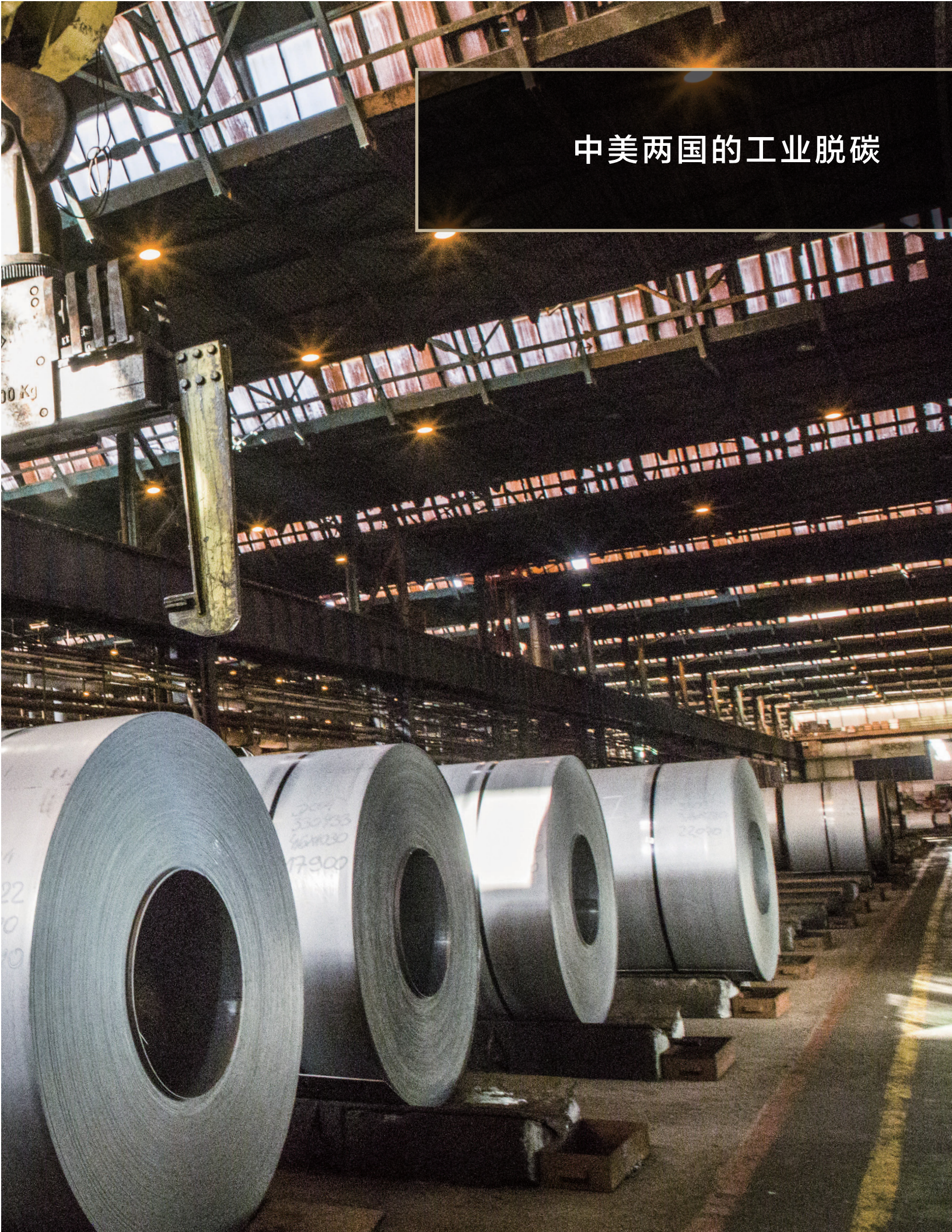


中美两国的工业脱碳

中美两国的工业脱碳

Jeffrey Rissman (杰弗里 · 瑞斯曼)，能源创新公司*
鲁虹佑，劳伦斯伯克利国家实验室*
Al Armendariz (艾尔 · 阿尔门达里斯)，Climate Imperative*
张琦，东北大学*

* 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。

背景与挑战

工业部门在社会向清洁、可持续经济转型过程中的重要性毋庸置疑。工业为我们生产每天使用的材料和产品，包括减少温室气体（GHG）排放必不可少的创新技术，如太阳能板、风力发动机和电动汽车等。然而工业本身就是一个主要温室气体排放源，包括工业外购的电力所产生的排放在内，工业部门约占中国温室气体总排放量的60%（国际能源署，2021；世界资源研究所，2022），在美国总排放量中的占比为30%（国际能源署，2021；美国环境保护局，2022）。因此，工业必须通过技术和工艺实现零排放，同时继续支持数以百万计的优质就业岗位，为所有经济部门脱碳生产必要的技术。中美两国为了履行在2050年至2060年期间实现净零温室气体排放的承诺，必须采取强有力的措施实现工业脱碳。

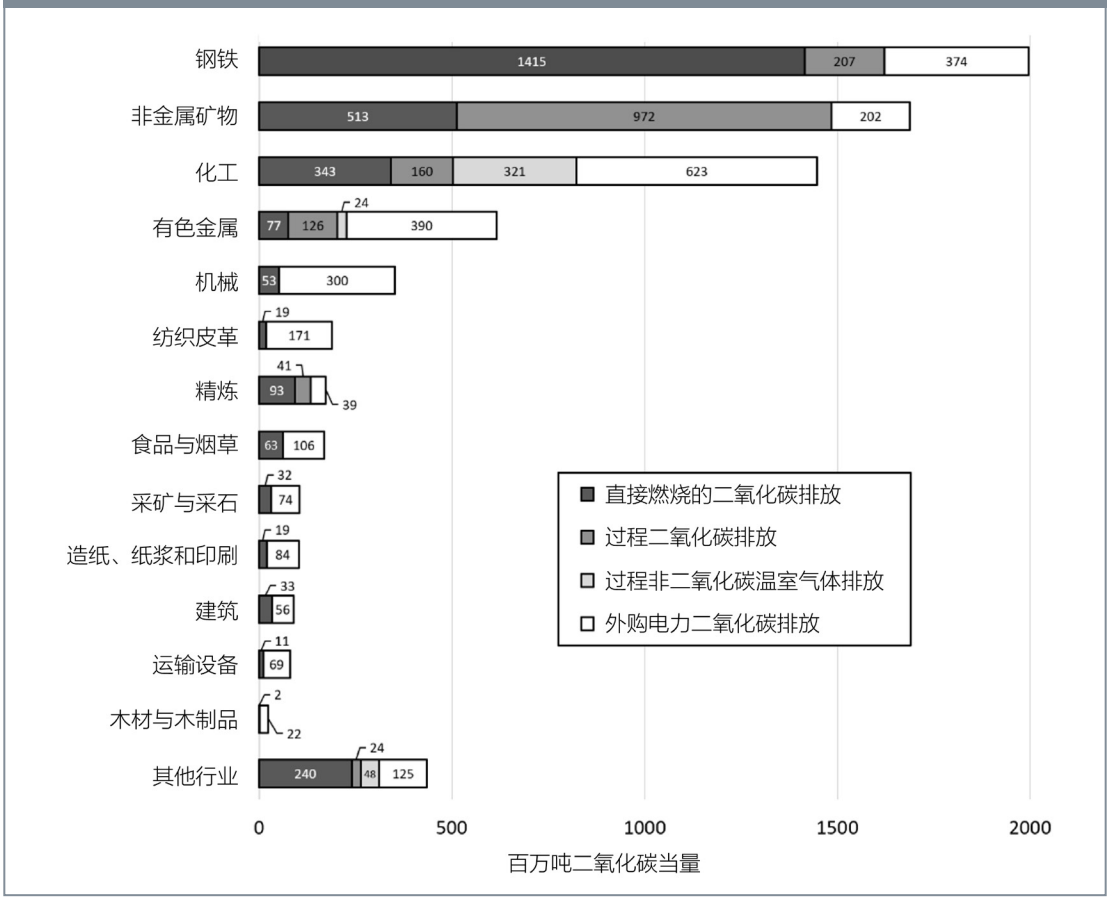
在中美两国，钢铁、非金属矿物（如水泥）和化工是最大的工业排放源（见图1和图2）。有一些减排技术特别针对这些行业，而能源效率、材料效率和电加热等跨领域技术则可以应用于多个行业。

工业设备的寿命长达几十年，因此即使出台了加快部署清洁生产技术的政策，要完成对现有高污染设备的全面更换或升级可能需要多年时间。这个漫长的更新过程使得各工业行业迫切需要尽快开始部署清洁技术。

由于问题的紧迫性，本报告重点分析了当前已经可用的技术，或者中美两国在未来十年可以部署和规模化的技术，例如能源效率、材料效率、循环经济和工业用热直接电气化等。本文还强调了在未来十年内，有必要在高排放行业中建设减排示范设施，例如实现零排放长流程炼钢的创新方法或新水泥化学工艺等。

