滩港的船只都必须接入该网。截至2020年，洛杉矶港已建有79个AMP电力库，并且正在扩大容量，以容纳邮轮。加州空气资源委员会正在考虑将集装箱船、冷藏船和游轮使用岸电的规定比例从70%提高到80%。一艘集装箱船接网一天减少的污染物，相当于同一天道路上减少了33,000辆汽车。¹⁶⁰

同时，各方也在共同努力，开发零排放货物装卸设备，并加强港口的充电基础设施。例如，长滩中港项目一期于2016年投入运营，几乎全部采用电气设备，而且基本上实现自动化。同样地，南加州爱迪生公司正在实施一项3.56亿美元的计划，即到2023年在其服务范围内（包括长滩港）安装可供8,500辆重型和中型车辆使用的充电基础设施。其中至少有四分之一的预算专门用于港口和仓库。¹⁶¹

两座港口共有16,000辆卡车。目前已经实行了各种措施，鼓励使用清洁卡车。港口需要将卡车替换为零排放和接近零排放的车型。¹⁶²

但最合适的技术仍在开发中，具体将在下一节全面讨论。而在2020年6月，加州空气资源委员会通过了全球首个零排放卡车规则，要求到2030年制造约10万辆零排放重型车辆，及到2035年制造约30万辆。¹⁶³

虽然在技术方面仍存在各种挑战，但总体政策目标始终是，将洛杉矶港和长滩港转型为零排放港口。

¹⁶⁰ Vock, D.C. (2019年5月20日)。《州和地方未来治理，美国最大港口能否变绿》，第8-9页。

Governing.com。 <https://www.governing.com/archive/gov-california-ports-emissions-air-pollution.html>

¹⁶¹ Vock, D.C. (2019年5月20日)。《州和地方未来治理，美国最大港口能否变绿》，第14页。

Governing.com。 <https://www.governing.com/archive/gov-california-ports-emissions-air-pollution.html>

¹⁶² Vock, D.C. (2019年5月20日)。《州和地方未来治理，美国最大港口能否变绿》，第5、10、11、12页。

Governing.com。 <https://www.governing.com/archive/gov-california-ports-emissions-air-pollution.html>

¹⁶³ 加州空气资源委员会

¹⁶⁴

5. 国际先进经验及其在中国应用的潜力

5.1 重型卡车的能源效率及其可能产生的空气质量协同效益

全球重型卡车¹⁶⁴ 仅占有所有类型车辆的10%，但在运输能源消耗和排放二氧化碳方面所占的比例却极高。重型卡车在公路货运活动方面的使用率为70%，消耗的能量占有所有卡车消耗能量的50%，排放的二氧化碳占有所有运输工具排放二氧化碳的40%。¹⁶⁵ 中型和轻型卡车通常用于区域运输和小规模的“最后一公里”交付服务。相较之下，重型卡车一般用于货物的长途运输，行驶时间比较长。在一定程度上，由于自身重量和有效载荷较重，且行驶的路途较为崎岖，重型卡车行驶一公里消耗的能源明显高于其他等级的卡车。然而，从政策角度来看，仅有5个国家就该等级的车辆制定了燃料经济性标准，且这些标准都是在过去20年里制定的。这些重型卡车对环境的巨大影响凸显了其在降低能源消耗和二氧化碳排放量巨大潜力，以及通过改善空气质量实现协同效益的可能性。对于公路货运需求将随着经济的持续发展快速增长，而空气污染仍是关键环境问题的新兴和过渡经济体而言，重型卡车的能耗降低强力尤为如此。

5.1.1. 市场、政策和技术概况

5.1.1.1 市场概况

自21世纪00年代以来，中国的公路货运大幅增长，公路货运周转量从2006年的不足1万亿吨公里增长到2018年的7万亿多吨公里，翻了七番。¹⁶⁶ 截至2018年，公路货运占有所有货运活动的47%。近年来，重型卡车占公路货运领域使用的所有车辆的比率也呈现出快速增长的态势，2002年为18%，2018年为28%。伴随着这一增长，目前中国交通运输业的石油使用量达到中国石油总使用量的58%，2018年中国超过美国，成为世界最大的原油进口国。除引发人们对能源安全和二氧化碳排放量的担忧外，重型卡车还造成了严重的空气质量以及健康相关的问题。在中国，柴油车排放的颗粒物和氮氧化物占有公路运输车辆排放颗粒物和氮氧化物总量的一半。特别是PM2.5，重型卡车的排放量要比轻型货运车辆高出1~2个数量级。

¹⁶⁵ 各等级卡车重量的划分因国家/地区而异，但重型卡车的重量一般等于或大于15吨。

¹⁶⁶ Moultaq, M., Nic, L, Hall, D. (2017年)。《零排放重型卡车转型》，国际清洁交通委员会白皮书。<https://theicct.org/publications/transitioning-zero-emission-heavy-duty-freight-vehicles>；国际能源署。(2017年)。《卡车的未来》，国际能源署。<https://doi.org/10.1787/9789264279452-en>

¹⁶⁷ 国家统计局。(2020年)。《中国统计年鉴-2019》。北京：中国统计出版社。国家统计局。<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>

中国将重型卡车定义为总重超过12吨的车辆，又将重型卡车分为牵引卡车、自卸卡车、直卡或皮卡、特种卡车等（表4）。到2018年，重型卡车的总数已翻了五番，增长到700万辆，平均每年增长10.3%，是所有货运车辆中增长速度最快的。用于市内短途运输的特种卡车（如水泥搅拌机）和用于长途运输的牵引卡车占据中国重型货运领域的主导地位，其次是自卸卡车和直卡。2015年，中国98%的重型卡车以柴油为燃料，其余2%以液化天然气为燃料。¹⁶⁷自那之后，由于国家补贴政策 and 电动车的发展，纯电动和燃料电池卡车也开始进入重型货运市场，特别是用于市内短途运输。截至2016年，中国约2%的重型车辆是电动车。¹⁶⁸

	皮卡	牵引卡车	自卸卡车	特种卡车
				
应用	物流公司使用，使用频率高	固定线路运输大量货物和材料	施工工地；运输垃圾；工作条件恶劣	短途运输；市内使用
年平均行驶里程（公里）	200,000 – 250,000	150,000 – 200,000	80,000 – 100,000	30,000 – 60,000
平均寿命（年）	10	8	3	10

表4 重型车辆分类和特点

数据来源：（中国汽车技术研究中心，2018年；Song等人，2017年；Xing等人，2016年）

¹⁶⁸ Song, H., Ou, X., Yuan, J., Yu, M., & Wang, C. (2017年)。《柴油的消耗量和排放的温室气体/基于自下而上的模型分析的中国以液化天然气为燃料的重型车辆》。《能源》，第140期，第966~978页。

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.011>

¹⁶⁹ 中国汽车技术研究中心。（2018年）。《中国绿色货运评估》。中国汽车技术研究中心。

<https://www.ccacoalition.org/en/resources/china-green-freight-assessment>

从市场角度来看，中国的重型货运领域的独特之处还在于其模式为车辆由个人拥有，71%的卡车司机有自己的卡车。¹⁶⁹ 因此，84%的卡车购置是先付一部分首付，然后尾款通过银行贷款购置或完全通过个人贷款购置。¹⁷⁰ 另外，近45%的卡车司机独自接活儿，而不是受雇于某个公司。这些市场状况导致重型货运的所有权和经营权相当分散和零散。

5.1.2 政策概况

与其他国家类似，中国也推出了一套基于监管、财政和市场的综合政策，以解决重型货运行业的能源和更广泛的环境影响。中国是少数几个为重型车辆制定强制性燃料经济性标准的国家之一，中国为重型车辆制定的燃料经济性要求经历了三个阶段，现在覆盖直卡、牵引卡车和自卸卡车。下图25以牵引卡车为例，展示了最近各阶段燃油经济性标准的具体要求和日益严格的趋势。

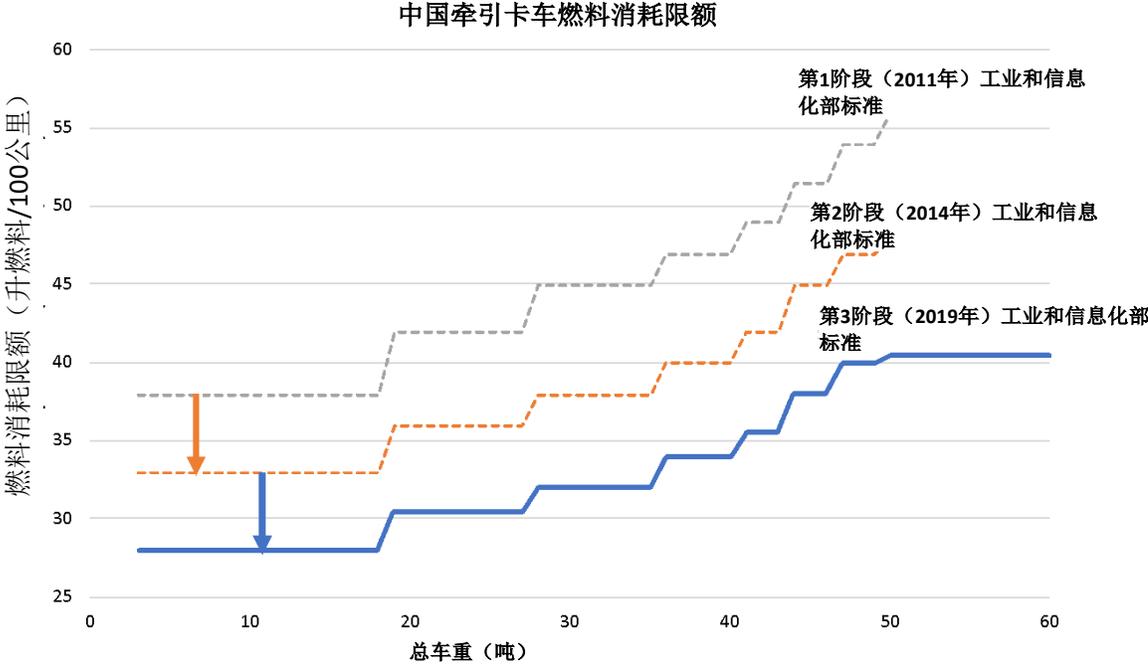


图25 中国的重型牵引卡车燃油经济性标准

除了通过制定燃料经济性标准提高能效表现外，中国政策关注的另一个重点领域在于

¹⁷⁰ 传化慈善基金会公益研究院。(2018年)。《卡车司机的群体特征与劳动过程》，社会科学文献出版社。

¹⁷¹ 同上。

促进新能源车辆的开发和部署。¹⁷¹ 虽然新能源车辆政策最初主要支持轻型客车，但最近对公交车、城市特种卡车和长途重型卡车的支持也有所增加。2020年4月发布的关于促进新能源车辆发展的政策文件中，为支持新能源重型卡车的发展，取消了购置配额限制，取消了限行措施，加强了对柴油卡车的环境管理，并采取了电池即服务的商业模式。此外，自2015年以来，中央政府（通常还有地方政府提供的配套资金）为发展新能源卡车提供了重要的财政和财务支持。对重型卡车的补贴水平也在2021年和2022年分别下降了10%和20%，并计划于2022年底彻底停止对重型卡车补贴。由于轻型和重型车辆技术的发展速度不同，新能源重型卡车的政策目前主要着重研发、关键材料、部件的生产以及核心技术。

在空气污染方面，中国已就重型车辆的氮氧化物、颗粒物和一氧化碳排放限值制定了六个阶段的标准，标准逐渐严格。最新的污染物排放标准，《重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》（GB17691-2018），于2018年6月发布，并分两个阶段实施。第六a阶段为2019年至2021年，第六b阶段为2021年至2023年。第六b阶段的实施重点为新型重型车辆。中国第六a阶段制定的排放标准与欧洲第六阶段的排放标准类似，第六b阶段的测量要求更严格，同时还建立了一套远程排放监测系统。¹⁷² 除国家排放标准外，一些地方还采取了其他政策和计划来限制重型卡车造成的空气污染。2017年底，首都北京设立了低排放区，禁止达不到国六排放标准重型卡车进入北京。上海市部分高速路已开始禁止污染严重的国三柴油卡车进入。上海市还向卡车运营商发放补贴，以提前淘汰这些污染严重的车辆。

5.1.3 技术概况

与美国和欧盟的重型货运市场相比，中国重型卡车的发动机往往比较小且动力不足。通过采用先进的涡轮增压器、涡轮复合、按需配件、减少摩擦和高效选择性催化还原系统等发动机技术，可以提高能源效率。¹⁷³ 与全球市场上的同类车辆相比，中国的重型车辆平均重量高出10%，但其车架

¹⁷² 在中国，新能源车辆指插电式混合动力车辆、纯电动车辆和燃料电池车辆。

¹⁷³ Yang, L., He, H. 2018年。《重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》（最终规定）。国际清洁交通委员会。<https://theicct.org/publications/china%E2%80%99s-stage-vi-emissions-standard-heavy-duty-vehicles-final-rule>

¹⁷⁴ Delgado, O., Zhao, L., Zheng, T., He, H., Yang, L., Muncrief, R. and Sharpe, B.（2017年7月）。《中国重型车辆市场分析和节油技术潜力》，国际清洁交通委员会。
https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/China-HDV-Market-Tech_ICCT-White-Paper_20072017_vF.pdf

和悬架弹簧等关键部件重量可能高出30-40%。¹⁷⁴ 这表明，有可能通过采用轻量化技术，比如采用高强度钢和铝，帮助降低车辆重量并提高燃油效率。此外，在美国和加拿大，卡车普遍在两侧安装整流罩以及使用低滚阻轮胎等其他节能技术，由此改善卡车空气动力学性能和提高燃油效率，但这些技术在中国尚未得到广泛应用。

除提高车辆自身效率外，信息通信技术、大数据以及自动化方面取得的进展也有可能帮助提高重型卡车的运营效率。随着全球各地不断取得新的技术突破，多项货运操作和物流方面系统技术已经诞生，可减少先前系统操作过程中的燃料消耗和相关污染物排放。这些货运操作和物流方面的进展包括通过全球定位系统和地理信息系统优化行驶路线，卡车自动排队行驶以减少空气阻力，节油驾驶培训和反馈，以及通过捆绑拼运来提高经济效益。¹⁷⁵ 然而，由于现有的技术、经济和/或政治障碍，以及缺乏能够克服这些障碍的机制或政策，这些进展大多尚未应用。在中国，超载和负载不足现象仍然存在，在返程时运输货物可大幅提高车辆利用率，减少车辆行驶活动。如果经优化的路线和共同装载得以广泛采用，中国重型货运车队的运营效率将得到进一步提高。

在空气污染物排放控制技术方面，随着国六排放标准的实施，预计柴油颗粒过滤器将得到更广泛的应用。因为中国的国六排放标准也对排放物中特定粒径的粒子数量设置了限值，所以需要柴油颗粒过滤器除去新型柴油重型卡车尾气中的颗粒物，如碳灰，以达到新的排放限值要求。同样，为达到国六关于氨气和氮氧化物的排放限值要求，新柴油重型卡车还需要采用选择性催化还原系统等先进的主动排放控制技术。¹⁷⁶

5.1.4 零排放技术评估

除现有的用于改善重型货运车辆及其运营能效的商用技术外，纯电动、氢燃料电池、悬链和动态充电技术正取代传统柴油卡车技术，成为实现零排放的选择性方案。

与已经投入商用的电动汽车和轻型车辆不同，重型卡车电动化面临着独特的技术问题，即这类卡车的车身更重、车辆尺寸更大，行驶的路面更崎岖、路途更远并且时间更长。

¹⁷⁵ 同上。

¹⁷⁶ 国际能源署。（2017年）。《卡车的未来》，国际能源署。

<https://doi.org/10.1787/9789264279452-en>

¹⁷⁷ Li, G., Ying Y., Zhang M.等人。（2019年）。《重型柴油车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》的关键技术内容。 *Johnson Matthey Technology Review* 63 (1): 21 – 31。

<https://www.technology.matthey.com/wp-content/uploads/pdf/21-31-jmtr-jan19.pdf>

这些特性要求重型卡车用电池需具有更高的能量密度，大约10倍于电动汽车的能量容量，电池更耐用，性能开始下降前更多放电周期，并具有温度管理要求以及安全要求。自2016年以来，全球知名跨国制造商和初创企业一直在开发电动重型卡车原型车，预计到2021年将有10款纯电动卡车投入商用。目前展示的这些重型电动卡车上用的电池仍处于研发阶段，无法确定扩大生产和投入商用的时间。例如，最近现有大多数纯电动重型卡车原型有限的续航里程有所提高。尼古拉2号和特斯拉半挂车等重型电动卡车最近的行驶里程都达到了400至550英里，而此前的行驶里程通常为200至300英里。从2007年到2019年，电动汽车应用的电池成本每年下降16%。2019年，整个行业锂离子电池组的平均成本为161美元/千瓦时。¹⁷⁷人们普遍预计，随着重型卡车用电池投入量产、经济效益扩大，电池成本将在一定时间内继续大幅下降至约100美元/千瓦时，在2030年左右，纯电动重型卡车的成本将与柴油卡车持平。¹⁷⁸然而，由于预计电网存储和电动车辆对电池的需求会增加，因此，仍不确定重型卡车用电池成本能否下降。除电池成本外，还有71000美元到189000美元充电基础设施成本。¹⁷⁹

纯电池技术卡车的替代之一是采用氢燃料电池卡车。这种卡车将氢储存在压力罐中，配备的燃料电池可将氢转化为电能，用于车载发电。氢的质量能量密度比纯电池高得多，但氢的体积能量密度低，因此，可通过将氢气压缩储存在储氢罐中来提高续航里程。加氢站设在加油站，给轻型客车加氢5分钟内就可完成。目前所用的氢是通过对天然气中的甲烷重整、或电解煤或直接电解而来，希望未来用可再生电力进行电解的过程可以成为清洁的氢来源。

¹⁷⁸ Kapoor R.等人。（2020年）。《分析显示全行业电动车辆电池成本持续下降》，宾夕法尼亚大学。
<https://mackinstitute.wharton.upenn.edu/2020/electric-vehicle-battery-costs-decline/>

¹⁷⁹ 国际能源署。（2017年）。《卡车的未来》，国际能源署。<https://doi.org/10.1787/9789264279452-en>；Hall, D., & Lutsey, N.（2019年）。《估算推出零排放卡车的基础设施需求与成本》，国际清洁交通委员会白皮书。<https://theicct.org/publications/zero-emission-truck-infrastructure>；Phadke, A., Khandekar, A., McCall, M., Karali, N., & Rajagopal, D.（2019年9月）。《长途纯电动卡车在技术上可行，在经济上引人瞩目》，劳伦斯伯克利国家实验室工作论文。网址：https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/working_paper_005_battery_electric_trucks_906_0.pdf；ICF。（2019年）。

《加利福尼亚州中型和重型卡车技术比较》，ICF。https://www.caletc.com/assets/files/ICF-Truck-Report_Final_December-2019.pdf

¹⁷⁹ Hall, D., & Lutsey, N.（2019年）。《估算推出零排放卡车的基础设施需求与成本》，国际清洁交通委员会白皮书。<https://theicct.org/publications/zero-emission-truck-infrastructure>

美国本地和全球市场上的商用轻型燃料电池车辆数量有限，但中型和重型车辆技术和市场仍在开发中，目前展示的只有4辆由现代、丰田、尼古拉和肯沃斯公司生产的第八类原型车。其中，现代XCient第八类直卡（2020年开始小规模生产）的续航里程最短，249英里，尼古拉一号第八类牵引挂车的续航里程最长，1000英里（预计于2022年开始生产）。成本方面，目前估计搭载燃料电池系统的重型卡车的资本成本为25.6万~48万美元，但分析表明，随着燃料成本的下降，到2030年，这一成本可能会降至15万~20万美元。¹⁸⁰ 根据加利福尼亚州的经验估计，建设一个加氢站及其配套基础设施还需要200~300万美元。

181

第三种电动化替代不太常见，即使用公路上的或公路下铺设的动态充电基础设施给重型卡车充电，如通过架空的可连接或断开的接触线，或通过嵌入公路上的可产生电磁场的线圈，用于接收所发电力的线圈装在卡车上。包括西门子、斯堪尼亚和沃尔沃在内的三家欧洲公司正在开展试点示范，利用悬链、公路轨道和专用感应技术（如连接港口和机场的短距离线路）给卡车进行动态充电。¹⁸² 动态充电或悬链充电相关的主要成本是新公路充电基础设施所需的投资成本，估计每公里新公路需80万~100万美元，如果需要对现有道路进行改造，成本会大幅提高。¹⁸³

5.1.5 国际先进经验

5.1.5.1 燃料经济性和二氧化碳排放标准

全球共有六个强制性的能源消耗或二氧化碳排放标准项目专门针对重型卡车。2006年，日本率先引入了重型车辆燃油经济性标准，最近实施的第二阶段标准于2019年最终确定。新标准的目标是从2015年到2025年，将效率提高13.4%。新标准还对空气动力学和轮胎等高效技术设定了要求。2017年，印度最终确定了重型汽车燃油经济性标准，第一阶段于2018年开始实施，第二阶段于2021年开始实施，目标是将平均燃油效率降低11%。

¹⁸⁰ Moultaq, M., Nic, L, Hall, D. (2017年)。《向零排放重型卡车过渡》，国际清洁交通委员会白皮书。<https://theicct.org/publications/transitioning-zero-emission-heavy-duty-freight-vehicles>; ICF。(2019年)。《加利福尼亚州中型和重型卡车技术比较》，ICF。https://www.caletc.com/assets/files/ICF-Truck-Report_Final_December-2019.pdf

¹⁸¹ ICF。(2019年)。《加利福尼亚州中型和重型卡车技术比较》，ICF。https://www.caletc.com/assets/files/ICF-Truck-Report_Final_December-2019.pdf

¹⁸² 西门子。(2019年)。《电子高速公路：货物运输电气化》，西门子。<https://new.siemens.com/global/en/products/mobility/road-solutions/electromobility/ehighway.html>; 国际能源署。(2017年)。《卡车的未来》，国际能源署。<https://doi.org/10.1787/9789264279452-en>

