

Views & Comments

碳减排工程管理

魏一鸣, 康佳宁, 陈炜明

Center for Energy and Environmental Policy Research & School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology & Beijing Key Laboratory of Energy Economics and Environmental Management, Beijing 100081, China

1. 引言

碳减排工程是减缓气候变化和实现碳中和目标的工程技术措施总称, 在国际上又被称为“气候工程”[1]。根据作用原理, 传统气候工程可分为以下三类: ①二氧化碳移除(CDR), 通过捕集大气中的二氧化碳实现系统负排放[2]; ②太阳辐射管理(SRM), 通过增加太阳辐射反射实现温升控制[3]; ③一般地球工程, 例如, 利用生物碳和土壤碳管理等工程措施增加系统碳吸收能力[4]。随着应对气候变化的挑战日益严峻, 碳减排工程已被赋予更为广泛的内涵, 它是旨在应对气候变化的各类工程技术的总称, 在传统概念基础上进一步拓展, 包含新能源与可再生能源技术、能效技术、碳捕集与封存技术(CCUS)、碳汇技术等[5]。

长期以来, 全球应对气候变化的行动主要依靠常规减排手段及气候适应措施[6]。但科学结论已表明, 当前气候治理框架已经无法实现全球气候治理目标, 按照当前发展趋势, 全球平均温升将在21世纪末较工业化前水平超过3℃以上, 控排缺口巨大[7]。为实现《巴黎协定》明确提出的2℃温控目标, 约87%的减排情景需要大规模部署“负排放”工程; 而1.5℃温控目标则几乎要求所有排放路径通过实施碳移除措施实现负排放, 以完成21世纪中叶净零排放的治理目标[8-9]。

随着全球应对气候变化深入推进, 碳减排工程必将成为未来全球气候治理框架的重要组成。而全球气候治理的紧迫性不但会催生大量的碳减排工程实践活动, 更将进一步激发管理学界对碳减排工程管理理论的探析。

2. 碳减排工程管理

区别于一般工程, 碳减排工程具有全球性、长周期、跨区域、多行业等特征, 科学有效的工程管理对于实现碳减排目标至关重要。虽然从实践角度看, 在技术创新及其他工程建设和管理经验的推动下, 碳减排工程管理实践在规模和效果上均取得了一些进展, 但其理论研究还处于碎片化阶段。而这种管理理论框架体系的缺失将对未来更大规模与更大范围的碳减排工程管理实践造成深远影响。

最新的研究已经打破了“应对气候变化负收益”的传统认知, 揭示了全球不同减排策略下实现温控目标的盈亏平衡点[10]。因此, 对碳减排工程开展科学管理不仅是实现工程目标的根本保障, 也将带来环境治理与经济的双赢。然而, 碳减排工程的复杂属性使得其在工程管理实践中面临协同管理、风险控制、社会交互, 以及区域和代际公平等诸多难题与挑战。为解决上述难题, 亟需在总结既有工程管理理论和相关学科理论基础, 结合碳减排工程的自有属性和实践需求, 为碳减排工程管理实践提供系

统性的科学指导和理论支撑。

综上所述，面对全球气候治理的复杂性与紧迫性，碳减排工程实践对相关管理理论提出了迫切需求。构建具有全局性、前沿性与普适性的碳减排工程管理理论体系是完善全球治理理论框架的关键环节。

2.1. 碳减排工程管理的几个特征

碳减排工程管理不能脱离工程管理的基础框架，具有重大工程管理体系的4个基础性特征[5,11]。

(1) 系统规模大。碳减排工程实体一旦形成，将与其外部环境系统耦合形成一个新的更复杂的人造系统。该系统涉及管理、工程、技术等资源与要素的有机耦合，以及自然科学与管理科学等跨学科知识，具有系统规模大的特征。

(2) 要素交互广。碳减排工程的外部环境系统不仅包括自然环境系统，还包括其所处的社会环境系统。由于涉及系统规模大，碳减排工程管理需要气象要素、经济要素、社会要素、政治要素、工程管理要素等紧密耦合，具有要素交互广的典型特征。

