



中美建筑电气化与脱碳

# 中美建筑电气化与脱碳

Stephanie Greene (斯蒂芬妮·格林), 落基山研究所\*

郝一涵, 落基山研究所 (北京办事处)\*

Denise Grab (丹妮丝·格拉布), 落基山研究所 (美国办公室)\*

\* 机构名称仅用于注明作者所在单位。本文仅代表作者个人观点, 并不代表其所在机构观点。

## 整体背景与挑战

建筑占全球温室气体 (GHG) 排放的比例达到40%, 一直是实现全球气候目标面临的持续威胁, 并且其影响与日俱增。在美国, 建筑消费了全国四分之三的电力和三分之一的天然气, 而在全世界, 建筑施工排放占比超过10% (美国能源信息署, 2019; 全球建筑建设联盟, 2021)。

虽然其他行业在减少温室气体排放方面已经取得了进展, 但建筑物部门依旧在朝着错误的方向发展。快速城市化意味着, 到2060年, 全球房屋面积将翻一番, 相当于从现在到2060年, 每个月新建一座与纽约市规模相当的城市 (建筑2030, 无日期)。在美国, 为了服务建筑需求, 天然气系统持续扩张, 平均每分钟新增一位客户, 每年新增客户超过600,000 (美国能源信息署, 2022)。建筑的现状正在威胁全球数十亿人的身心健康。全球有16亿人生活的住房不符合标准 (联合国, 2017)。建筑使用化石能源供暖或烹饪, 还会导致空气污染达到有害程度, 而低收入群体以及黑人、原住民和有色人种 (BIPOC) 会受到更严重的影响。在人们工作生活的地方消除气候和空气污染, 对于改善人类健康至关重要。

总之, 为了解决建筑物对气候和健康的影响, 绝对不能继续往常的做法。未来, 我们需要保证所有建筑做到零碳排放。无论新建筑施工还是现有建筑改造都需要达到零碳标准<sup>1</sup>: 实现全电气化、节能高效并使用低隐含碳 (在行业可用性允许的情况下, 零隐含碳) 材料建造, 包括电气热泵使用低全球变暖潜势 (GWP) 的制冷剂, 并且给建筑使用现场太阳能发电或由零温室气体排放的电网供电。

## 美国的背景与挑战

建筑消费了美国四分之三的电力和三分之一的天然气。住宅和商业建筑的直接化石能源消费产生的排放, 约占美国温室气体排放的10%以上 (美国环境保护局, 2022)。大多数排放来源于燃

<sup>1</sup> 请注意, 能否确保零隐含碳建材和低全球变暖潜势制冷剂的应用, 将取决于工业部门能否实现其脱碳承诺。此处的目标是建筑开发商可以“推动”这种情况发生, 但不应该承担工业脱碳的主要责任。

烧天然气用于满足空间和水的加热、烹饪和衣物烘干等需求。使用丙烷和取暖用油的设备也会产生温室气体排放，尤其是在美国部分地区。建筑中使用天然气产生的另外一种排放来自燃气管网中泄露的甲烷（Lebel等，2022；Weller等，2020）。由于建筑施工需要混凝土和钢材，因此大幅增加了生产这些原材料的工业部门的排放。

建筑燃烧化石能源还会产生直接危害人类健康的其他类型污染物，即氮氧化物（臭氧的前体物）和颗粒物（PM2.5）。建筑设备产生的氮氧化物排放是全美燃气发电厂的两倍以上，尤其是有色人种社区的污染程度较为严重（Dennison等，2021；Tessum等，2021）。

虽然目前市场上已经有用于空间和水加热的零排放技术，但到目前为止，政策并没有形成要求做出改变的明确法规，因此消费者、建筑商和制造商还是一如既往。

## 碳减排潜力

用于空间和水加热的直接零排放热泵技术在成本和性能方面都有巨大改进。由于热泵的效率远高于传统燃气炉（前者的效率是后者的2至4倍），将建筑设备电气化能够为50个州中的48个州减少温室气体排放，覆盖99%的美国人口（McKenna等，2020）。与此同时，美国的电网计划到2030年减排80%，未来将有助于建筑通过电气化进一步减少温室气体排放。简单来说，由于电力排放降低，今天安装的任何热泵未来每一年都会变得更清洁。