¹⁸³ 国际能源署。(2017年)。《卡车的未来》，国际能源署。<https://doi.org/10.1787/9789264279452-en>

与日本和印度类似，美国也将重型车辆的温室气体排放标准分为两个实施阶段，第一阶段针对2014年~2018车型年推出的车辆，第二阶段针对2018年~2027车型年推出的车辆。该标准对发动机和车辆单独制定了能效和污染物排放限值，并涵盖了二氧化碳、甲烷、一氧化二氮和氢氟碳化合物等四种主要温室气体。第一阶段标准根据车辆的类型和尺寸，要求将燃料消耗和二氧化碳排放量比2010车型基准年减少6~23%。第二阶段标准将燃料消耗和二氧化碳排放量指标降低了30%。加拿大关于重型卡车的标准与美国的标准基本一致。

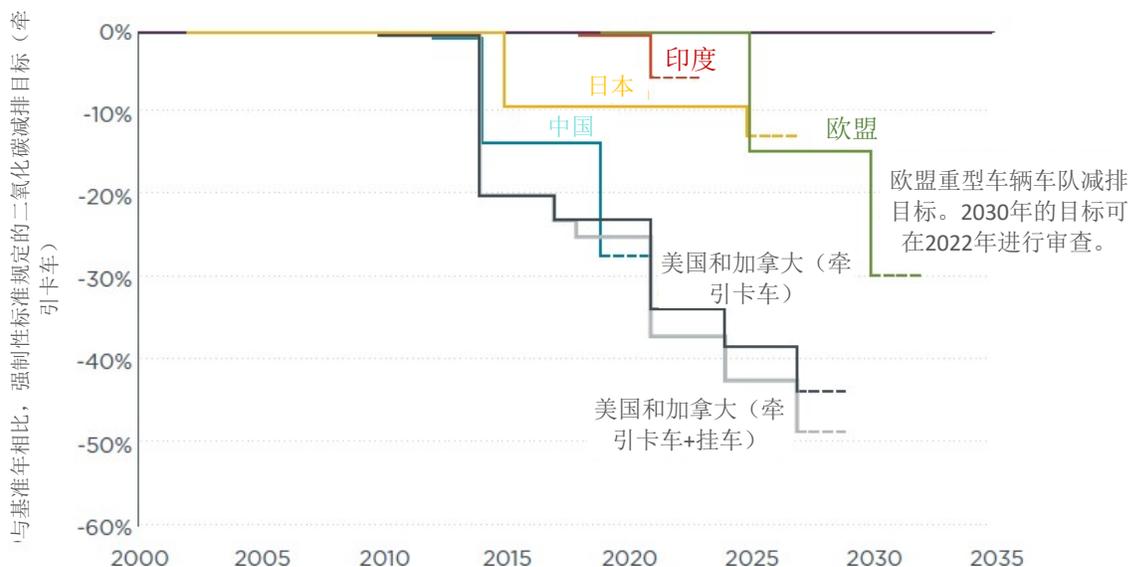


图26 全球关于重型车辆的强制性标准中设定的二氧化碳减排指标比较
 据来源：国际清洁交通委员会，2019年

2019年，欧盟推出了首个关于重型车辆二氧化碳排放量的标准。该标准于2019年8月开始实施。该标准根据2019年7月~2020年6月的监测和报告数据，将每行驶一吨公里平均排放的二氧化碳量作为单位，明确规定了整辆车的尾气排放量。该标准也规定了两个实施阶段的限值：2025年~2029年，比基准年的二氧化碳排放量减少15%，到2030年，比基准年的二氧化碳排放量减少30%。2030年目标将在2022年进行回顾与修订。

现有国际燃料经济性和二氧化碳排放标准普遍采用分阶段的方法，一个阶段比一个阶段的要求严格，除此之外，欧盟法规的突出之处在于，它还采用了一套分阶段激励采用零排放和低排放车辆（二氧化碳排放量低于所有车辆平均排放量的一半）的方法。

2019年~2024年，该法规引入了一项超级积分系统，对生产零排放和低排放汽车的制造商给予指标因数奖励¹⁸⁴，以帮助车企降低车辆的平均排放量，使其达到2025年的目标。从2025年开始，一个只有奖励的基准系统将取代超级积分系统，即如果一个制造商销售的零排放或低排放车辆超过基准销售数量的2%，则可调低其二氧化碳排放目标，¹⁸⁵最多调低3%。该法规还规定对不遵守规定的进行严厉的经济处罚：如果超过就2025年和2030年分别设定的排放目标，每超过一克二氧化碳/吨公里（gCO₂/tkm），罚款4250~6800欧元。

5.1.6 低排放区

除了直接控制重型车辆排放的尾气中污染物的标准外，欧洲还制定了一项关于设立低排放区的政策作为补充。自1996年以来，该政策同时鼓励设立零排放区或低排放区，并帮助减轻主要城市地区的空气污染。这些零排放区或低排放区规定进入指定城区的车辆，如重型施工或送货卡车，须达到更严格的排放标准。这反过来又加快了旧传统车辆的淘汰速度。在某些情况下，没有达到指定区域更严格排放标准的车辆可能需要进行改装或缴纳更高的过路费和额外的道路费。目前，奥地利、比利时、捷克共和国、丹麦、芬兰、法国、德国、希腊、意大利、荷兰、挪威、葡萄牙、瑞典和英国的250多个城市已经或计划设立覆盖卡车的低排放区。

低排放区的具体例子包括德国汉堡市，2018年4月，该市部分限制未达到欧六标准的卡车驶入特定城市路线。德国其他主要城市，包括柏林、波恩和斯图加特，随后采取了更严格的限行政策。低排放区的一个成功研究案例是伦敦市。伦敦于2008年在市中心设立了低排放区。伦敦的低排放区已经帮助减少黑碳排放40-50%，氮氧化物排放2.4%和可吸入颗粒物（PM₁₀）排放1.9%。¹⁸⁶更值得注意的是，一项研究发现，2013年，生活在二氧化氮排放量超过欧盟规定限值地区的儿童比例从2009年的99%下降到了34%。这表明，设立低排放区显著提高了人们的健康状况。¹⁸⁷

¹⁸⁴ 根据车辆的具体排放水平，零排放车辆的乘数为2，低排放车辆的乘数为1~2；超级积分的上限为3%。

¹⁸⁵ 每超过基准阈值一个百分点，制造商的平均特定二氧化碳排放目标就可调低1%，最多可调低3%。

¹⁸⁶ 《收费、低排放区、其他通行归管计划》。（2021年）。《欧洲城市通行法规》。《收费、低排放区、其他通行归管计划》。<https://urbanaccessregulations.eu/low-emission-zones-main/impact-of-low-emission-zones>

¹⁸⁷ Mudway I., Dundas I., Wood H.等人。（2019年）。《伦敦的低排放区对空气质量和儿童呼吸系统健康的影响：连续年度横断面研究》，《柳叶刀》4（1）：E28-E40。
[https://www.thelancet.com/journals/lanpub/article/PIIS2468-2667\(18\)30202-0/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanpub/article/PIIS2468-2667(18)30202-0/fulltext)

鉴于低排放区带来的好处，包括伦敦、牛津、阿姆斯特丹、马德里、布鲁塞尔和巴黎在内的欧洲主要城市都开始引入零排放区，在2019年~2030年期间分阶段实施，只允许零排放车辆或其他种类的交通工具驶入。¹⁸⁸ 伦敦于2019年4月推出的超低排放区覆盖了伦敦市中心的大部分地区，进入超低排放区的车辆每周7天、每天24小时都必须达到欧六排放标准，否则每天就要支付100英镑的罚款。2021年10月，伦敦将把超低排放区扩大到市中心以外的更多地区。伦敦推出超低排放区后前六个月的初步结果显示，路边的二氧化氮浓度降低了29%-36%，道路运输产生的氮氧化物减少了31%，道路运输产生的二氧化碳减少了13%。¹⁸⁹

5.1.7 地方在目标设定方面发挥着领导作用

在地方层面，美国各州在制定宏伟的目标、推动采用零排放车辆（包括重型卡车）方面发挥了领导作用。加利福尼亚州宣布，所有中型和重型车辆到2045年实现零排放在任何地方都是可行的，所有运货卡车到2035年实现零排放在任何地方都是可行。在此之后，美国15个州于2020年底签署了一项联合谅解备忘录，承诺了其各自实现车辆零排放的目标。这15个州承诺，到2050年销售的所有中型和重型车辆都是零排放车辆，到2030年实现其中期目标，即30%的中型和重型车辆是零排放车辆。通过该谅解备忘录还建立了一个联合工作组，帮助各国制定和实施零排放车辆行动计划，包括激励措施、基础设施、筹资渠道和财务管理模式、外联、统一标准和数据收集。这个例子表明，除了国家法规和计划之外，设定更宏伟的目标和地方层面的合作也有助于推动零排放重型车辆市场的发展。

5.1.8 能源效率提高和空气质量协同效益可能给中国重型卡车带来的好处

5.1.8.1 分析方法

为了解提高能源效率和采用新能源车辆技术可能给重型卡车的能源消耗、二氧化碳排放和其他空气污染物的减少带来的好处，我们采用自下而上的能源终端使用模型，中国2050年需求，资源能源分析模型，对到2030年的重型卡车行业进行了情景分析。作为一个模拟能源需求、供应和转型领域的国家模型，“中国2050梦想”模型利用货运活动的宏观经济驱动因素对城内和城际重型卡车进行了清晰地模拟。用库存周转率模型来预测重型卡车的未来销量和隐含总库存，由于缺乏其他车型的数据，以牵引式挂车为代表进行了能耗分析。

¹⁸⁸ Bannon, E. (2019年9月10日)。《低排放区取得了成功，但现在低排放区必须过渡到零排放区》，交通运输与环境。<https://www.transportenvironment.org/publications/low-emission-zones-are-success-%E2%80%93-they-must-now-move-zero-emission-mobility>

¹⁸⁹ 收费、低排放区、其他通行归管计划。(2021年)。《欧洲城市通行法规》。《收费、低排放区、其他通行归管计划》。<https://urbanaccessregulations.eu/low-emission-zones-main/impact-of-low-emission-zones>

利用该模型，我们设计了三套主要的**能源策略**情景，以评估从车辆技术和运行方面以及重型卡车采用新能源汽车（即纯电动和氢燃料电池）方面提高能源效率的潜在影响。这些情景包括：

1. **参考情景：**该基线情景假设现有的能源效率和因当前政策采用的一些液化天然气卡车对重型卡车产生的影响将会继续，每年平均能效提高0.6%~0.7%，但不会实现重型卡车的电气化。
2. **能效提高和物流改善情景：**这两个子情景中，具有巨大潜力的更多车辆信息的捕集和运营能源效率节约得以实现，使能效平均每年提高1.4~1.5%，此外，由于物流得到改善，使重型车辆周转再降低15%。
3. **能效提高、物流改善以及新能源车辆采用情景：**该情景基于能效提高和物流改善情景的两个子情景，但还附加了一个假设，即纯电动卡车的采用将迅速增长，到2030年纯电动卡车销量将占新卡车销量的5%左右，占总库存的2.5%。由于氢燃料电池技术仍处于原型开发阶段，进一步开发的成本更高且不确定，因此本分析并未考虑在2030年前投入使用氢燃料电池技术。

虽然上述三套能源战略情景反映了整个车辆能源效率和采用的特定燃料技术的变化以及随后的能源消耗和二氧化碳排放变化，但它们不足以分析这些能源战略对空气质量的协同效益。具体而言，未来实施和遵守可能直接影响空气质量协同效益分析的车辆排放标准时可能有不确定性，为此，我们设计了两种**减少空气污染的子情景**。这些减少空气污染潜力高和减少空气污染潜力低的子情景是为能效提高和物流改善情景以及效率提高、物流改善和新能源汽车采用情景设计的，代表了达到中国重型卡车排放标准的两种可能途径。

由于缺乏相关数据，我们采用的分析报告，其中针对中国一个具有代表性的中等城市的车辆排放情况进行了分析，¹⁹⁰其中包括模拟分析针对不同类型的车辆实施排放标准的各个阶段，并用其车队的周转率作为中国总重型货运车队的周转率。我们设计了两种子情景，即在重型卡车车队中一直执行现有排放标准和持续执行日益严格的排放标准，来代表能效提高和新能源汽车技术采用将使空气污染情况减轻的水平。这两个子情景对能源和二氧化碳的影响是相同的，因为在给定的能源战略的子情景中，只有空气污染物排放强度不同。

¹⁹⁰ Sun S., Jin J., Xia M.等人。（2020年4月）。《中国某中等城市车辆排放情况：现状及未来的发展趋势》，*Environment International* 137: 105514. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105514>

1. **情景1 减少空气污染潜力高：**假设排放标准的实施一直保持在2020年的水平，导致冻结存量重型车辆每行驶一公里的氮氧化物和PM2.5加权平均排放强度与事实相反。这意味着，重型卡车整体空气污染物排放量将增加，因为假设中国没有制定更严格的国六排放标准来减少新车带来的空气污染，提高能效和采用新能源车辆就将有更大的减排潜力。虽然考虑到中国计划实施国六标准，这一假设并不现实，但该假设仍是能源战略减少空气污染潜力的上限。
2. **情景2 减少空气污染潜力低：**假设继续全面实施排放标准，随着更多符合中国国六标准的新车上市，到2030年，存量重型车辆的氮氧化物和PM2.5加权平均排放强度将下降。与国五排放标准相比，国六将柴油车每行驶一公里氮氧化物的排放限值降低了77%，将PM2.5排放限值降低了67%。随着在售的新重型卡车越来越多地采用国六标准，整体给空气造成的污染水平显著降低，剩余的少量空气污染物可以通过提高能效和采用新能源汽车进一步减少。

图27比较了减少空气污染潜力高和减少空气污染潜力低两种情景下，执行不同排放标准时重型卡车的存量分布，表5比较了两种情景下计算得到的重型卡车存量加权平均排放强度。

按排放标准水平对假定重型车辆存量分布的比较

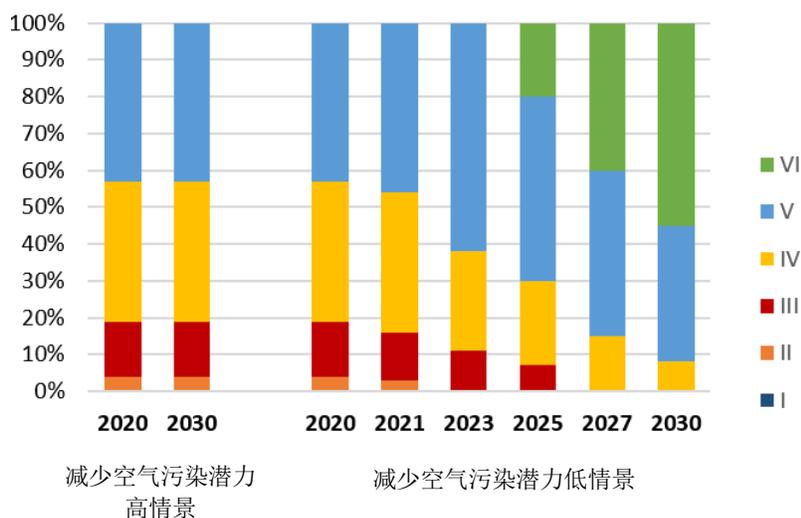


图27 不同情景下，执行不同排放标准时，重型货运车队分布比较

克/公里		减少空气污染潜力低情景		减少空气污染潜力高情景		
		2020 – 2030		2020	2025	2030
氮氧化物	柴油	5.65	5.65	5.65	4.41	2.79
	液化天然气	6	6	6	4.76	3.95
PM2.5	柴油	0.12	0.12	0.12	0.07	0.03
	液化天然气	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04

表5 不同情景下，存量加权平均排放强度比较

5.1.9 可能产生的能量、二氧化碳和空气质量协同效益结果

通过情景分析，量化了两种能源策略在降低氮氧化物和PM2.5污染方面可能产生的能源消耗、二氧化碳排放减少以及其他空气质量协同效益。图28比较了不同情景下，重型卡车在各关键年份的最终能源消耗结果，并显示出与参考情景相比，能效提高与物流改善情景以及能效提高+新能源汽车采用情景下，重型卡车的能源消耗减少量随时间变化的增长情况。2020年，能效提高和物流改善情景使中国重型卡车的最终能源需求减少了7%，即减少了1680万吨油当量。减少的主要是重型卡车的柴油消耗量，与参考情景相比，柴油消耗量减少了1560万吨，液化天然气消耗量减少了120万吨油当量。到2030年，由于能效提高和物流改善，最终能源需求每年减少4800万吨油当量，相当于较参考水平减少20%，这是由于能效提高和物流改善以及车辆总量增加。2030年，柴油总需求减少6000万吨油当量，但部分被重型卡车液化天然气需求增加的1200万吨油当量抵消。

到2030年，新能源车辆在新车销量中的占比相对较小，仅为5%，因此新能源车辆的采用对最终能源需求减少的增量贡献非常小。在能效提高和物流改善情景下，新能源车辆每年将额外减少消耗230万吨石油当量的能源。然而，与参考情景相比，由于能效提高、物流改善和新能源车辆的采用，每年柴油总需求量减少6400万吨油当量，相当于重型卡车总柴油消耗量的28%和运输总柴油消耗量的20%。从2020年到2030年，与参考情景相比，能效提高+新能源汽车采用情景下的柴油消费量累计减少4.46亿吨油当量，超过了中国全年柴油消费量的总和。

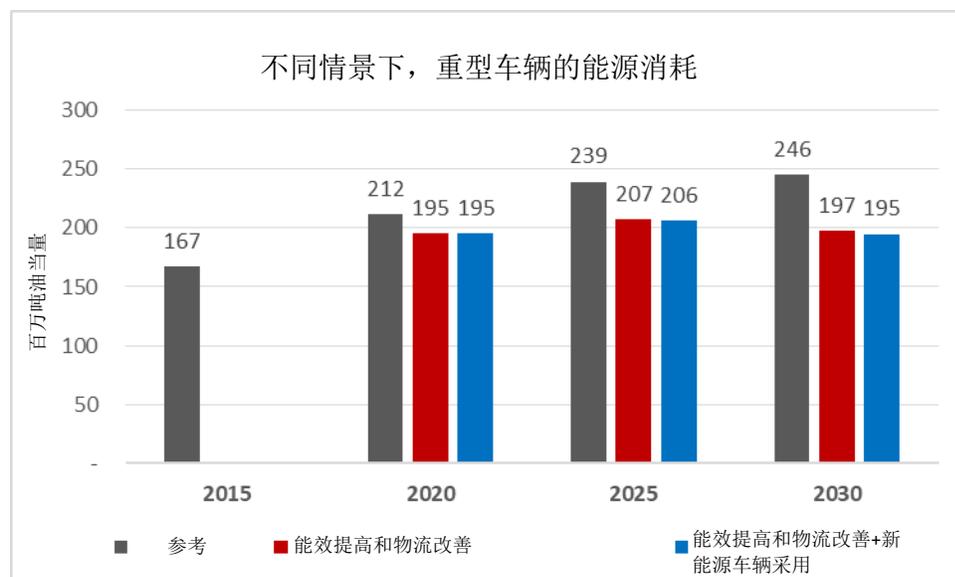


图28 不同情景下，重型卡车最终能源需求比较

与最终能源需求的减少相对应，能效提高和物流改善也有助于减少重型卡车的总二氧化碳排放量。与参考情景相比，2030年总排放量减少8%（5070万吨二氧化碳），到2030年累计减少22%（1.57亿吨二氧化碳）。2030年通过提高能源效率和改善物流减少的二氧化碳排放量相当于今天运输产生的二氧化碳排放总量的近10%。如果不考虑新能源车辆用电间接排放的二氧化碳，¹⁹¹ 那么随着新能源重型卡车数量的增加，新能源车辆的采用所带来的二氧化碳减排效果在随后几年会变得更加明显。到2030年，新能源车辆的采用将使二氧化碳排放量再减少2%，即在能效提高和物流改善情景的减排基础上再减少1400万吨二氧化碳排放。

¹⁹¹ 本文中提供的二氧化碳排放结果仅包括车辆直接排放的二氧化碳，不包括电力行业那些可能由纯电动重型卡车用电间接排放的二氧化碳。电动卡车的总（直接+间接）二氧化碳排放影响与电力行业的平均二氧化碳排放强度密切相关。虽然其他地方已对该强度进行了评估，但由于未来发电燃料的结构不确定，本报告并未考虑这一点。

从2020年到2030年，与参考情景相比，中国重型卡车的能效提高和物流改善累计减少排放11.43亿吨二氧化碳，而新能源车辆的采用在此期间累计减少排放7500万吨二氧化碳。

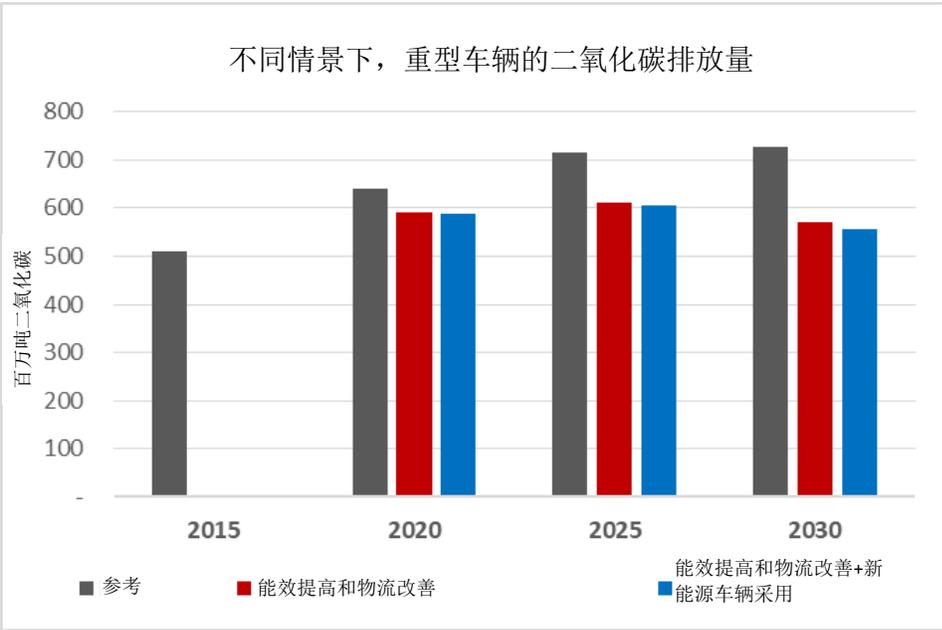


图29 不同情景下，重型卡车的二氧化碳排放情况比较

除了会减少能量消耗和二氧化碳排放，能效提高、物流改善和新能源车辆采用还可同时减少柴油和天然气燃烧过程中排放的氮氧化物和颗粒物等空气污染物的排放量。对于那些达不到最近出台的以及更严格的排放标准的老式重型卡车来说，这种减排潜力尤其显著，因为这些卡车的燃油效率往往也较低，单位行驶里程的柴油消耗更多，而且没有尾气排放控制技术。利用这两个子情景来代表能效提高和物流改善以及新能源车辆采用可能带来的高减排水平和低减排水平，预测的氮氧化物和PM2.5减排情况如图30和图31所示。