(3) 深度不确定。碳减排工程管理面临的深度不确定主要有三个来源。一是来自气候预估的自然变率难确定；二是来自于人口、经济发展、技术进步以及政治选择等因素带来的社会经济发展轨迹不确定；三是人们对一些基础性的物理反馈过程及其科学机理尚未完全知晓。这需要在传统和常规的不确定性思想与处理方法上，运用碳减排工程管理的新技术与新理念，降低不确定性影响，为科学建模和有效管理提供支撑。

(4) 情景预估难。情景表示碳减排工程复杂系统所处宏观环境的发展愿景、演化规律以及实现该愿景的所有可能路径。考虑到上述不确定性，准确预估社会经济系统的发展与物理系统的演化已十分困难，而同时厘清两个系统间的互馈机理并进行定量刻画则更加困难。

此外，通过对碳减排工程管理实践活动的特有现象与规律进行提炼总结，本研究又概括出碳减排工程管理5个方面的专属特征[5,12]。

(1) 覆盖主体多：应对气候变化是全球性问题，因此，碳减排工程管理及其实践是全球治理框架下衍生的科学体系。碳减排工程管理主体涵盖全球近200个国家和地区，各主体发展阶段不尽相同，使得碳减排工程管理面临更加严峻的挑战。

(2) 协同要求高：碳减排工程涵盖工业（如钢铁、水泥、电力、化工、有色金属等行业）、交通、建筑、农业、土地利用、海洋生态等多个部门。治理对象涉及CO₂、

CH₄、N₂O等多种温室气体。因此，碳减排工程管理需要开展跨部门整合和全生命周期污染排放的协同管理。

(3) 技术跨度大：不同行业的生产工艺、响应过程、工程选址及适用性技术迥异。因此，碳减排工程管理需要充分考虑行业应对气候变化的技术异质性，及其实现全局统筹优化的时空可行性。

(4) 风险程度高：碳减排工程系统规模大、涉及领域广、建设周期长、不确定程度高、公众认知浅，导致其设计、实施、运行与管理中所面临的风险具有规模大、来源广、多元化、多时相、多尺度和高复杂性等特点。特别是一些碳减排工程（如核能发电）一旦损害或中断，还可能引发灾难性与致命性后果。

(5) 全局统筹难：气候变化是一个长期过程，综合以上特征，碳减排工程管理需权衡不同层次（系统、工程、项目、技术等）、不同时间域（百年尺度、代际冲突、年际变化、工程周期等）、不同空域（全球、区域、国家、市县等）的发展诉求，对近百年甚至更长时期内的碳减排工程措施进行全局优化和系统部署，从而统筹长期与短期、局部与整体、发展与减排。

2.2. 碳减排工程管理的几个难题

碳减排工程管理是综合运用计划、进度、组织等管理方法，对碳减排工程中减多少、谁来减、何时减、如何减、何效果等方面进行系统研究的新兴交叉学科。我们初步总结了碳减排工程管理的5个关键难题。

(1) 减多少，即对碳减排工程的全球减排潜力和实现气候目标所需减排水平的科学认知仍不统一。由于实现温控目标所允许的排放尚不明确，“技术→经济→CO₂排放→CO₂浓度→温升→气候损失”的传导机理尚未厘清，导致难以科学预估全球气候治理所需要的碳减排工程规模。

(2) 谁来减，即对碳减排工程的实施主体和责任分担原则尚不明晰。由于气候变化具有跨区域、多部门特征，不同工程主体的工程能力和资源禀赋迥异，使得主体间的减排责任分担具有极大挑战。因此，碳减排工程管理的实施主体和减排责任分担原则还需进一步明确。

(3) 何时减，即对碳减排工程实施的关键时间节点难以把握。气候变化的长周期特征导致难以权衡当代人的利益和子孙后代的福祉，因此碳减排工程管理亟需制定实现全局最优且代际公平的实施方案，明晰发展的关键时间节点。

(4) 如何减，即对满足气候治理目标的可行技术路径和工程规划布局知之甚少。碳减排工程涉及的部门众多、

技术复杂且成本不确定，导致未来应对气候变化的技术预见难、碳减排工程措施规划难。因此，我们需要通过对系统进行复杂性降解，制定具有明确导向的工程布局方案。

(5) 何效果，即需要正确认识碳减排工程的风险特性，完善风险预防机制。在对碳减排工程开展计划、组织、进度和技术管理的基础上，需进一步度量 and 评估不同过程产生的成本、收益和风险。因此，风险管理也是碳减排工程管理中的重要内容。

