



陈迎, 沈维萍. 地球工程的全球治理: 理论、框架与中国应对 [J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(8): 1-12. [CHEN Ying, SHEN Weiping. Global governance of geoengineering: theory, framework and China's strategies [J]. China population, resources and environment, 2020, 30(8): 1-12.]

地球工程的全球治理: 理论、框架与中国应对

陈迎¹ 沈维萍²

(1. 中国社会科学院生态文明研究所, 北京 100028; 2. 中国社会科学院大学(研究生院) 北京 102488)

摘要 为应对气候变化的严峻挑战, 科学家提出地球工程的概念, 探讨通过超常规的大规模工程技术手段改变气候系统的可能性, 成为气候变化领域研究的新热点。地球工程是诸多复杂技术方案的总称, 根据不同作用机理, 将其分为太阳辐射管理(SRM)和碳移除(CDR)两大类。地球工程在降低地球平均温度的同时也带来新的风险, 引发全球治理的难题。面对影响人类共同利益的未知领域, 各国纷纷启动相关研究项目, 陆续开展多领域科学评估, 且部分CDR项目已经开展商业化示范, 地球工程全球治理的实践也拉开帷幕。地球工程影响的全球性、外部性决定了其治理需要全球共同努力, 其综合影响的复杂广泛和不确定性决定了其治理是一个跨领域、多平台、多主体、多层次的治理体系, 而其特殊的经济学属性使得全球治理面临着供给方案、两难选择、道德风险、区域和代际公平等诸多的困境和挑战。地球工程的全球治理框架需要明确原则、对象、目标、主体、平台、制度和机制等基本要素, 需要在现有机制基础上, 建立联合国框架下的多平台协同治理机制, 以科学共识推动政治进程, 并把握关键时间节点。面对地球工程议题, 中国应以可持续发展理念和生态文明思想为指导, 在正确认识其风险特性的基础上, 科学地将其纳入应对气候变化大框架, 并坚持多边主义立场, 深度参与地球工程的全球治理, 维护人类命运共同体。

关键词 气候变化; 地球工程; 全球治理; 太阳辐射管理(SRM); 碳移除(CDR)

中图分类号 F062 文献标识码 A 文章编号 1002-2104(2020)08-0001-12 DOI: 10.12062/cpre.20200644

自20世纪90年代启动国际气候谈判进程以来, 经过20多年艰难坎坷的发展历程, 各方利益依然分歧严重, 谈判步履维艰。近年来, 在常规的气候变化减缓和适应措施外, 一些科学家试图探索在更大更广的地理尺度上采用工程技术手段应对气候变化的可能性, 逐步兴起了地球工程(Geoengineering)相关研究。地球工程包含通过人工从空气中移除二氧化碳或为地球降温的一系列技术, 因潜在影响复杂、高风险和高不确定性, 在国际上引起广泛争议。综合来看, 关于地球工程的研究发展很快, 除自然科学领域的影响模拟和风险研究外, 从伦理、哲学、经济学、社会学等人文社会科学角度讨论地球工程的文献也大量涌现, 其中地球工程的国际治理问题成为研究的热点, 重点探讨地球工程国际治理的伦理依据、原则、目标、核心问题、管制手段等。而中国有关地球工程的研究起步较晚, 2015年首次设立“973计划”国家级研究课题, 从自然科学和社会科学领域展开研究。且随着国际上地球工程讨论愈来

愈热, 国内更多学者关注和研究地球工程, 自然科学领域的研究侧重于影响模拟和分析^[1-2], 社会科学领域开始关注和研究负排放技术的综合经济评估问题^[3], 以及地球工程的全球治理和中国应对问题^[4-5]。在此基础上, 中国将于2021年出版的《第四次气候变化国家评估报告》中也将纳入地球工程的综合影响、相关技术发展现状及前景的总结和评估, 但整体上相关的社会科学研究还十分有限。

相比地球工程国际治理的需求和实践, 作为负责任大国, 中国日益受到国际社会的高度关注, 但限于研究不足, 在国际讨论中话语权很弱。有鉴于此, 本文就地球工程的全球治理问题进行分析 and 探讨, 具体从以下几个部分展开: 第一部分梳理地球工程的提出和发展历程, 明确地球工程概念的界定和具体技术类别; 第二部分分析地球工程的研究及其激发的越来越强烈的全球治理需求; 第三部分从理论上系统梳理和分析地球工程全球治理的概念、困境和挑战; 第四部分构建地球工程全球治理的机制框架, 具

收稿日期: 2020-06-09 修回日期: 2020-06-28

作者简介: 陈迎, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为全球气候治理、能源与环境政策。E-mail: cy_cass@163.com。