向清洁工业顺利转型不仅能减少温室气体排放，还能壮大经济，减少空气污染相关疾病和死亡，并巩固两国在清洁能源技术领域的领导地位。

图1：2019年中国工业温室气体排放量及排放类型



（Gütschow等，2019；国际能源署，2021；联合全球变化研究中心，2018；美国环境保护局，2014，2021）。

技术和技术方法建议

材料效率与循环经济

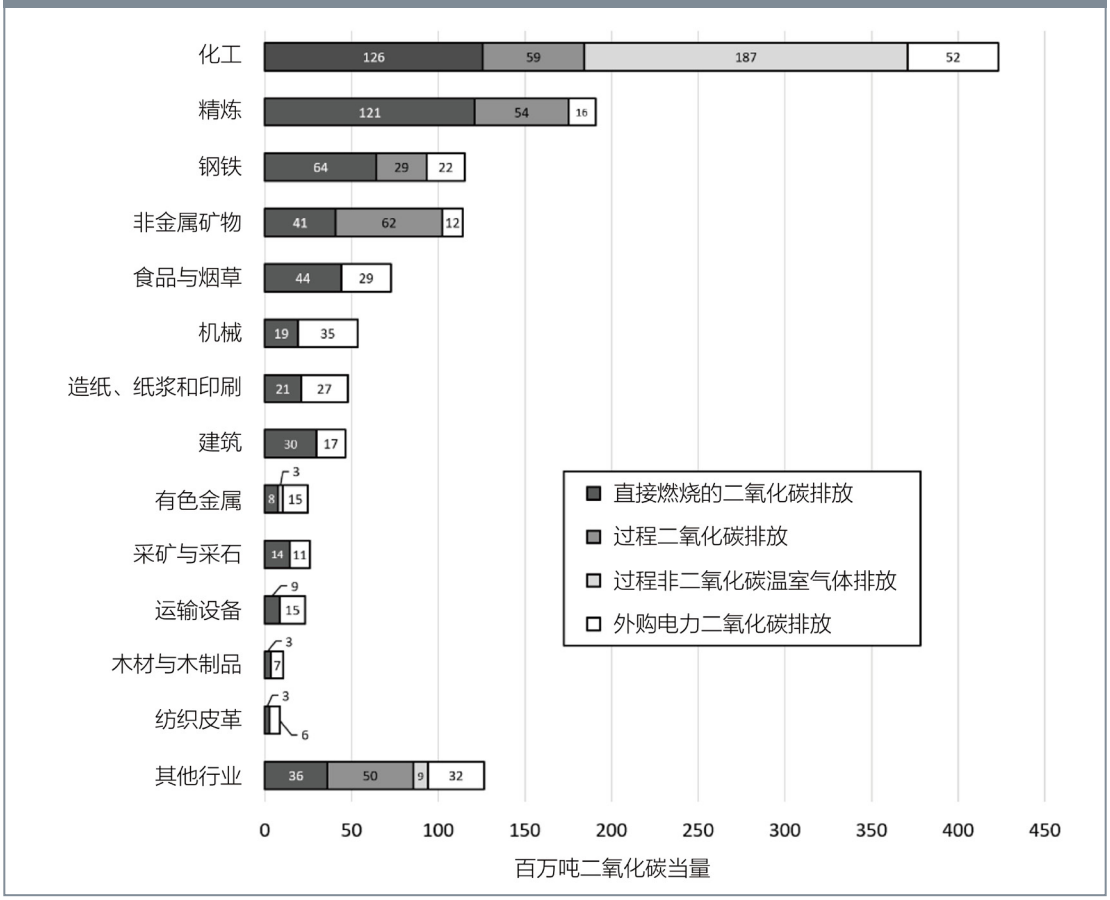
水泥、钢材、铝、铜和塑料等原材料是现代社会建设城市，开发基础设施，提供食物、住所、交通、医疗等服务的关键。工业原材料的提取、加工和生产有巨大的环境影响，约占全球温室气体排放总量的50%（IRP，2020a）。例如，2020年，水泥和钢铁生产分别占中国二氧化碳总排放量的13.5%和15%（《中国证券报》，2021；《经济参考报》，2021）。

全球对原材料的需求增长速度超过人口增长速度，并且与经济发展保持同步。自1970年以来，全球原材料提取量增加了两倍，而全球人口几乎翻了一番（联合国环境署，2016），全球国民生产总值几乎增长到1970年的五倍（国际能源署，2019a）。未来，材料需求预计将持续增长，有专家预测到2060年，全球人均材料需求将翻一番（IRP，2020a）。

因此，为了实现全球气候目标，材料需求与环境影响脱钩势在必行。有许多技术、实践和措施有助于实现这种脱钩。许多技术实践具有成本效益，可以在近期执行，涵盖了材料和产品价值链的设计、生产、使用和再利用/转售阶段。

- **材料设计：完善设计，并使用轻型材料**

图2：2019年美国工业温室气体排放量及排放类型



（Gütschow等，2019；国际能源署，2021；联合全球变化研究中心，2018；美国环境保护局，2014，2021）。

在进行产品设计时，应该采取措施减少或避免使用材料。例如，有研究表明，在不影响功能的前提下，食品和消费品的包装材料可以减少超过20%（材料经济学，2018）。有些产品可以通过数字方式交付（如视频、图书等），而且数字化服务可以减少出行的必要，从而减少对材料密集型汽车和基础设施的需求。在建筑施工时，减少超规格设计可以将建筑构件的水泥用量降低20%（Shanks等，2019），而变截面钢梁可以将标准梁的钢材用量降低约30%（Carruth等，2011）。

- **材料生产：增材制造、装配式建筑和生产良品率提升**

在生产阶段，增材制造（又称3D打印）的效果在航空、医疗和汽车行业已经得到了验证，可用于生产钢材、铝、镍和钛合金等各种聚合物和金属。增材制造仅在需要的情况下添加材料，可以创造复杂的形状，实现高强度和低材料消耗，最高可将材料消耗量减少90%（Huang等，2016）。装配式和模块化建筑在工厂中通过标准化工艺组装建筑构件，可以减少材料消耗，避免材料浪费（IRP，2020b）。中国提出到2030年装配式建筑占当年城镇新建建筑的比例达到40%的目标（住房和城乡建设部与国家发改委，2022）。在汽车行业，通过在设计和生产阶段采用节约材料的最佳实践，可以将钢板生产良品率从56%提高到70%，从而将二氧化碳排放和成本分别降低超过25%（Horton & Allwood，2017）。

- **材料使用：替代材料和延长使用寿命**

一些能源密集型材料可以使用环境影响较小的材料替代。在拥有可持续木材资源的地区，利用

工程木可以减少建筑对混凝土和钢材的需求。例如，最高25层的建筑可以使用工程木制品取代混凝土，如使用胶合木梁和正交胶合木等（Willcoxon，2022）。大型木材可将建筑的混凝土用量减少25%至42%（Churkina等，2020）。纤维包装可以取代约25%的塑料包装，而建筑构件中使用的塑料，有5%可以更换为生物复合材料（材料经济学，2018）。

通过提高材料性能，在结构设计过程中进行耐久度模拟，从而延长产品使用寿命，能够显著节约材料，并减少环境影响（Milford等，2013）。例如，中国的建筑寿命不足欧美建筑的一半，将现有建筑寿命延长一倍，到2060年可将水泥和钢材需求减少20%（Lu等，2022）。

- **重复使用、共享、再制造和回收利用**

如果现主人不再需要一款产品，最好的选择是将其出售或转让，以实现重复使用，避免生产新产品所产生的排放和成本。公司可以设计方便转让的产品，执行回购计划，购买、翻新和重新出售其旧产品。共享系统，类似图书馆一样，不仅可以共享媒体，还能共享工具、园艺设备等产品，从而减少人们对于极少使用的产品的购买需求。

再制造是指将产品拆解后，重新使用产品的零部件。例如，一栋建筑退役后，可以将钢梁进行修复后用于新建筑（Dunant等，2019）。对于经过可拆解设计的建筑，可以将柱、梁和空心板等建筑构件重新用于新施工项目，可将混凝土需求减少68%（Cao等，2021）。汽车零部件再制造也能减少能源和材料需求。研究发现，再制造一台柴油发动机与重新生产一台柴油发动机相比，可以减少90%的能源需求，减少约70%的隐含排放量（Liu等，2014；McKenna等，2013）。

材料回收再利用可以节约能源，减少温室气体排放，具体成效取决于材料的类型。回收再利用最适合金属（尤其是铝）和纸（可避免在填埋场中降解纸所产生的甲烷排放）。玻璃回收再利用所产生的效益相对较小，因为玻璃回收再利用所消耗的能源，与生产新玻璃的能源消耗量基本相当。与塑料生产商的市场营销主张不同，大多数塑料并不适合回收再利用，因为只有少数类型的塑料能够通过具有成本效益的方式回收，而且即使“被回收的”塑料通常也是降级回收（在低级产品中重复使用，最后被作为废料丢弃）。

能源效率

能源效率是最具有成本效益的工业温室气体减排方法之一。提升能效能够减少工业所需要的清洁电力供应，从而加快向净零经济转型，并降低转型成本。即使在提升能效多年之后，依旧有许多机会。研究认为，未来十年，能效提升率有望达到每年2.4%左右（国际能源署，2018年；美国能源部，2016）。中美两国都认识到了提升能效的重要性。2021年10月，中国宣布将节能作为重点工业部门降碳的关键措施，并提出了到2025年达到国际能效标杆水平的工业产能比例超过30%的目标（中国国家发展和改革委员会，2021），而美国能源部“更好的工厂”计划旨在在未来十年，将制造业的能源强度下降25%（美国能源部，未明确日期）。

工业能效提升可以从三个层面展开，分别是个体设备层面、工厂设施层面和设施以外层面，如业务实践和产品设计等。在个体设备层面，有数百种适合工业的节能技术和实践具有成本效益，并且已经实现商业化。例如，制造企业可以更多使用铸造和锻压等成形加工工艺，减少钻孔和研磨等浪费材料的机械加工工艺。工业部门在使用电动机和泵时，可以选择变频驱动装置，因为这类驱动装置可以根据载荷调整速度和扭矩。工业设施应该避免使用空气压缩系统，因为该系统的效率通常

只有约10%（Galitsky & Worrell，2008）。相反，工业设施可以使用风扇制冷；利用毛刷、吹风机或真空泵清洁零部件和清理碎屑；用电动机或液压装置移动机械设备。