概括而言，以上几个关键难题涵盖了碳减排工程管理中的计划管理、组织管理、进度管理、技术管理和风险管理等全过程。

3. 碳减排工程管理“时-空-系统”协同理论

在对碳减排工程管理内涵及主要难题进行明确界定的基础上，我们提出了碳减排工程管理“时-空-系统”协同理论（图1）。该理论兼具“一轴牵引、动态优化”“三元联动、分级整合”“五维协同、一体可控”的管理特色。

针对时域协同，提出“一轴牵引、动态优化”的管理协调机制，在保证代际公平的基础上，明确碳减排工程的优先部署顺序，确定关键时间节点。在碳减排工程建设中，实践“增量发展、迭代演进”的动态模式，为追求全局更优，探索科学方法论，从而确定不同情景下实现温控目标或碳中和的最佳减排时间和力度，统筹短期和长期，实现代际之间的公平。

针对空域协同，形成“三元联动、分级整合”的管理运行模式，统筹整体与局部。通过引入合作共赢减排机制，确定气候目标下兼具公平性和经济性的国家间最优减排方案，实现管理、工程和技术在不同国家间的分级整合。

针对系统协同，建立“五维协同、一体可控”的管理控制体系，统筹经济转型、技术创新、能源革命、排放控制、气候治理等五维发展目标。通过“计划”减排目标、“设计”工程方案、“评估”风险影响、“优化”进程设计、“组织”多元主体，实现资源、要素的优化配置与有效整合，统筹发展与减排，实现碳减排的多系统整体优化。

该理论体系通过对碳减排工程复杂系统的重构与预测，兼顾减排行动的轻重缓急、各类微观主体的需求平衡、各类宏观系统的协同统筹等方面，帮助开展工程技术与管理工具的全局优化。在碳减排工程实践的过程管理、组织管理、计划管理、技术管理和风险管理上进行创新，旨在回答上文提及的五个关键难题，即“减多少”“如何减”“谁来减”“何时减”“何效果”。

目前已有研究将“时-空-系统”协同理论付诸实践，本文将简要介绍其中两项研究，以帮助读者更好地理解上述理论。第一项研究旨在应用“时-空-系统”协同理论，解决如何在时间和空间尺度上权衡短期经济损失与长期气候威胁的关键科学问题。为了实现全球气候治理，《巴黎协定》建立了一个动态机制，规定各缔约方每五年提交一次“国家自主减排贡献”（NDC）[13]。然而，但现有多