通信作者: 沈维萍, 博士生, 主要研究方向为全球气候治理、气候变化经济学。E-mail: shenweiping@ucass.edu.cn。

基金项目: 科学技术部《第四次气候变化国家评估报告》编制工作专项; 中国社会科学院大学(研究生院) 研究生科研创新支持计划项目“地球工程全球治理的理论基础与机制构建研究”(批准号: 2020-KY-018)。

体阐释地球工程全球治理的基本要素;最后提出中国在全球可持续发展 and 全球气候治理框架下对地球工程议题的应对策略。

1 地球工程的提出和概念界定

1977年,美国学者马尔切蒂(Marchetti)^[6]在《地球工程与二氧化碳问题》一文中首次提出地球工程,建议把CO₂封存在深海以应对全球气候变暖。同年,俄罗斯科学家Budyko^[7]提出通过向平流层注入气溶胶(SAI)给地球降温的设想。2006年,诺贝尔奖得主克鲁岑(Crutzen)^[8]重提实施该技术的可能性,并得到学术界的广泛关注。2009年9月,英国皇家学会发布了题为《地球工程:气候科学、治理与不确定性》的报告^[9],引发了政界、学术界和公众对地球工程的广泛讨论。2009年底哥本哈根大会前夕举行的国际气候科学家会议上,有15个演讲内容与地球工程相关。哥本哈根会议期间,有关地球工程的边会多达十几场。此后,地球工程研究升温,从自然科学扩展到经济、政治、伦理等社会科学领域,各类学术研讨活动日益活跃,科学文献大量涌现。2015年达成的气候变化《巴黎协定》确立了控制全球平均升温不超过2℃并努力实现1.5℃的长期目标。1.5℃目标的引入为国际上有关地球工程的研究和讨论注入了新的活力。2018年,政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的《全球升温1.5℃特别报告》(SR1.5)指出,即使各国落实国家自主贡献(NDCs)目标,到21世纪末,全球升温可能达到3℃。要实现控制全球升温1.5℃目标,相比2℃情景难度很大、时间紧迫,通过地球工程人工干预气候系统可能是难以避免的无奈选择^[10]。

常用地球工程的定义是“为了应对全球气候变化而对气候系统采取的有计划、大规模的人工干预活动”,也称“气候工程(climate engineering)”或“气候干预(climate intervention)”^[9,11]。根据作用机理的不同,可分为碳移除(carbon dioxide removal, CDR)和太阳辐射管理(solar radiation management, SRM)两大类,也分别称碳地球工程(carbon geoengineering, CG)和太阳地球工程(solar geoengineering, SG)^[12]。此外,IPCC在1.5℃特别报告中采用人工影响太阳辐射(solar radiation modification)代替太阳辐射管理(solar radiation management),英文缩写均为SRM。CDR通过生物、物理或化学的方法移除或转化大气中的二氧化碳,降低大气中温室气体浓度。SRM不直接减少大气中二氧化碳含量,而是通过减少到达地面的太阳辐射来缓解地球升温。具体技术分类如表1所示。

目前,SRM类技术尚未实施。计算机模拟研究表明,SRM通过人工干预太阳辐射可以降低全球平均温度,但同时也会影响区域温度、降水等。除气候效应外,SRM的

影响还涉及环境、农业、社会、经济、伦理和治理等多方面,综合影响评估还不成熟,国际治理机制几乎空白。

相比而言,CDR类技术实施更为现实和紧迫,旨在通过直接从大气中移除二氧化碳,或人为增加海洋或陆地碳汇减少大气中的二氧化碳,以实现负排放^[10]。现有气候公约虽涉及陆地碳汇管理,但对于大规模实施生物能源的碳捕集与封存(BECCS)带来的土地利用、粮食安全和生物多样性损害等新挑战,国际治理机制有待进一步完善。

总之,地球工程是诸多复杂技术方案的总称。不同技术的作用机理不同,技术成熟度、有效性、经济成本、起效时间、对环境的可能影响和风险也不相同,需要区别对待,不能简单化地一概而论。

2 地球工程实施和全球治理需求

地球工程潜在影响复杂而广泛,具有高风险和不确定性的特点。如果大规模实施,在降低地球温度的同时也可能带来许多不可忽视的副作用,其影响甚至超越气候系统,给全球生态系统带来巨大风险。面对影响人类共同利益的未知领域,各国科学研究的竞争已经拉开帷幕。

2.1 地球工程研究项目纷纷启动

近年来,各国启动了很多地球工程研究项目,英美等发达国家相对领先,如表2所示。美国哈佛大学大卫·凯斯(David Keith)教授领导的太阳地球工程研究计划(SCRIP)研究团队非常活跃,获得比尔及梅琳达·盖茨基金会的资助,计划开展小型户外实验,在大气平流层释放少量反光物质以观察其扩散的规律。2019年3月,美国气候政策智库发布《确保气候安全:气候干预和地球系统预测研究的国家当务之急》研究报告,从气候安全的高度呼