仅重型卡车的能效提高和物流改善就能在2025年减少排放氮氧化物13.1万吨~16.7万吨，在2030年减少排放氮氧化物12.2万吨~23.8万吨。与2030年全面实施中国国六排放标准，预计全年减少230万吨氮氧化物排放相比，这表明能效提高和物流改善可以进一步减少10%的氮氧化物排放。在提高能效和改善物流的基础上采用新能源汽车，可以使2030年的氮氧化物排放量减少的更多一些，最多可减少32.7万吨，相当于北京排放的所有氮氧化物，或等于2015年中国所有车辆氮氧化物排放的1%。虽然本文未对此进行量化，但氮氧化物浓度的降低还将进一步减少人类接触可加重呼吸道疾病、导致哮喘和增加呼吸道感染可能性污染物等健康方面的好处。

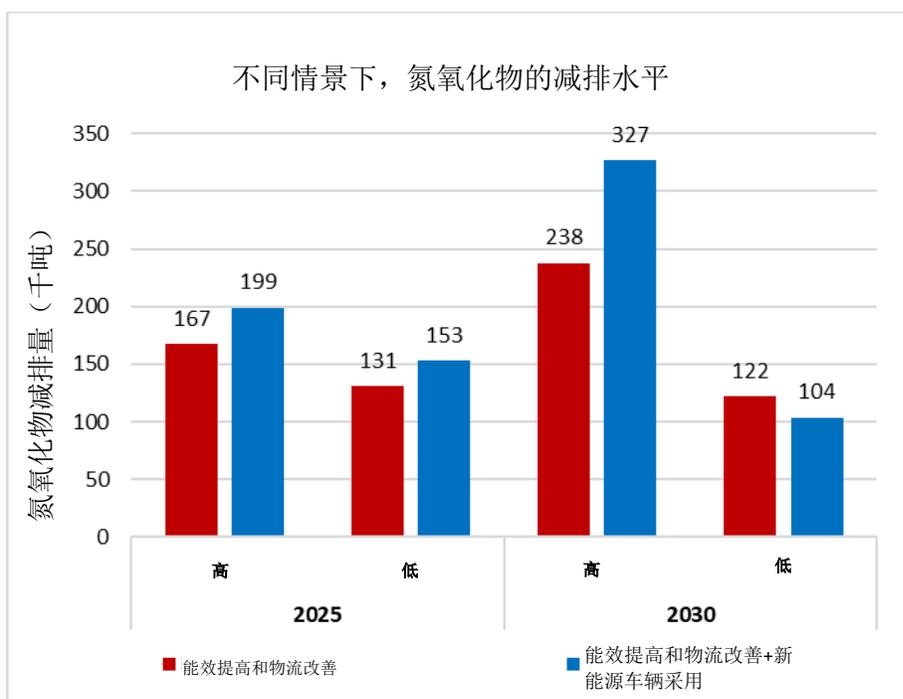


图30 不同情景下，重型卡车可能减少氮氧化物排放的水平

与在2025年和2030年仅实施排放标准相比，重型卡车的能效提高和物流改善也可使PM2.5的年排放量进一步减少近10%。仅重型卡车可能减少排放的PM2.5总量（2025年，1900~3400吨，2030年，1200~4700吨）就与2015年京津冀地区的PM2.5总排放量相当。新能源车辆的采用可以进一步减少PM2.5的排放，到2030年，在减少空气污染高潜力情景下，能效提高和物流改善减少的PM2.5排放量可能会增加一倍以上。2030年，新能源车辆的采用可减少1.21万吨PM2.5排放，使PM2.5排放量在仅实施排放标准的基础上再减少17%，这表明，除能效提高和物流改善外，新能源车辆的采用也可以显著减少一种关键空气污染物的排放。减少重型卡车的PM2.5排放量有助于降低PM2.5的浓度，继而防止因心肺疾病和呼吸道疾病（如支气管炎和哮喘发作）入院的人数增加，促进人们的身体健康。

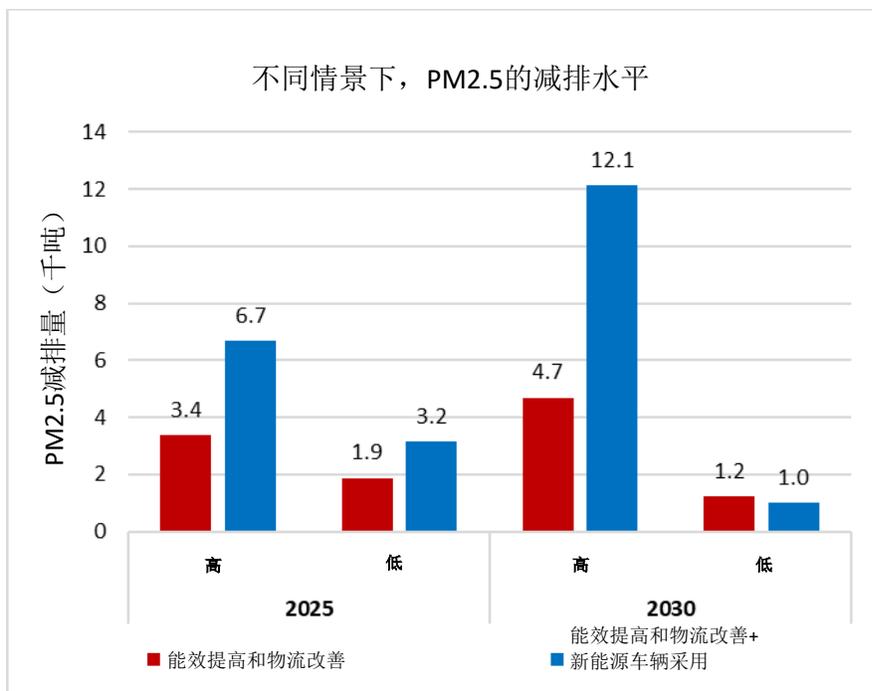


图31 不同情景下，重型卡车PM2.5排放量可能下降的水平

5.2 水泥行业

5.2.1 中国水泥行业概况

5.2.1.1 市场概况

自1986年以来，中国一直是世界上最大的水泥生产国。¹⁹² 2020年，由于新冠疫情的影响，2020年第一季度的水泥产量大幅下降，较2019年第一季度下降25%（图32）。但从2020年4月开始，中国的水泥产量开始回升。¹⁹³ 2020年的水泥产量再创新高，达到23.80亿吨，比2019年高出1.5%（图33）。新冠疫情对水泥行业能源消耗和二氧化碳排放量以及空气污染物排放量的影响有限。

相比之下，仅在2019年和2020年这两年，中国就消耗了47亿吨水泥，相当于美国在整个20世纪（1900年~2000年）的消耗量。

¹⁹² Lu, H., Price, L., Zhang, Q. (2015年)。《捕捉无形资源：中国工业余热潜力分析》，*Applied Energy* 161. <http://doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.060>

¹⁹³ 国家统计局（2021年）。《中国统计年鉴-2020》。北京：中国统计出版社。国家统计局。
<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexeh.htm>

从全球来看，中国的水泥产量约占全球水泥总产量的56%。¹⁹⁴

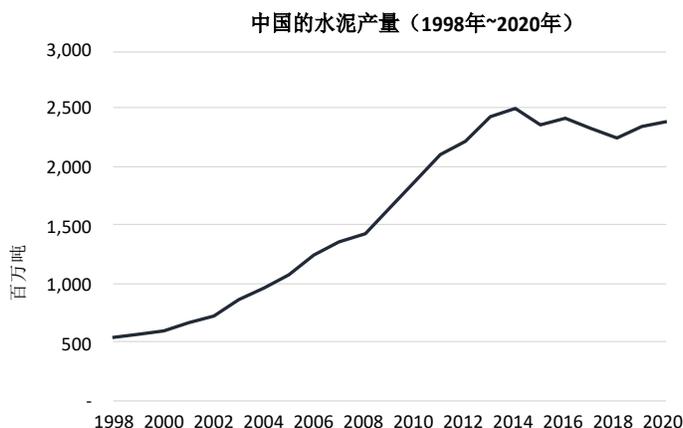


图32: 1998年~2020年中国的水泥产量

数据来源: 中国国家统计局历年数据。

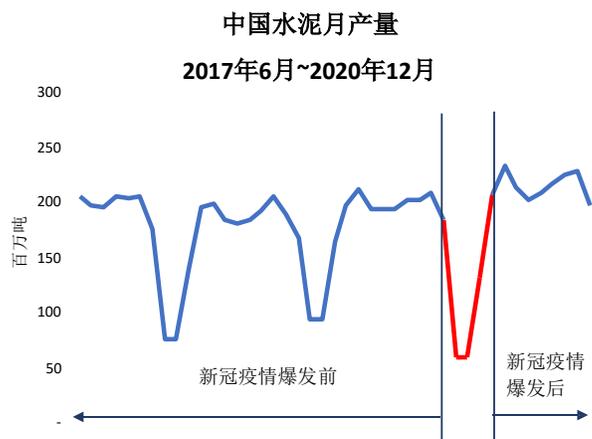


图33: 中国水泥月产量

中国国内有一大批水泥企业。从2010年起，中国政府一直在“五年计划”中鼓励行业整合，利用“淘汰落后产能”和差别电价等政策。在前述政策的指导下，中国的水泥企业数量从1997年的7000家减少到2006年的5130家，2012年减少到3507家，2019年进一步减少到2800家。¹⁹⁵

截至2020年底，全国熟料产能达18.46亿吨。中国前50强水泥企业的熟料产能占中国熟料总产能的76%。前10强水泥公司的熟料产能占中国熟料总产能的57%，其中中国纳高建材、安徽海螺、冀东水泥、华润水泥和华新水泥等公司高居榜首。

¹⁹⁴ 美国地质调查局。2020年。《矿产商品概述：水泥》。美国地质调查局。

<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-cement.pdf>

¹⁹⁵ 新浪财经新闻（2020年7月29日）。《水泥业整合大幕开启，传统老经济能否重焕生机？》，新浪财经新闻。<https://finance.sina.com.cn/chanjing/cywx/2020-07-29/doc-iivhvpwx7987772.shtml>；中国水泥协会。（2014年3月）。《中国水泥年鉴2012~2013》。中国建材工业出版社。中国北京。中国水泥协会。（2008年3月）。《中国水泥年鉴2007》。中国建材工业出版社。中国北京。

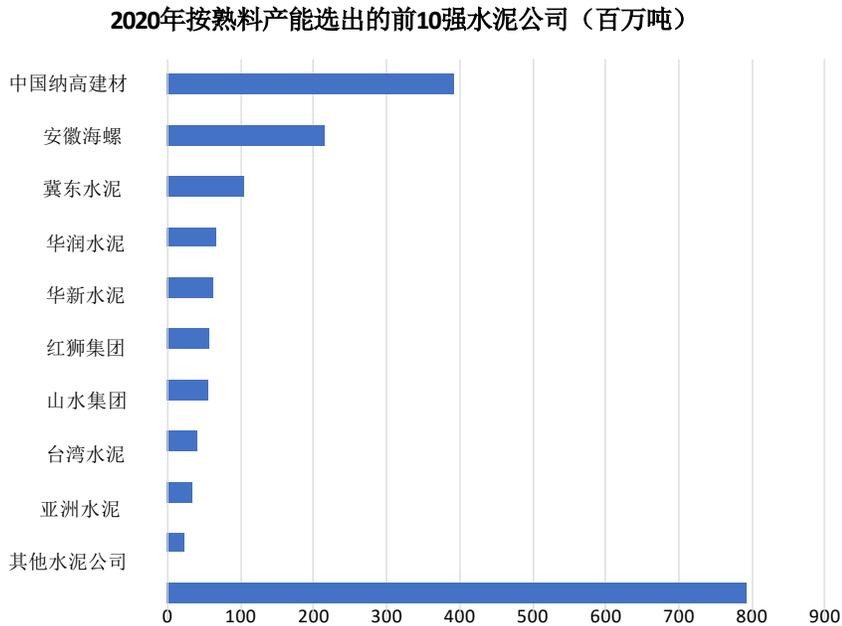


图34 2020年按熟料产能选出的前10强水泥公司

数据来源：数字水泥网，2021年。

5.2.1.2 技术过渡

在过去20年左右的时间里，中国水泥行业进行了技术改造，主要是通过建设新设施和安装新设备。采用的技术先是从立窑转变到干窑，再转变到新型悬浮预热器-预分解炉回转窑（NSP）。迄今为止，中国的熟料¹⁹⁶主要由NSP窑生产的。2015年，悬浮回转窑的份额已从2005年的40%增加到95%，预计到2020年将继续增加到几乎100%，¹⁹⁷如图35所示。

¹⁹⁶ 熟料，水泥的关键成分，是消耗能量和碳最多的材料，通常占水泥行业总能耗的90%（Worrell和Galitsky，2008年）。

中国水泥协会。（2017年）。《水泥工业“十三五”发展规划》，中国水泥协会。

<http://www.ccement.com/news/content/9012415094564.html#top>；中国水泥协会。（2014年3月）。

¹⁹⁷ 《中国水泥年鉴2012~2013》。中国建材工业出版社。中国北京；中华人民共和国工业和信息化部。（2011年11月8日）。《水泥工业“十二五（2011年~2015年）”发展规划》，中华人民共和国工业和信息化部。http://www.gov.cn/zwgk/2011-11/29/content_2005593.htm；Sui, T. 个人沟通，2021年。

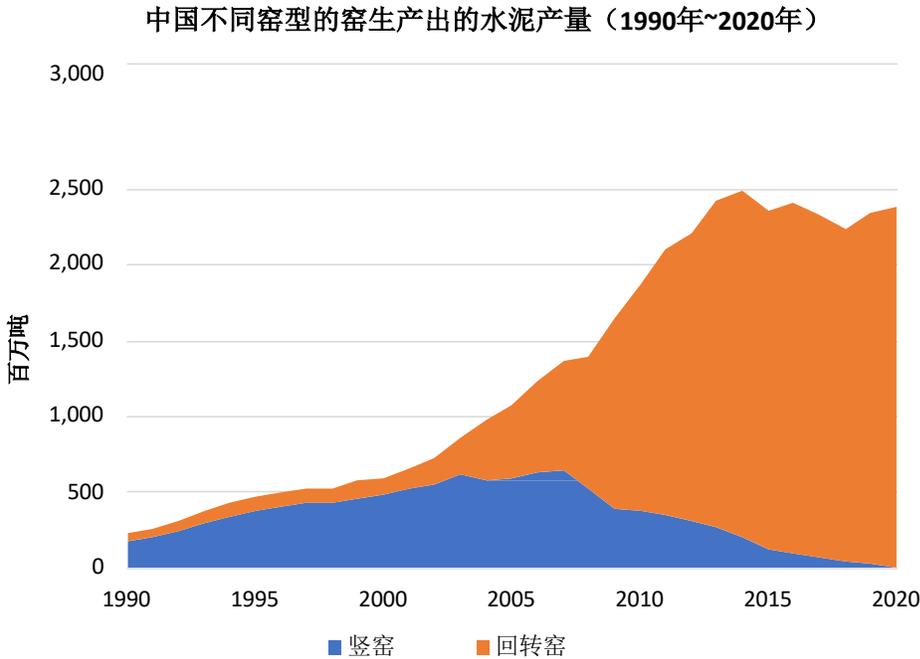


图35 中国不同窑型的窑生产出的水泥产量

数据来源：中国水泥协会，2017年；中国水泥协会，2014年；工业和信息化部，MIIT, 2011b；Sui, 2021年

许多水泥设施也安装了预分解炉和/或预热器，利用石灰石煅烧的余热来预燃烧和/或预热燃料和原材料。具体而言，余热发电技术在中国水泥行业得到了推广。从税收优惠和清洁发展机制收入开始，到国家对新熟料产能的明令支持，余热回收（WHR）技术在中国水泥行业的覆盖率已超过80%。¹⁹⁸ 相比之下，美国水泥行业采用余热回收技术的采用率则小得多。¹⁹⁹ 截至2008年，美国只有4家工厂安用了余热发电技术设施。²⁰⁰

此外，多通道煤粉燃烧器、高效冷却器、节能磨矿优化、精磨立磨机、NSP窑节能监测与优化系统等关键节能技术为中国水泥行业提高能效发挥了重要作用。

¹⁹⁸ 工业和信息化部（2020年7月14日）。《工业和信息化部：中国正在逐步向绿色制造发展》；“工业和信息技术产业4年累计节约能源成本4000亿元”

<http://sme.miit.gov.cn/cms/news/100000/0000000224/2020/7/14/3d8b92fcbb9447c393e46f2a48bd08a3.shtml>

¹⁹⁹ 工业生产力和国际金融公司。（2014年6月）。《水泥行业的余热回收：市场和供应商分析》。工业生产力和国际金融公司。<https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2014/06/cement.pdf>

²⁰⁰ Ilona, J., Choate, W.T., Davidson, A.（2008年）。《余热回收：美国工业的技术和机遇》。BCS Incorporated。<https://doi.org/10.2172/1218716>

5.2.1.3 政策指导

中国政府已经实施了一系列政策措施来指导水泥行业的发展，包括供给侧改革、能源效率提高、环境法规、技术推广和财政鼓励。

下文重点介绍了最新的水泥错峰生产政策（供给侧改革）、最新的最低能效标准和省级政府出台的超低空气污染排放标准（节能环保）。

供给侧改革

供给侧改革的目的是限制过剩产能的增长，主要是水泥行业的熟料产能，引导行业在生产更高质量、更高附加值的产品方面做大做强。中国政府已出台了几项政策措施来指导水泥行业的发展，如淘汰落后产能，以产能置换方式建设新工厂，以及水泥行业准入法规。

最近，工业和信息化部以及生态环境部于2020年12月28日联合宣布，将继续实施水泥错峰生产计划并将其常态化。²⁰¹ 2016年，国务院大规模实施水泥错峰生产政策，要求供暖区在供暖季节停止熟料生产，以控制重点地区的空气污染情况。政策要求在非供暖区生产熟料也应避开春节和炎热的夏季。

在2020年的新指导方针的指导下，对错峰生产区和错峰生产时间进行了常态化。其中，辽宁、吉林、黑龙江、新疆四省将于11月1日至次年3月31日（5个月，150天）实施限产；北京、天津、河北、山西、内蒙古、山东、河南等省市将于11月15日至次年3月15日（4个月，120天）实施限产；陕西、甘肃、青海、宁夏四省实施时间为12月1日至次年3月10日（约3个月，90天）；而其他省份将在春节期间、炎热的夏季、雨季和重大活动期间实施该政策。该政策要求将所有熟料生产窑纳入实施范围。全年处置城市固体废物和危险废物的生产线不受该政策的约束，但该政策指出，这些生产线也需要减少水泥生产负荷。

²⁰²

²⁰¹ 工业和信息化部以及生态环境部。（2020年12月28日）。《两部委关于进一步做好水泥常态化错峰生产的通知》。工业和信息化部以及生态环境部。

https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/yclgy/art/2020/art_6bff7f6bd055439ebd806b7fb230bc37.html

²⁰² 同上。

该政策的主要目的是避免熟料生产与集中供暖同时造成空气污染，以及降低熟料产能。限产政策的实施和监督往往依赖于水泥公司本身，缺乏适当的奖惩制度。据报道，一些水泥公司为增加产量，并未实施该政策。²⁰³ 中国的产能过剩问题仍然存在，尤其是在北方地区。最新数据显示，2020年中国水泥产量为23.77亿吨，比2019年增长1.6%。²⁰⁴

5.1.1.4 能源节约与环境保护

在节能环保方面，中国政府制定了降低能源消耗、二氧化碳排放强度以及大气污染物绝对排放量等目标。国家“十三五”规划的目标是，单位国内生产总值能耗比2015年降低15%，单位国内生产总值二氧化碳排放比2015年降低18%，二氧化硫和氮氧化物排放均比2015年降低15%。²⁰⁵ “十四五”规划的目标是，能源消耗降低13.5%，碳减排目标保持不变。虽然“十四五”规划未明确规定二氧化硫、氮氧化物和颗粒物的减排目标，但“十四五”规划呼吁“继续改善环境质量”、“加强多种大气污染物和碳减排的协调控制”、“细化环保、节能、减排管理工作”，以及“积极参与和引领包括应对气候变化在内的生态环境保护方面的国际合作”。²⁰⁶

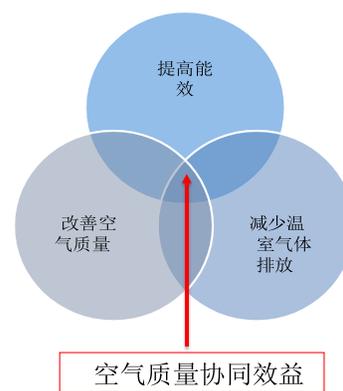


图36 中国的能源与环境目标

从“十三五”和“十四五”规划可以明显看出，中国政府在同时追求三个目标：提高能效（节能）、改善空气质量和减少温室气体排放。如图36所示，所有三个目标的重叠部分即为空气质量协同效益，以及通过在关键行业（如水泥行业）采用和扩大能源效率措施实施减少的二氧化碳排放。

在水泥行业层面，政府制定的目标是，到2020年将熟料能源消耗从2015年的水平降低7%，降低至105公斤煤当量/吨。²⁰⁷

²⁰³ 新华网。（2021年1月29日（a））。《水泥“量价齐稳”需坚持错峰生产》。新华网。

http://www.xinhuanet.com/energy/2021-01/29/c_1127039953.htm

²⁰⁴ 国家统计局（2021年）。《中国统计年鉴-2020》。北京：中国统计出版社。国家统计局。

<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexeh.htm>

²⁰⁵ 国务院。（2016年1月5日）。《国务院关于印发“十三五”节能减排综合工作方案的通知》。国务院。
http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm

²⁰⁶ 新华网。（2021年3月5日（b））。《“十四五”规划和2035远景目标的发展环境、指导方针和主要目标》。新华网。
http://www.xinhuanet.com/politics/2021-03/05/c_1127172897.htm