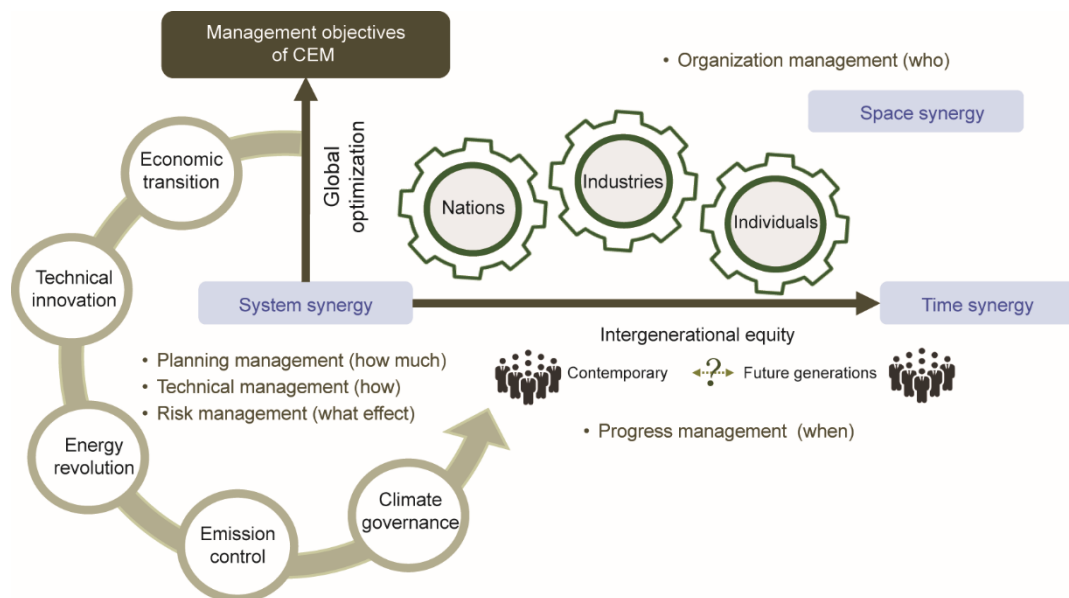


图1. 碳减排工程管理多主体协同理论概念图。这里的时间协同旨在平衡短期和长期优先事项，以确定减少排放的最佳时间，并保障代际公平。为了解决谁应该承担减排责任的问题，运用空间协同统筹局部减排与整体减排的关系，确定最公平、最具成本效益的减排责任分担方案。系统协同能够协调五个维度的发展目标，平衡这些发展目标与减排之间的关系，实现多系统减排的整体优化。这使我们能够回答CEM的其他三个关键问题：减多少，如何减，何效果。

数研究表明, 这些国家自主减排贡献仍然无法满足 2°C 和 1.5°C 温控目标的要求[14–15]。更令人担忧的是, 出于短期经济发展考虑, 国家或地区可能拒绝增强短期行动力度, 这对后巴黎时代全球气候治理提出了严峻挑战。在此背景下, Wei等[10]基于“时-空-系统”协同理论自主研发了中国气候变化综合评估模型(C³IAM), 在综合考虑技术发展和气候变化不确定性的条件下, 对各国应对气候变化可能带来的经济收益和避免的气候损失进行了评估, 提出了在后巴黎协定时代能够实现各方无悔的9个最优“自我防护策略”。与目前的NDC相比, 在“自我防护策略”下, 21世纪末所有国家和地区在实现 2°C 温控目标的同时都有正的累计净收益。该研究在“时-空-系统”协同理论支撑下, 编制了后巴黎协定时代实现温控目标的国家自主减排贡献改进的全球方案, 揭示了应对气候变化的全球碳减排盈亏平衡点(2065—2070年), 突破了应对气候变化将对全球经济产生负面影响的传统认知, 为提高各国应对气候变化的积极性、推动全球气候治理进程提供了科学依据。

二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)是实现21世纪末将全球温升控制在不超过工业化前 2°C (以下简称“ 2°C 温控目标”)必不可少的碳减排工程, 也是包括中国在内的世界各国实现碳中和目标的重要技术。为了明确温控目标下各国合作分担CCUS减排任务的具体方案, 现有研究在全球范围内满足CCUS实施要求的碳源识别、一致可比的封存潜力评估, 以及大规模实施CCUS的总体优化和规划等方面还存在不足。为解决上述难题, Wei等[16]集成地理信息数据、行业数据、土地利用数据等, 构建了全球 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 尺度的碳排放网格数据库, 界定并识别了4220个CCUS碳簇, 核算了全球794个陆上盆地的CO₂封存潜力。基于“时-空-系统”协同理论, 建立了基于碳簇的全球CCUS源汇匹配优化模型(C³IAM/GCOP), 发现全球实现 2°C 温控目标的CCUS低成本部署需要85个国家或地区参与, 大部分CCUS工程将部署在中国、美国、欧盟、俄罗斯、印度等国家和地区。

本文描述的两项研究展示了如何将碳减排工程管理“时-空-系统”协同理论用于跨时间、地理、技术、经济和社会维度的碳减排管理研究。针对特定的管理目标, 该理论可以提供关于预期何主体、何时、何地、实施何种类型的碳减排工程以及如何可能实施的见解。

4. 展望与建议

碳减排工程管理研究尚处于起步阶段, 需要充分利用管理手段, 系统、科学地指导碳减排工程实践, 积极探索

碳减排工程管理实践存在的协同机理、管理策略、风险控制、技术选择和气候公正等理论机制。尽快建立碳减排工程“成本-效益-风险”三位一体的评估体系, 从气候伦理角度强调碳减排工程实施和管理所带来的正外部效益, 并将其纳入全球治理框架中。

此外, 应充分发挥以点带面的先导作用, 通过全球碳减排工程示范项目的推进, 将碳减排工程管理理论体系在实践中不断应用与修正, 尤其是推动气候脆弱国家全面参与到碳减排工程管理的商议和决策过程中, 提高碳减排工程管理理论体系的普适性, 形成以工程能力为基础、以气候公平为导向、以风险预防为主线、以工程可持续为目标、以多主体协同为核心的碳减排工程管理理论体系。