表1 地球工程技术的分类

类别	原理	具体技术
碳移除 (CDR)	直接从大气中移除二氧化碳	直接空气捕获(DAC)
	人为增加陆地碳汇	造林和森林生态系统恢复、生物能源的碳捕集与封存(BECCS)、生物炭提高土壤碳含量 增强风化
	人为增加海洋碳汇	增强海洋碱化、海洋施肥
太阳辐射管理 (SRM)	平流层气溶胶注射(SAI) 减少到达地面的太阳辐射	陆地或水面上空云改造/海洋云层增亮(MCB) 表面反照率修改/太空反光镜

注:资料来源于Carnegie Climate Governance Initiative(C2G)(<https://www.c2g.net/>)。

吁立即开展气候干预技术研究,投资开展气候预测建模、地球工程技术评估和小规模实验,加强国际合作^[13]。中国学者关于地球工程的研究起步较晚,但是近两年在研究团队建设和研究成果上进展较快。如北京师范大学约翰·摩尔(John Moore)教授领导的研究团队加入了国际“地

球工程模型间比较计划”(GeoMIP)^[14];2015年6月,中国启动了“973计划”地球工程研究项目,由北京师范大学、浙江大学和中国社会科学院城市发展与环境研究所合作承担,研究内容涉及地球工程的机理研究、情景模拟、影响评估和国际治理等。

表2 各国开展的地球工程研究项目情况(截至2019年11月)

项目名称	项目承担国家/地区	项目经费/万美元	项目起止时间
哈佛太阳地球工程项目(SGRP)	美国	162.25	2017—2024年
地球工程模型间比较计划(GeoMIP)	美国	250.00	2008年至今
气候与能源创新基金	美国	776.50	2008年至今
卡内基气候地球工程治理倡议(C2G2)	美国	474.70	2017年至今
可持续气候风险管理网络(SCRM)	美国	226.10	2012—2019年
埃米特研究所项目	美国	107.61	2017—2020年
康奈尔气候工程	美国	65.00	2015—2020年
平流层气溶胶地球工程大集合(GLENS)	美国	100.00	2015—2017年
合作研究:评估地球工程气候系统的建议	美国	69.99	2008—2013年
创新气候与能源研究基金(FICER):MCB	美国	15.00	2010—2020年
创新气候与能源研究基金(FICER):SRMGI	英国	10.00	2010—2020年
太阳辐射管理治理倡议(SRMGI)	英国	241.20	2010—2020年
地球工程提案综合评估(IAGP)	英国	273.85	2010—2015年
气候工程平流层粒子注入(SPICE)	英国	260.00	2010—2014年
气候地球工程治理项目(CGG)	英国	163.46	2012—2014年
欧洲气候工程跨学科评估(EuTRACE)	欧盟	159.16	2012—2014年
太阳辐射地球工程对限制气候变化的影响和风险(IMPLICC)	欧盟	117.00	2009—2012年
综合气候评估:风险、不确定性和社会(ICA-RUS)	日本	80.10	2012—2017年
SOUSEI	日本	80.00	2012—2016年
TOUGOU	日本	80.00	2017—2021年
高级可持续发展研究机构(IASS)	德国	389.96	2010—2017年
Schwerpunkt Programm(SPP 1689)	德国	351.00	2013—2019年
地球工程基础理论和影响评估研究“973计划”项目)	中国	225.00	2015—2019年
气溶胶注入技术冷却气候:成本、收益、副作用与治理(COOL)	芬兰	169.18	2011—2014年
探索气候工程的潜力和副作用(EXPECT)	挪威	130.00	2014—2017年

注:资料来源于Harvard's Solar Geoengineering Research Program(SGRP)(<https://geoengineering.environment.harvard.edu>)、Carnegie Climate Governance Initiative(<https://www.c2g2.net/>)、The Solar Radiation Management Governance Initiative(SRMGI)(<http://www.srmgi.org/>)、Climate Geoengineering Governance(<http://geoengineering-governance-research.org/>)和European Transdisciplinary Assessment of Climate Engineering(EuTRACE)等。

从研究内容和主题来看,这些项目以自然科学模拟研究为主,有些涉及户外实验,但因无法承受社会压力,目前多数项目延迟或停止。近年来,从社会科学角度探讨伦理和治理问题的项目逐渐增多,碳移除相关研究日渐活跃。

2.2 多层面地球工程科学评估陆续开展

随着地球工程研究不断推进,近年来,美国、欧盟陆续开展国家和地区层面评估,一些国际组织发布多份多领域地球工程科学评估报告,政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告对地球工程议题的关注度也逐渐增强,引发国际社会的高度关注。