²⁰⁷ 同上。

其他政策，如促进余热回收利用、实行差别电价、增加使用水泥窑协同处理城市固体废物等，也得到鼓励和推广。²⁰⁸

现行水泥行业最低能源消耗标准为《水泥单位产品能源消耗限额》（GB16780-2012），2007版《水泥单位产品能源消耗限额》的修订版本，自2012年起实施。目前正在对2012版的标准进行修订并征求公众意见。即将出台的新标准对能源效率水平作了修订，将熟料生产的综合能耗先进值（过去称为“先进值”）降至103公斤煤当量/吨（如建议），2012版标准中是110公斤煤当量/吨。

此外，各省也陆续出台水泥行业的超低空气污染防治标准。例如，从2020年3月开始，河北省将水泥窑PM2.5、SO₂和氮氧化物排放的最高浓度设定为10、35和100 mg/m³。²⁰⁹河北省还对平板玻璃行业和锅炉制定了超低排放标准。2021年4月，中国水泥协会召开了水泥行业超低排放标准团体标准制定工作会议。²¹⁰表6总结了与中国水泥行业相关的重大政策措施。

政策	供给侧改革	能源节约	环境保护	技术推广	财政鼓励
国家	淘汰落后产能	国家能源消耗降低目标	国家减排目标	节能低碳技术推广目录	节能减排改造奖励
	错峰生产政策				采用清洁发展机制享受税收优惠
水泥行业	水泥行业准入法规	行业能源消耗目标	水泥清洁生产	水泥行业清洁生产技术推行方案	差别电价
		最低能源消耗标准			

表6 中国水泥行业的重大政策措施

数据来源：Tan等人，2016年。

²⁰⁸ 新华网。（2021年3月5日（b））。《“十四五”规划和2035远景目标的发展环境、指导方针和主要目标》。新华网。http://www.xinhuanet.com/politics/2021-03/05/c_1127172897.htm

²⁰⁹ 唐山市生态环境局。（2020年3月13日）。《有关水泥行业超低排放标准等三个标准的说明》。唐山市生态环境局。

<https://sthjj.tangshan.gov.cn/cms/jsp/site001/article.jsp?fchannelidentity=zhengcexiedu&articleId=8a8d825b710600b501710a589f4000be&a1b2dd=7xaac>

²¹⁰ 数字水泥网，2021年。

5.2.1.4 能源使用与排放物的影响

2017年，中国水泥行业消耗了约1.88亿吨煤当量，占中国制造业能源消耗的9%，占中国总能源消耗的4%。²¹¹中国目前的水泥制造业主要以煤为基础。从2008年到2020年，煤占总燃料投入的90%以上，²¹²占水泥行业总能源投入的80%（图37）。城市固体废物和生物质（如农业残留物、生物质作物等）约占总燃料投入的10%。²¹³

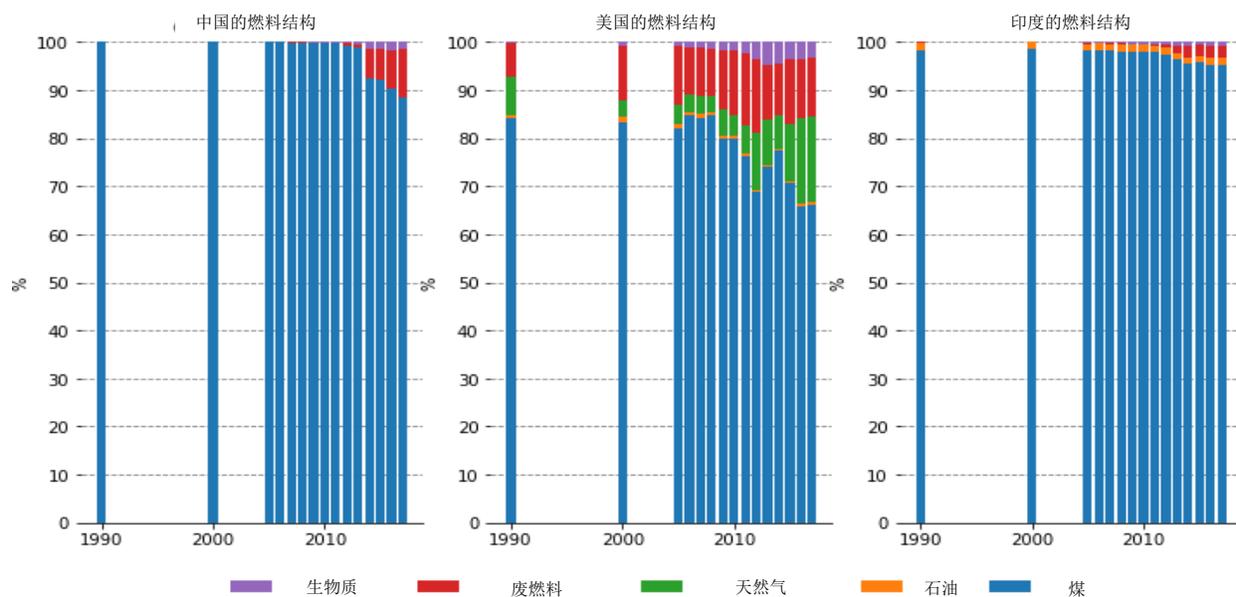


图37 中国、美国和印度水泥行业的燃料结构

数据来源：Masanet和Cao，2021年。

水泥行业排放的二氧化碳有两个来源：1）化石燃料的使用，主要是水泥行业用烧煤产生巨大热量将原材料加热到1450°C时排放的二氧化碳；2）石灰石煅烧，碳酸盐（主要是在石灰石中发现的CaCO₃）被分解成氧化物（主要是石灰，CaO）和CO₂时排放出的二氧化碳。²¹⁴

尽管中国政府已实施了多项重大政策措施（如表7所示），但中国水泥行业的二氧化碳（CO₂）和空气污染物排放量依然很高。水泥行业能源相关（以燃料为基础）的CO₂排放量占中国制造业CO₂排放量的8%，占中国全国能源相关CO₂排放量的6%。如果纳入生产过程中排放的CO₂，水泥行业的CO₂排放总量占中国制造业CO₂排放总量的16%，占全国化石燃料和生产过程中排放CO₂总量的12%（表8）。

²¹¹ 国家统计局。（2019年）。《中国能源统计年鉴-2018》。中国统计出版社。中国北京。

²¹² Masanet, E.和Cao, Z.（2020年）。《混凝土脱碳：美国、印度和中国水泥和混凝土循环的深度脱碳途径》。西北大学技术报告。https://www.climateworks.org/wp-content/uploads/2021/03/Decarbonizing_Concrete.pdf

²¹³ 水泥可持续发展倡议行动组织。（2018年）。GNR项目。水泥可持续发展倡议行动组织。

<https://gccassociation.org/gnr/>

²¹⁴ Andrew, R.M.（2019年）。《1928年~2018年水泥生产造成的全球二氧化碳排放》。《地球系统科学数据》第11期，第1675~1710页。<https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>

水泥行业还会产生大量的二氧化硫、氮氧化物和颗粒物。二氧化硫来自于煤中硫的氧化。值得注意的是，排放的70~80%的SO₂通过与预分解炉中的氧化钙反应被吸收；但在其他回转窑或竖窑中被吸收的比例要少得多（30%）。²¹⁵

水泥行业排放的氮氧化物有两个潜在来源。一个是燃烧空气中氮分子的氧化，即热力型氮氧化物的形成。另一个是燃料中氮化合物的氧化，即燃料型氮氧化物的形成。水泥窑的氮氧化物排放量取决于燃烧温度和氧气。水泥行业排放的颗粒物有多个来源，包括原料开采和破碎、原料储存、碾磨和混合（仅干式工艺）、熟料生产、精磨、包装和装载。熟料生产（煅烧和冷却）是颗粒物的最大来源。²¹⁶

具体而言，中国水泥行业的二氧化硫、氮氧化物和颗粒物的排放量分别占制造业排放总量的9%、16%和40%。在国家层面，水泥行业的二氧化硫、氮氧化物和颗粒物的排放量分别占全国排放量的3~4%、8~12%和17~27%（表7）。水泥行业是中国排放颗粒物的最大来源²¹⁷

此外，水泥行业还会排放少量挥发性有机化合物、氨、氯、氯化氢、重金属（颗粒或蒸汽）、燃料和原材料的残渣，以及其他不完全燃烧产生的有害污染物。²¹⁸

²¹⁵ Liu, H.Q. (2006年)。《水泥窑生产过程中SO₂排放的控制》。《中国水泥》第11期，第74~77页。（中文版）。

²¹⁶ Hasanbeigi, A., Lobscheid, A., Dai, Y., Lu, H., Price, L., (2012年)。《能源效率项目协同效益的量化:中国山东省水泥行业的案例研究》(LBNL-5949E)。劳伦斯伯克利国家实验室。https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/shandong_co-benefit_full_report_english.rev.pdf

²¹⁷ Lei, Y., Zhang, Q., Nielsen, C., and He, K. (2011年)。《1990年~2020年中国水泥生产中主要空气污染物和二氧化碳排放清单》。《大气环境》第45期，第147~154页。
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.034>

²¹⁸ Hasanbeigi, A., Lobscheid, A., Dai, Y., Lu, H., Price, L., (2012年)。《能源效率项目协同效益的量化:中国山东省水泥行业的案例研究》(LBNL-5949E)。劳伦斯伯克利国家实验室。https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/shandong_co-benefit_full_report_english.rev.pdf

指标	能源消耗	指标	二氧化碳	指标	二氧化硫	氮氧化物	颗粒物
占制造业能源消耗的比例	9%	占行业能源相关二氧化碳排放量的比例	8%	占行业空气污染物排放量的比例	9%	16%	40%
		占行业能源相关和生产过程中二氧化碳排放量的比例	16%				
占国家能源消耗的比例	4%	占国家能源相关二氧化碳排放量的比例	6%	占国家空气污染物排放量的比例	3-4%	8-12%	17-27%
		占国家能源相关和生产过程中二氧化碳排放量的比例	12%				

表7 中国水泥行业能源使用和排放物的影响

数据来源：国家标准局，2021年；国家标准局，2017年；Liu等人，2017年；Tan等人，2016年；Lei等人，2011年；Zhang等人，2007年；国家发展和改革委员会，2004年；以及作者估计。

5.2.2 水泥行业的国际最佳实践计划

5.2.2.1 限额与交易计划

限额与交易排放权交易计划着眼于通过一套限额与交易制度削减社会上（包括水泥行业）的温室气体排放。这种计划通常是强制参与的。

Cap-and-Trade Program

在加利福尼亚州，限额与交易计划覆盖了该州80%的温室气体排放。工业设施跟踪、报告和减少温室气体排放。该计划每年分配给水泥设施的配额上限调整系数不断下降。

在欧盟，排放交易制度覆盖了欧盟40%的温室气体。由于担心碳泄漏风险，水泥等行业获得了免费配额。然而，这种免费配额的分配弱化了水泥厂积极采取减少温室气体排放行动的动机。

5.2.2.2 绿色采购

绿色采购计划是政府部门强制采购环境可持续产品的计划。目前已有几个政府计划，如购买清洁加州、美国环境保护署环保采购计划、荷兰的智能采购和欧盟的绿色公共采购。



这些计划要求政府部门采购可持续的产品，这些产品上通常标有第三方关于高能效或对环境影响小的认证标识。

例如，“购买清洁加州”计划目前涵盖了钢铁、平板玻璃和矿棉（绝缘材料）。生产商必须提交环境友好产品声明和合格材料，以满足全球变暖潜势阈值的要求。美国环境保护署环保采购计划提供了绿色采购指南，并推荐了从摇篮到摇篮认证的标准。荷兰的智能采购基于生命周期评估结果，将二氧化碳减排和其他环境影响货币化；比较投标与环境成本。该计划目前涵盖45个产品。

5.2.2.3 标识和认证

标识和认证计划激励和认可行业内表现最佳的工厂，包括水泥厂。



例如，美国环境保护署的“能源之星”计划重点关注水泥厂的能源表现（用“能源之星”能源表现指标，通过具体的能源消耗来衡量）。排名前25%的水泥厂可获得认证认可。“能源之星”有一个水泥特殊工作小组和“能源之星”认证计划。美国环境保护署的“能源之星”计划完全是自愿参与的。

5.2.2.4 环保产品声明

环保产品声明记录产品的生命周期对环境的影响，以便进行核实和比较。目前大部分环保产品声明都是自愿作出的，除非某些计划强制要求。



全球水泥和混凝土协会为水泥/混凝土生产商开发了经过验证的EPD工具，以提供EPD。在加利福尼亚州，第966号议会法案要求在加利福尼亚州运营的每个水泥厂在2022年1月1日前就特定设施提交环保产品声明。波特兰水泥协会目前正在为四种水泥产品和一种低碳水泥产品更新全行业的环保产品声明。全球水泥和混凝土协会为水泥/混凝土生产商开发了一种经过验证的环保产品声明工具，以提供环保产品声明。

5.2.3 水泥行业重要的零排放措施

2020年9月，习主席宣布中国的目标是到2030年实现碳达峰，到2060年实现碳中和。²¹⁹ 中国建筑材料联合会于2021年1月16日宣布了一项倡议，承诺建材行业要在2025年之前实现碳达峰，水泥行业要更早完成目标，在2023年之前实现碳达峰。²²⁰

²¹⁹ 新华网。（2020年9月20日）。《习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话》。新华网。
http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm

中国的水泥行业在达到各种能源和环境目标方面面临着巨大压力，如前述能源消耗降低目标、淘汰落后产能、限产、提高利用率、协同处理废物、减少关键空气污染物排放、到2023年实现碳达峰、到2060年实现碳中和。

表8列出了一些支持水泥行业实现碳中和的低排放或零排放技术和措施。这些措施被归类为不同的关键战略，包括材料效率、能源效率、电气化、燃料转换以及碳捕获、利用和储存。下面几节重点就各个关键战略介绍了几个重要例子，并在措施、节约潜力和潜在实施障碍方面进行了详细介绍。

材料效率/需求减少	能源效率	电气化	燃料转换以及碳捕获、利用和储存
<ul style="list-style-type: none"> ï 用粉煤灰、高炉矿渣、天然火山灰、煅烧粘土代替熟料 ï 材料效率：质量更高、性能更好、寿命更长的材料/产品 ï 设计优化 	<ul style="list-style-type: none"> ï 某环节（如原材料碾磨、窑炉、精磨）和系统能源效率 	<ul style="list-style-type: none"> ï 扩大电力终端应用（如电气化工业加热过程） 	<ul style="list-style-type: none"> ï 用作原料和低温/高温加热的生物质/生物燃料
<ul style="list-style-type: none"> ï 回收爆破细粒并将其作为熟料原材料进行再利用 ï 回收混凝土并将其作为熟料替代品进行再利用 	<ul style="list-style-type: none"> ï 智慧能源管理 	<ul style="list-style-type: none"> ï 使用太阳能光伏和风力涡轮机现场或电网发电 	<ul style="list-style-type: none"> ï 太阳能地热
<ul style="list-style-type: none"> ï 基于新型材料/化学物质的绿色水泥 ï 基于混凝土碳化的绿色水泥 ï 材料替代：大块木材 	<ul style="list-style-type: none"> ï 余热回收利用 	<ul style="list-style-type: none"> ï 高温电加热（如等离子体加热；集中太阳能加热） 	<ul style="list-style-type: none"> ï 碳捕获、利用和储存：燃烧后、氧燃烧、钙循环
<ul style="list-style-type: none"> ï 轻质材料和结构 ï 预制施工 ï 3D打印 	<ul style="list-style-type: none"> ï 一体化设计/统优化 	<ul style="list-style-type: none"> ï 电化学煅烧工艺 	<ul style="list-style-type: none"> ï 氢燃料

表8 水泥行业的低排放和零排放措施

²²⁰ 中国建筑材料联合会。（2017年7月7日）。《水泥工业“十三五”规划发展规划》，中国建筑材料联合会。<http://www.cbmf.org/cbmf/yw/6675038/index.html>

注释：绿色：商业化技术。橘色：采用较少的商业化技术。红色：新兴技术。

5.1.3.1 材料利用率

许多材料效率的措施和策略都是用来提升水泥和混凝土行业的材料利用效率，同时可能减少对水泥的需求。在此特别举两个例子：一个是延长建筑的使用寿命，另一个是提升水泥/混凝土的质量。

例如，可通过使用性能好的材料，在结构设计中融入基于风险的耐用性模型，同时优化制造方法等方式，延长产品使用寿命，提升建筑物的耐用性。例如：建造能源高效的建筑物中，可以使用多尺度纤维筋、强抗腐蚀性钢材、高级化学混合物，提升新拌混凝土的流动性，创造自愈混凝土（含有聚合物微囊的石灰石产生菌，该菌能够愈合微裂纹）以及研发低热传导性的超轻水泥。²²¹据实验估计，从基线位置起，每增加50%的寿命（例如：将建筑的使用寿命从30年延长到60年）将使水泥需求量减少14%。²²²利用该项方法的挑战在于，对新科技的快速适应，提升设计情况，实现文化转型，以及提供更完善的施工计划。²²³

另一个例子是采用新兴科技提升水泥/混凝土质量。该方法包括优化硅酸钙水合物，来提升混凝土的性能及耐用性。利用先进的技术、高分辨率同步辐射X射线光谱显微术、高压X射线衍射和全散射方法来研究硅酸钙水合物。通过先进原子建模，得到的结果将为混凝土的彻底优化提供模型情况。²²⁴研究还发现，水泥含量减少30%的同时，强度并没有明显减少。²²⁵据估计，水泥的需求量可减少15%。²²⁶实际上，要将该种措施实施并扩大规模，有几点非常重要：改变建筑公司与承包商的实践方法、建筑法案需求，以及安全、耐用性以及其它性能需求的风险认知。

²²¹ Monteiro, P.J.M., Miller, S.A., and Horvath, A. (2017). 《可再生利用混凝土》。《自然材料》16 (7) 698-99 <https://doi.org/10.1038/nmat4930>.

²²² Masanet, E. and Cao, Z. (2020) 脱碳混凝土：《美国、印度和中国深度脱碳路径——水泥和混凝土循环》美国西北大学技术报告 https://www.climateworks.org/wp-content/uploads/2021/03/Decarbonizing_Concrete.pdf
223编号

²²⁴ Monteiro, P.J.M., Miller, S.A., and Horvath, A. (2017). 《可再生利用混凝土》。自然材料16 (7) 698-99 <https://doi.org/10.1038/nmat4930>.

²²⁵ Obla, K.H., Hong, R., Lobo, C.L., and Kim, H. (2017) 《混凝土最低流动是否应进行特别规定？运输研究记录》 2629: 1-8 <https://doi.org/10.3141/2629-01>.

²²⁶ Dunant, C., Shanks, W., Drewniok, M., Lupton, R., Cabrera Serrenho, A., & Allwood, J. (2019). 《我们能省下多少水泥？从英国水泥材料的流通中获取的经验。来源、保护与循环》 141 441-454 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.002>

5.1.3.2 能源利用效率

理论上生产熟料所需的最小热能，包括在1450°C的环境进行干燥和煅烧原料，为1.85-2.8 GJ/吨熟料。²²⁷目前六级预热器和预分解窑的最佳可行技术(BAT)在2.9-3.3 GJ/吨熟料的范围内。²²⁸对于电能需求，目前的BAT水平在90-100千瓦时/吨水泥的范围内。²²⁹

几年以来，中国水泥产业的能源利用效率已经显著提升，从1997年的每吨熟料5.27GJ，转变为2005年的每吨熟料3.83GJ。从2005年至2020年，熟料生产的能耗强度持续下降。中国的“十二五”规划对综合熟料的能耗强度提出了目标，即到2015年将该数值降至3.28GJ/吨熟料。²³⁰“十三五”规划期间，能耗强度目标为3.08GJ/吨熟料，逐渐接近BAT水平。²³¹

5.1.3.3 燃料转换

中国目前对城市固体废物（MSW）的使用率在2-5%之间。²³²相较之下，欧洲国家MSW以及其他替代燃料的使用率远远高于中国。替代燃料有巨大的利用潜力，例如水泥窑中的油漆残渣、溶剂、旧轮胎、城市固体废物、污水污泥和生物质能(废木材、锯末)可以用来替代煤炭。非生物质替代燃料会减少20%-25%的二氧化碳排放，而生物质燃料则可能减少30%的二氧化碳排放。研究估计，该情况下的能源节省量可达到每吨熟料0.6GJ。²³³

当前各种种类的替代燃料的使用都存在一定技术难题，例如：一些替代燃料、高浓度氯以及其他微量物质的热值较低，而含水量较高。替代燃料在使用前可能也需要预处理，确保成分混合均匀，处于最佳燃烧条件，并最大限度地减少问题物质的产生。此外，需要建立废物收集、分类及管理系统，以确保废物材料的有效供应。废物的共处理可能难以得到社会认同。

²²⁷国际能源局，2018年

²²⁸欧洲水泥研究院（ECRA）和水泥可持续性倡议行动（CSI）。（2017）。《当前水泥行业领先技术的发展：向未来展望》（2017年修订版）https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/CSI_ECRA_Technology_Papers_2017.pdf
²²⁹编号

²³⁰中国工业和信息化部（2011年11月8日）《水泥工业“十二五”发展规划（2011年-2015年）》中国工业和信息化部http://www.gov.cn/zwggk/2011-11/29/content_2005593.htm
中国建筑材料联合会（CBMF）（2017年6月7日）水泥工业“十三五”发展规划中国建筑材料联合会<http://www.cbf.org/cbf/yw/6675038/index.html>

²³²Sui, T. Personal communication. 2021.