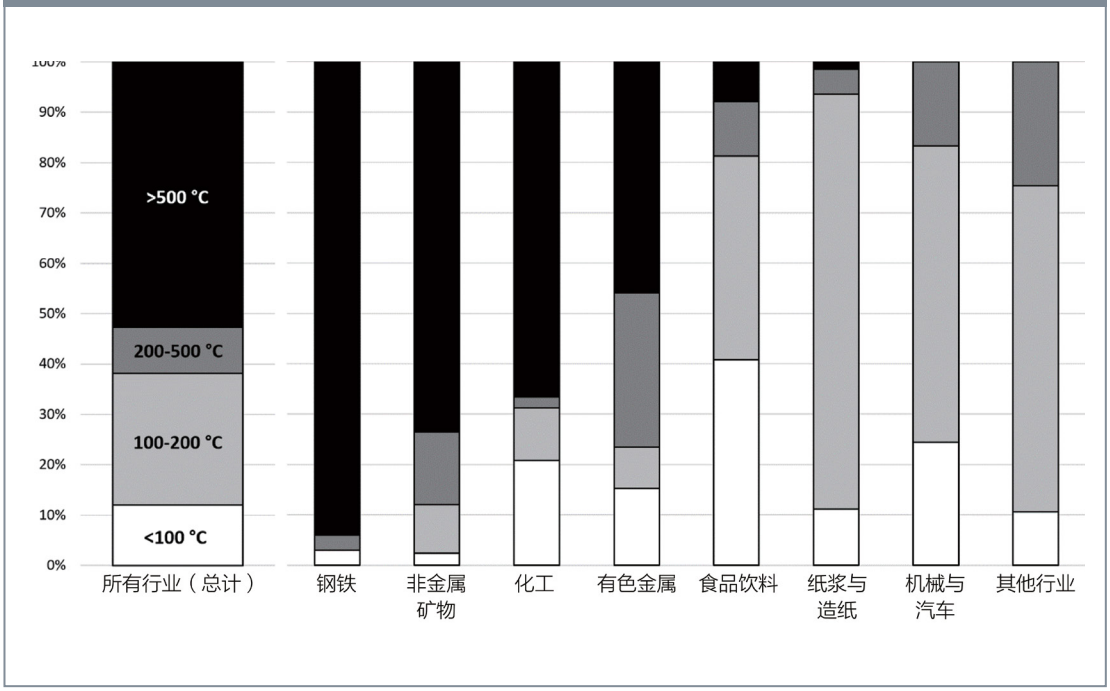
在整个设施层面，提高能效的关键在于设备的选择和尺寸，不同设备的连接方式，以及设备之间的能量和材料流动。一种重要的技术是保证选择与载荷相匹配的机械设备，使其能够按照最佳设计容量运行。设备（如泵或锅炉）尺寸过大必须上下调整运行功率，会造成能源浪费。另外一种设施规模的技术是废热回收，利用工业过程产生的废热驱动其他流程，或者对材料进行预热和干燥后送入炉灶、锅炉或炉窑。尤其是在钢铁和水泥生产等会产生高温的行业，废热回收非常有用。废气经过压缩后会提高温度，更容易通过热交换器提取热量（美国能源部，2003）。其他设施规模的技术选择包括直接利用太阳能加热（即不将太阳能转换成电能）和自动化（使用机器人更快完成焊接等工作任务，从而限制焊枪运行的时间，减少能源消耗）。

在设施以外层面，企业可以优化供应链，重新设计产品以降低制造难度和能源强度，并采用会充分考虑能效投资及其效益的企业决策框架。这些效益通常不止局限于节能，还能提高生产率，减少能源价格波动风险，降低资本成本和相关保费，降低维护成本，减少废弃物和废弃物处理费，并改善工作场所的健康和安全（Russell，2015）。

工业用热直接电气化

减少工业排放最强大的方法之一是用电气化设备取代化石能源燃烧。随着电网大幅提高可再生能源占比，电气化设备能够减少排放。由于工业设备漫长的更新周期，现在开始部署电气化技术至关重要，不能等到电网完全脱碳之后再采取行动。

图3：欧盟2012年不同温度范围的工业供热需求



（Fraunhofer Institute，2016）

绝大多数工业化石燃料（除原材料以外）被用于锅炉、炉灶、炉窑、蒸馏塔等设备加热。在美国，91%的非原材料工业能耗用于锅炉和其他过程加热（美国能源信息署，2021）。工业电气化的关键在于使用电气技术保证供热充足，并且能够达到工业所需的温度。图3显示了欧洲工业不同

温度范围的供热需求。欧洲、中国和美国各行业的温度范围可能相同，但由于各地区的行业分布状况不同，因此总体上存在地理位置上的差异。

若提供高达165摄氏度左右的热力温度，最高效的技术是工业热泵。热泵传输热能，其本身并不产生热能，其工作原理与冰箱相反。热泵的效率通常比通过用电阻器的效率高1.5至5倍，当热泵被配置为提供更高温度时，效率会下降（Arpagaus等，2018）。热泵可以为食品饮料加工、纸浆和造纸、机械和车辆生产（使用外购原材料）以及其他轻工业制造等行业满足所有供热需求。

如果温度需求超出热泵的供热范围，可用的电气技术选择包括电阻式加热、感应加热（将导热材料置于一种可变磁场）、电弧和等离子体炬、电介质加热（使用无线电波或微波刺激有极分子，如水）、红外线加热、激光和电子束等。此外，目前还有取代加热的电气化技术，如使用紫外线固化环氧树脂和松香，或使用电解技术对物质进行化学分解。

在中国和美国，电力成本是单位能量煤炭或天然气的数倍。然而，电力可以更高效地向材料或需加工部分供热（热损失更低），有助于补偿其更高的成本。例如，在工业炉中燃烧化石燃料产生的热能，有很大一部分在热废气中损失，或者通过燃烧过程中产生的水分蒸发（能源效率局，未明确日期）。电气化技术并不会产生燃烧废热，也不需要蒸发燃料中存在的或由燃料生成的水分，避免了造成热损失的这些主要原因。

通过重新设计工业流程，充分利用电力而不是简单地更换零部件，甚至能够实现更大的效率增益。例如，化石燃料锅炉产生蒸汽的效率超过90%，但中国常用工业锅炉的效率为70%至79%（联合国工业发展组织，2014）。但部分热能会在蒸汽系统的其他部分损失，例如蒸汽分配和冷凝水回收等，而且使用热交换器只能从蒸汽中提取75%的热能，因此中国蒸汽系统的整体效率只有约50%。而电锅炉从燃料到蒸汽的效率可以达到近100%，但在系统的其他部分依旧会出现热损失。将整个蒸汽系统更换为电气系统，能够带来更大的效率增益。电气化除了减少温室气体排放以外，还能减少化石能源消耗、降低非能源成本、提高安全性和降低空气污染物排放等，从而带来社会、经济和环境效益（Rightor等，2020）。

最后，直接工业用热电气化可以与需求侧管理和能源管理相结合，从而提高工业设施的用电效率，实现更有效的载荷管理。

氢作为化工原料和氢冶金

目前，化工制造和一次炼钢严重依赖化石燃料用于高温供热，以及作为炼铁和生产化学品时发生化学反应的原料。零碳氢可以满足这些工艺的需求，且不会产生二氧化碳排放。最成熟的零碳氢制氢技术是水电解制氢，在电解槽中将水分解成氢和氧。商业化应用最广泛的水电解制氢技术是碱性水电解，目前的能源效率为63%至70%，未来有望达到80%（国际能源署，2019b）。

零碳氢将在难以减排的工业部门实现脱碳的过程中发挥重要作用。对以中国为重点的七个能源模型的综合研究发现，在模型中的1.5摄氏度情境下，到2050年，零碳氢预计将占中国最终工业能源消耗的3%至18%（能源基金会中国，2020）。在美国，到2050年，零碳氢将占工业最终能源消耗的10%（Horowitz等，2022）。

钢铁企业对氢气在钢铁工业的应用有很大的兴趣。中国宝武钢铁和晋南钢铁均开始了在高炉中使用富氢气体的试点项目。宝武钢铁、河北钢铁集团、建龙钢铁和酒钢等多家企业正在开发测试将

氢用于直接还原铁的项目。在化工行业，氢可以作为化石原料的替代选择。例如，中国已经开始进行二氧化碳加氢制甲醇试点（北极星大气网，2021）。

碳捕集与封存技术的小范围应用

大量工业二氧化碳排放，可以通过提高能源效率和材料效率、进行材料替换和采用加热电气化等技术实现减排。各工业部门应该尽量利用这些技术减少排放，因为防止产生二氧化碳的成本，低于二氧化碳排放之后的管理成本。然而，在水泥生产和炼钢等行业，利用目前或未来十年可用的技术很难实现彻底脱碳。例如，水泥行业超过一半二氧化碳排放来自化学生产过程，而不是燃烧燃料的过程（国际能源署，2018）。为了帮助这些行业脱碳，政策制定者可以考虑开发碳捕集与封存（CCS）技术，用于减少二氧化碳排放，尤其是非能源相关的二氧化碳排放（国际能源署，2021）。（水泥生产所需要的热能可由电等离子体炬提供。）

在进行碳捕集时，烟道气经过净化，去除杂质，并隔离二氧化碳，形成高浓度二氧化碳气流。在之后的碳封存环节，将二氧化碳注入地下适宜的封存库。而碳捕集与封存技术要成为一种可行的温室气体减排策略，必须能防止捕集的二氧化碳在数百年或者数千年后进入大气（Kelemen等，2019）。在建设永久地下封存库时，地质条件应该有利于二氧化碳矿化成固体碳酸盐材料。

水泥行业部署碳捕集与封存技术需要在水泥厂建设二氧化碳捕集系统，要有压缩设备压缩二氧化碳，有管道网络将二氧化碳输送并最终注入到封存地，并且需要对系统进行监控。这些系统与电气化、材料效率和能源效率相结合，能够实现水泥生产深度脱碳（Plaza等，2020）。

碳捕集与封存技术的另外一种潜在应用是在钢铁行业，用于新型高炉-转炉（BF/BOF）炼钢厂（经营时间为十年或十年以内，依然有多年使用寿命）。对于服役时间超过十年的老旧的高炉-转炉炼钢厂，其经济状况可能更适合停止燃煤炼钢炼铁，而不是对碳捕集与封存基础设施进行资本投资。