在国家或区域层面,2012年欧盟资助德国和英国科学家对地球工程进行跨学科的综合评估(EuTrace)。2015年,美国国家科学、工程与医学院就针对地球工程的SRM和CDR两类技术分别发布评估报告,揭示地球工程的潜在影响和风险。2018年10月,美国科学院设立一个新的委员会,识别SRM类地球工程技术的研究需求和治理问题,并于2019年发布了一份长达500多页的报告《负排放技术和可靠的封存:研究议程(2019)》^[15],对BECCS、DAC等六种负排放和封存技术进行了评估,呼吁美国政府推进负排放技术的研发和部署。

在全球层面,海洋环境保护科学联合专家组(GESAMP)第41工作组于2019年3月发布了《海洋地球工程技术高级别综述报告》^[16],全面评估了各种海洋地球工程技术的发展现状和可能影响,建议联合国牵头建立一个协调机制,负责海洋地球工程活动的管理和审核。同时呼吁持续关注并开展地球工程的评估,在自然科学评估之外,加强社会经济和地缘政治层面的分析。

IPCC对地球工程的关注度也不断提高。2012年,IPCC召开地球工程专家会议,明确了地球工程的定义和侧重点。2014年发布的第五次评估报告(AR5)首次关注地球工程,三个工作组报告都有涉及地球工程的相关内容,没有给出明确结论性判断,警告在缺乏充分研究的情况下不应盲目开展SRM实践活动^[17]。2018年10月,IPCC发布的《全球升温1.5℃特别报告》(SR1.5)^[18],在不同排放情景下,负排放的规模在100亿~1000亿t CO₂。正在编写的第六次评估报告(AR6)对地球工程的关注度有所增强,将反映最新研究进展,就地球工程的复杂影响做出更为全面、客观、平衡的评估。

2.3 部分CDR项目开展商业化示范

由于SRM争议很大,户外实验多被迫取消或延迟。但近年来,CDR研究活跃,美国、英国、加拿大、瑞士等发达国家已纷纷启动相关技术的研发和商业化示范,有望开辟科技和市场竞争的新领域。如英国剑桥大学成立气候修复中心,探索用地球工程手段修复地球气候^[19]。英国最

大的发电厂Drax三分之二的发电机组改用生物质替代煤炭,并从发电废气中每天捕集1t二氧化碳开展了BECCS试点,成为欧洲最大的脱碳项目。加拿大碳工程公司(Carbon Engineering)自2015年以来一直运营一家二氧化碳萃取试验厂,开展直接空气碳捕获研究,根据其设计方案和假设条件估算,从大气中捕获1t二氧化碳的成本在94~232美元之间^[20]。美国也有公司开展直接捕获技术应用。瑞士的Climeworks公司是全球首家签订商业运营合同的公司^[21],通过直接碳捕集向附近的温室供应二氧化碳用于蔬菜种植。该公司称,捕获1t二氧化碳的成本约为600美元,未来5~10a可将成本降至每t100美元以下。不过这些项目能否在全生命周期实现负排放还需进一步观察和评估。

2.4 地球工程全球治理实践拉开帷幕

随着对地球工程研究和科学评估的不断深入,地球工程的潜在影响和风险引起全球范围内的高度关注,地球工程全球治理的实践也拉开帷幕。2019年3月,在肯尼亚召开联合国环境大会(UNEA4)前夕,瑞士政府在卡内基气候工程治理项目(C2G2)的支持下,联合韩国、墨西哥、塞内加尔等10个国家提交案文,要求联合国环境规划署(UNEP)牵头建立一个特设独立专家组就每一项地球工程技术的研究、应用、利弊和风险、治理等状况开展全面评估;为各成员国提供有关地球工程国际治理所需框架的建议,供UNEA5讨论;同时促进联合国系统其他相关机构,包括气候公约秘书处,参与上述各项工作。该提案虽得到部分国家的支持,欧盟、新西兰等对瑞士的努力表示了敬意,但由于美国和沙特的极力阻挠,最终无法达成共识,瑞士无奈撤回提案^[22]。

在提案辩论过程中反映出各国存在严重的立场分歧。以瑞士为代表的多数欧洲国家秉持谨慎预防的原则,要求启动国际进程,加强国际治理。少数欧洲国家考虑自身利益,有所保留。沙特阿拉伯基于巨大的石油利益,在应对气候变化问题上一贯立场消极,态度强硬。多数国家,尤其是发展中国家由于缺乏地球工程的认知,对启动地球工程国际治理还没有充分准备。而美国对地球工程的态度最为复杂。一方面,美国积极开展科学研究,深知地球工程的影响和风险,另一方面,美国极力阻挠国际社会讨论地球工程的治理问题,其强硬立场难免令人揣测美国有凭借先进科学技术和大国政治的优势走单边主义道路的战略意图。