然而，为了充分释放建筑电气化和脱碳的潜力，美国需要解决以下挑战：

- **政策和相关市场与中间环节默认选择天然气：**包括新建筑规范、费率、阻碍更换燃料的激励措施等。此外，建筑商、承包商和业主在新建筑施工和建筑翻新时基本会默认选择天然气。政策制定者应该提供鼓励建筑电气化和脱碳的明确信号，以规范市场行为（公用事业公司、生产商、承包商和建筑商等）。
- **公众对于天然气的缺点和电气化的好处认识不足：**大部分承包商、居民和政策制定者认为燃气设备经济实惠、安全可靠并且性能优越。虽然有许多机构正在快速改变立场，开始曝光天然气造成的损害，宣传电气化的好处，但要真正改变人们的想法，将是一个艰难的过程。
- **对电气化可靠性的担忧：**最近几年，美国发生了多次备受关注的电网问题（例如最近在德克萨斯州和加利福尼亚州出现的问题），因此与天然气相比，宣传电气化的可靠性时需要克服公众认知挑战。但另一方面，更具耐候化、更节能、隔热性能良好的房屋，能够产生显著的弹性效益。
- **对低碳建材认识不足和缺少支持政策：**建筑商、业主和政策制定者对于隐含碳是否是需要解决的问题意见不一，导致对低隐含碳产品的需求不足。
- **经济性：**在许多情况下，建筑电气化的成本低于使用天然气，例如新建筑施工，或者用一台热泵取代炉灶和空调等。然而，建筑电气化通常需要一些前期投入（面板升级、布线等）。我们在为电动汽车和屋顶太阳能基础设施升级发放补贴的同时，必须努力降低热泵和建筑电气化的成本。
- **需要更新耐候化和多样化的建筑存量：**美国的建筑存量多样化，并且4,500万套城市住宅存在一种或多种健康和安全隐患，占比高达45%（美国国家健康住房中心，2020）。幸运的是，各州可以利用大量联邦资金（《基础设施投资和就业法案》和《通胀削减法案》）进行

房屋升级改造。然而，与简单的设备更换相比，建筑升级改造会增加时间投入和复杂性。但这样做在健康、安全和能源可负担性方面的长期回报值得投资。例如，高效节能的住宅隔热性能和密闭性良好，与低效建筑相比只需要更小的热泵。总之，耐候化投资1.00美元，可以创造2.78美元非能源效益（能源效率与可持续能源，2020年；无日期。全球建筑建设联盟，2021）。

- **政治：**到目前为止，涉及气候变化的联邦法规一直难以执行。地方和各州的进展不一，很难规模化。然而，最近《通胀削减法案》为建筑脱碳注入的大量资金（500亿美元）具有巨大潜力，或许能够刺激各方采取更多行动。下一步是保证这笔资金得到有效和公平的使用。

## 中国的背景与挑战

中国目前是并且未来将依旧是全球建筑存量最大的国家。中国每年新增建筑面积约40亿平方米，占全球新增建筑面积的近一半。建筑整个生命周期的碳排放占全国总排放量的51%，其中22%来自使用阶段，29%来自混凝土和钢材等原材料和施工过程（中国能源效率协会，2020年；全球建筑建设联盟，2021）。供暖占建筑使用阶段排放的20%，供暖使用的化石能源和化石能源发电厂的间接排放，使其成为建筑业最大的排放来源。