如果产品中使用捕集的二氧化碳，而不是进行长期地下封存，政策制定者应该谨慎。如果对二氧化碳的使用方式会重新向环境中排放二氧化碳，将会减少或抵消碳捕集的气候效益。吸纳二氧化碳的产品如果在使用时会释放二氧化碳（如燃料、燃料添加剂、化肥等），会随着时间推移化学降解，或者会在寿命结束时被燃烧（如部分塑料），就会抵消碳捕集的气候效益。

避免一氧化二氮和氟化气体排放

有些行业会产生非二氧化碳温室气体排放，尤其是一氧化二氮（N_2O）和氟化气体。工业设施排放的一氧化二氮主要是生产硝酸和己二酸的副产品。通过热降解或催化降解，可以将一氧化二氮分解成氮气和氧气，这是一种经济的减排方式。氟化气体主要被作为制冷剂（冰箱、空调、热泵等设备内部的工作液）和推进剂，除此之外氟化气体还有其他一些小众用途。在新产品中，可以用危害较小的替代气体，如碳氢化合物、氨或二氧化碳等，取代氟化气体（虽然二氧化碳和某些碳氢化合物也属于温室气体，但这些气体导致气候变暖的能力远低于氟化气体。）。对于已经使用的氟化气体，在设备报废时，应该将旧冰箱、空调等收集起来，清除氟化气体后安全销毁或回收，而不是任由氟化气体进入大气。

针对具体工业的技术

有多项商业化和试点规模的技术，可以替代传统的基于化石燃料的炼钢、炼铁和水泥生产。在钢铁行业，直接还原铁（DRI）作为一项成熟技术，在竖炉中采用天然气或在回转炉中采用煤炭，已经在全世界应用了数十年（全球能源监测，未明确日期）。然而，直接还原铁可以使用氢气取代这些化石燃料。在瑞典有一座新型氢直接还原铁设施HYBRIT，是全世界首座零碳钢铁生产设施。该设施目前仍在试点测试阶段，预计到2026年将开始商业化生产（HYBRIT，未明确日期）。熔融氧化物电解是另外一种新型炼铁理念，该技术用电力取代化石燃料用于铁矿还原（波士顿金属，未明确日期）。波士顿金属公司作为最先进的熔融氧化物电解技术开发者，计划最早2026年开始大规模商业化部署（Temple，2018）。

创新低碳混凝土配方已经经过测试，配方中使用新型水泥，包括碱激发水泥、氧化镁水泥和硫铝酸盐水泥等（Phair，2006）。另外一种混凝土低碳生产策略是增加使用辅助性胶凝材料（SCM），如高炉炉渣、粉煤灰和天然火山灰等（Van Dam，2013）。一些辅助性胶凝材料已经商业化，在部分地区被广泛应用。混凝土碳矿化，又称二氧化碳固化混凝土，是在固化混凝土中封存二氧化碳的一种全新策略，目前正在开展这方面的研究（Sant，2019）。

温室气体减排潜力与协同效益

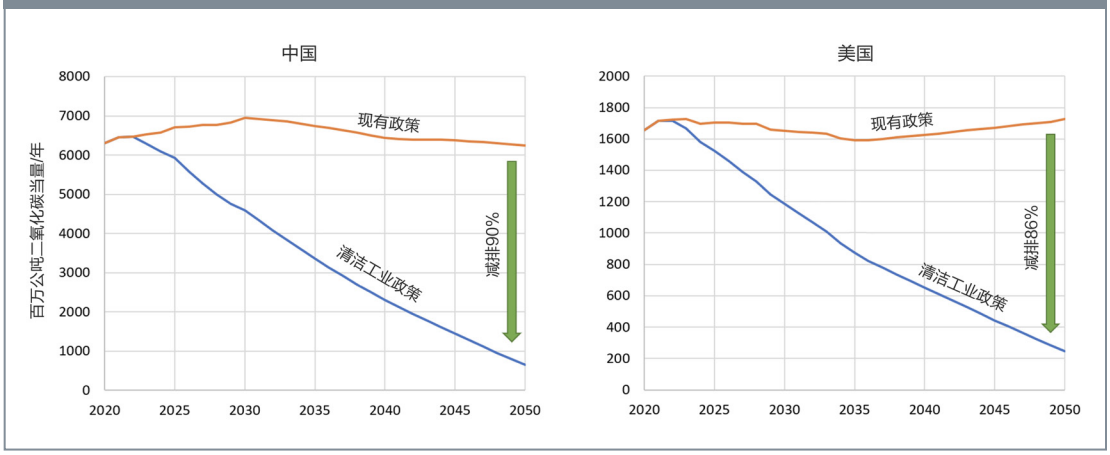
为了量化本报告中提出的建议可能产生的减排、金融和公共健康影响，本报告使用能源政策模拟器3.4版为中国和美国建立了一个清洁工业情境[1]，将该情境下的模拟结果与现有政策情境进行对比。现有政策情境不包括政策制定者为减少工业排放采取的新措施。

下列措施在中美两国都进行模拟，将在2023年到2050年按顺序执行。虽然为保证两国采取可比较的措施，对两国使用了相同设置，但这意味着采取的技术措施的绝对数量是不同的，因为这些措施被设置为百分比，而中国的工业规模比美国更加庞大，而且使用的燃料不同，导致中美两国的技术潜力存在差异。

- 能效提升25%，以及热电联产和废热回收的潜力达到100%；
- 通过热泵实现低温工业用热100%电气化；
- 除钢铁和化工以外的工业部门，通过电阻加热、感应加热、电弧和等离子体炬等技术实现中高温度工业用热100%电气化；
- 钢铁和化工行业以50%的电力和50%的绿氢燃烧供应中高温度工业用热；
- 通过以更安全的气体取代氟化气体、回收再利用或消除氟化气体，避免氟化气体排放，实现100%的技术潜力；
- 捕集或销毁天然气生产、加工、传输、分配以及使用天然气的工业设备产生的甲烷（CH_4）泄露，实现100%的技术潜力；
- 销毁工业过程产生的一氧化二氮（N_2O），实现100%的技术潜力；
- 用其他胶凝材料和填料取代水泥熟料，实现100%的技术潜力；
- 对于非金属矿物、钢铁和化工，捕集和封存80%的非能源二氧化碳排放。

[1] EPS是由Energy Innovation和绿色创新发展中心（iGDP）共同开发的一个免费开源计算机模型。关于该模拟器的详情及其工作原理，请登陆网址https://us.energypolicy.solutions/docs/，查看EPS资料。

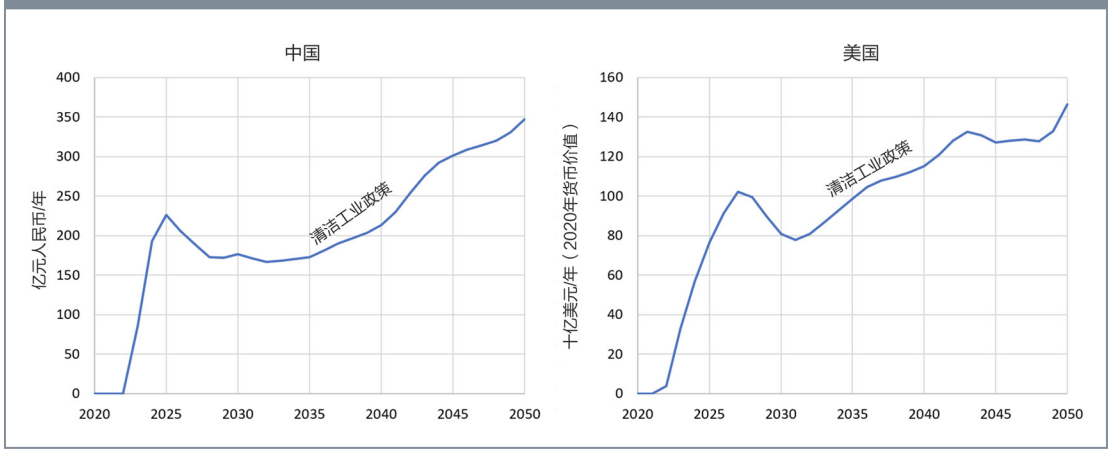
图4：情境分析中得出的中美两国的温室气体减排潜力



清洁工业情境显示，与现有政策情境下的排放量相比，到2050年，美国工业直接温室气体排放量大幅减少86%，中国减少90%（图4）。两国可实现最大减排效果的三个措施中，有两个措施分别是工业用热电气化（和少量使用绿氢）和二氧化碳过程排放的碳捕集。在中国，第三项措施是防止氟化气体排放，因为中国是制冷剂和推进剂的主要生产国，而美国的第三项措施是防止甲烷泄露，因为美国是主要天然气生产国。