3 地球工程全球治理的理论分析

地球工程是一个跨领域的新问题,涉及科学、技术、环境、社会、经济、法律、伦理等多学科交叉。地球工程的全

球治理是全球气候治理领域的新兴问题。要构建地球工程全球治理的框架和机制,首先必须厘清地球工程全球治理的概念和范畴,从理论上识别地球工程全球治理面临的困境和挑战。

3.1 地球工程全球治理的概念和范畴

治理的概念属于公共管理学的范畴。詹姆斯·N·罗西瑙(J. N. Rosenau)将治理定义为一系列活动领域里的管理机制,这些管理机制“尽管它们未被赋予正式的权力,但在其活动领域内也能够有效地发挥功能。”^[23]联合国开发计划署(UNEP)于2007年发表的《治理指数:使用手册》研究报告指出,治理是一套价值、政策和制度的系统,由制度和过程组成。可见,治理是一个过程;治理过程的基础是协调;治理涉及公共部门和私人部门;治理不是一种正式的制度,而是持续的互动。国际治理是治理从国内层次延伸到超国家层次或全球层次,属于国际政治经济学的范畴。全球治理,是“个人和机构、公共和私人管理一系列共同事务方式的总和,是一种可以持续调和冲突或多样利益诉求并采取合作行为的过程,包括具有强制力的正式制度与机制,以及无论个人还是机构都在自身利益上同意或认可的各种非正式制度安排”^[24]。

地球工程的全球治理,既具有全球治理问题的一般性特征,又因其综合影响的复杂广泛和不确定性决定了其治理是一个跨领域、多平台、多主体、多层次的治理体系。既包括国际治理,也包括国内通过各种政策措施加以落实,是一个多层次、多形式、动态持续的进程。

3.2 地球工程全球治理的困境与挑战

地球工程影响的全球性、外部性决定了其治理需要全球共同努力,而特殊的经济学属性使得全球治理面临着诸多的困境和挑战。

3.2.1 全球公共物品的供给

从公共经济学的角度看,地球工程是全球气候治理的一种全球公共物品,从理论上可由政府供给,在没有世界政府的情况下,是否应该提供以及需要时如何提供等基本问题就需要国际治理机制来解决。根据已有研究,SRM的部署成本被认为很小,所以在供给时存在“开便车”问题^[25],可以在没有全球充分参与的情况下局部实现。如果国际治理缺位或不足,无论是放任国家、企业、甚至个别科学家的不受约束的单边行动,还是在气候系统到达风险阈值时无法以地球工程作为应急手段,都将使全球生态系统面临巨大风险。

此外,具有环境风险的地球工程技术在供给时还有可能被“武器化”,如SRM的部署可能从“多边主义逻辑”向“军事化逻辑”演化^[26],进而威胁国家安全。在SRM的部署问题上,如果没有达成共识,或者在胁迫下达成局部共

识,则实施SRM可能被视为战争行为,可能助长现有冲突或引发新的冲突。

3.2.2 两难选择和道德风险

传统的减缓措施,如提高能效和发展可再生能源是“无悔选择”,相比而言,地球工程是末端治理,在降低地球温度的同时会带来风险和不确定性,例如,SAI有“终止效应”,意味着一旦开始实施就需要长期持续。如果由于技术或者政治等原因突然停止,没有其他减缓措施跟进,则全球气温会迅速反弹,使生态系统难以适应,SRM也不能缓解与碳排放相关的海洋酸化问题^[1]。如同一付有强烈副作用的救命药,如何权衡利弊并做出选择,面临两难的困境。

不仅如此,一些环保组织还担心有了地球工程作为退路,会削弱人类社会减缓和适应气候变化的努力,产生所谓“道德风险”(moral hazard)^[27]。国际社会已逐渐形成共识,地球工程不能替代从源头减缓气候变化的努力,而只能作为实现全球2℃或1.5℃目标的补充,或气候紧急情况下的补救措施。

3.2.3 区域公平与代际公平

地球工程的影响具有外部性和区域差异性,带来额外的区域不公平。例如,实施SRM不仅降低全球平均温度,还引起不均匀的温度和降水变化,加剧不同地区或国家间水资源分布差异,引起政治关系紧张,甚至威胁国家安全^[28-29]。大规模实施BECCS的区域会造成大量土地利用变化,威胁粮食安全和水安全,损害生物多样性等。因此,必须建立妥善的全球治理机制,完善相关法律来预防和管理潜在的部署行动。