中国幅员辽阔，划分成五个主要气候区，每个区都有不同热工设计要求。华北地区覆盖了最冷的两个气候区，在冬季需要空间加热。城市主要依靠集中供暖，而农村地区主要使用热泵和燃气锅炉等家庭供暖系统。在华北地区，供暖被作为公共服务，但华南地区尽管某些地区冬季的温度可能会降至5摄氏度（41华氏度）以下，却一直没有实行集中供暖。随着收入增长，华南地区的居民要求改善室内舒适度，并开始购买加热器。我们预测，如果没有干预措施，华南地区的居民会选择燃气炉而不是热泵。例如，长三角地区有2.2亿人口，相当于美国总人口的三分之二。落基山研究所的分析显示，未来10年，随着长三角地区对供暖的需求增长，如果选择使用燃气设备，所产生的碳排放将增加两倍，影响区域和国家气候目标的实现（Wang，2021）。

中国政府目前的承诺是到2030年建筑行业碳排放达峰，到2060年实现碳中和。作为落实“双碳”计划的措施之一，中国政府将确立推动绿色低碳城市发展和乡村建设的政策体系和制度机制。此外，政府将进一步完善建筑节能水平目标，并要求能源利用效率符合更高的国际标准。能效改善、建筑电气化和脱碳以及建筑分布式能源开发，能够将建筑运营排放减少72%，而碳捕集与封存技术可将隐含碳排放减少28%。

### 挑战：

- **建筑利用率不足和不符合标准：**中国建筑的平均寿命只有30年，远远落后于欧美国家。住宅和商业建筑的空置率为12%，增加了建材的隐含碳排放。与此同时，随着人们生活水平的提高，对建筑热舒适性的需求增长，尤其是在农村和华南地区。在没有干预的情况下，改善建筑质量和室内热舒适性可能增加化石能源消费。
- **施工和运营阶段效率不足：**虽然新建筑在规划设计阶段通常会考虑到建筑运行的能源效率，但目前并没有针对隐含碳的低碳采购或规格规定。这导致施工过程中普遍使用碳密集型建材，尽管现在已经有低隐含碳产品可供使用并且可以进一步开发。例如，改变混凝土配比规格能够显著减少碳排放，或者使用生物材料取代钢材也会对减少排放产生重要的积极影响，

但这需要在建筑设计阶段就做出这些选择。由于以前执行的能效要求较低（或根本没有要求），因此旧建筑和农村建筑的能效同样远低于新建筑。虽然数字控制和预制化等技术能够提高建筑效率，但这些技术的应用并不普遍。

- **现场化石能源消耗：**建筑的空间和水加热以及烹饪通常都会现场消耗化石能源。这部分能耗可以由电气化取代，例如热泵和电炉灶等。在华北地区，自2017年开始发放“清洁供暖”补贴以来，燃煤供暖已经被电驱动热泵和燃气锅炉所取代。在华南地区，随着供暖需求持续增长，燃气锅炉占据了主要市场份额。公众对于电气化的认识以及电气化的经济性是推广电气化的重要挑战，需要通过政策手段来解决。然而，目前全电气化设备并没有与燃气设备一样的指导标准。此外，建筑中的分布式可再生能源渗透率较低。
- **华北地区的集中供暖：**在华北地区的城市，供暖由集中供暖系统作为公共服务向市民提供。华北约80%的建筑集中供暖系统使用的热源是燃煤热电联产（CHP）和燃煤锅炉。虽然过去几年，燃煤热电联产的能源效率有所提升，但供暖产生的碳排放依旧是中国实现碳中和目标面临的一个严重问题。

## 给美国的建议

如前文所述，有多项挑战阻碍了美国建筑业全面脱碳。通过执行有针对性的政策和市场转型措施，美国能够促进建筑业转型，为所有人提供健康、经济和零排放的建筑。以下措施将有助于掀起建筑行业的脱碳革命：

- **全电气化或电气化优先的新建筑规范**

以电气化为重点的建筑规范是建筑脱碳的关键工具。新建筑施工是最经济有效的干预点，因为可以从最开始为建筑选择最佳设计。在多数研究区域，建设全电气化住宅的成本低于使用天然气的住宅的建设成本（McKenna等，2020）。