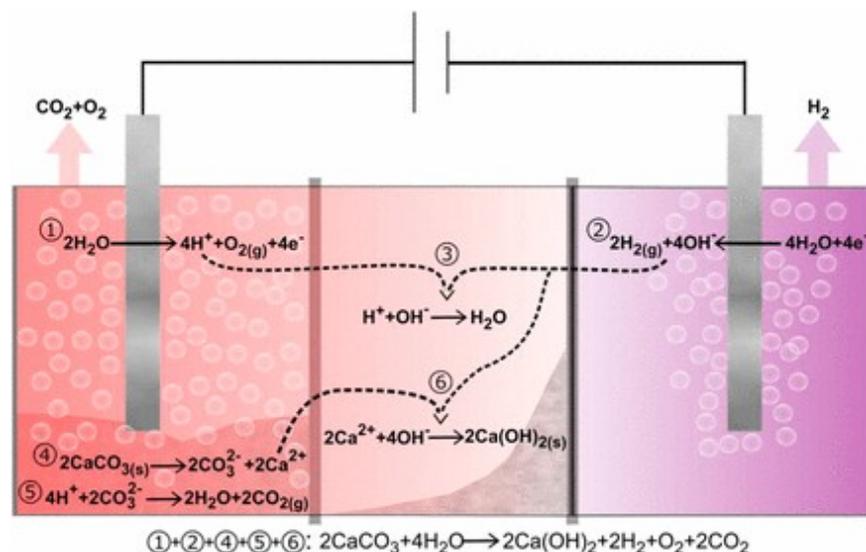
²³³ Price, L., Hasanbeigi, A., Lu, H., and Wang, L. (2009), 《中国山东省水泥工业的能效机会分析》，劳伦斯伯克利国家实验室<https://www.osti.gov/servlets/purl/974444>

5.1.3.4 电气化

尽管电气化只占水泥工业的总能源使用的20%，施工现场的电力脱碳仍然很重要。水泥厂可通过现场可再生能源发电与能源购买协议，增加可再生发电使用量。可再生能源电可能来自于风能发电、太阳能光伏发电、太阳热能以及水力发电。利用该种能源的问题在于缺少可再生资源的获取方式（依靠当地资源条件），而且相比于燃料，可再生能源获取成本较为高昂。

另一种为水泥生产供电的方式是电解石灰石。这是一个电化学过程，使用中性水电解产生一个酸碱度梯度（酸），其中碳酸钙（ CaCO_3 、石灰石）在低酸碱度下脱碳酸，氢氧化钙（ Ca(OH)_2 ）在高酸碱度下沉淀，同时在阳极产生高纯度 O_2/CO_2 气体混合物（化学计量操作时摩尔比为1:2），在阴极产生 H_2 。当用二氧化硅（二氧化硅）加热时，氢氧化钙分解成氧化钙（ CaO 或石灰），然后与二氧化硅结合形成硅酸三钙石，这是水泥中最占比最大的成分²³⁴（图38）。氧气可以用作水泥窑中的燃料提升有效性，降低二氧化碳的排放量。

图38基于电解槽的脱碳池原理图



来源: Ellis et al., 2020年

若利用可再生能源电力，该项科技有可能减少燃料燃烧产生的二氧化碳排放量。同时产生高浓度、已分离隔绝的气体流。目前，由于高昂的成本以及高水密度加工程序，该项技术尚未在工业级规模进行试点试验或示范。为达成二氧化碳减排目标，电力来源应属非化石能源。

²³⁴ Ellis, L.D., Badel, A.F., Chiang, M.L., Park, R.J.-Y., and Chiang, Y. (2020年6月9日) 水泥进行电化学生成——通过使用电解槽，为碳酸钙进行脱碳，同时产生有用的气体流。美国国家科学院（PNAS）议程117 (23), 12584-12591 <https://doi.org/10.1073/pnas.1821673116>

5.1.3.5 二氧化碳的利用与减少

目前正在进行试验开发燃烧后捕获、直接捕获以及有氧燃烧捕获等多种技术捕捉水泥厂中排放的二氧化碳。

当前，通过化学吸收进行的燃烧后捕获，在技术层面已经高度完备。该项技术利用化学品（胺系）吸收燃料燃烧及煅烧过程中直接排放的二氧化碳，其捕获量可达到95%。²³⁵需要热能加热并再次产生吸附剂（1.0-3.5 GJ/吨熟料和50-90千瓦时/吨熟料）。该项技术在管道末端对排放进行控制，只影响废气排放，而不影响工厂的运行流程。该项技术在使用上以及规模化上面临的挑战主要有增长的能源成本二氧化碳的捕获、储存及运输成本。基于胺捕获二氧化碳的原理图，参见表39。

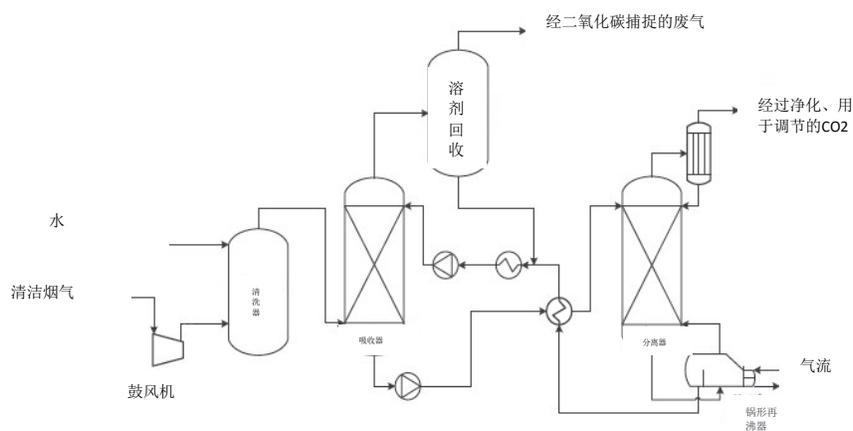


图39 基于胺捕获二氧化碳原理图

来源: Jakobsen et al., 2017.

位于挪威布雷维克的海德堡水泥诺森工厂的全面碳捕获与储存项目计划每年捕获40万吨二氧化碳，并将其永久储存。该项目于2020年获批，预计于2024年完成，届时水泥厂产生的二氧化碳将减少50%。

²³⁵ 欧洲水泥研究院（ECRA）和水泥可持续性倡议行动（CSI）（2017）。《当前水泥行业领先技术的发展：向未来展望（2017年修订版）》https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/CSI_ECRA_Technology_Papers_2017.pdf

²³⁶ Jakobsen, J., Roussanaly, S., and Anantharaman, R. (2017) 《一项针对挪威水泥厂的二氧化碳捕获、运输以及储存链的技术经济案例研究》，《清洁生产杂志》144, 523-539.<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.120>

²³⁷ Jakobsen, J., Roussanaly, S., and Anantharaman, R. (2017) 《一项针对挪威水泥厂的二氧化碳捕获、运输以及储存链的技术经济案例研究》，《清洁生产杂志》144, 523-539.<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.120>

5.2.4 中国水泥厂的能效节约潜力与潜在积极影响

为从节能、二氧化碳减排以及二氧化硫和氮氧化物减排等方面，评估水泥行业节能措施的潜力，采用图40所示的分析方法。

这种自下而上的方法针对每种特定适用的能效措施进行了分析，包括每种方法的节能减排潜力、及其在中国的影响力。下文详细讨论了每一阶段水泥制作过程中能效措施，包括节能潜力及覆盖率。



图40 量化节能减排能力的方法

测试节能减排的潜力范围，要从两方面进行分析：

- i 合理减排情况：水泥行业循序渐进推进能效措施
- ii 最大减排情况：2030年前实现技术可行性范围内对能效措施的最大利用

另外，为了单独挑出能效措施对节能减排的影响，该分析法假定2030年前中国的熟料以及水泥生产将一直保持在2020年的水平。

下文是关于节能与二氧化硫、氮氧化物及二氧化碳减排的数据分析结果。

5.2.4.1 能效措施

许多商业化的能效措施可能适用于水泥行业。相较于通过末端治理技术实现二氧化硫及氮氧化物的减排，能效措施技术的优势在于可通过节能追回前期投入，并且回收周期相对短暂。并且由于该方法能够减少能源使用及成本，水泥厂会更愿意实施能效措施技术。相较于通过末端治理技术，能效措施技术所需的监控工作也大大降低了。

虽然实现减排仍然需要末端治理技术，但是该技术的缺点在于需要不断进行投入，而且这种投入并不能通过节能进行弥补。由于成本的增加（大多来自于耗电量的增加），工厂经常不愿意采纳或使用该项技术。该种技术的监管和实施成本都很高。另外，末端治理技术并不能降低水泥行业的二氧化碳排放量，而大多能效措施技术能够通过降低燃料和/或电力的消耗降低二氧化碳排放。表9对末端治理技术与能效措施技术进行了简单对比。

主要特点	末端治理技术	能效措施技术
是否需要新的投入？	✓	✓
是否通过节能实现前期投入回收？	X	✓
是否增加能源使用？	增加电力使用	减少总体能源使用
是否减少主要空气污染物的排放？	✓	✓
是否减少二氧化碳排放？	X	✓
监管及实行所需工作量？	强	弱

表9.末端治理技术与能效措施技术的比较

该项报告分析了总共39种方法的节能以及对二氧化碳、氮氧化物减排的潜力。其中包括燃料准备阶段的三项节能措施、原材料准备阶段的八项措施、十八项熟料制作措施、最后研磨阶段的六项措施以及两项普遍（交叉进行）措施。此外，该报告还分析了水泥工业中使用替代燃料及水泥混合物的可能性。

附录3中介绍了针对燃料及原料准备采用的能效措施，以及此类措施对电力节约能力的影响。附件4中介绍了关于针对熟料制作采用的能效措施，与该情况对燃料/电力的影响。附件5介绍了关于针对最后研磨阶段采用的能效措施，实行普遍措施，利用替代燃料，以及通过混合水泥改变产物的情况。以上措施及其对能源的影响是基于之前的研究结果确定的，该研究来自Worrell and Galitsky（2014）、Zhou et al.（2011）（2011）、Hasanbeigi et al.（2012）与Zhang et al.（2015）。能效措施采用率的历史数据来源于中国水泥行业的研究，包括Hasanbeigi et al.（2012）以及Zhang et al（2015）。2020年至2030年的采用率是基于两种情景假定所估计的（附件6与附件7）。

5.2.4.2 节能

如图41所示，合理减排情况下，“十四五”规划期间可以减少22百万吨煤当量（Mtce）（2021至2025年期间）。通过最大节能方式，即推广并增加混合水泥的使用，至2025年该措施节能量将占到总节能量的57%。在最大减排情况下，至2025年节能潜力可能增至两倍以上，达到46（Mtce）。减排贡献最大的措施分别是：混合水泥(占总节能量的32%)、转化为篦冷机(21%)、利用废物和生物质(19%)以及减少窑壳损失(升级耐火材料)(7%)。能源管理及加工控制系统，热量回复系统优化将各自贡献4%与3%。

在第十五次五年规划期间，合理减排情况下，可在2026至2030期间兑现节能共22（Mtce）。最大减排情况将节省总共46（Mtce）。

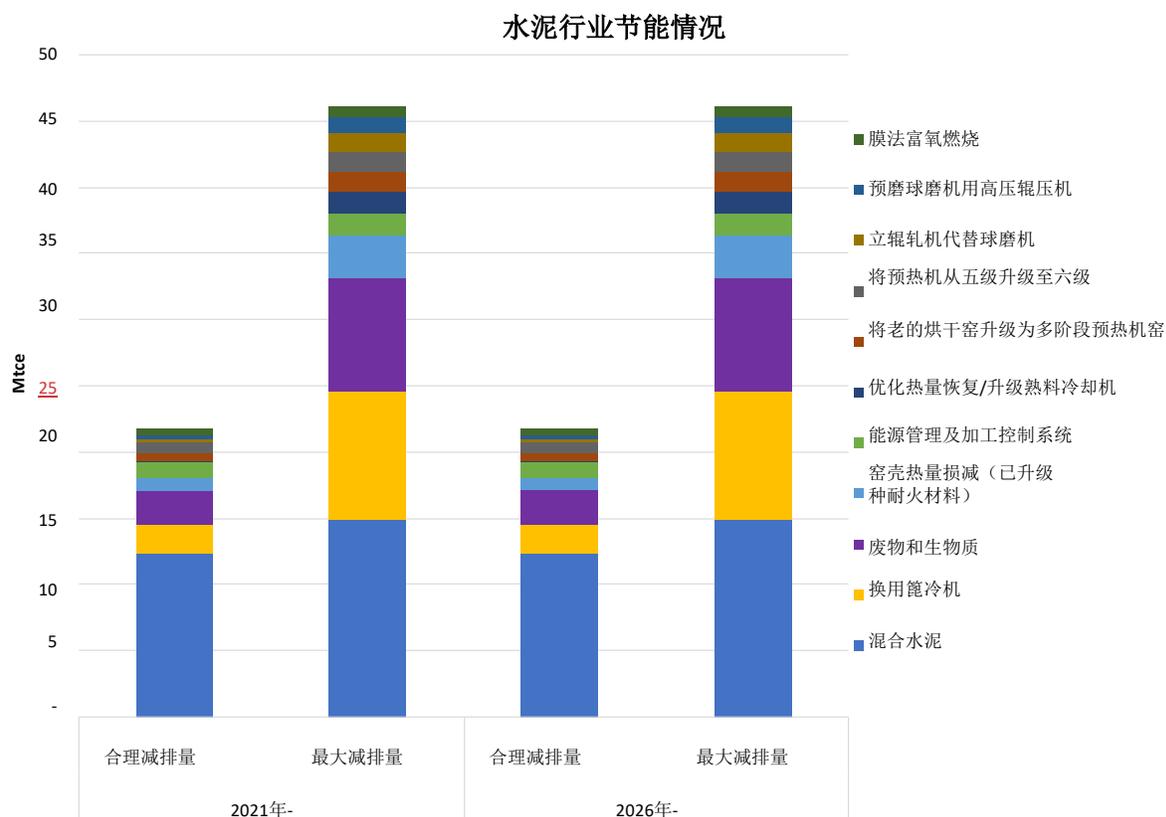


图41 能效措施的能源节约潜力

5.2.4.3 二氧化硫减排

从2021至2025年，在合理减排情况下，通过实施能效措施，预计共减少34.2万吨二氧化硫排放，主要减排措施分别是：混合水泥（63%）、废物与生物质（12%）、换用篦冷机（6%）以及升级预加热/预分解窑（4%）其他方法，例如窑壳损减（升级耐热材料）以及能源管理加工控制系统在二氧化硫总减排中分别贡献3%。

从2021至2025年，在最大减排情况下，预计共减少67.7万吨二氧化硫排放，将合理减排情况下的二氧化硫减排量翻了一番。该方法可实现二氧化硫的最大减排量-减排途径来源于：混合水泥（总减排量的38%）、废物与生物质（21%）、换用篦冷机（14%）以及升级预加热/预分解窑（9%）。

随着能效措施在2030年后的持续升级，2026年至2030年期间可通过减排情况，再减排4.2万吨二氧化硫。如果中国水泥厂都按照最大减排情况推进能效措施实行，在此期间，二氧化硫的合理减排量可能增加至67.6万吨，参照图42。

相比之下，根据报道，通过能效措施与末端排放控制，中国的水泥行业自“十三五”规划实行以来，共减排了13.8万吨二氧化硫。图42显示，通过实行节能措施，“十四五”规划中的二氧化硫预计可达到“十三五”规划的两倍。

²³⁸ Fan, Y. (2016年11月) 《水泥行业“十三五”煤控目标的实现》。中国水泥协会
<https://www.china5e.com/download/20161101-nrdc/1101-FanYongbin.pdf>

水泥行业二氧化硫减排情况

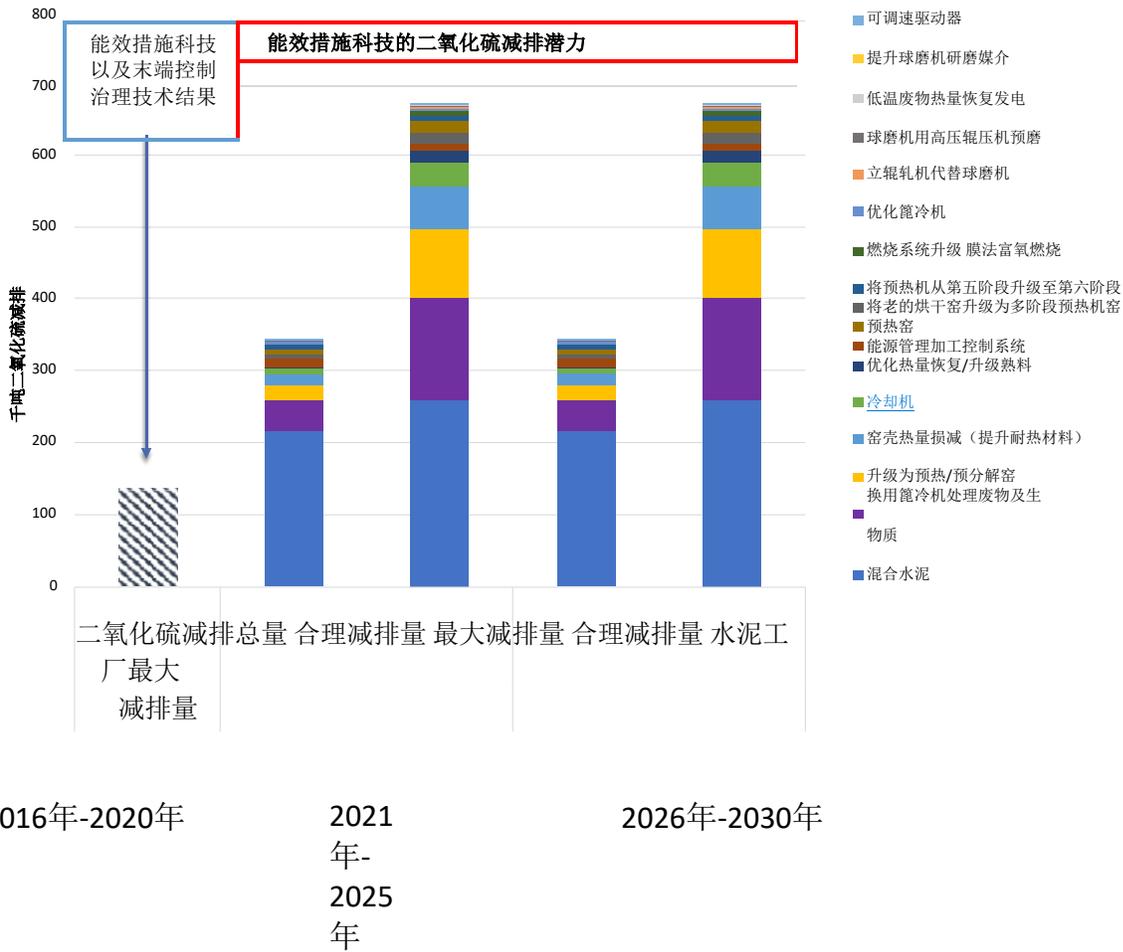


图42 能效措施下的二氧化硫减排潜力

5.2.4.4 氮氧化物减排量

“十四五”规划期间（2021年-2025年），在合理减排情况下，能效措施可减排53.1万吨氮氧化物。与二氧化硫减排类似，实现氮氧化物减排主要来源于：水泥混合物（氮氧化物总减排量的63%）、废物及生物智能利用（13%）。其他措施，例如换用篦冷机、预热/预分解窑升级在氮氧化物减排的总贡献占比分别为6%、5%。在最大减排情况下，氮氧化物的减排量可翻倍，在2021年至2025年期间减排105.8万吨。混合水泥、废料及生物质、换用篦冷机在氮氧化物总减排的贡献占比各分别为38%、21%和14%。

第十五个五年规划期间，若能效措施能按预计放缓速率逐渐发展，在合理减排情况下，氮氧化物将再减少53.1万吨。若最大限度利用能效措施直至2030年，最大减排情况下氮氧化物将累计减排100万吨。

中国“十三五”（2016年-2020年）期间，通过采用能效措施及末端治理措施，实现氮氧化物减排108万吨。²³⁹图43显示，“十四五”规划期间，最大限度利用能效措施依然可以维持同“十三五”规划期间相同的氮氧化物排放量。

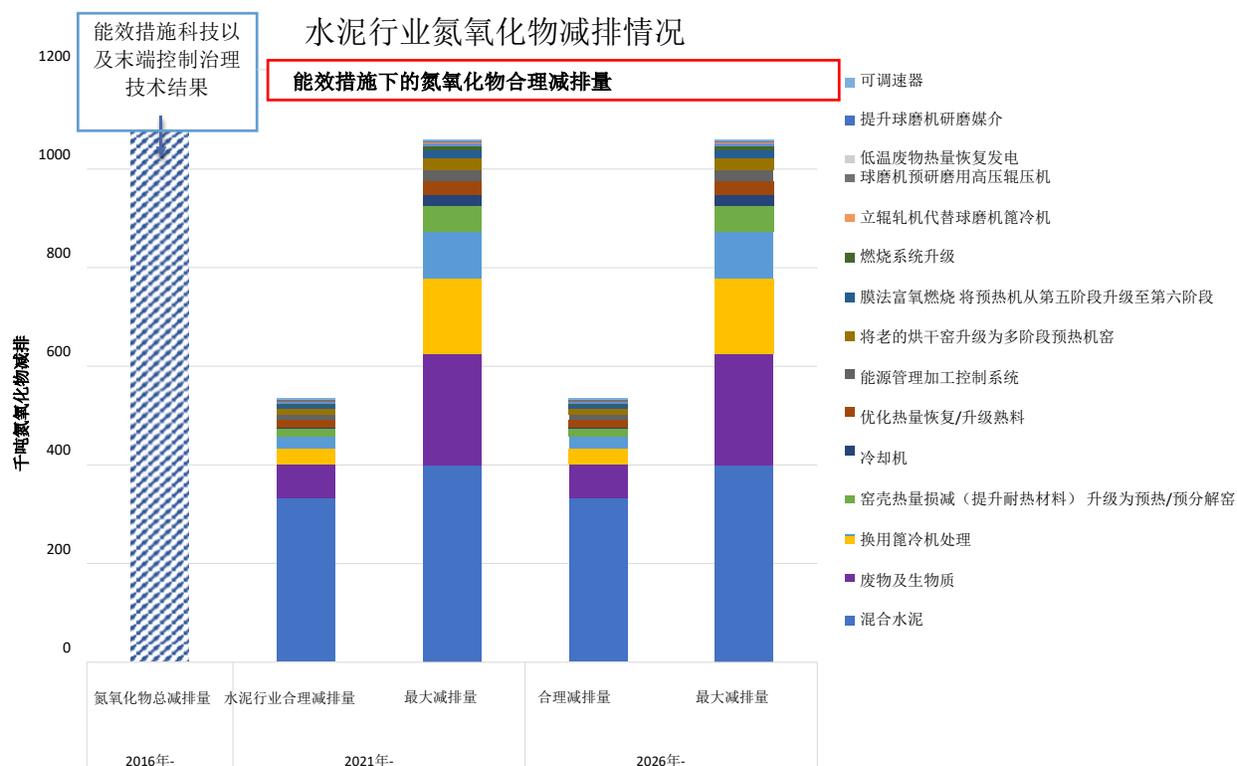


图43 能效措施下的氮氧化物排放潜能

5.2.4.5 二氧化碳排放量

能效措施不仅能减少能源使用、二氧化硫及氮氧化物排放，还可减少二氧化碳的排放。在合理减排情况下，2021年至2025年期间，预计实现共6200万吨二氧化碳减排。主要的减排措施分别为：混合水泥（二氧化碳总排放量的56%）、废物及生物质（11%）以及换用篦冷机（10%）。另外，能源管理加工控制系统以及窑壳热量损减（提升耐热材料）在二氧化碳减排的总贡献占比分别为6%、5%。在最大减排情况下，2021年至2025年期间，预计实现1.33亿吨二氧化碳减排。混合水泥、废料及生物质、换用篦冷机在二氧化碳总减排的贡献占比各分别为31%、20%和18%。