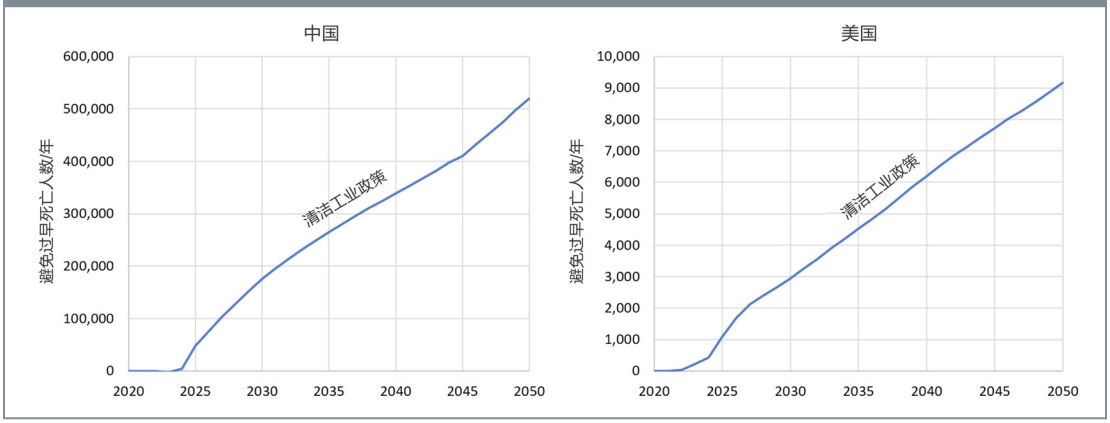
清洁工业情境提高了两国的国内生产总值（GDP）。2050年，中国的GDP将增加350亿元人民币，美国的GDP将增加1,460亿美元。从2023年至2050年，中国的GDP将合计增加约6,230亿元，美国的GDP将增加2.9万亿美元（图5）。对GDP影响最大的是对新建先进工艺工业设施和资本设备的投资，这些投资能够创造设备制造、施工和组份材料生产等方面的工业就业岗位。其次，效率提升和向电力（使用效率高于化石燃料）转变能够为企业节约资金，这些资金可以用于刺激经济，例如支付员工工资、采购原材料和增加产量等。

图5：清洁工业情境与现有政策情境所带来的GDP变化对比



清洁工业情境使制成品进口小幅增加，出口下降，因为会有制造商试图避免支付设备升级费用。通过设备更新拨款和提供低成本融资支持这些制造商进行设备升级，和/或执行“本地采购”政策，要求采购一定比例的本地制造商品，能够抵消这方面的影响，大幅提高GDP和（创造）就业，同时不会影响减排。

图6：避免过早死亡



向清洁工业转型可减少颗粒物、氮氧化物和氧化硫等对人体健康有害的污染物排放，从而改善人类健康。随着工业变得更加清洁，避免过早死亡人数逐年增加，到2050年，中国避免过早死亡人数达到520,000人，美国为9,160人（图6）。向清洁工业转型之所以在中国产生更大的效益，是因为中国有更庞大的人口，而且中国45%的工业能源需求使用煤炭，污染物排放水平更高，而煤炭仅占美国能源消耗的6%（国际能源署，2021）。向清洁工业转型还能减少非致命性健康影响。2050年，中国将避免670,000例非致命性心脏病发作、超过1,400万例哮喘病发作、250,000例呼吸疾病急诊以及超过5,000万个工作日损失。美国将避免12,000例非致命性心脏病发作、283,000例哮喘病发作、4,400例呼吸疾病急诊以及914,000个工作日损失。

避免工作日损失、疾病和死亡的经济效益并不包含在上述GDP计算当中，因此如果将公共健康影响考虑在内，向清洁工业转型的GDP效益更大。

政策建议

清洁工业融资

对于一些制造商而言，购买新设备和工厂设备升级的成本，可能是他们采用新清洁生产工艺的障碍。这些企业通常无法在私人市场找到负担得起的融资，因为他们的技术太新且风险太大，或者有对产品竞争力的担忧。政府可以利用政策工具，为工业企业提供获取低成本融资的途径，用于改进工艺。

政府可以直接利用绿色融资机制，或者组建独立或半独立的绿色银行负责这项工作。绿色银行最初由政府拨款注入资本，之后将作为一家能够自给自足的基金，利用本金还款和贷款利息向其他借款人继续发放贷款。这将使绿色银行比依赖政府每年注入资金的项目更可靠、更持久。

放大绿色金融效应的一种做法是使用公共资源，调动尽可能多的民间资本投资清洁工业项目。关键公共融资方法包括：

- 联合贷款：与私营金融机构合作向符合条件的项目贷款，共担风险（和回报）。政府部门或绿色银行可能具备评估清洁工业项目的专业能力，可以为私人银行家的贷款包销提供协助。
- 聚合贷款：捆绑多个小型工业项目贷款，然后将捆绑贷款出售给私人投资者。捆绑贷款之所以对投资者有吸引力，是因为其中提供了多样化的项目，可以帮助投资者避免评估多个小型

项目的必要性。

- 贷款损失准备金或贷款担保：赔偿私人贷款商投资合格清洁工业项目后因贷款违约导致的部分损失。政府不应该赔偿全部损失，以促使私人贷款商对项目进行恰当的尽职调查。
- 债券销售：政府部门或绿色银行可以通过出售债券，为合格的清洁工业项目融资。虽然多数融资机制依赖大型企业贷款人，但出售债券可以提供从个人和机构债券投资者获得融资的途径，丰富了清洁工业项目的可用融资来源。

这些贷款机制搭配其他金融政策能发挥良好的效果，例如税务减免或清洁工业技术或清洁生产补贴等，因为与政府金融部门或绿色银行合作的许多私人投资者，在一定程度上都是受到了这些金融政策的激励。

温室气体排放权交易体系

排放权交易体系赋予温室气体（包括但不限于二氧化碳）排放权一个货币价值。中国的全国碳排放权交易体系目前涵盖了电力行业，预计未来将扩大到建材、钢材和其他能源密集型行业，而美国有14个州执行州级或跨州排放权交易体系，涵盖了电力行业，在个别州还包括工业。本报告探讨了如何设计碳排放权交易体系，从而以高效且具有成本效益的方式减少工业排放。中美两国的政策制定者在加强或扩展国内排放权交易体系政策时，可参考本报告提出的指导原则。

排放权交易体系通过三种机制激励减排：技术转换、需求减少和巧妙利用出售排放许可带来的政府收入。技术转换要求各行业利用低碳排放制造工艺生产产品，以降低对排放许可的需求。当清洁技术的成本接近于高污染技术的成本时，各行业可以以经济的方式向清洁技术转型，避免支付碳价。当清洁技术相对成熟，仅需要些许帮助就能在竞争中击败高污染技术时，这将使碳定价成为一种低成本但功能强大的政策。

降低需求需要企业提高产品的价格，从而使人们减少购买。通常情况下，降低需求并不是政策制定者希望碳定价运行的主要机制，因为降低每吨二氧化碳当量排放需要付出高成本，因此经济效率较低。高价格可能给消费者带来负担，并影响经济增长。如果技术转换成本高昂或不可行，碳价可能主要通过降低需求发挥作用。因此，当清洁生产路径在技术上尚不成熟时，碳定价并不是最佳选择。

第三种机制是巧妙利用政府碳定价收入。最合理的利用方式之一是投资工业温室气体减排项目，如提供研发资金、分摊技术验证和早期商业化部署的成本，以及向绿色银行注资（如上文所述）等。政府收入还可以用于支持工业能效提升，尤其是小型制造商，因为对于小型制造商而言，初期资本投资是一个巨大的障碍。

排放许可应该设立价格限定：许可价格不能低于价格下限，而当价格达到上限时，政府会印发更多许可，以防止价格超出最高水平。价格下限通常尤其重要，因为欧洲和美国执行碳定价体系的经验已经证明，碳减排的价格通常比监管机构预期的价格更低，因此如果没有下限，排放许可价格可能过低，导致不足以激励向清洁工业转型。如果企业允许储存许可（将许可保存到未来使用），那么一个可靠的价格下限就变得更加重要。价格上限应该设定为足够高的水平，保证许可价格在短期内不会达到，但到2050年可能相对更接近上限，因为工业降低最后几个百分比的排放量需要付出的成本，可能高于未来10至20年避免更容易减排的温室气体排放所付出的成本。

政策制定者对于碳定价的主要担忧之一是泄露的可能性：政策可能降低国内工业活动的增长，增加未实行碳定价的国家的工业活动和排放。到目前为止，政策制定者为了解决泄露所采取的措施包括对部分或全部工业设施免于参加碳定价体系，或向国内制造商发放免费许可。这些做法虽然可能减少泄露，但也会抑制或者消除脱碳的积极性，降低碳定价政策的效果。更好的方法是对所有企业，按照单位温室气体排放量收取碳价，但向国内制造商发放平衡补贴。该类补贴与排放无关，而是与政府希望鼓励的积极特征有关，例如企业对GDP的贡献，或者创造的高质量就业岗位数量等。补贴可以帮助抵消碳定价费用，从而保持国内工业的竞争力。由于补贴并不允许免费排放，因此不会降低政策对脱碳的激励效果。

温室气体排放标准

中美两国都有通过制定标准减少常规空气污染物排放的经验，这为两国减少温室气体排放提供了可以借鉴的专业知识。一项研究发现，美国的《清洁空气法案》计划和法规的效益/成本比例为30比1（美国环境保护局，2011）。自2013年起，中国的政策使全国常规空气污染减少了40%，北京的常规空气污染减少了50%，居民预期寿命延长了2至4岁（空气质量寿命指数，2022）。

温室气体排放标准可以设定为大宗商品的碳强度阈值（二氧化碳当量/单位产品），例如钢材的特定标号、水泥的类型或者氨等大批量化学品。对于差异化产品（非大宗商品），各生产设施需要报告并减少相对于其各自历史基准水平的排放量。

妥善设计的排放标准可以提供长期信号，促进创新。最重要的设计原则是能够在未来许多年推动持续改善。如果标准不随着时间推移而变得更加严格，就会失去驱动市场向更环保技术转型的能力。因此，标准中应该包含一个公式，说明在什么时间以及如何自动计算未来提高标准的严格程度。这将提高政治干预的透明度和及时性，并减少阻力。

标准的设计应该简单，并专注于结果。复杂的标准包含对不同类型设备和具体用途的许多不同规定，更难编写，而且更容易出现漏洞。限制单位产出温室气体排放量的设施标准，比针对每一台生产设备或燃烧燃料的设备制定的标准更简单。

标准必须适用于在受监管市场上出售的任何产品，无论是进口产品还是国内生产产品，以避免给更高碳排放的外国生产商带来不公平的竞争优势。对于按照单位材料制定的标准（如钢材），应该要求进口商披露其进口产品的隐含碳。有关工业锅炉等进口机械性能的标准，应该对进口产品的性能进行检测，并需接受审计。