最后, 我们鼓励跨学科领域的研究人员参与到碳减排工程管理研究中来。尽管本研究为碳减排工程管理提供了一个系统的理论框架, 但主要是从管理科学视角出发, 难以解决碳减排工程管理中出现的所有问题, 特别是在伦理与地缘政治等方面[17–19]。由于气候变化的全球性特征, 在一个国家使用碳减排工程技术可能会导致气候损害转移到邻近地区, 或在全球气候治理中出现“搭便车”行为, 这可能会进一步导致关于气候减缓责任分担的国际争端。因此, 为解决碳减排工程管理可能存在的各种风险, 促进碳减排工程在全球范围内的广泛部署, 需要多学科共同努力, 通过更多的学术研究和管理实践, 推动碳减排工程管理学科的长足发展。

致谢

感谢国家自然科学基金项目(71521002)和国家重点研发计划项目(2016YFA0602603)对本研究的支持。我们也真诚感谢北京理工大学能源与环境政策研究中心的同事们的帮助。

References

- [1] Keith DW. Geoengineering the climate: history and prospect. *Annu Rev Energy Environ* 2000;25(1):245–84.
- [2] National Research Council. Climate intervention: carbon dioxide removal and reliable sequestration. Washington, DC: National Academies Press; 2015.
- [3] Burns WC. Geoengineering the climate: an overview of solar radiation management options. *Tulsa L Rev* 2010;46:283.
- [4] Oldham P, Szerszynski B, Stilgoe J, Brown C, Eacott B, Yuille A. Mapping the landscape of climate engineering. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* 2014; 372(2031):20140065.
- [5] Wei YM, Yu BY, Li H, Kang JN, Wang JW, Chen WM. Climate engineering management: an emerging interdisciplinary subject. *J Model Manag* 2019;15(2): 685–702.
- [6] Kang JN, Wei YM, Liu LC, Han R, Yu BY, Wang JW. Energy systems for

- climate change mitigation: a systematic review. *Appl Energy* 2020;263:114602.
- [7] Wei YM, Han R, Liang QM, Yu BY, Yao YF, Xue MM, et al. An integrated assessment of INDCs under Shared Socioeconomic Pathways: an implementation of C³IAM. *Nat Hazards* 2018;92(2):585–618.
- [8] Fuss S, Canadell JG, Peters GP, Tavoni M, Andrew RM, Ciais P, et al. Betting on negative emissions. *Nat Clim Chang* 2014;4(10):850–3.
- [9] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Special report on global warming of 1.5 °C. Cambridge: Cambridge University Press; 2018.
- [10] Wei YM, Han R, Wang C, Yu B, Liang QM, Yuan XC, et al. Self-preservation strategy for approaching global warming targets in the post-Paris Agreement era. *Nat Commun* 2020;11(1):1624.
- [11] Sheng Z. Fundamental theories of mega infrastructure construction management. New York: Springer; 2018.
- [12] Wei YM. Climate engineering management: carbon capture and storage technology management. Beijing: Science Press; 2020.
- [13] Rogelj J, den Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, et al. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature* 2016;534(7609):631–9.
- [14] Schlessner CF, Rogelj J, Schaeffer M, Lissner T, Licker R, Fischer EM, et al. Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nat Clim Chang* 2016;6(9):827–35.
- [15] United Nations Environment Programme (UNEP). Emissions gap report 2020—executive summary [Internet]. Nairobi: United Nations Environment Programme; 2020 Dec 9 [cited 2021 Aug 16]. Available from: <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>.
- [16] Wei YM, Kang JN, Liu LC, Li Q, Wang PT, Hou JJ, et al. A proposed global layout of carbon capture and storage in line with a 2 °C climate target. *Nat Clim Chang* 2021;11(2):112–8.
- [17] Merk C, Pönitzsch G, Rehdanz K. Do climate engineering experts display moral-hazard behaviour? *Clim Policy* 2019;19(2):231–43.
- [18] Rübberke DTG. International support of climate change policies in developing countries: strategic, moral and fairness aspects. *Ecol Econ* 2011;70(8):1470–80.
- [19] Nordhaus W. Climate clubs: overcoming free-riding in international climate policy. *Am Econ Rev* 2015;105(4):1339–70.