²³⁹ Fan, Y. (2016年11月) 《水泥行业“十三五”煤控目标的实现》，中国水泥协会
<https://www.china5e.com/download/20161101-nrdc/1101-FanYongbin.pdf>

在下一个五年（2026年-2030年），若假定能效措施继续循序渐进发展，二氧化碳减排将总共达到6200万吨）。在最大减排情况下，二氧化碳的总排放量将减少1.32亿吨。“十四五”到“十五五”期间的节能潜力参照图44。

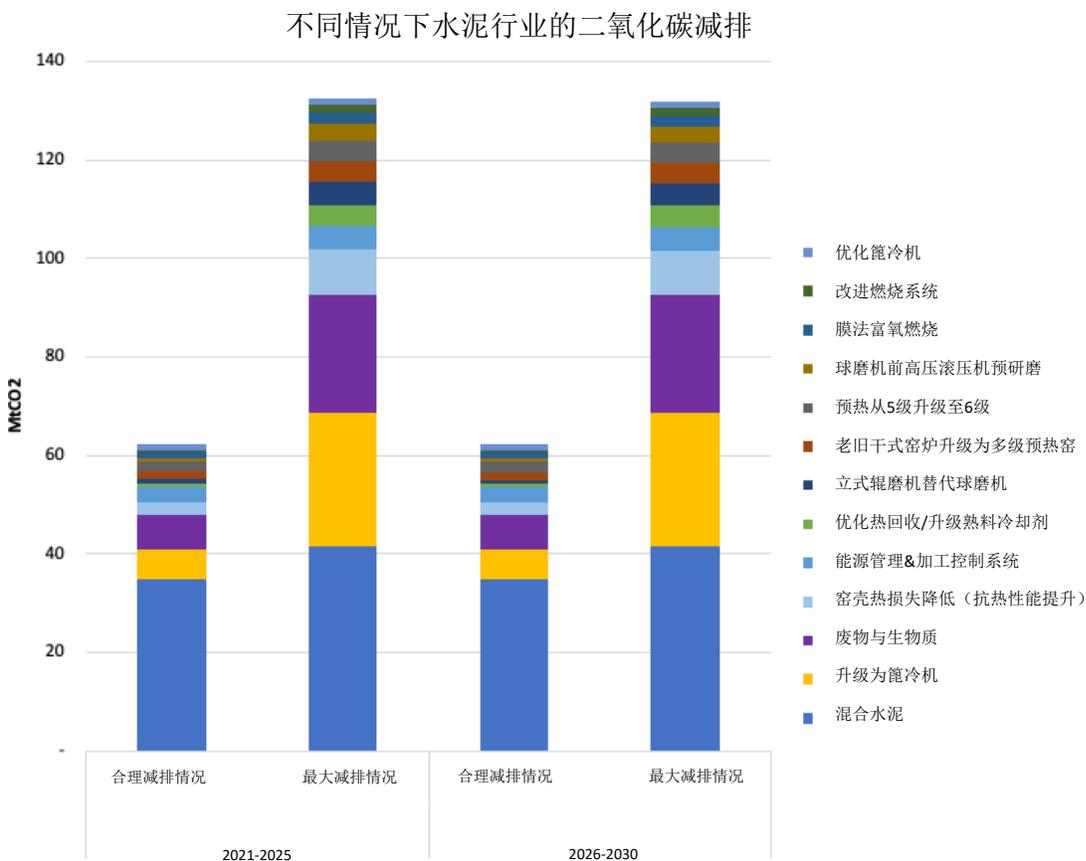


图44 能效措施下的二氧化碳减排量

6. 结论

能效和空气质量 加利福尼亚的协同效应

规划协调

加利福尼亚界定规划（2022年才开始实施）以及各个五年计划将有可能与中国目前以及将来的五年计划保持一致。加利福尼亚和中国需对计划进行更新，不仅是为了控制空气污染，也是为了完成净零碳目标。加州空气资源委员会意在通过计划的更新，使用全新的加利福尼亚的2045年净零排放之路计划，并将在气候变化计划纳入有害气体减排对健康的益处有关内容。²⁴⁰加州空气资源委员必须对现存界定规划的效果进行检验，并确定待改进的各个方面。为实现碳中和目标，中国将需要温室气体减排与每个行业和地区政策的发展相结合，而通过与加州空气资源委员、南海岸空气质量管理局（SCAQMD）以及湾区空气质量管理局（BAAQMD）开展对话，中国及其各省份也许能从加利福尼亚的共同效益及项目中吸取经验，取得空气质量进步，实现气候污染物减排。自从2013年起，中国已在PM2.5减排方面取得惊人的成绩，保障了公众健康。如上所述，最佳共同效益策略的实际着眼于污染物存量、设备存货、大气化学等。然而，空气污染、气候能源协同策略应该减少合规成本。因此，加利福尼亚的政策及项目并不完全适用于中国及其各个省份。

界定规划以及州行动计划对于能效的作用举足轻重。甚至在能效项目之后的几十年中，从2021年至2030年若按照界定计划情况，节能翻倍预计会占累计减排量的10.3%（6400万吨二氧化碳当量，总量6.21亿公吨二氧化碳当量）。相较之下，空气质量方面效益较小，因为交通运输仍然是该州空气污染物的主要源头。加州能源委员会发现加利福尼亚可能达不到其翻倍目标，因此2022年界定计划的更新是进一步对该项目评审及修订的非常好的时机。然而不幸的是，这一翻倍目标过于的理想化，并没有多少分析支持。加利福尼亚的能效项目自20世纪70年代展开，发展较为迅猛。为了准备下一次能效界定规划的修订，加州能源委员会开始重新审视能效行动计划，并将重点放在减排行动的成本效益上（同时注意加利福尼亚各地区是否平衡发展）。可再生能源发展意味着加利福尼亚在一段时间内有超额可再生能源发电量，因此在短时间内能效价值并不高。加州能源委员会制定了较为精密的能效项目度量标准，该标准聚焦于一年到头每小时温室气体储量的变化。无论这次修订升级的目标究竟是什么，在加利福尼亚，能效将继续起到举足轻重的作用。

²⁴⁰ 《加利福尼亚2017年气候变化范围计划》，空气管理局, 2017. p. 50.

大幅增加断续资源的意义所在 - 储存和灵活需求

加州实现净零碳之路依赖100%可再生能源电网升级和建筑、载具、工业终端用户电气化。加州将于2045年前大幅增加分散和集中模式的太阳能与风能发电量。虽然该报告并没有细致讨论可再生能源之路，当前电网可靠性需要考虑到广大地理区域可再生能源情况，低成本储能技术以及灵活需求。该报告确实探讨了存储发展手段以及灵活需求措施。

就储存而言，自从布朗州长任期开始，加州就开展了积极的电池存储发展计划。作为州检察长，Brown州长为加州公共事业委员会制定了相关法律，设定了存储采购目标，并在州长上任第一年通过了该法律。根据此法律，加州公共事业委员会为所管辖的公共事业设定了特定的采购目标，其中包括了分散以及电网级存储需求。这使得公共事业可根据投标成本效应，灵活安排采购时间。在促进电池储能系统市场竞争方面，该采购计划十分成功。由于电网和交通方的市场动力，在过去十年中，锂电池电池储能系统成本已大幅下降（将上文图21）。加州公共事业委员会存储采购计划对相互连接要求进行改革，促进及时相互连接，修订加州独立系统运营商的市场规则，制定政策允许储能设施有更大的操作灵活性，以让他们可以参与多种辅助服务市场并提升整体收益。电网储能对维持电网可靠性极为重要，因为大量燃气发电站由于运行水平下降而关闭。如上文所讨论的，加州莫斯兰丁有着世界上最大的电池储能系统，且上千兆瓦的储能设备也在建设中，以解决夏天中出现的电网可靠性问题。在去年夏天的停电后，加州希望通过加速推广电网级电池储能系统提升长期电网可靠性，而非维持大量燃气峰值负载机组。加州也不得不在高火灾风险地区以及高火灾风险时间段内实行电源切断，这使得市场对分散能源储存有了极大兴趣。加州是全美国零售率最高的地区之一，所以储能和太阳能设施的组合极具经济吸引力。考虑到电力存储系统与太阳能系统组合可以享受联邦太阳能税收抵免，该组合更受市场青睐。虽然加州是电网和电表后端电池储能系统主要市场，但是电池储能系统以外的各种储存期市场和长期储能方案的价值也愈发明显。

存储是一项关键技术，需要规模化和创新来进一步降低电池储能系统成本以及长期储能方案成本，后者将为中国和加州提供合作机遇。中国可以学习加州在电网和电表后端应用的经验。此外，当前电池电力应用可以支持四到八小时。德国经历过长达10天的低风能低太阳能情况，所以还是需要长达数周的电量存储时间。通常情况下，当电网可再生能源发电量超过80%或90%以后，电网就需要巨量的、储存时间不同的储能系统，例如季度储能系统。还有许多蕴含巨大潜力的领域待中国与加州合作研究发掘，比如长期储能领域。该研究将会考虑其他替代技术，例如流体电池、其他电池化学应用、先进抽水蓄能和“绿色”氢气。总的来说，回收储能技术将随着市场储存应用份额增加而愈发重要，也同样需要通过合适的电网市场规则，实现最大化储能价值。

就灵活需求来说，加州能源委员会已经有立法权力，将能效以外的要求纳入家电适用标准中，以实现能源灵活性。中国和加州都从20世纪80年代开始的家电能效标准合作项目受益。为了应对资源间隙程度的不断增高以及去年的停电，加州正努力拓展其灵活需求计划。随着中国可再生能源水平越来越高，其不仅将需要上文所述的储能方案，也将需要灵活需求计划。中国可以从加州相关工作中吸取经验。加州也可以从中国更大规模的灵活需求计划中收益，因为加州可以将这些灵活需求技术规模化，特别是用于翻新以及家电的“指

挥控制”技术（该技术不仅成本低且安全可靠），并进行进一步创新。

建筑电气化

就建筑电气化而言，加利福尼亚正思考如何制定政策，以推广大小不同的空间热泵与热水器，以及电感厨灶。供热终端用户的电气化进程可大幅降低燃烧与甲烷泄露产生的二氧化碳以及空气污染排放（一氧化碳、氮氧化物、细颗粒物和甲醛）。加州公用事业委员会和加州能源委员会已经根据法律检验2030年前加州建筑实现40%温室气体减排的可行性，并创立了加州推广热泵应用的试点项目。加州部分地区政府要求新建建筑全电气化。加州能源委员会已经在检验其建筑能效标准（Title 24）对2022年新工程建筑要求中的空间热泵和热水系统的相关进展，并为未来的更新铺设好基础框架。加州能源委员会的法规草案在以下三个方面对热泵进行规定：

- “修订建筑项目可用合规途径，规定在特定环境下只能使用热泵技术；
- 修订“标准设计”用于建筑项目可用基于建模表现合规途径，根据特定环境下的热泵技术建立表现基准线；以及
- 新增混合燃料建筑电气化要求，意味着需要建设工程初期安装电力连接和其他组件，以便采用非燃烧方案。²⁴¹

加州需要符合《蒙特利尔议定书（基加利修正案）》的热泵设备，所以在加州广泛推广热泵前急需研发替代制冷剂。此外，为了将热泵（与/或电感炉）纳入Title 24，热泵在整个周期内的成本效益都必须足够可观。加州将从与中国的合作中汲取经验，通过规模化与创新措施，降低制冷剂替换热泵以及电感炉成本并改进其表现。此外，单户家庭、多户家庭和商业建筑以及应对多种天气情况必需的各种热泵和电感炉技术都有可能实现。

加州和中国都面临着如何在现有建筑中实现高能效和低排放的挑战。例如，Title 24一年最多覆盖150000栋新建建筑。但同时，加州有超过一千万既存住宅。而且加州新建和既存商用建筑的数据也大致相同。加利福尼亚一直在研究政策，探索如何利用能效技术，翻新普遍有数十年历史的建筑。这些努力也进行了拓展，将温室气体减排技术和负载灵活性技术纳入其中。目前有两个项目正在实施中：

- i. 建立商用建筑能耗公共数据库数据信息将帮助现有业主和准业主、用户和准用户做出更合理的决策。
 - ii. 设计并实施财政激励，行为计划和宣传计划，鼓励消费者使用高能效技术。
- 这又是一个中国与加州能互相分享现有项目经验的领域，同时中国与加州也能一同制定解决方案，研发相关技术，实现共同目标。

交通系统电气化

最后，交通也是中国与加州温室气体以及污染物排放的主要原因之一。在加州，交通排放了超过50%的温室气体和超过80%的标准污染物。交通也是加州空气管理局数十年工作的重点之一，他们也常与中国政府官员就此问题进行交流。事实上，中国与加州都大力推广无污染车辆，在当前时间点，加州的无污染车辆占全美国的一半。而中国的无污染车辆占全世界的一半。不断走高的无污染车辆销售额不仅让电池产能大幅增长，同时带动了产业化与创新，

²⁴¹ 美国加州能源委员会（2021年5月）《2022建筑能效标准》www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/building-energy-efficiency-standards/2022-building-energy-efficiency, pages 4 and 5.

降低了电池成本。（如上所述，交通中的电池应用既帮助了电网电池储能系统以及其他分散应用，也在与后者竞争）。预计进一步发展创新将导致在未来内燃机车辆与零排放车辆差别更大。依靠公司平均燃料经济性标准，加州得以对州内销售车辆设定基础能效水平要求，并由此推动无污染车辆销售。州长Newsom甚至设定目标：在2035年前，加州将完全淘汰内燃机车辆。电气化交通的下一个重点便是卡车，尤其是重型载重卡车。如果成功，其将带来极为可观的空气质量效益。加州空气管理局正在要求各厂商为加州生产无污染车辆。如上文所述，无污染重型载重车辆将需要为其研发高成本效益、可靠、安全的无污染车辆技术。还有，规模化和创新能大幅降低成本，所以中国与加州之间的协同极为重要。无污染车辆的扩展将需要发展充电和补给基础设施，而这些只能依赖自身的供应链。如上所述，电池回收问题让人愈发担忧。灵活无污染汽车充电负载将成为保证电网可靠性的关键需求资源。最后，在中国制造货物，并进口至长滩和洛杉矶，最后扩展到全美国的交通，这样一条商品移动路径带来了巨大的经济效益，但也带来了温室气体排放和空气质量问题，让中国和加州紧紧联系在一起。加州一直追求多样化的环境影响降低工具，如LCFS、AMP、无污染货物装卸设备和土地利用规划。电气化货物运输行业可以为中国和加州带来巨大的温室气体减排和空气质量效益。交通领域中，加州和中国各省市将有更多的合作机会。下文重型卡车相关内容和加州大学伯克利分校法学院和自然资源学院的《向零前进》进一步对这些机遇进行探讨。

中国的清洁高效重型载货卡车

分析显示，通过重型载货卡车能效和后勤提升、采用新能源基础等方式，能耗（尤其柴油）、二氧化碳排放、以及氮氧化物、PM2.5等方面的减排潜力巨大，但是技术、经济、市场以及制度障碍依然存在。基于国际先进经验和中国当前市场情况，十四五以及十五五规划期间解决上述问题的政策行动包括：

1. 空气质量问题严重的大型城市分阶段扩展或引入超低排放区；
2. 鼓励地方领导制定远大的新能源目标，其中需要覆盖重型载货卡车，支持地方经验共享以及多地协同；
3. 继续支持实施更严格加氢燃料经济与车辆排放标准，并在未来标准修订中认识到能源和空气质量共同效益的重要价值；
4. 支持科技与商业模式创新发展，以帮助完善物流、新能源充电等领域，如改进供应链协同与电池更换情况。

低碳水泥

为了完成所有能源、环境和气候目标，中国水泥行业面临巨大压力。分析发现能效措施在实现中国的节能、空气污染物减排、以及最近宣布的双碳目标中依然发挥着重要作用。分析还发现，如果能最大限度地采用能效措施，十四五时期的二氧化硫减排幅度将是十三五时期的两倍以上。如果能最大限度地使用能效措施，十四五时期的氮氧化物减排幅度将与十三五时期相同。此外，如果最大限度地采用能效措施，中国水泥行业可以在十四五期间节省4500万吨煤当量资源，并避免1亿3200万吨二氧化碳排放（对比2020年的固定基准线）。

对于政策制定者来说，他们需要继续将能效作为完成经济、能源、环境和气候等多重目标

的首要资源。在多个政府机构低成本，高效并系统地完成以上多重目标的过程中，协同推进是关键。

7.附件

附件1：2016年南海岸空气质量管理计划ECC措施

数量	职务	说明	减排
ECC-01	协同效益 温室气体项目、政策、激励计划实现的减排【所有污染物】	<ul style="list-style-type: none"> - 标准污染物降低，也得益于联邦、州和地方的温室气体减排指令和项目 - 项目包括：市场项目、可再生能源目标、激励与返利项目、以及推动新型技术发展应用项目。 	氮氧化物-待定
ECC-02	协同效益 现有居民以及商业建筑节能措施【氮氧化物、挥发性有机化合物】	<ul style="list-style-type: none"> - 标准污染物降低，得益于州能效指令，如Title24以及350号参议院法案 	氮氧化物 - 2023年前实现0.3吨每天，2031年前实现11吨每天 挥发性有机化合物 - 2023年前实现0.07吨每天，2031年前实现11吨每天
ECC-03	进一步降低居民建筑能耗【氮氧化物、挥发性有机化合物】	<ul style="list-style-type: none"> - 标准污染物降低得益于鼓励超额完成ECC-02目标的激励项目。 - 项目包括：支持房屋节能改造、太阳能热能和光伏、升级更换老旧家具 	氮氧化物 - 2023年前实现1.2吨每天，2031年前实现2.1吨每天 挥发性有机化合物 - 2023年前实现0.2吨每天，2031年前实现0.3吨每天
ECC-04	通过冷屋顶技术实现臭氧形成下降与减排【全部污染物】	<ul style="list-style-type: none"> - 使用冷屋顶技术可以降低日间环境温度，降低臭氧形成速率。 - 该技术还同样降低了制冷电力消耗，由此降低发电产生的排放。 	氮氧化物-待定

资料来源：南海岸空气质量管理区²⁴²

注：待定指进一步评估措施，完成技术评估，确定库存和成本方法后确定的降幅量，且并不影响成果展示。

附件2：湾区空气质量管理计划交通、能源、建筑控制措施

数量	名称	说明	预计减少量	年度	排放
			空气标准 (磅/天)	污染物	温室气体 (二氧化碳当量/年)

²⁴² 2016年空气质量管理计划定稿南海岸空气质量管理计划2017年3月第4章

			活性有机气体	氮氧化物	PM2.5	SO2	
交通							
TR14	汽车与轻卡	为合格车辆购买和基建发展提供地区空气清洁基金。与私人、地方、州以及联邦项目一同推广纯电动以及插电式混合动力汽车购买与租赁。	64	64	14		3963
TR19	中重型载货卡车	针对1) 引擎符合ARB 2010重型载货卡车氮氧化物标准的卡车2) 混合动力卡车或3) 零排放新型卡车, 直接提供购买补贴, 也鼓励其他组织提供购买补贴。空气质量管理局将与卡车司机群体、行业、加州空气委员会、加州能源委员会等一同演示纯电动以及混合动力零排放卡车。	44	36 2	10		13830 6
TR20	远洋船舶	学习洛杉矶长滩港口实施的绿船计划。项目以停靠港口二级和三级远洋船舶的财政激励为基础。该计划一开始作为圣佩德罗湾港口空气清洁行动计划的一部分。该措施同样认识到了监督此类项目的需要, 并对此类项目进行提供必要支持, 以确保计划成功。		38			
建筑							
BL1	绿色建筑	<ul style="list-style-type: none"> - 与KyotoUSA等合作伙伴一同探索能源进步, 探索学校区域建设当地可再生能源系统的可能性, 审视投资策略。 - 确定阻碍地方有效实施Title24建筑标准的各种问题, 并制定相应解决方案, 改进标准 	30	36 7	53	9	141767

		<p>执行</p> <ul style="list-style-type: none"> - 与BayREN项目合作，为建筑业能源相关项目提供更多资金。 - 接触更多降低特定建筑种类排放的组织。 					
BL2	建筑去碳化	<ul style="list-style-type: none"> - 帮助空气管理局探索有关化石燃料空间销售和民商两用水供热系统的规定方案。 - 探索业主更换零排炉、水热器和天然气家具的激励方案。 - 更新空气管理局指导文件，在其中推荐商业以及多户型安装地源热泵以及太阳能热水器。 	54	635	98	34	313586
BL3	市场解决方案:	<ul style="list-style-type: none"> - 呼吁创新，支持市场提供能带来创新可且行现存建筑温室气体减排方案。 	无				
BL4	降低城市热岛效应	<ul style="list-style-type: none"> - 制定并推广模范“降温公园”条例 - 制定并在新建筑或更换升级屋顶的商用民用多户建筑中实施模范建筑规范要求。 - 与专家合作，向城镇相关部门介绍冷屋顶和冷铺技术以及相应可用工具。 	3	31	6	3	14512

能源				
EN1	发电去碳化	<ul style="list-style-type: none"> - 接触公共事业单位，在发电量以及输送电量中最大化可再生能源占比。 - 与地方政府合作实施地方可再生能源占比。 - 与行业利益相关方以及市政工程单位接触，以增加发电量中生物质能占比。 	无（不确定性水平过高，无法预测）	
EN2	降低电力需求量	<ul style="list-style-type: none"> - 通过先进经验，模范条例以及技术支持等方式支持地方政府能效项目 - 与合作伙伴一同进行宣传，降低电力需求量 	无	
超-温室气体				
SL1	短期气候污染物	<ul style="list-style-type: none"> - 通过废品行业以及农业所推出的多种控制措施，降低垃圾填埋和农业活动产生的甲烷。 - 制定专门规则，降低天然气管道以及制备中产生的甲烷排放；修改现有条例，以降低石油精炼装备泄露产生的甲烷以及其他有机化合物气体排放。 - 在机动车行业汇总并实施现有空调元件使用规范，支持加州空气质量管理局与/或美国环境保护局制定和执行更严格的规章，同时鼓励更好的氢氟烃处理措施。 	无	28600

资料来源：湾区空气质量管理局（2017）²⁴³

²⁴³ 《2017年清洁空气计划定稿》2017年4月湾区空气质量管理局第五章附件H

附件3：能效措施：燃料制备和原材料制备工艺

#	能效措施	节省燃料（GJ/吨-熟料）	电力影响（kWh/吨-熟料）
燃料制备			
1	高效碳分离器		0.26
2	高效煤研磨混压机		1.47
3	安装变频器，替换煤磨袋吸尘器风扇		0.16
原材料制备			
4	立磨生料工艺控制		1.41
5	高效分离器		5.08
6	高效辊压机		10.2
7	高效传输系统		3.13
8	生料混合（均质）系统		2.66
9	生料磨机排气扇变频器		0.33
10	生料斗式运输机		2.35
11	高效生料磨机排风扇/变频器		0.36

数据来源：Worrell and Galitsky (2004), Zhou等人(2011), Hasanbeigi等人(2012), Zhang等人(2015).