2019年，加利福尼亚州伯克利通过了第一项全电气化建筑规范，之后多个城市和州都形成了支持电气化建筑规范的势头，但重要的是各地区应该调动并说服更多关键利益相关者参与规范制定过程。许多建筑协会和行业组织对建筑电气化规定表示担忧，尤其是技术较为陌生或者在某些类型的建筑中并不常用等问题。通过激励、培训、技术援助等措施，将有助于顺利转型，为建筑电气化创造市场。

- **鼓励低全球变暖潜势制冷剂的政策和项目**

由于许多制冷剂的全球变暖潜势较高，因此必须出台政策提高对建筑使用低全球变暖潜势制冷剂的要求。使用高全球变暖潜势制冷剂目前是美国存在的一个特定问题。在其他地区，机械设备中通常会使用低全球变暖潜势制冷剂。欧洲、亚洲和澳大利亚市场提供了许多选择，如使用R32、R290（丙烷）和R744（二氧化碳）实现类似（甚至更好的）效果；但北美市场却没有这些选择，只有小企业会从亚洲和欧洲向美国进口设备。

2020年《美国创新和制造法案》授权美国环境保护局根据《基加利修正案》逐步淘汰氢氟烃。2022年9月，美国参议院正式批准了《基加利修正案》，现在政府需要确保其得到有效实施。

美国应该尽快更新建筑规范和标准，支持使用低全球变暖潜势制冷剂，并在全电气化建筑中快

速部署。

政府的激励措施包括《通胀削减法案》、全电气化新建筑规范等，应该对低全球变暖潜势制冷剂热泵的激励效果最为显著，能够为最低全球变暖潜势制冷剂提供研究资金。

- **“清洁采购”和低隐含碳建材规范**

联邦、州和地方政策制定者在推动优先采购低隐含碳建材方面，可以发挥重要的影响力。首先，政府应该通过采购政策，例如加利福尼亚州和科罗拉多州通过的“清洁采购”政策，推动需求转变（Rempher & Olgay, 2021）。“清洁采购”是一项绿色公共采购政策，要求披露钢材和混凝土等大宗建材的温室气体排放量和最高排放强度目标。由于政府公共采购规模庞大，并且覆盖大量资产，因此这些政策向制造商发出了明确的需求信号。

新建筑规范为私营行业加快推行低隐含碳建材规格提供了第二个政策机会。例如，2022年5月，丹佛建筑规范委员会在丹佛绿色规范中使用了低隐含碳的规范语言，要求建筑面积达到25,000平方英尺或以上的开发商必须从一系列可持续建筑和采购策略中做出选择。

随着温室气体排放强度目标变得更加严格，“清洁采购”政策和规范将推动制造商在脱碳方面加大投资。除此之外，政府可以提供财政激励，为创新低碳建材创造一个差异化市场。《通胀削减法案》（IRA）为联邦政府提供了超过20亿美元，用于发展低隐含碳建材，这笔资金可以用于进一步鼓励采购深度脱碳的建材。

- **减少消费者群体（尤其是中低收入（LMI）群体）的前期投入和刺激供应链的激励措施**

有针对性的财政激励措施，在减少消费者需要支付的建筑电气化前期成本和鼓励行业参与者向电气化市场转型方面，将发挥关键作用。前期的销售折扣能够保证低收入家庭负担得起清洁高效的家用设备，无需等待税收抵免。消费者激励措施还应该包括完善建筑围护结构，更新配电板，以保证新热泵的有效运行，并改善节能和提高舒适度。根据美国能源部的Justice40建议，至少40%的消费者激励措施应该留给受贫困和污染影响最严重的基层社区（Young等，2021）。