从代际公平角度分析,地球工程的影响还具有全球性和长期性,其影响超出了国界,超出了当代人,也超出了人类社会,如果要采取行动,也存在一个国际治理问题:谁来决定、在何时、何地、何种规模上做^[5]?地球工程是为了应对气候变化而提出的,但其治理不能局限于气候变化的单一目标,必须考虑可持续发展目标(SDGs)的各个方面。若不能实现与可持续发展的协同,至少不能对陆地生态系统、粮食、水等相关的其他可持续发展目标产生重大的负面影响。

4 地球工程全球治理框架的基本要素

全球治理机制是国际行为关系体通过共同制定或认可一整套明示或默认的原则、规范、规则以及决策程序,协调全球对于特定全球问题的关系,在动态协商和调整中逐步推动问题走向解决。要建立地球工程的全球治理机制,需要明确其全球治理的原则、对象、目标、主体、平台、制度和机制等基本要素。

4.1 地球工程全球治理的基本原则

2009年,英国牛津大学地球工程项目的专家提出“牛津原则”(Oxford Principles)^[30],被学术界广泛引用,强调地球工程的公共物品属性,主张先治理后实施。实际上,早在1996年,戴尔·杰米森(Dale Jamieson)^[31]便提出“地球工程必须在技术上是可行的、可靠的,在社会经济上是可取的,并尊重有充分依据的道德准则”称为“杰米森原则”(Jamieson's Principles)。后来,Gardiner和Fraginère^[32]基于“杰米森原则”对“牛津原则”进行了建设性的批判,并提出了“收费站原则”(Tollgate Principles)。“收费站原则”共有十条,认为遵守这些原则是任何试图制定和引入符合道德的地球工程政策所“必须付出的代价”。

一般而言,伦理原则是目的指向的,也可理解为价值遵循和导向,而治理原则是工具导向的。“牛津原则”侧重治理原则,强调规范和加强地球工程研究、实验,乃至可能的部署行动。“收费站原则”侧重伦理原则,强调治理框架的伦理充分性;而“杰米森原则”既强调技术和经济可行性也强调道德准则的重要性,既有治理原则也有伦理原则。

考虑到地球工程的提出是为了应对气候变化,但其影响已超越了气候系统,涉及人类社会可持续发展的各方面;从空间尺度看,影响是全球范围的;从时间尺度上,影响将超出当代。地球工程治理的原则必须置于全球可持续发展的更广阔的视角下来探讨,至少应包括可持续性、共同性和公平性三大伦理原则:首先是可持续性原则。地球工程一旦实施,人类社会要承担的相关后果,无论是获益还是损害。地球工程的实验或技术部署应有利于人类社会可持续发展,以不损害人类福祉为基本前提,任何损害人类健康和社会进步的技术手段都应被制止。其次是共同性。无论是CDR的“搭便车”问题还是SRM的“开便车”问题,解决集体行动的困境,国际合作都至关重要^[33],需要全球共同建立地球工程治理机制,保障人类安全。第三是公平性。可持续发展的公平性包括代内公平,也包括代际公平。气候变化的影响具有明显的区域差异性,且当代人排放的二氧化碳累积在大气和海洋中,由后代人来承受相关的影响和损失,便产生了代际不公平问题。地球工程可能加剧气候变化已有的代内区域不公平和代际的不公平,带来新的风险。地球工程的公平性问题包含多重含义,如实施的成本如何分担,收益如何分配,涉及分配公平、程序公平、生态公平等,从代际考虑,还涉及代际公平、矫正公平等^[34]。

基于上述伦理原则,在“杰米森原则”和“牛津原则”提及的治理原则之外,地球工程的全球治理还应补充以下治理原则:第一,公共利益优先原则。在市场机制和监督

机制不完善的情况下,不能允许以私人利益为目的的研究和部署。第二,透明度原则。保持研究和部署相关决策的透明度,各种宣传渠道需要科学解读和报道相关信息,使社会民众能够认知和理解相关决策;第三,灵活性原则。治理机构需要具有灵活性,以便适应不断变化的政治环境和快速更新的信息而及时做出反应^[35],使治理不能落后于技术进步。

4.2 地球工程全球治理的阶段和目标

基于地球工程全球治理的基本原则,需要各方在地球工程治理目标上达成共识,并识别关键目标及优先序。决策者对于地球工程全球治理不应预设立场,对地球工程的研究、实验、应用或部署实施的各种可能都持开放的态度,不赞成也不反对。地球工程的全球治理的总目标是建立一套符合道德和伦理规范的、具有全球共识的准则和制度来规范和引导其良性发展。其中关键目标包括:第一,确保地球工程技术不能被滥用,任何技术不得危害人类、后代和地球生态安全。第二,要避免地球工程的“道德风险”,不能因地球工程的研究、讨论或实验而削弱减缓和适应气候变化的努力。第三,应在满足一定规范下允许开展地球工程科学研究,识别有潜力的地球工程技术,评估包括地球工程在内的气候政策组合的效果和风险,并研究如何规避风险。