附件4：能效措施：熟料制作工艺

#	能效措施	节省燃料 (GJ/吨-熟料)	电力影响 (kWh/吨-熟料)
	熟料制作		
12	替换立窑悬挂	2	
13	使用篦冷机	0.6	-0.01
14	升级预热/预分解炉窑	0.43	
15	降低窑壳损耗 (改进耐火材料)	0.26	
16	膜式富氧燃烧	0.22	-5.5
17	能耗管理和工艺控制系统	0.15	2.35
18	升级老旧干式窑炉为多级预热窑炉	0.11	-1.17
19	五级预热升级成六级预热	0.11	-1.17
20	优化热回收/升级熟料冷却器	0.11	-2
21	优化篦冷机	0.09	
22	改进燃烧系统	0.03	
23	电力低温预热回收		30.8
24	可变速窑风扇		6.1
25	悬浮预热器低压降旋风分离器		2.6
26	窑填料斗式提升机		1.24
27	高效预热风扇		0.7
28	高效窑传动		0.55
29	篦冷机制冷风扇变频器		0.11

数据来源：Worrell and Galitsky (2004), Zhou等人(2011), Hasanbeigi等人(2012), Zhang等人(2015).

附件5：能效措施：终磨工艺、一般措施、替代燃料和产品更替

#	能效措施	节省燃料（GJ/吨-熟料）	电力影响（kWh/吨-熟料）
	终磨		
30	研磨能耗管理和工艺控制		4
31	立式辊磨机替换球磨机		25.9
32	球磨机前使用高压滚压机进行预研磨		24.4
33	改进球磨机研磨介质		6.1
34	（终磨）高效分类器		6.1
35	高效水泥磨机排风扇		0.13
	一般措施		
36	高效电机		4.58
37	可变速机		9.15
	替换燃料	节省燃料（GJ/吨-水泥）	电力影响（kWh/吨-水泥）
38	废物与生物质	0.6	
	产品变化	节省燃料（GJ/吨-水泥）	电力影响（kWh/吨-水泥）
39	混合水泥	1.77	-7.21

数据来源：Worrell and Galitsky (2004), Zhou等人(2011), Hasanbeigi等人(2012), Zhang等人(2015).

附件6：各种降低情况下的能效实施速率

	燃料制备	2020	2025	2030
1	高效碳分离器	39%	44%	50%
2	高效煤研磨混压机	67%	73%	80%
3	安装变频器，替换煤磨袋吸尘器风扇	45%	53%	60%
	原材料制备			
4	立磨生料工艺控制	17%	23%	30%
5	高效分离器	47%	53%	60%
6	高效辊压机	66%	73%	80%
7	高效传输系统	30%	37%	45%
8	生料混合（均质）系统	30%	38%	45%
9	生料磨机排气扇变频器	74%	80%	85%
10	生料斗式运输机	30%	37%	45%
11	高效生料磨机排风扇/变频器	78%	81%	85%
	熟料制作	2020	2025	2030
12	替换立窑悬挂	97%	98%	100%
13	使用篦冷机	17%	23%	30%
14	升级预热/预分解炉窑	27%	33%	40%
15	降低窑壳损耗（改进耐火材料）	37%	43%	50%
16	膜式富氧燃烧	6%	11%	15%
17	能耗管理和工艺控制系统	53%	67%	80%
18	升级老旧干式窑炉为多级预热窑炉	30%	40%	50%
19	五级预热升级成六级预热	33%	47%	60%
20	优化热回收/升级熟料冷却器	18%	22%	25%
21	优化篦冷机	78%	87%	95%
22	改进燃烧系统	17%	23%	30%
23	电力低温预热回收	85%	87%	90%
24	可变速窑风扇	33%	42%	50%
25	悬浮预热器低压降旋风分离器	65%	70%	75%
26	窑填料斗式提升机	30%	37%	45%
27	高效预热风扇	38%	47%	55%
28	高效窑传动	52%	58%	65%
29	篦冷机制冷风扇变频器	70%	75%	80%
	终磨	2020	2025	2030
30	研磨能耗管理&工艺控制	60%	67%	75%
31	立式辊磨机替换球磨机	22%	28%	35%
32	球磨机前使用高压滚压机进行预研磨	37%	43%	50%
33	改进球磨机研磨介质	22%	28%	35%
34	（终磨）高效分类器	42%	46%	50%
35	高效水泥磨机排风扇	52%	61%	70%

	一般措施	2020	2025	2030
36	高效电机	62%	68%	75%
37	可变速机	57%	68%	80%
	替换燃料	2020	2025	2030
38	废物与生物质	15%	20%	25%
	产品变化	2020	2025	2030
39	混合水泥	50%	60%	70%

附件7：最大降低情况下能效实施速率

	燃料制备	2020	2025	2030
1	高效碳分离器	59%	84%	100%
2	高效煤研磨混压机	70%	81%	100%
3	安装变频器，替换煤磨袋吸尘器风扇	64%	90%	100%
	原材料制备			
4	立磨生料工艺控制	10%	10%	100%
5	高效分离器	42%	43%	100%
6	高效辊压机	89%	119%	100%
7	高效传输系统	49%	75%	100%
8	生料混合（均质）系统	46%	70%	100%
9	生料磨机排气扇变频器	77%	84%	100%
10	生料斗式运输机	42%	62%	100%
11	高效生料磨机排风扇/变频器	101%	127%	100%
	熟料制作	2020	2025	2030
12	替换立窑悬挂	123%	152%	100%
13	使用篦冷机	20%	30%	100%
14	升级预热/预分解炉窑	50%	80%	100%
15	降低窑壳损耗（改进耐火材料）	36%	42%	100%
16	膜式富氧燃烧	27%	52%	25%
17	能耗管理和工艺控制系统	53%	67%	100%
18	升级老旧干式窑炉为多级预热窑炉	46%	72%	100%
19	五级预热升级成六级预热	43%	67%	100%
20	优化热回收/升级熟料冷却器	33%	52%	100%
21	优化篦冷机	82%	93%	100%
22	改进燃烧系统	10%	10%	100%
23	电力低温预热回收	98%	114%	100%
24	可变速窑风扇	53%	82%	100%
25	悬浮预热器低压降旋风分离器	83%	107%	100%
26	窑填料斗式提升机	50%	79%	100%
27	高效预热风扇	51%	71%	100%
28	高效窑传动	64%	83%	100%
29	篦冷机制冷风扇变频器	65%	65%	100%
	终磨	2020	2025	2030
30	研磨能耗管理和工艺控制	70%	89%	100%
31	立式辊磨机替换球磨机	15%	15%	100%
32	球磨机前使用高压滚压机进行预研磨	47%	63%	100%
33	改进球磨机研磨介质	15%	15%	100%
34	（终磨）高效分类器	48%	58%	100%
35	高效水泥磨机排风扇	43%	43%	100%
	一般措施	2020	2025	2030
36	高效电机	55%	55%	100%
37	可变速机	45%	45%	100%

	替换燃料	2020	2025	2030
38	废物与生物质	10%	10%	60%
	产品变化	2020	2025	2030
39	混合水泥	40%	40%	70%

References

- Abrell, J., Betz, R., Kosch, M., Kardish, C., & Mehling, M. (2020, December). *The Californian Emissions Trading System and Electricity Market: Influence of market structures and market regulation on the carbon market*. German Environment Agency. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_03_cc_49-2020_case_studies_californian_electricity_market.pdf
- American Council for an Energy-Efficient Economy. (2020). *2020 State Energy Efficiency Scorecard*, P. 117. American Council for an Energy-Efficient Economy. <https://www.aceee.org/research-report/u2011>
- American Institute of Physics. (2020, March 26). *FY21 Budget Request: DOE Applied Energy R&D*. American Institute of Physics. <https://www.aip.org/fyi/2020/fy21-budget-request-doe-applied-energy-rd>
- Andrew, R.M. (2019). Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *Earth System Science Data*, 11, 1675–1710. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>
- Aquilera, R., Corringham, T., Gershunov, A., & Benmarhia, T. (2021). Wildfire smoke impacts respiratory health more than fine particles from other sources: observational evidence from Southern California. *Nature Communications*, 12, 1493. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21708-0>
- Baker, D. (2021, April 1). *California to Test Whether Big Batteries Can Stop Summer Blackouts*. Bloomberg. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-04-01/to-avoid-blackouts-california-s-installing-more-big-batteries-than-all-of-china>
- Bannon, E. (2019, September 10). *Low emission zones are a success – but they must now move to zero-emission mobility*. Transport & Environment. <https://www.transportenvironment.org/publications/low-emission-zones-are-success-%E2%80%93-they-must-now-move-zero-emission-mobility>
- Barboza, Tony. (2021, January 13). *Wildfire smoke now causes up to half the fine-particle pollution in Western U.S., study finds*. LA Times. <https://www.latimes.com/california/story/2021-01-13/wildfire-smoke-fine-particle-pollution-western-us-study>
- Bay Area Air Quality Management District. (2017, April). *Final 2017 Clean Air Plan p. ES-5*. Bay Area Air Quality Management District. https://www.baaqmd.gov/~/media/files/planning-and-research/plans/2017-clean-air-plan/attachment-a_proposed-final-cap-vol-1-pdf.pdf
- BloombergNEF. (2020, December 16). *Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh*. BloombergNEF. <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>
- BloombergNEF. (2019, December 3). *Battery Pack Prices Fall As Market Ramps Up With Market Average At \$156/kWh In 2019*. BloombergNEF. <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/>
- California Air Resources Board. (2013). *ARB Almanac 2013 - Chapter 2: Current Emissions and Air Quality 2-3 and 2-6*. California Air Resources Board. <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/resource-center/technical-assistance/air-quality-and-emissions-data/almanac-2>
- California Air Resources Board. (2020, October). *ARB presentation on October 28, 2020*. California Air Resources Board.
- California Air Resources Board. (2017). *California's 2017 Climate Change Scoping Plan*. California Air Resources Board. https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/cc/scopingplan/scoping_plan_2017.pdf

California Air Resources Board, California Energy Commission, and California Public Utilities Commission. (2021, March). *2021 SB 100 Joint Agency Report*. California Air Resources Board, California Energy Commission and California Public Utilities Commission.
<https://efiling.energy.ca.gov/EFiling/GetFile.aspx?tn=237167&DocumentContentId=70349>

California Air Resources Board. (2020). *California Greenhouse Gas Emissions for 2000 to 2018: Trends of Emissions and Other Indicators*. California Air Resources Board.
https://ww3.arb.ca.gov/cc/inventory/pubs/reports/2000_2018/ghg_inventory_trends_00-18.pdf

California Air Resources Board. (2020, December 10). *California introduces groundbreaking program to reduce climate super pollutants*. California Air Resources Board. Retrieved 16 February 2020 from ww2.arb.ca.gov/news/california-introduces-groundbreaking-program-reduce-climate-super-pollutants.

California Air Resources Board. (2008, December). *Climate Change Scoping Plan: A Framework for Change*. California Air Resources Board.
https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/cc/scopingplan/document/adopted_scoping_plan.pdf

California Air Resources Board. (2021). *Data Dashboard*. California Air Resources Board.
<https://ww3.arb.ca.gov/fuels/lcfs/dashboard/dashboard.htm>.

California Air Resources Board, California Energy Commission, and California Public Utilities Commission. (2020, December 3). *Draft 2021 SB 100 Joint Agency Report*, p. 86. California Air Resources Board, California Energy Commission and California Public Utilities Commission.
<https://efiling.energy.ca.gov/getdocument.aspx?tn=235848>

California Air Resources Board. (2014, May). *First Update to the Climate Change Scoping Plan*. California Air Resources Board.
https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/classic/cc/scopingplan/2013_update/first_update_climate_change_scoping_plan.pdf

California Air Resources Board. (2021, February 21). *Improved Program Measurement Would Help California Work More Strategically to Meet Its Climate Change Goals*. California Air Resources Board.

California Air Resources Board. (2016, May 16). *2016 Mobile Source Strategy*. California Air Resources Board. <https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/2016-mobile-source-strategy>

California Air Resources Board. (2020). *Public Comment Draft—Greenhouse Gas Emissions of Contemporary Wildfire, Prescribed Fire, and Forest Management Activities*. California Air Resources Board.
https://ww3.arb.ca.gov/cc/inventory/pubs/ca_ghg_wildfire_forestmanagement.pdf

California-China Climate Institute. (2020, September). *Driving to Zero: California and China's Critical Partnership on Zero Emission Vehicles*. California-China Climate Institute.
<https://ccci.berkeley.edu/sites/default/files/ZEV%20Paper%20-%20September2020.pdf>

California Climate Investments. (2020, March). *California Climate Investments Annual Report to the Legislature on California Climate Investments Using Cap-and-Trade Auction Proceeds*, p. iv-v. California Climate Investments. <http://www.caclimateinvestments.ca.gov/annual-report>

California Energy Commission. (2020). *2019 Building Energy Efficiency Frequently Asked Questions*. California Energy Commission. Accessed 23 February, 2021, from www.energy.ca.gov/sites/default/files/2020-03/Title_24_2019_Building_Standards_FAQ_ada.pdf.

California Energy Commission. (2021). *California Clean Energy Almanac 2020*. California Energy Commission. Accessed 22 February 2021 from <https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-02/2020%20-%20CEC%20-%20CCEA%2002.04.21%20ADA.pdf>.

California Energy Commission. (2019, November). *2019 California Energy Efficiency Action Plan*, p. 38. California Energy Commission. <https://www.energy.ca.gov/filebrowser/download/1900>

California Energy Commission. (2021). *2022 Building Energy Efficiency Standards*. California Energy Commission. www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/building-energy-efficiency-standards/2022-building-energy-efficiency

California Energy Commission. (2021). *Acceptance Test Technician Certification Provider Program Frequently Asked Questions*. Accessed 5 April 2021 from <https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/acceptance-test-technician-certification-provider-program/acceptance-0>

California Energy Commission. (2020). *Adopted 2019 Integrated Energy Policy Report*. California Energy Commission. <https://efiling.energy.ca.gov/getdocument.aspx?tn=232922>

California Energy Commission. (2021, January). *Assembly Bill 2127 Electric Vehicle Charging Infrastructure Assessment: Analysing Charging Needs to Support Zero-Emission Vehicles in 2030*, 1. California Energy Commission. <https://efiling.energy.ca.gov/getdocument.aspx?tn=236237>

California Energy Commission. (2021). *Building Energy Benchmarking Program Frequently Asked Questions*. California Energy Commission. <https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/building-energy-benchmarking-program/building-energy-benchmarking>

California Energy Commission. (2021). *Home Energy Rating System Program – HERS*. California Energy Commission. Accessed 5 April 2021 from <https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/home-energy-rating-system-hers-program>

California Energy Commission. (2020). *Introduction to Flexible Demand Appliance Standards*, p. 5. California Energy Commission. Accessed 9 December 2020 from <https://efiling.energy.ca.gov/GetDocument.aspx?tn=235899>

California Energy Commission. (2020). *State Releases Final Plan to Transform Freight System*. California Energy Commission. Accessed May 20 2020 from <https://calenergycommission.blogspot.com/2016/07/state-releases-final-plan-to-transform.html>

California Energy Commission. (2018, September). *Tracking Progress: Energy Efficiency*. California Energy Commission. https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2019-12/energy_efficiency_ada.pdf

California Energy Commission. (2018, August). *Tracking Progress: Energy Storage*. California Energy Commission. https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2019-12/energy_storage_ada.pdf

California Energy Commission. (2019). *Tracking Progress: Renewable Energy*. California Energy Commission. https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2019-12/renewable_ada.pdf

California Energy Commission. (2019). *California Building Energy Benchmarking Program*. California Energy Commission. https://tableau.cnra.ca.gov/t/CNRA_CEC/views/EnergyEfficiencyBenchmarkingDashboard/BenchmarkingDashboard?iframeSizedToWindow=true&%3Aembed=y&%3AshowAppBanner=false&%3Adisplay_count=no&%3AshowVizHome=no&%3AshowShareOptions=false

California Environmental Protection Agency. (2021) *Lithium-ion Car Battery Recycling Advisory Group*. California Environmental Protection Agency. <https://calepa.ca.gov/climate/lithium-ion-car-battery-recycling-advisory-group/>.

California Public Utilities Commission. (2016). *Actions to Limit Utility Cost and Rate Increases - Public Utilities Code Section 913.1 Report to the Governor and Legislature*, p. 5. California Public Utilities Commission. <https://www.cpuc.ca.gov/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=6442457283>

California Public Utilities Commission. (2021). *DR Information and FAQs for Consumers*. California Public Utilities Commission. <https://www.cpuc.ca.gov/General.aspx?id=5923>

California Public Utilities Commission. (2013, July). *Energy Efficiency Policy Manual, p 1*. California Public Utilities Commission. https://www.cpuc.ca.gov/uploadedfiles/cpuc_public_website/content/utilities_and_industries/energy_-_electricity_and_natural_gas/eepolicymanualv5forpdf.pdf

California Public Utilities Commission. (2018, May). *Energy Efficiency Portfolio Report 10*. California Public Utilities Commission. <https://www.cpuc.ca.gov/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=6442459323>

California Public Utilities Commission. (2021). *Energy Storage*. California Public Utilities Commission <https://www.cpuc.ca.gov/General.aspx?id=3462>.

California Public Utilities Commission. (2021). *How is my bill calculated?* California Public Utilities Commission. <https://www.cpuc.ca.gov/General.aspx?id=12188>.

California Public Utilities Commission. (2021). *Net Energy Metering (NEM)*. California Public Utilities Commission. <https://www.cpuc.ca.gov/NEM/>.

California Public Utilities Commission. (2020, January). *Self-Generation Incentive Program Revisions Pursuant to SB700 and Other Program Changes*. California Public Utilities Commission. <https://docs.cpuc.ca.gov/PublishedDocs/Published/G000/M325/K979/325979689.PDF>

California Public Utilities Commission. *What are TOU Rates?* California Public Utilities Commission. <https://www.cpuc.ca.gov/General.aspx?id=12194>.

California Public Utilities Commission. (2020). *What is the Impact of CPUC Energy Efficiency Programs? 2019 Results and 2020 Look Ahead, p. 2*. California Public Utilities Commission. <https://www.cpuc.ca.gov/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=6442465530>

California Public Utilities Commission. (2021). *Zero Net Energy*. California Public Utilities Commission. <https://www.cpuc.ca.gov/ZNE/>

Center for Law, Energy and Environment. (2019). *California Climate Policy Fact Sheet: Building Energy Efficiency*. UC Berkeley. Accessed 23 February 2021 from www.law.berkeley.edu/wp-content/uploads/2019/12/Fact-Sheet-Building-Energy-Efficiency.pdf.

Cement Sustainability Initiative. (2018). *GNR Project*. Cement Sustainability Initiative. <https://gccassociation.org/gnr/>

Charging, Low Emission Zones, other Access Regulation Schemes (CLARS). (2021). *Urban Access Regulations in Europe*. Charging, Low Emission Zones, other Access Regulation Schemes (CLARS). <https://urbanaccessregulations.eu/low-emission-zones-main/impact-of-low-emission-zones>

China Automotive Technology and Research Center. (2018). *China Green Freight Assessment*. China Automotive Technology and Research Center. <https://www.ccacoalition.org/en/resources/china-green-freight-assessment>

China Building Materials Federation (CBMF). (2017, June 7). *Cement industry 13th Five-Year Development Plan*. China Building Materials Federation. <http://www.cbmf.org/cbmf/yw/6675038/index.html>

China Building Materials Federation (CBMF). (2021, January 16). *Fully promote carbon emissions reductions to achieve carbon peaking ahead of time*. China Building Materials Federation. <http://www.cbmf.org/cbmf/yw/7045330/index.html>

China Cement Association (CCA). (2017). *13th Five-Year Plan for Cement Industry*. China Cement Association. <http://www.cement.com/news/content/9012415094564.html#top>

China Cement Association. (2020, November 20). *2019 Top 30 Largest Cement Companies in the World*. China Cement Association. <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/201120-e1fd5737.html>

China Cement Association. (2008, March). *China Cement Almanac 2007*. China Building Materials Industry Press. Beijing, China.

China Cement Association. (2014, March). *China Cement Almanac 2012-2013*. China Building Materials Industry Press. Beijing, China.

Chuanhua Charity Institute. (2018). *Group Characteristics and Labor Process of the Truck Drivers*. Social Sciences Academic Press.

Delaski, A. (2021, March 8). *Biden, States Kick Off Pivotal Year for Appliance Efficiency Standards* | American Council for an Energy Efficient Economy. <https://www.aceee.org/blog-post/2021/03/biden-states-kick-pivotal-year-appliance-efficiency-standards>

Delgado, O., Zhao, L., Zheng, T., He, H., Yang, L., Muncrief, R. and Sharpe, B. (2017, July). *Market Analysis and Fuel Efficiency Technology Potential of Heavy-Duty Vehicles in China*. International Council on Clean Transportation. https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/China-HDV-Market-Tech_ICCT-White-Paper_20072017_vF.pdf

Digital Cement. (2021, April). *Building materials industry to realize carbon peaking and carbon neutral still faces significant challenges*. Digital Cement. <http://www.dcement.com/article/202104/170984.html>

Digital Cement. (2021, April 6). *China Cement Association publishes Top 50 Cement companies in 2021*. Digital Cement. <http://www.dcement.com/article/202104/171108.html>

Digital Cement. (2020, July 9). *Ministry of Industry and Information Technology: the adoption rate of low temperature waste heat to power generation exceeds 80% in cement industry*. Digital Cement. <http://www.dcement.com/article/202007/168180.html>

Dooley, E.C. (2021, January 5). *California's 2020 Wildfire Emissions Akin to 24 Millions Cars*. Bloomberg Law. <https://news.bloomberglaw.com/environment-and-energy/californias-2020-wildfire-emissions-akin-to-24-million-cars>

Dunant, C., Shanks, W., Drewniok, M., Lupton, R., Cabrera Serrenho, A., & Allwood, J. (2019). How much cement can we do without? Lessons from cement material flows in the UK. *Resources, Conservation and Recycling*, 141 441-454. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.002>

duVair, P.H. *Electricity Savings Figures - Title 20 Appliance Efficiency Standards*. Received by Robert Weisenmiller, 20 Apr. 2021.