对市场参与者的激励措施有助于降低成本，鼓励采用电气设备。鼓励承包商和建筑行业安装热泵等技术的中游激励措施尤其重要，因为这些安装者通常会引导业主的采购决策。对制造商和经销商的上游激励措施同样有助于促进技术创新和市场发展。这些激励措施可能有不同资金来源，例如《通胀削减法案》为建筑业投资提供了超过500亿美元激励。其他资金可能来自纳税人（通过电力公司）、州预算和医疗补助或私人保险公司的医疗基金。建筑脱碳对健康的积极影响可能令保险公司受益（Norton, 2022）。

- **电力公司费率改革，降低运行成本**

除了减少前期投入以外，改革电力公司费率对于保证建筑电气化降低家庭能源支出同样至关重要，尤其是对于能源负担较重的低收入家庭而言。如前文所述，热泵的效率远高于燃气设备。然而，由于电力公司费率设计存在问题，建筑电气化可能导致某些地区的消费者承担高能源开支。在某些地区，电价被人为推高，其设计无法支持电气化，而天然气的价格被人为压低。

电力公司委员会应该更新费率，体现建筑电气化的健康、气候和弹性效益。应该采用分时电价费率设计，鼓励在电网清洁能源最充足时使用电气设备。许多电力公司已经开始积极修改电动汽车的充电费率设计，以鼓励交通电气化，我们建议电力公司额外设计费率，鼓励建筑电气化。

- **建筑设备的健康保护性能标准**

美国目前有7,000万栋建筑在直接运行过程中燃烧化石燃料。整栋建筑的大范围翻新或重建的周期通常为20至30多年，但热水器和炉灶等设备的平均更换周期为10至15年。因此，在设备报废时更换，是现有建筑电气化的关键干预点。

加利福尼亚州、德克萨斯州和犹他州的空气监管部门强制要求销售更清洁的燃气用具，从而限制燃气设备所产生的氮氧化物等有害健康的污染物。加利福尼亚州零排放汽车标准曾经在加利福尼亚州等地区掀起了发展电动汽车的运动，监管者可以从中得到启示，制定针对建筑设备的零排放设备标准。到目前为止，加州空气资源委员会的空气监管部门在加利福尼亚州两个区域性空气质量管理区以及全州提出了建筑设备零排放标准。这些标准最终通过之后，到2030年，加利福尼亚州将停止销售燃气设备。

除了州和联邦空气监管部门制定家电排放标准以外，美国能源部（DOE）也可以出台更严格的家电能效标准。例如，能源部最近计划提高家用炉灶的年度燃料利用效率（AFUE），将激励向更清洁的家用电器转型（美国能源部，2022）。根据家电能效法律的规定，在能源部制定联邦能效标准时，各州已经率先行动制定本地的能效标准，能源部的权限只有要求转换燃料（Klass，2010年；Sallee，2022）。因此，虽然能源部的能效标准可以作为家电排放标准的有效补充，但仅靠能效标准不足以充分解决建筑的温室气体排放问题。

- **天然气规划和统一**

除了电力公司费率改革以外，州公共电力公司委员会在减少燃气补贴和逐步淘汰成本高昂且容易泄露的燃气管网方面，能够发挥重要作用。对扩建天然气系统停止发放补贴，有助于降低总体能源成本，为天然气和电气化服务创造公平的竞争环境。目前，许多州允许天然气公司使用纳税人的钱，付费给建筑商在房屋中铺设新天然气管线，即所谓的管线延伸补贴（Alter等，2021）。用于扩建天然气系统的这些补贴成本高、效率低，必须淘汰。

公共电力公司委员会的其他政策可以帮助减少建筑对天然气的依赖，包括（Billimoria& Henchen，2020）要求天然气公司进行“非管道替代方案分析”，投资天然气管线的维修、更换或延长不能自动获得批准；探索如何“精简天然气系统”；以及确定开始淘汰大部分天然气输送系统的战略性方法。