目前,SRM仍处于研发的初期,主要是计算机模拟、观察等科学研究,罕有户外实验,尚没有实施应用。相比而言,CDR技术已有商业示范,如瑞士已开设世界上第一家商业DAC工厂,大规模实施BECCS很有可能被纳入未来气候政策组合。技术发展日新月异,治理必须跟上技术发展的步伐。地球工程的全球治理需要针对不同技术以及技术研究、实验、示范、实施应用等的不同阶段制定不同的治理目标(见表3)。

4.3 地球工程全球治理的多层次和多主体特征

全球治理的主体是制定和实施全球规则的组织机构。虽然各国政府代表主权国家参与仍是全球治理的主体,但在很多领域,治理主体已突破一国治理的范围,不同领域、不同层次的行为体构成了日益复杂的治理网络结构^[36]。同样,要实现地球工程的治理目标,需要多主体参与,多层次治理。不同参与主体和机构在国家 and 国际层面采取协调一致的行动,政府、政府间和非国家行为体都可以通过不同的平台发挥各自重要的作用。

4.3.1 全球层面的治理

在全球层面,地球工程作为全球公共物品,影响广泛,不仅涉及气候变化,还包括人类健康和安全、经济发展、粮食系统、海洋等其他许多领域的问题,需要相关领域的国际机构合作治理。除了借助已有的机制平台,还需要设计

表 3 不同地球工程技术不同阶段的治理目标

治理对象	治理阶段	治理目标
太阳辐射管理 (SRM)	研究(模拟、观察等)	允许并鼓励公开透明的研究; 避免“道德风险”; 探究优化气候政策组合的效果和风险
	户外实验	必须确定影响和风险可控并被利益相关者所接受和允许才可进行; 探究何时、何地、如何应用或进行政策组合能规避风险
	实施	在影响和风险得到科学论证并被全球范围内的利益相关者接受之前, 禁止实施
碳移除 (CDR)	研究(技术研发和小规模实验)	允许并鼓励公开透明的研究; 避免“道德风险”; 防范封存的环境风险; 探究何时、何地、如何应用或进行政策组合能规避风险
	商业示范	允许; 防范封存的环境风险和市场风险
	大规模实施	论证全生命周期实现负排放的可行性, 生物质生产和供应的可持续性, 融资问题, 公众可接受度, 以及防范大规模封存的环境风险, 等等

注: 笔者整理制作。

和调整相关规则和机构运行方式, 甚至构建新的治理机构。借助已有的国际机构进行协调相比建立一个新的治理机构, 优点是发挥机构之间的协同作用, 避免重复劳动, 还能节约时间, 避免繁琐的程序以提高效率。

目前, 已有一些国际机构尝试对地球工程相关活动进行规范。如在海洋领域, 《防止倾倒废物及其他物质污染海洋的公约》(《伦敦公约》)及其修订书首次在国际公约中明确了海洋地球工程的定义并建立了海洋地球工程许可制度, 对海洋施肥进行了规范。2019年, 海洋环境保护科学方面联合专家组(GESAMP)和国际海事组织(IMO)、联合国粮食及农业组织(FAO)、联合国教育、科学及文化组织(UNESCO)、世界气象组织(WMO)等机构共同起草了《各种拟议海洋地球工程技术的高级别审查》提案, 再一次推动了海洋地球工程活动的治理^[16]。

《生物多样性公约》也高度重视海洋施肥对生物多样性的影响, 单列了地球工程谈判议题。早在2010年, 《生物多样性公约》第10次缔约方大会, 针对有企业私自向海洋倾倒铁剂的行为, 各缔约方经过激烈争论, 大会最终通过决定, 要求在用适当的科学方法对地球工程的社会、经济及文化影响进行评价前, 缔约方不得开展可能影响生物

多样性的大规模地球工程活动。对于小规模科学研究, 必须提供具体科学数据, 并对其潜在环境影响进行彻底的事先评估, 才能在受控制的环境中进行。在此基础上, 第11次缔约方大会再次重申禁止开展对生物多样性有潜在影响的大规模地球工程, 认为缺乏科学、透明、有效和凝聚全球共识的地球工程管控机制, 应采取谨慎预防的原则, 对具有跨境影响的地球工程活动开展监管^[37]。不过该决定没有足够的法律强制力, 在如何定义大规模地球工程, 如何判定对生物多样性的潜在影响等关键问题上存在模糊地带。