Earthjustice. (2012, January 12). *California Regulators Add Teeth to Landmark Clean Energy Policy*. Earthjustice. <https://earthjustice.org/news/press/2012/california-regulators-add-teeth-to-landmark-clean-energy-policy>

Eilperin, J., Dennis, B., and Muyskens, J. (2020, October 30). *Trump has rolled back 125 climate and environmental policies. It would take Biden years to restore them*. The Washington Post. <https://www.washingtonpost.com/graphics/2020/climate-environment/trump-climate-environment-protections/>

Ellis, L.D., Badel, A.F., Chiang, M.L., Park, R.J.-Y., and Chiang, Y. (2020, June 9). Toward electrochemical synthesis of cement—An electrolyzer-based process for decarbonating CaCO₃ while producing useful gas streams. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of*

- America (PNAS). 117 (23), 12584-12591. <https://doi.org/10.1073/pnas.1821673116>
- European Cement Research Academy (ECRA) and Cement Sustainability Initiative (CSI). (2017). *Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: trying to look ahead, Revision 2017*. https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/CSI_ECRA_Technology_Papers_2017.pdf
- Fan, Y. (2016, November). *Achieving coal cap goals in the cement industry over the 13th FYP*. China Cement Association. <https://www.china5e.com/download/20161101-nrdc/1101-FanYongbin.pdf>
- Friedman, L. (May 14, 2021). *Biden Administration to Repeal Trump Rule Aimed at Curbing E.P.A.'s Power*. The New York Times. <https://www.nytimes.com/2021/05/13/climate/EPA-cost-benefit-pollution.html>
- Hall, D., & Lutsey, N. (2019). *Estimating the infrastructure needs and costs for the launch of zero-emission trucks*. The International Council on Clean Transportation (ICCT) White Paper. <https://theicct.org/publications/zero-emission-truck-infrastructure>
- Hasanbeigi, A., Lobscheid, A., Dai, Y., Lu, H., Price, L., (2012). *Quantifying the Co-benefits of Energy-Efficiency Programs: A Case Study of the Cement Industry in Shandong Province, China* (LBNL-5949E). Lawrence Berkeley National Laboratory. https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/shandong_co-benefit_full_report_english.rev.pdf
- ICF. (2019). *Comparison of Medium- and Heavy- Duty Technologies in California*. ICF. https://www.caletc.com/assets/files/ICF-Truck-Report_Final_December-2019.pdf
- Ilona, J., Choate, W.T., Davidson, A. (2008). *Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry*. BCS Incorporated. <https://doi.org/10.2172/1218716>
- International Energy Agency. (2019, December 19) *Energy efficiency is the first fuel, and demand for it needs to grow*. International Energy Agency. www.iea.org/commentaries/energy-efficiency-is-the-first-fuel-and-demand-for-it-needs-to-grow.
- International Energy Agency. (2017). *The Future of Trucks*. International Energy Agency. <https://doi.org/10.1787/9789264279452-en>
- International Energy Agency, World Business Council on Sustainable Development & Cement Sustainability Initiative. (2018, April). *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>
- Institute for Industrial Productivity and International Finance Corporation. (2014, June). *Waste Heat Recovery for the Cement Sector: Market and Supplier Analysis*. Institute for Industrial Productivity and International Finance Corporation. <https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2014/06/cement.pdf>
- Jakobsen, J., Roussanaly, S., and Anantharaman, R. (2017). A techno-economic case study of CO₂ capture, transport and storage chain from a cement plant in Norway. *Journal of Cleaner Production*, 144, 523-539. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.120>
- Kapoor R., et al. (2020). *Analysis shows continued industry-wide decline in electric vehicle battery costs*. University of Pennsylvania. <https://mackinstitute.wharton.upenn.edu/2020/electric-vehicle-battery-costs-decline/>
- Knipping, E., Bistline, J., Blanford, G. (2020). *Efficient Electrification in California: Assessment of Energy System and Air Quality Impacts*. Electric Power Research Institute. <https://www.epri.com/research/products/3002019494>

- Lei, Y., Zhang, Q., Nielsen, C., and He, K. (2011). An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990–2020. *Atmospheric Environment* 45, 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.034>
- Li, G., Ying Y., Zhang M. et al. (2019). Key Technical Contents of the China VI Emission Standards for Diesel Fueled Heavy-duty Vehicles. *Johnson Matthey Technology Review* 63 (1): 21 - 31. <https://www.technology.matthey.com/wp-content/uploads/pdf/21-31-jmtr-jan19.pdf>
- Liu, H.Q. (2006). Control of SO₂ from cement kiln systems. *China Cement* 11, 74-77. (in Chinese).
- Liu, X., Yuan, Z., Xu, Y., and Jiang, S. (2017). Greening cement in China: A cost-effective roadmap. *Applied Energy*, 189, 233-244. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.057>
- Lu, H., Price, L., Zhang, Q. (2015). Capturing the Invisible Resource: Analysis of Waste Heat Potential in Chinese Industry. *Applied Energy* 161. <http://doi:10.1016/j.apenergy.2015.10.060>
- Martin, K. Esq., (2021, April 12). *Infrastructure Plan: Outlook in Congress*. Norton Rose Fulbright. <https://www.projectfinance.law/publications/2021/april/infrastructure-plan-outlook-in-congress/>
- Martin, K. Esq. (2020, December). *Renewable energy tax credits extended*. Norton Rose Fulbright. <https://www.projectfinance.law/publications/2020/december/renewable-energy-tax-credits-extended/>
- Masanet, E. and Cao, Z. (2020). *Decarbonizing Concrete: Deep decarbonization pathways for the cement and concrete cycle in the United States, India, and China*. Northwestern University Technical Report. https://www.climateworks.org/wp-content/uploads/2021/03/Decarbonizing_Concrete.pdf
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT) and the Ministry of Ecology and Environment (MEE). (2020, December 28). *Two ministries issuing notice on continue to normalize cement production curtailment*. Ministry of Industry and Information Technology and the Ministry of Ecology and Environment. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/yclgy/art/2020/art_6bff7f6bd055439ebd806b7fb230bc37.html
- Ministry of Industry and Information Technology. (2020, July 14). *MIIT: China's green manufacturing is gradually being developed; industry and information technology industry saved 400 billion yuan in energy costs over four years*. <http://sme.miit.gov.cn/cms/news/100000/0000000224/2020/7/14/3d8b92fcbb9447c393e46f2a48bd08a3.shtml>
- Ministry of Industry and Information Technology of China. (2011, November 8). *Cement Industry Development Plan during the Twelfth Five-Year (2011-2015)*. Ministry of Industry and Information Technology of China. http://www.gov.cn/zwgk/2011-11/29/content_2005593.htm
- Monteiro, P.J.M., Miller, S.A., and Horvath, A. (2017). Towards Sustainable Concrete. *Nature Materials* 16 (7): 698–99. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>.
- Moultak, M., Nic, L, Hall, D. (2017). *Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles*. The International Council on Clean Transportation (ICCT) White Paper. <https://theicct.org/publications/transitioning-zero-emission-heavy-duty-freight-vehicles>
- Mudway I., Dundas I., Wood H., et al. (2019). Impact of London's low emission zone on air quality and children's respiratory health: a sequential annual cross-sectional study. *The Lancet* 4(1): E28-E40. [https://www.thelancet.com/journals/lanpub/article/PIIS2468-2667\(18\)30202-0/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanpub/article/PIIS2468-2667(18)30202-0/fulltext)
- National Bureau of Statistics. (2019). *China Energy Statistical Yearbook 2018*. China Statistics Press. Beijing, China.
- National Bureau of Statistics (NBS). (2020). *China Statistical Yearbook 2019*. Beijing: China Statistics Press. National Bureau of Statistics. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>

- National Bureau of Statistics (2021). China Statistical Yearbook 2020. Beijing: China Statistics Press. National Bureau of Statistics. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexeh.htm>
- National Development and Reform Commission (NDRC). (2004). *The People's Republic of China Initial National Communications on Climate Change*. China Planning Press, Beijing (in Chinese).
- Obla, K.H., Hong, R., Lobo, C.L., and Kim, H. (2017). Should Minimum Cementitious Contents for Concrete Be Specified? *Transportation Research Record* 2629: 1–8. <https://doi.org/10.3141/2629-01>.
- Patel, S. (2020, January 14). *Vistra Energizes Massive 1.2-GWh Battery System at California Gas Plant*. Power Magazine. <https://www.powermag.com/vistra-energizes-massive-1-2-gwh-battery-system-at-california-gas-plant/>
- Phadke, A., Khandekar, A., McCall, M., Karali, N., & Rajagopal, D. (2019, September). *Long-haul battery electric trucks are technically feasible and economically compelling*. Lawrence Berkeley National Laboratory Working Paper. Retrieved from https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/working_paper_005_battery_electric_trucks_906_0.pdf
- Price, L., Hasanbeigi, A., Lu, H., and Wang, L. (2009). *Analysis of Energy-Efficiency Opportunities for the Cement Industry in Shandong Province, China*. Lawrence Berkeley National Laboratory. <https://www.osti.gov/servlets/purl/974444>
- Raso, C. (2019, April 1). *Examining the EPA's Proposal to Exclude Co-Benefits of Mercury Regulation*. The Brookings Institution. <https://www.brookings.edu/research/examining-the-epas-proposal-to-exclude-co-benefits-of-mercury-regulation/>
- Reilly, S. (2020, December 9). *Trump's new cost-benefit rule will curb EPA's regulatory power*. Science Magazine. <https://www.sciencemag.org/news/2020/12/trump-s-new-cost-benefit-rule-will-curb-epa-s-regulatory-power>
- Rocky Mountain Institute. (2015, October). *The Economics of Battery Energy Storage*. Rocky Mountain Institute. <https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/03/RMI-TheEconomicsOfBatteryEnergyStorage-FullReport-FINAL.pdf>
- San Joaquin Valley Air Pollution Control District. (2021) *Grant and Incentive Programs*. San Joaquin Valley Air Pollution Control District. <https://valleyair.org/grants/>
- San Joaquin Valley Air Pollution Control District. (2016) *2016 Plan for 2008 8-Hour Ozone Standard, Chapter 2*. San Joaquin Valley Air Pollution Control District. 2016. http://www.valleyair.org/Air_quality_Plans/Ozone-Plan-2016.htm
- San Joaquin Valley Air Pollution Control District. (2018). *2018 Plan for the 1997, 2006, and 2012 PM2.5 Standards*. San Joaquin Valley Air Pollution Control District. <http://valleyair.org/pmplans/documents/2018/pm-plan-adopted/2018-Plan-for-the-1997-2006-and-2012-PM2.5-Standards.pdf>
- San Joaquin Valley Air Pollution Control District. (2010, January 21). *Re: Approval of the District's Regional Energy Efficiency Strategy*. San Joaquin Valley Air Pollution Control District. http://www.valleyair.org/Board_meetings/GB/agenda_minutes/Agenda/2010/January/Agenda_Item_7_Jan_21_2_010.pdf
- Siemens. (2019). *eHighway- electrification of freight transport*. Siemens. <https://new.siemens.com/global/en/products/mobility/road-solutions/electromobility/ehighway.html>
- Sina Financial News. (2020, July 29). *Beginning of cement industry consolidation; can the traditional industry revive itself?* Sina Financial News. <https://finance.sina.com.cn/chanjing/cyxw/2020-07-29/doc-iihvpx7987772.shtml>

Song, H., Ou, X., Yuan, J., Yu, M., & Wang, C. (2017). Energy consumption and greenhouse gas emissions of diesel/LNG heavy-duty vehicle fleets in China based on a bottom-up model analysis. *Energy*, 140, 966–978. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.011>

South Coast Air Quality Management District. (2016) Final 2016 Air Quality Management Plan. South Coast Air Quality Management District. <https://www.aqmd.gov/home/air-quality/clean-air-plans/air-quality-mgt-plan/final-2016-aqmp>

State of California Legislature. (2016, September 26). *Assembly Bill No. 2868 Energy Storage*. State of California Legislature. https://leginfo.ca.gov/faces/billTextClient.xhtml?bill_id=201520160AB2868.

State Council. (2016, January 5). *13th Five-Year Energy Conservation and Emission Reductions Comprehensive Working Plan*. State Council. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm

Sui, T. Personal communication. 2021.

Sun S., Jin J., Xia M. et al. (2020, April). Vehicle emissions in a middle-sized city in China: Current status and future trends. *Environment International* 137: 105514. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105514>

Tabuchi, H and Plumer, B. (2021 May 19). *How Green Are Electric Vehicles?* The New York Times <https://www.nytimes.com/2021/03/02/climate/electric-vehicles-environment.html>

Tan, Q., Wen, Z., Chen, J. (2016, February 16). Goal and technology path of CO2 mitigation in China's cement industry: from the perspective of co-benefit. *Journal of Cleaner Production*, 114, 299-313. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.148>

Tangshan Bureau of Ecology and Environment. (2020, March 13). *Explanation of three standards, including cement industry ultra-low emissions standards*. Tangshan Bureau of Ecology and Environment. <https://sthjj.tangshan.gov.cn/cms/jsp/site001/article.jsp?fchannelidenty=zhengcexiedu&articleId=8a8d825b710600b501710a589f4000be&a1b2dd=7xaac>

The White House. (2021, January 20). *Executive Order on Protecting Public Health and the Environment and Restoring Science to Tackle the Climate Crisis*. Executive Office of the President. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2021/01/20/executive-order-protecting-public-health-and-environment-and-restoring-science-to-tackle-climate-crisis/>

The White House. (2021, April 9). *Summary of the President's Discretionary Funding Request*. Executive Office of the President. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/04/FY2022-Discretionary-Request.pdf>.

The White House. (2021, February). *The White House Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide Interim Estimates under Executive Order 13990*. Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government. https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/02/TechnicalSupportDocument_SocialCostofCarbonMethaneNitrousOxide.pdf

United States Department of Energy. (2015, May 12). *Residential and Commercial ITC Factsheets*. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <https://www.energy.gov/eere/solar/downloads/residential-and-commercial-itc-factsheets>

United States Department of Energy. (2017, January). *Saving Energy and Money with Appliance and Equipment Standards in the United States*. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/01/f34/Appliance%20and%20Equipment%20Standards%20Fact%20Sheet-011917_0.pdf

United States Department of Energy Industrial Technologies Program. (2008, March). *Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry*. United States Department of Energy Industrial Technologies Program. https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf

United States Energy Information Agency. (2021). *California State Profile and Energy Estimates*. United States Energy Information Agency. <https://www.eia.gov/state/data.php?sid=CA#ConsumptionExpenditures>.

United States Energy Information Agency. (n.d.). *International—China*. U.S. Energy Information Administration. Retrieved May 5, 2021, from <https://www.eia.gov/international/analysis/country/CHN>.

United States Environmental Protection Agency. (2021). *Affordable Clean Energy rule*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution/affordable-clean-energy-rule>

United States Environmental Protection Agency. *Air Pollution: Current and Future Challenges*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/air-pollution-current-and-future-challenges>

United States Environmental Protection Agency. (2021) Community Choice Aggregation. United States Environmental Protection Agency. [https://www.epa.gov/greenpower/community-choice-aggregation#:~:text=Community%20choice%20aggregation%20\(CCA\)%2C.service%20from%20their%20existing%20utility](https://www.epa.gov/greenpower/community-choice-aggregation#:~:text=Community%20choice%20aggregation%20(CCA)%2C.service%20from%20their%20existing%20utility)

United States Environmental Protection Agency. (2017). *EPA Energy and Environment Guide to Action. Chapter 4. Energy Efficiency Policies: State Appliance Efficiency Standards*, p. 4-74. United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-06/documents/guide_action_chapter4.pdf

United States Environmental Protection Agency. (2021). *Overview of Greenhouse Gases*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#fluorinated-sources>

United States Environmental Protection Agency. (2018) *Quantifying the Multiple Benefits of Energy Efficiency and Renewable Energy: A Guide for State and Local Governments - Part One: The Multiple Benefits of Energy Efficiency and Renewable Energy*, p. 1-7. United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-07/documents/epa_slb_multiple_benefits_508.pdf

United States Environmental Protection Agency. (2021). *Regulations for Greenhouse Gas Emissions from Passenger Cars and Trucks*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-greenhouse-gas-emissions-passenger-cars-and>

United States Geological Survey. 2020. *Mineral Commodity Summary: Cement*. United States Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-cement.pdf>

United States Government Accountability Office. (2020, June). *Social Cost of Carbon: Identifying a Federal Entity to Address the National Academies' Recommendations Could Strengthen Regulatory Analysis*, p. 16. United States Government Accountability Office. <https://www.gao.gov/assets/710/707871.pdf>.

United States National Highway Safety Administration. (2021). *SAFE The Safer Affordable Fuel-Efficient 'SAFE' Vehicles Rule*. United States National Highway Safety Administration. <https://www.nhtsa.gov/corporate-average-fuel-economy/safe>

Vock, D.C. (2019, May 20). *Governing the Future of States and Localities, Can America's Biggest Ports go Green*. Governing.com. <https://www.governing.com/archive/gov-california-ports-emissions-air-pollution.html>

Wang, L., Chen, H., & Chen, W. (2020). Co-control of carbon dioxide and air pollutant emissions in China from a cost-effective perspective. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(7), 1177–1197. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09872-7>

Wang, A, Shen, S., Pettit, D. (2020, July). *Coordinated Governance of Air & Climate Pollutants: Lessons from the California Experience*. UCLA Law. <https://law.ucla.edu/news/coordinated-governance-air-climate-pollutants-lessons-california-experience>

Worrell, E. and Galitsky, C. 2004. *Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making: An ENERGYSTAR® Guide for Energy and Plant Managers*. Lawrence Berkeley National Laboratory <http://china.lbl.gov/publications/energy-efficiency-improvement-opportunities-cement-industry>

Xinhua. (2020, September 20). *Speech of President Xi at the General Debate of the 75th Session of The United Nations General Assembly*. Xinhua. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm

Xinhua. (2021, January 29 (a)). *Cement quality and price are stable, need to continue to implement cement production curtailment*. Xinhua. http://www.xinhuanet.com/energy/2021-01/29/c_1127039953.htm

Xinhua. (2021 March 5 (b)). *14th Five-Year Plan and development context, guiding policy, and main targets of 2035 Long-term goals*. Xinhua. http://www.xinhuanet.com/politics/2021-03/05/c_1127172897.htm

Yang, L., He, H. 2018. *China's Stage VI emissions standard for heavy-duty vehicles (final rule)*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publications/china%E2%80%99s-stage-vi-emissions-standard-heavy-duty-vehicles-final-rule>

Zhao, B., et al. (2019). Air Quality and Health Cobenefits of Different Deep Decarbonization Pathways in California. *Environmental Science & Technology*, 53(12), 7163-7171. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02385>.

Zhang, Q., Streets, D.G., He, K.B., Klimont, Z. (2007). Major components of China's anthropogenic primary particulate emissions. *Environmental Research Letter* 2 (4), 045027. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045027>

Zhang, S., Worrell, E. Crijns-Graus, W. (2015). Evaluating co-benefits of energy efficiency and air pollution abatement in China's cement industry. *Applied Energy* 147, 192–213, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.081>

Zhou, N., Price, L., Zheng, N., Ke, J., and Hasanbeigi, A. (2011). *National Level Co-Control Study of the Targets for Energy Intensity and Sulfur Dioxide in China* (LBNL-5253E). Lawrence Berkeley National Laboratory. <https://china.lbl.gov/publications/national-level-co-control-study>

Zhu et al. (2020 April). *Effects of Residential Gas Appliances on Indoor and Outdoor Air Quality and Public Health in California*. UCLA Fielding School of Public Health. <https://ucla.app.box.com/s/xyzt8jc1ixnetiv0269qe704wu0ihif7>

8. 免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。
- 本文件属工作报告，在美国政府赞助下编制。虽然我们认为本文件中的信息准确无误，但无论美国政府或其任何机构亦或加州大学董事会董事或其任何雇员，均不对披露的任何信息、设备、产品或流程的准确性、完整性或实用性作任何保证（明示或暗示），承担任何法律责任，或表示其使用不会侵犯私有权利。本文提及任何特定的商品、流程或服务的商品名称、商标、生产商或其他名称，并不构成或暗示美国政府或其任何机构亦或加州大学董事会董事认可、推荐或支持该商品、流程或服务。作者在此所表达的观点和意见并不一定表明或反映美国政府或其任何机构，或加州大学董事的观点和意见。厄内斯特奥兰多劳伦斯伯克利国家实验室对所有申请者提供均等机会。加州-中国气候研究院根据劳伦斯伯克利国家实验室合同（合同号：DE-AC02-05CH11231）对该项研究工作给予了大力支持。

Disclaimer

- Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulted from or related to using this report by any third party.
- The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.

版权声明

- 本手稿由劳伦斯伯克利国家实验室的工作人员根据劳伦斯伯克利国家实验室与美国能源部的合同（合同编号：DE-AC02-05CH11231）撰写。美国政府保留为其自身之目的在全球范围内出版或再版已出版手稿或允许他人出版或再版已出版手稿的非排他性、已缴款、不可撤销的许可。出版商接受出版本文，即表示出版商承认美国政府保留上述许可。

Copyright Notice

- This manuscript was written by Lawrence Berkeley National Laboratory staff under a Lawrence Berkeley National Laboratory contract with the U.S. Department of Energy (Contract Number: DE-AC02-05CH11231). The United States Government reserves a non-exclusive, paid-up, irrevocable license to publish or republish published manuscripts worldwide or to allow others to publish or republish published manuscripts for its own purposes. By accepting the publication of this article by the publisher, the publisher acknowledges that the above license is reserved by the United States Government.