## 给中国的建议

- **合理的施工量，建筑性能达到标准**

政府政策应该鼓励开发商避免频繁拆除重建，而是将重心从新建筑向维护和完善功能转变。政策还应该为建筑行业注入活力，提供降低空置率和提高建筑利用率的激励措施。对于缺少能源服务的建筑，应该制定标准推动电气化，逐步限制使用化石能源来满足对热舒适性的需求。

- **提高建筑运行的效率**

政府应该完善建筑能效标准体系，推动零排放建筑翻新和低碳城市改造。城市规划和建筑设计的法律过程应该考虑碳中和目标。为了加快新技术部署，必须利用激励性政策，推动数字控制和预制化等技术的应用。

- **集中供暖使用低碳或零碳热源并开发新技术**

为了逐步淘汰燃煤热电联产和燃煤锅炉，政策应该鼓励利用低碳热源，如地热能、工业废热和地源/水源热泵取代煤炭。集中供暖是一种传统供暖方法，政府应该加大对新技术的研发资金支持，以取代集中供暖系统。

- **政策应该激励和促进建筑施工使用低隐含碳建材。**

政策制定者应该执行激励项目，鼓励停止使用碳密集型建材，并推广低碳和天然建材，如低碳混凝土和水泥、生物材料和绿色钢材等。美国的“清洁采购”政策在这方面开创了很好的先例。低隐含碳建筑规范、对采购深度脱碳建材的资金激励以及建筑整体生命周期评估（WBLCA）性能基准等新政策，将加快建材脱碳。

- **法律规定应该激励并最终要求建筑停止现场燃烧煤炭和天然气等化石能源，鼓励使用可再生能源。**

法律规定中还应该确定建筑停止现场煤炭消耗的时间期限。与此同时，政策应该为推动电气化取代化石能源提供激励措施。例如，在长三角地区，居民已经开始使用取暖设备，当地政府应该启动宣传教育活动，介绍热泵在健康和效率方面的效益。此外，政府应该执行激励措施，鼓励居民用热泵取代燃气炉灶。最后，行业标准中应该添加要求建筑增加分布式可再生能源应用的规定。

## 中美合作的机会

中美两国可以在许多领域进一步展开合作，其中包括：

- **“二轨”对话：**建立二轨对话渠道，为中美两国创造相互学习的机会，包括联邦/国家最佳实践分享、州/省领导人交流等，对话的主题包括政策、市场机制、技术等领域。例如，两国可以创造沟通的机会，将加利福尼亚州、纽约州和华盛顿州制定全电气化新建筑规范的最佳实践，与中国全电气化新建公共建筑全国试点项目进行对比。
- **全球奖项：**中美两国应该共同设立一个两年一度的奖项，鼓励市场领导者设计和投资零排放地标建筑，目标是到2030年零排放地标建筑达到300座。
- **普惠金融：**建立绿色金融机制，以推动建筑脱碳，例如中美“零碳就绪”<sup>2</sup>经济适用房基金，以及中美“零碳就绪”农村住宅绿色基金等。
- **联合研究：**由两国提供公共资金成立官方联合研究机制，鼓励企业领导人和学术带头人在最紧迫的问题上展开合作，加快扩大零碳建筑的规模，例如找到推广零碳建筑的区域解决方案，以及预制化零碳城市改造等。
- **制定政策基准：**中美两国共同制定零碳规划与设计、绿色采购和热泵推广方面的政策基准。
- **技术研发：**分享建筑替代材料技术、能效关键技术和综合可再生能源技术等方面的研发进展。

<sup>2</sup> “零碳就绪”建筑是高效建筑，直接使用可再生能源或使用到2050年将完全脱碳的能源供应（如电力或区域供热）。



## 总结

没有建筑物的脱碳，就无法实现我们的全球气候目标。建筑行业脱碳的进展落后于电力和交通行业，因此改革迫在眉睫，必须保证所有新建筑从最初就采用全电气化和高能效设计，是使用低隐含碳建材建成的零碳建筑，从而避免不必要且成本高昂的天然气基础设施建设，并锁定建筑排放。建筑的排放周期通常长达30至60多年。