政策制定者还需要考虑销量加权的可交易排放标准。这些标准应该规定制造商出售的所有产品的最低销量加权平均性能。制造商可以出售部分不符合标准的产品，但需要出售足够多高于标准的产品作为补偿。一个销量加权标准的例子是美国对轻型车的企业平均燃油经济性（CAFE）标准，自2011年起允许汽车厂商之间交易积分（He，2014）。可交易的销量加权标准可以作为按每台设备向企业提出最低排放要求的传统标准的补充，或者取代传统标准。

最后，政策制定者可以考虑制定一项标准，管理进口零部件和原材料的容许“嵌入排放量”（生产相关排放）。这些标准可以防止出现国内企业进口碳密集型原材料以继续在管制区内出售排放密集型产品这种漏洞。为了遵守标准，国内企业可能要求供应商减少其温室气体排放，或者可以更换成已经使用更清洁工艺的供应商。如果供应商希望向管制市场出售产品，可以选择采用更清洁的生产工艺。

设备费、退费和收费退费

工业设施需要使用从锅炉和炉灶到压缩空气、电动机和风扇等各种工业设备。有些设备在许多行业应用广泛。对于使用最广泛的设备，鼓励采购低碳节能型号，取代高能耗型号，可以在各行各业实现节能和降低成本。此外，加快采用清洁和节能工业设备，不需要等到突破性创新出现，因为市场上已经有具有成本竞争优势的商业化技术，并且政策可以帮助最清洁的技术获得市场份额。

财政激励措施，如设备费、退费（折扣）和收退费等，可以降低工业设施进行能效投资的成本。例如，低性能和低效率的工业设备在向客户出售时需要支付设备费。设备退费旨在奖励高性能和高效的工业设备。设备收退费是将收费和退费进行组合的一项政策，即对最低性能的设备征税，并将税收收入用于激励购买最清洁的设备。在制定财政激励的门槛时，重要的是保证门槛“足够高，并提供足够的行动激励，同时保证门槛不会过高，导致行业关闭或搬迁”（Price等，2005）。这些门槛还应该根据市场上技术的不断完善定期更新，并避免停滞不前。其他与特定的能源效率和低碳技术挂钩的财政激励措施，如减税、退税、加快折旧或税收抵免等，在许多工业化国家也被广泛采用（世界能源理事会，2008）。

借鉴许多欧洲国家的做法，中美两国还可以将财政激励与其他能效和脱碳政策（如最低能效标准、设备标识、能源评估、绿色金融、技术目录和评奖、碳排放权交易体系、绿色采购等）相结合，纳入一个综合能效或温室气体减排项目（Price等，2005）。

循环经济政策

中美两国都出台了支持循环经济的政策，即通过延长产品寿命、共享系统、再分配/转售、再制造和循环利用等措施，最有效地利用每一种产品或材料。中国在2008年颁布了《循环经济促进法》（《中华人民共和国循环经济促进法》，2008），并制定了促进废料再利用的政策（Mathews&Tan，2016）。美国的《综合环境响应、补偿和责任法案》（CERCLA）同样促进了企业的循环利用和资源回收行动（Zeng等，2022）。

两国在国内可以通过填补漏洞和法规空白，加强对循环经济规划和管理。例如，两国可以通过对维修权立法，提高产品的可修理性，包括出台产品耐久性、可修理性和替换零部件与手册可用性的强制标准（van der Velden，2021）。两国可以通过制定具有约束力的机制、向企业提供激励以及覆盖更多工业产品等措施，扩大生产者责任原则，即将对寿命终止产品的部分责任转移给制造商。对于钢材、铝、纸和玻璃等关键材料制定更高的循环利用目标，制定企业和家庭循环利用规定，以及要求制造商在产品中使用更易循环利用材料的规定等作为配套政策（Zeng等，2022）。

此外，两国应该制定工业废弃物的记录和处置标准。两国政府可以要求各工业部门记录所产生的废弃物的类型、数量、目的地等属性。政策制定者可以创建可靠的废弃物回收网络，并开发跟踪废弃物和循环利用材料流向的在线工具。政府应该鼓励废弃物管理公司推出既能改善循环利用材料的质量和产量，又能降低回收能源需求的技术，例如聚乙烯塑料的低温固态挤压成型（Guo等，2006）。

绿色公共采购

政府是工业产品的重要买家和资金来源，尤其是用于建造基础设施、政府建筑、军事装备、汽车等的原材料。公共采购平均占经合组织国家GDP的12%，在非经合组织国家的GDP占比高

达30%（联合国环境署，2017），因此政府采购对于工业供应商而言是一个庞大的、有利可图的市场。

绿色公共采购（GPP）项目利用政府的购买力制定碳强度标准，要求政府资助项目出售的产品必须达标。绿色公共采购项目对向政府出售的产品制定更严格的标准，以创建一个使用清洁生产技术生产工业产品的先导市场，使清洁生产工艺能够扩大规模，并且清洁制造商可以通过学习和规模收益降低成本。

绿色公共采购项目没有必要涵盖政府采购的所有产品。因此，政策制定者在制定绿色公共采购标准时，应该优先考虑生产过程会产生大量温室气体排放的产品、商业化替代选择能够提供巨大减排潜力且政府可以接受采购成本的产品、绿色替代产品能够为低收入群体创造就业岗位或减少常规污染物的产品以及绿色替代产品具有通过规模收益降低成本的巨大潜力的产品。绿色公共采购项目能够为使用高度创新的零碳技术生产的产品创造一种“突出效应”，例如用绿氢或铁电解等工艺生产的钢铁和新水泥化学工艺等。“突出效应”可凸显一个更高性能的产品级别，而政府也愿意为每一件产品支付更高价格，以帮助制造商开发先进的清洁工艺。

如果许多供应商都能提供符合绿色公共采购项目条件的清洁产品，政府可以执行“反向拍卖”，确定其愿意支付的价格。参与投标的公司应该在标书中说明其接受的最低价以及可以供应的产品数量。政府同意支付能保证从所有供应商购买足够产品的最低价格。供应商在竞拍中降低成本，并获得向政府出售的合约。这种机制最适合钢材或水泥等大宗商品，供应商提供的这类最终产品相同，但生产过程存在差异。

最后，需要注意的是绿色公共采购项目是一种标准，因此与标准有关的所有设计原则（如上文所述）也适用于绿色公共采购项目。

温室气体排放量披露

要求企业向公众、客户和政府披露生产产品所产生的温室气体排放量，这是一项支持性政策，有助本报告中所述的其他策略的执行。披露规定能够通过多个机制加快工业脱碳：

- 首先，一家企业为了遵守披露规定，必须了解其排放来源，这通常需要企业对高能耗设备和工业流程步骤进行审计。这种审计通常能够为企业发现具有成本效益的节能方式。
- 其次，准确报告排放量为其他政策的实施提供支持。政府可以根据报告排放量，确定一家企业在碳定价制度下的责任，判断企业是否遵守温室气体排放标准，其产品是否符合绿色公共采购项目的条件等。在向欧盟等执行碳边境调整机制的地区出口产品时，披露碳排放信息必不可少。
- 第三，随着公众和政府日益认识到工业脱碳的必要性，对高排放生产工艺的依赖成为一种金融负债。排放量披露规定为投资者做出知情决策提供了必要数据。排放量披露有助于促使企业将其增加股东价值的目标与全社会对减少温室气体排放的要求保持一致。
- 第四，要求完整准确披露环境信息有助于打击“漂绿”行为，即表面宣传企业或产品环保的做法（例如，在没有真正创造任何环境效益的情况下，使用“绿色”或“生态友好”等词汇进行宣传）。政府和媒体可以曝光营销宣传与披露数据不一致的情况。

为了保证来自不同行业和国家的企业报告数据的准确性和可比性，温室气体排放量报告应该符合国际标准。管理环境披露的主要机构是2000年成立的非营利组织CDP（全球环境信息研究中心），其办事处遍布全球。CDP与企业合作，帮助企业准确披露排放量（包括外购材料和零部件的嵌入排放量）。有超过13,000家企业通过CDP披露数据（CDP全球环境信息研究中心，2022）。

另外一家与此有关的机构是科学碳目标倡议组织（SBTi）。科学碳目标倡议组织帮助企业根据将全球温升限制在1.5摄氏度的路径，制定可验证的未来减排目标。科学碳目标倡议组织的工作人员根据详细的技术标准，对企业的目标进行审查，以确保目标的有效性和方法的可靠性，并专门制定了十多个行业的特定标准（科学碳目标倡议组织，2022b）。截至2022年初，超过1,300家企业的目标已经获得科学碳目标倡议组织批准，有超过1,500家企业公开承诺在两年内制定目标并获得科学碳目标倡议组织批准（科学碳目标倡议组织，2022a）。

越来越多政府要求企业披露其排放量和气候相关风险。2022年，英国成为首个制定排放报告规定的G20国家。在英国注册的员工超过500人、收入超过5亿英镑的企业，需要报告其气候影响（气候相关财务信息披露工作组，2017；英国政府，2021）。日本也在2022年要求大型企业报告排放量。新西兰在2021年颁布了排放报告规定，2023年开始生效（Duran，2021）。欧盟将从2024年开始执行排放报告规定。巴西、新加坡和瑞士等其他国家也计划制定温室气体排放报告规定。

温室气体排放标识

温室气体排放标识要求在产品包装和数字存储列表中添加公告，说明其环境性能。汽车和家电等高能耗产品粘贴披露能效水平的标识，这种做法在全球很常见。例如中国能效标识、美国EnergyGuide能效标识和欧盟能效标识等。然而，目前这些标识并不会披露产品或其原材料在生产过程中产生的温室气体排放。标识必须披露这些排放，才能有助于工业脱碳。