世界需要零排放建筑行业降低住房成本负担，同时改善居住质量，为所有人创建一个安全健康的建筑物。为了与气候目标保持一致，我们必须保证：

- 所有新建筑均与气候目标一致（全电气化、高能效、电网交互型），隐含碳减少65%。
- 每年有5%的现有建筑经改造后与气候目标一致（是当前速度的四倍），到2030年将有2,500万栋建筑经过彻底改造。
- 停止出售燃气设备。
- 根据气候目标进行建筑改造的成本，与化石能源改造的成本相当。

美国必须制定政策，优先考虑中低收入群体，保护他们免受成本大幅上涨的影响，例如联邦和州政府投入拨款加快低收入家庭的房屋改造项目。

## 致谢

非常感谢以下诸位外部评审的宝贵意见和建议：

Anand Gopal（能源创新）、Robert Weisenmiller（加利福尼亚州能源委员会前主席）和Adam Hinge（可持续能源伙伴）。

同时感谢落基山研究所的其他同事在数据收集和其他相关领域所提供的支持：Rachel Golden、Kiley Kroh、Chris Potter、王萌。

## 参考文献

1. Alter, A., Billimoria, S., & Henchen, M. (2021). Overextended: It's time to rethink subsidized gas line extensions. <https://rmi.org/insight/its-time-to-rethink-subsidized-gas-line-extensions/>
2. Apte, J. S., Chambliss, S. E., Hill, J. D., Tessum, C. W., Marshall, J. D., & Paoletta, D. A. (2021). PM<sub>2.5</sub> pollutants disproportionately and systemically affect people of color in the United States. *Science Advances*, 7(18), eabf4491. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abf4491>
3. 《建筑2030》. (n. d.). <https://architecture2030.org/why-the-building-sector/> per the Global Alliance for Buildings and Construction 2021 Status Report.
4. Balaraman, K. (2021). California greenlights first-of-its-kind energy code to encourage electrified buildings. <https://www.utilitydive.com/news/california-greenlights-first-of-its-kind-energy-code-to-encourage-electrifi/604863/>
5. 湾区空气质量管理区 (BAAQMD). (2022). <https://www.baaqmd.gov/rules-and-compliance/rule-development/building-appliances>; <http://www.aqmd.gov/home/air-quality/clean-air-plans/air-quality-mgt-plan>

6. Billimoria, S., & Henchen, M. (2020). Regulatory solutions for building decarbonization. <https://rmi.org/insight/regulatory-solutions-for-building-decarbonization/>
7. 加州空气资源委员会 (CARB). (2022). Proposed 2022 State Strategy for the State Implementation Plan [https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2022-08/2022\\_State\\_SIP\\_Strategy.pdf](https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2022-08/2022_State_SIP_Strategy.pdf)
8. 中国建筑节能协会 (2020). <https://www.cabee.org/site/content/24020.html>
9. Dennison, J. Gruenwald, T., & Louis-Prescott, L. (2021). How air agencies can help end fossil fuel pollution from buildings. <https://rmi.org/insight/outdoor-air-quality-brief>
10. 美国能源部. (June 13, 2022). Biden Administration Proposes New Cost-Saving Energy Efficiency Standards for Home Furnaces. <https://www.energy.gov/articles/biden-administration-proposes-new-cost-saving-energy-efficiency-standards-home-furnaces>
11. 美国能源信息署. (2019). Natural Gas Consumption by End Use. [https://www.eia.gov/dnav/ng/ng\\_cons\\_sum\\_dcu\\_nus\\_a.htm](https://www.eia.gov/dnav/ng/ng_cons_sum_dcu_nus_a.htm)
12. 全球建筑建设联盟. (2021). 2021 Global Status Report for Building and Construction. <https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>
13. 美国能源信息署. (2022). <https://www.eia.gov/naturalgas/data.php#consumption>
14. 《能源效率与可再生能源》. (n.d.). About the weatherization assistance program. <https://www.energy.gov/eere/wap/about-weatherization-assistance-program>
15. 美国环境保护局. (2022). <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>
16. 全球建筑建设联盟. 2021. Global Status Report for Buildings and Construction. <https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>
17. Golden, R., & Louis-Prescott, L. (2022). How local governments and communities are taking action to get fossil fuels out of buildings. <https://rmi.org/taking-action-to-get-fossil-fuels-out-of-buildings/>
18. Hamburg, S. P., von Fischer, J. C., & Weller, Z. D. (2020). A national estimate of methane leakage from pipeline mains in natural gas local distribution systems. *Environmental Science & Technology*, 54(14), 8958-8967. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.0c00437>
19. Finnegan, C. J., Jackson, R. B., Lebel, E. D., & Ouyang, Z. (2022). Methane and NO<sub>x</sub> emissions from natural gas stoves, cooktops, and ovens in residential homes. *Environmental Science & Technology*, 56(4), 2529-2539. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c04707>
20. Klass, A.B. (2010). State Standards for Nationwide Products Revisited: Federalism, Green Building Codes, and Appliance Efficiency Standards. *Harvard Environmental Law Review*, 34, 335-368. [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1474930#](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1474930#)
21. Louis-Prescott, L., McKenna, C., & Shah, A. (2020). All-Electric new homes: A win for the climate and the economy. <https://rmi.org/all-electric-new-homes-a-win-for-the-climate-and-the-economy/>
22. Mallory, B., McCarthy, G., & Young, S. (2021). The path to achieving Justice40. <https://www.whitehouse.gov/omb/briefing-room/2021/07/20/the-path-to-achieving-justice40/>; <https://www.thejustice40.com/>

23. McKenna, C., Shah, A., & Silberg, M. (2020). It's time to incentivize residential heat pumps. <https://rmi.org/its-time-to-incentivize-residential-heat-pumps/>
24. 美国国家健康住房中心 (2020). <https://nchh.org/tools-and-data/data/state-of-healthy-housing/executive-summary/>
25. Norton, R. A. (2022). First-Of-Its-Kind project to use private-sector funding to reduce asthma for New York City Medicaid recipients. [https://www.greenandhealthyhomes.org/press\\_release/first-of-its-kind-project-to-use-private-sector-funding-to-reduce-asthma-for-new-york-city-medicaid-recipients/](https://www.greenandhealthyhomes.org/press_release/first-of-its-kind-project-to-use-private-sector-funding-to-reduce-asthma-for-new-york-city-medicaid-recipients/)
26. Olgay V., & Rempher, A. (2021). Colorado passes embodied carbon legislation. <https://rmi.org/colorado-passes-embodied-carbon-legislation/>
27. Pistochini, Theresa, Mitchal Dichter, Subhrajit Chakraborty, Nelson Dichter, Aref About . 2022. *Greenhouse gas emission forecasts for electrification of space heating in residential homes in the US. Energy Policy* 163.
28. Pontecorvo, E. (2022). First all-electric heating mandate for buildings passes in Washington state. <https://grist.org/buildings/washington-state-requires-electric-heat-pumps-buildings/>
29. Sallee, James. (Feb. 22, 2022). Can Federal Appliance Standards Spur Electrification? Energy Institute Blog, UC Berkeley, <https://energyathaas.wordpress.com/2022/02/22/can-federal-appliance-standards-spur-electrification/>
30. 联合国. (2017). Affordable housing key for development and social equality, UN says on World Habitat Day. <https://news.un.org/en/story/2017/10/567552-affordable-housing-key-development-and-social-equality-un-says-world-habitat>
31. Wang, M. (2021). Zero-Carbon heating in China. <https://rmi.org/zero-carbon-heating-in-china/>