如计算机等产品在生产过程中产生的大多数排放，都来自铝、铜、玻璃、塑料等组份材料的生产过程。由于产品制造商通常并不是其组份材料的生产商，因此标识必须披露所有排放才能发挥效果，包括外购材料的隐含排放量。

标识应该使用统一的、科学合理的和政府强制规定的排放测算方法，理想情况下排放测算方法应该基于国际标准，并且符合CDP（全球环境信息研究中心）的报告要求。应禁止使用不符合这些标准的标识和宣传。例如，消费品有超过450种生态标识，其中大多数标识没有指导意义，因为这些标识对于企业的主张并没有制定标准或进行验证（Atkinson，2014）。

一个可靠的政府标识制度有助于突出明星企业，引导企业和家庭购买者选择更环保的选项，协助政府实现国家温室气体排放目标，并使企业和地方政府更容易执行绿色采购政策。

中美两国合作的机会

组建全球联盟以加快工业用热电气化

中美两国可以牵头组建工业用热电气化全球联盟，以加快工业采用电气技术。两国可制定技术指导手册和目录，以帮助地方政府和工业进一步认识到工业电气化的好处。开展关键电气技术的

大规模示范项目，可以测试和验证技术的可行性，并公布项目成果，以证明不同行业电气化的可行性。制定典型的自愿或强制性电气化标准，可在全国或地方执行。中美联合研发和推广示范项目，利用各合作伙伴的技术专业知识和生产经验，在两国政府的资金、政策和交流项目的支持下，可以完善高温供热电气化技术，并实现商业化。

制定和统一工业产品温室气体排放测算标准

一项重要的工业脱碳措施是创造对低碳材料和产品的市场需求。为了提高政策的效果，减少潜在碳泄露，制定、统一和执行碳排放测算的方法和标准是关键（Hasanbeigi等，2019）。统一的碳排放测算标准能够提高数据质量和一致性。中美两国可以采用与环境产品声明（EPD）有关的国际标准，如ISO 14025 III型环境声明，要求企业报告最佳实践，并制定工业产品披露规定（碳领导论坛，2020）。中美两国可成立委员会，参与环境产品声明的制定过程。

如果中美两国增强和统一对工业设备的能效和温室气体排放标准，设备制造商就能设计符合两个大型市场规定的高能效设备。设备制造商可以减少需要生产和运输的产品型号数量，从而降低生产和物流成本，以及业务复杂性。由此所产生的效益也会在世界范围内产生良好的影响，因为设备制造商可以选择在全球遵守这些标准，甚至包括在中美两国以外的地区销售的设备。

联动碳市场（ETS）

中美两国可以创建一个联动的排放权交易体系市场，针对排放量测算、许可拍卖、验证和交易等制定强有力的统一标准。两国可以邀请同样执行严格碳定价机制的其他国家加入。统一的碳市场可以为企业创造一个公平的竞争环境，打消对碳定价将给外国企业带来竞争优势的担忧，有助于克服执行碳定价所面临的阻力。

联合开展“首批”工业脱碳技术示范项目

工业部门需要采用突破性技术来实现完全脱碳，例如水泥生产使用的新型中高温供热电气化，用于炼钢的氢直接还原铁或熔融氧化物电解，以及碳捕集与封存在工业的应用。有些技术仍在开发初期，而工业碳捕集与封存等技术则需要大量投资和技术验证。市场采用这些技术面临诸多障碍，如成本问题、风险认知、地理挑战、基础设施需求和与现有工业过程整合的复杂性等。

中美两国可以联合开发“首批”示范项目，对尚未实现商业化但具有巨大减排潜力的技术的工业应用进行验证。联合项目可以基于美国能源部国家实验室和中国科学院以及高校的技术和专有知识。联合项目可以以之前取得成功的中美清洁能源联合研究中心项目（2011至2020年）为基础。中美清洁能源联合研究中心项目致力于早期技术的研发，并不覆盖碳密集型工业部门。新项目的重点应该是工业深度脱碳技术示范、测试、验证以及与工业部门的合作。

清洁材料自由贸易协定

中美两国可以签署清洁材料自由贸易协定，对钢材、有色金属、水泥等在生产过程中产生超低或零温室气体排放的大宗商品，免除关税、配额或其他贸易壁垒。清洁材料自由贸易区能够激励高碳排放制造商大力创新，采用低碳和零碳技术，如氢直接还原铁和水泥生产电气化等。自由贸易协定还可以对其他国家开放，将其带来的效益扩展到全球。在签署清洁材料自由贸易协定之后，两国

最终可以将使用清洁材料生产的设备纳入协定的范围，尤其是对工业脱碳或清洁能源发电至关重要的设备，例如氢电解槽、太阳能面板、工业热泵等。

联合清洁工业融资实体

两国之间另外一个关键的合作机会是成立一家新联合融资实体中美绿色银行（USCGB）。中美绿色银行可以帮助两国的绿色工业项目获得可负担的融资。该实体将利用绿色银行常用的各种融资和贷款工具，如联合贷款、贷款损失准备金、贷款担保和债券销售等。中美绿色银行的种子资本可由中美两国政府平均提供，可以在多年内分批支付。中美绿色银行将是一家完全独立的、自给自足的非营利性组织，致力于利用其资金充分调动私人投资进入清洁工业，加快向净零经济转型。

致谢

感谢以下人员对本报告提供的审阅：Lynn Price（劳伦斯伯克利国家实验室）、田智宇（国家发改委能源研究所）、常世彦（清华大学）。

参考文献

1. *Air Quality Life Index.* (2022). *Pollution in Beijing is Down by Half Since the Last Olympics, Adding Four Years onto Lives.* https://aqli.epic.uchicago.edu/news/pollution-in-beijing-is-down-by-half-since-the-last-olympics-adding-four-years-onto-lives/

2. Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J., & Bertsch, S. (2018, July 12). *High Temperature Heat Pumps: Market Overview, State of the Art, Research Status, Refrigerants, and Application Potentials.* 17th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, West Lafayette, IN. https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2875&context=iracc

3. Atkinson, L. (2014). 'Wild west' of eco-labels: Sustainability claims are confusing consumers. *The Guardian.* https://www.theguardian.com/sustainable-business/eco-labels-sustainability-trust-corporate-government

4. 北极星大气网.（2021年6月28日）.*《国内首套二氧化碳加氢制绿色甲醇工业化项目签约》*. https://huanbao.bjx.com.cn/news/20210628/1160591.shtml

5. *Boston Metal.* (n.d.). https://www.bostonmetal.com/transforming-metal-production/

6. Bureau of Energy Efficiency. (n.d.). *Furnaces.* Government of India. Retrieved March 18, 2021, from https://beeindia.gov.in/sites/default/files/2Ch4.pdf

7. Cao, Z., Masanet, E., Tiwari, A., & Akolawala, S. (2021). *Decarbonizing Concrete Deep decarbonization pathways for the cement and concrete cycle in the United States, India, and China.* March.

8. Carbon Leadership Forum. (2020). *Guidance on Embodied Carbon Disclosure.* https://carbonleadershipforum.org/guidance-on-embodied-carbon-disclosure/

9. Carruth, M. A., Allwood, J. M., & Moynihan, M. C. (2011). The technical potential for reducing metal requirements through lightweight product design. *Resources, Conservation and Recycling, 57,* 48–60. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.018

10. CDP. (2022). *CDP. What We Do.* https://www.cdp.net/en/info/about-us/what-we-do

11. *《中国证券报》*（2021年11月8日）.*《水泥行业节能降碳成效显现集中度料进一步提升》*.

http://finance.china.com.cn/industry/energy/20211108/5688604.shtml

12. Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Graedel, T. E., & Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability, 3(4*), 269–276. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4

13. *《中华人民共和国循环经济促进法》*.(2008). http://www.gov.cn/flfg/2008-08/29/content_1084355.htm

14. Dunant, C. F., Skelton, A. C. H., Drewniok, M. P., Cullen, J. M., & Allwood, J. M. (2019). A marginal abatement cost curve for material efficiency accounting for uncertainty. *Resources, Conservation and Recycling, 144*(January), 39–47. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.020

15. Duran, P. (2021, October 21). New Zealand passes climate change disclosure laws for financial firms in world first. *Reuters.* https://www.reuters.com/business/sustainable-business/new-zealand-passes-climate-change-disclosure-laws-financial-firms-world-first-2021-10-21/

16. *《经济参考报》*.（2021年8月9日）.*《钢铁行业谋划碳达峰路线图》*http://www.jjckb.cn/2021-08/09/c_1310116405.htm

17. 能源基金会中国.（2020）.*《中国碳中和综合报告2020——中国现代化的新征程：”十四五”到碳中和的新增长故事》*.

18. Fraunhofer Institute. (2016). *Mapping and analyses of the current and future (2020—2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables).* European Commission. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/mapping-hc-final_report_wp1.pdf

19. Galitsky, C., & Worrell, E. (2008). *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Vehicle Assembly Industry* (LBNL-50939). Lawrence Berkeley National Laboratory. https://www.osti.gov/servlets/purl/927881

20. *《全球能源监测》*.（无日期）.全球钢铁厂追踪器. https://globalenergymonitor.org/projects/global-steel-plant-tracker/

21. Guo, W., Tang, X., Yin, G., Gao, Y., & Wu, C. (2006). Low temperature solid-state extrusion of recycled poly(ethylene terephthalate) bottle scraps. *Journal of Applied Polymer Science, 102*(3), 2692–2699. https://doi.org/10.1002/app.24101

22. Gütschow, J., Jeffery, L., Gieseke, R., & Günther, A. (2019). *The PRIMAP-hist national historical emissions time series (1850-2017)* (2.1). Potsdam Institute for Climate Impact Research. https://doi.org/10.5880/PIK.2019.018

23. Hasanbeigi, A., Becqué, R., & Springer, C. (2019). *Curbing Carbon from Consumption—The Role of Green Public Procurement* (p. 105).

24. He, H. (2014). *Credit Trading in the US Corporate Average Fuel Economy (CAFE) Standard*. ICCT. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCTbriefing_CAFE-credits_20140307.pdf

25. Horowitz, R., Binsted, M., Browning, M., Fawcett, A., Henly, C., Hultman, N., McFarland, J., & McJeon, H. (2022). The energy system transformation needed to achieve the US long-term strategy. *Joule, 6* (7), 1357–1362. https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.06.004

26. Horton, P. M., & Allwood, J. M. (2017). Yield improvement opportunities for manufacturing automotive sheet metal components. *Journal of Materials Processing Technology, 249* (March), 78–88. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.037

27. Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., Cresko, J., & Masanet, E. (2016). Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: The case of

lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production, 135*, 1559–1570. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.109

28. *HYBRIT. (n.d.).* https://www.hybritdevelopment.se/en/hybrit-demonstration/

29. 国际能源署. (2018). *Technology Roadmap—Low-Carbon Transition in the Cement Industry. Key Findings* (p. 5). IEA. https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf

30. 国际能源署. (2019a). *Material Efficiency in Clean Energy Transitions.*

31. 国际能源署. (2019b). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities.* https://doi.org/10.1016/S1464-2859(12)70027-5

32. 国际能源署. (2021). *Cement.* https://www.iea.org/reports/cement

33. 国际能源署. (2018). *Energy Efficiency 2018.* https://iea.blob.core.windows.net/assets/d0f81f5f-8f87-487e-a56b-8e0167d18c56/Market_Report_Series_Energy_Efficiency_2018.pdf

34. 国际能源署. (2021). *World Energy Balances Data Service.* https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances

35. 国际资源委员会. (2020a). Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want. *In Global Resources Outlook 2019*. https://doi.org/10.18356/689a1a17-en

36. 国际资源委员会. (2020b). *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future.* Zenodo. https://doi.org/10.5281/ZENODO.3542680

37. Joint Global Change Research Institute. (2018). GCAM 5.1.2. https://github.com/JGCRI/gcam-core/releases

38. Kelemen, P., Benson, S., Pilorge, H., Psarras, P., & Wilcox, J. (2019). An Overview of the Status and Challenges of CO_2 Storage in Minerals and Geological Formations. *Frontiers in Climate, 1*(9). https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00009

39. Leal Filho, W., Saari, U., Fedoruk, M., Iital, A., Moora, H., Klöga, M., & Voronova, V. (2019). An overview of the problems posed by plastic products and the role of extended producer responsibility in Europe. *Journal of Cleaner Production, 214*, 550–558. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.256

40. Liu, Z., Li, T., Jiang, Q., & Zhang, H. (2014). Life cycle assessment-based comparative evaluation of originally manufactured and remanufactured diesel engines. *Journal of Industrial Ecology, 18*(4), 567–576. https://doi.org/10.1111/jiec.12137

41. Lu, H., & Feng, W. (2022). Unlocking China's Building Material Embodied Emissions: Opportunities and challenges to achieve carbon neutrality in building materials and construction. Submitted to *Nature Energy*.

42. Material Economics. (2018). Sustainable Packaging: The Role of Materials Substitution. In *PackREPORT* (Vol. 53, Issue 5). https://doi.org/10.51202/0342-3743-2021-5-007

43. Mathews, J. A., & Tan, H. (2016). Circular economy: Lesson from China. *Nature, 531*, 440–442.

44. McKenna, R., Reith, S., Cail, S., Kessler, A., & Fichtner, W. (2013). Energy savings through direct secondary reuse: An exemplary analysis of the German automotive sector. *Journal of Cleaner Production*, 52, 103–112. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.032

45. Milford, R. L., Pauliuk, S., Allwood, J. M., & Müller, D. B. (2013). The Roles of Energy and Material Efficiency in Meeting Steel Industry CO_2 Targets. *Environmental Science & Technology, 47*(7), 3455–3462. https://doi.org/10.1021/es3031424

46. 中国住房和城乡建设部与国家发展和改革委员会. (2022). http://www.gov.cn/zhengce/

zhengceku/2022-07/13/content_5700752.htm

47. 国家发展和改革委员会. (2021). *《关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见》*. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202110/t20211021_1300583.html?code=&state=123

48. Phair, J. W. (2006). Green chemistry for sustainable cement production and use. *Green Chemistry, 8*(9). https://www.researchgate.net/publication/244550710_Green_Chemistry_for_Sustainable_Cement_Production_and_Use

49. Plaza, M., Martinez, S., & Rubiera, F. (2020). CO_2 Capture, Use, and Storage in the Cement Industry: State of the Art and Expectations. *Energies, 13*, 5692.

50. Price, L., Galitsky, C., Sinton, J., Worrell, E., & Graus, W. (2005). *Tax and Fiscal Policies for Promotion of Industrial EnergyEfficiency: A Survey of International Experience* (LBNL-58128). Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL), Berkeley, CA (United States). https://doi.org/10.2172/861361

51. Rightor, E., Whitlock, A., & Elliott, R. N. (2020). Beneficial Electrification in Industry. In *ACEEE Research Report; Industrial Electrification ACEE*: (Issue July).

52. Russell, C. (2015). *Multiple Benefits of Business-Sector Energy Efficiency: A Survey of Existing and Potential Measures* (Text No. IE1501). American Council for an Energy-Efficient Economy. https://aceee.org/research-report/ie1501

53. Sant, G. (2019, August 26). *Upcycled "CO_2-negative" concrete for construction functions.* NETL Carbon Capture, Utilization, Storage, Oil & Gas Technologies Integrated Review Meeting, Pittsburgh PA. https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/G-Sant-UCLA-CO2-Negative-Concrete_0.pdf

54. 科学碳目标倡议组织. (2022a). *Science Based Targets Initiative. Companies Taking Action.* https://sciencebasedtargets.org/companies-taking-action

55. Science Based Targets Initiative. (2022b). *Science Based Targets Initiative. Sector Guidance*. https://sciencebasedtargets.org/sectors

56. Shanks, W., Dunant, C. F., Drewniok, M. P., Lupton, R. C., Serrenho, A., & Allwood, J. M. (2019). How much cement can we do without? Lessons from cement material flows in the UK. *Resources, Conservation and Recycling, 141*(October 2018), 441–454. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.002

57. Task Force on Climate-related Financial Disclosures. (2017). *Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures.* Task Force on Climate-related Financial Disclosures. https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2021/10/FINAL-2017-TCFD-Report.pdf

58. Temple, J. (2018, September 24). A new way to make steel could cut 5% of CO_2 emissions at a stroke. *MIT Technology Review.* https://www.technologyreview.com/2018/09/24/2024/this-mit-spinout-could-finally-clean-up-steel-one-of-the-globes-biggest-climate-polluters/

59. 英国政府. (2021). *UK to enshrine mandatory climate disclosures for largest companies in law.* https://www.gov.uk/government/news/uk-to-enshrine-mandatory-climate-disclosures-for-largest-companies-in-law

60. 联合国环境署. (2017). *Global Review of Sustainable Public Procurement 2017*. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/20919/GlobalReview_Sust_Procurement.pdf?sequence=1&isAllowed=y

61. 联合国环境署. (2016). *Global Material Flows Resource and Productivity: An Assessment Study of the UNEP International Resource Panel.*

62. 联合国工业发展组织. (2014). *Energy Efficiency Potentials in Industrial Steam Systems in*

China. https://www.unido.org/sites/default/files/2015-09/EE_Potentials_Steam_Systems_China__0.pdf

63. 美国能源部. (n.d.). *Better Plants*. Retrieved August 15, 2022, from https://betterbuildingssolutioncenter.energy.gov/better-plants

64. 美国能源部. (2003). *Industrial Heat Pumps for Steam and Fuel Savings.* https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/heatpump.pdf

65. 美国能源部. (2016). *Industrial Energy Efficiency Potential Analysis.* https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/04/f34/energy-savings-by-state-industrial-methodology.pdf

66. 美国能源信息署. (2021). *2018 Manufacturing Energy Consumption Survey*. https://www.eia.gov/consumption/manufacturing/data/2018/

67. 美国环境保护局. (2011). *The Benefits and Costs of the Clean Air Act from 1990 to 2020.* U.S. Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/fullreport_rev_a.pdf

68. 美国环境保护局. (2014). *GHGRP Industrial Profiles*. https://www.epa.gov/ghgreporting/ghgrp-industrial-profiles

69. 美国环境保护局. (2021). *GHG Emission Factors Hub*. https://www.epa.gov/climateleadership/ghg-emission-factors-hub

70. 美国环境保护局. (2022). *Greenhouse Gas Inventory Data Explorer*. https://cfpub.epa.gov/ghgdata/inventoryexplorer/

71. Van Dam, T. (2013). *Supplementary Cementitious Materials and Blended Cements to Improve Sustainability of Concrete Pavements* [Technical Brief]. Institute for Transportation. https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/12/SCM_tech_brief.pdf

72. van der Velden, M. (2021). 'Fixing the World One Thing at a Time': Community repair and a sustainable circular economy. *Journal of Cleaner Production, 304*, 127151. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127151

73. Willcoxon, M. (2022, June 29). The tallest mass timber building in the world is opening in downtown Milwaukee. It's healthier for the planet. And you. *Milwaukee Journal Sentine*l. https://www.jsonline.com/story/news/2022/06/29/milwaukee-newest-mass-timber-structure-ascent-opens-summer-sustainable-architecture/7653606001/

74. 世界能源理事会. (2008). *Energy Efficiency Policies around the World: Review and Evaluation* (p.16).

75. 世界资源研究所. (2022). *Climate Watch*. https://www.climatewatchdata.org

76. Zeng, X., Ogunseitan, O. A., Nakamura, S., Suh, S., Kral, U., Li, J., & Geng, Y. (2022). Reshaping global policies for circular economy. *Circular Economy, 1*(1), 100003. https://doi.org/10.1016/j.cec.2022.100003