相比而言, 针对大气圈地球工程SRM的相关立法仍属空白, 如联合国气候变化框架公约(UNFCCC)部分覆盖农林业碳汇和CCS技术《保护臭氧层维也纳公约》以及《蒙特利尔破坏臭氧层物质管制议定书》针对臭氧层保护对消耗臭氧层物质有法律规定; 1979年签署的《关于远距离跨境空气污染的日内瓦条约》以及1999年的《哥德堡协议》对于加强区域空气污染的治理发挥很大作用等^[38]。但现有国际法都没有明确的法律可以约束SRM活动, 换言之, 一旦有国家、企业或个人恶意实施SRM, 损害了其他国家的利益, 威胁全球生态系统, 国际层面将无法可依。

此外, 世界气象组织(WMO)、联合国教育、科学及文化组织(UNESCO)、《联合国海洋法公约》(UNCLOS)、环境修改公约(ENMOD)、联合国外层空间事务办公室(UNOOSA)、联合国环境规划署(UNEP)和联合国粮食及农业组织(FAO)都与地球工程的治理密切相关。

4.3.2 国家或地区层面的治理

在全球层面地球工程治理严重缺失不足以解决集体行动困境的情况下, 国家层面的治理可以先行。通常, 国家一级的政策是推动国际治理的驱动力, 国家治理的经验将为国际治理提供重要信息和支撑, 各国也往往更愿意接受并遵守与既有国内政策相关联的国际政策。《控制危险废物越境转移及其处置巴塞尔公约》和应对气候变化的《巴黎协定》就是很好的例子, 通常国家政策的有效执行为达成国际协定铺平了道路。

地球工程在国家层面的治理可以借助已有的机构和平台, 也可以单独建立研究和监管平台, 例如美国《清洁空气法案》《濒危物种法案》和《人工影响天气法案》等国内法律可以将SRM纳入监管。又如中国科技部2019年9月公布的《科学技术活动违规行为处理规定(征求意见稿)》第九条内容“开展危害国家安全、损害社会公共利益、危害人体健康、违反伦理道德的科学技术研究开发活动”, 也可以适用于对地球工程相关活动的监管^[39]。不过, 考虑到地球工程的特殊性, 建立特定的地球工程国家级治理平台可能会起到更好的监管效果。目前, 大型科研

项目的论证不透明,公众普遍对于地球工程缺乏基本的科学认识,媒体报道往往夸大其词,例如,曾引起很大的争议的“天河工程”,受到国内专家的严重质疑^[40],还被国外质疑中国在实施地球工程^[41],可见加强地球工程国家层面的治理很有必要。

4.3.3 次国家行为体的参与

地球工程的全球治理,除了国家政府之外,也需要次国家层面的非国家行为体的支持和助力。非国家行为体主要包括地方政府、私人部门、非政府组织(NGO)、科学家和公众等。NGO在地球工程治理中发挥了重要作用。例如,英国政府2010年批准了向平流层中注入反光微粒的研究项目,但最后迫于公众压力,暂停了释放热气球的野外实验。2012年7月,美国商人向太平洋倾倒了将近100t的硫酸铁以促进浮游植物的生长,受到环保NGO的强烈抨击。卡内基气候地球工程治理项目(C2G2)因一些NGO反对讨论地球工程而改名卡内基气候治理项目(C2G)。

地球工程的治理中,科学家群体还负有特殊的责任。一方面,无论是国际治理还是国家治理都需要科学家对地球工程涉及复杂的科学、技术、环境、伦理等提供专业知识和政策咨询,另一方面科学家开展地球工程研究本身,特别是可能对生态环境产生影响的大型科研项目,也需要纳入治理体系加以规范。一些科学家群体倡议通过签署“负

责任的科学研究行为规范”进行自治^[42]。此外,随着研究的发展和技术的突破,治理的范围和重点还会有所调整,非国家行为体的支持和参与可以增强未来治理的灵活性^[43-44]。

4.4 构建地球工程全球治理的多平台协同治理模式

地球工程影响复杂、广泛且充满不确定性,决定了其国际治理涉及面广,任何单一公约或机制难以覆盖,建立国际治理框架需要漫长的过程。与全球气候治理一样,地球工程的治理也需要资金、技术、能力建设、检测报告、核查、履约等机制来保障其治理的运行。但地球工程技术还处在发展阶段,缺乏更多的科学认知给其全球治理增加了诸多困难。近期来看,建立有效的机制来管理其研究和户外实验非常重要;长期来看,就需要更多针对部署的管理和治理。但根据治理先行的原则,在全球气候治理框架和机制下,构建具有全球共识的治理模式来规范和激励地球工程的良性发展,具有重要的理论和现实意义。

首先,地球工程全球治理不可能另起炉灶,在现有机制基础上,建立联合国框架下的多平台协同治理模式是比较可行的方案。如图1所示,地球工程的全球治理涉及联合国大会(UNGA)、联合国环境大会(UNEA)、生物多样性公约(CBD)、伦敦公约、海洋治理、北极治理等多平台,可由联合国秘书处协调相关机构共同推进。

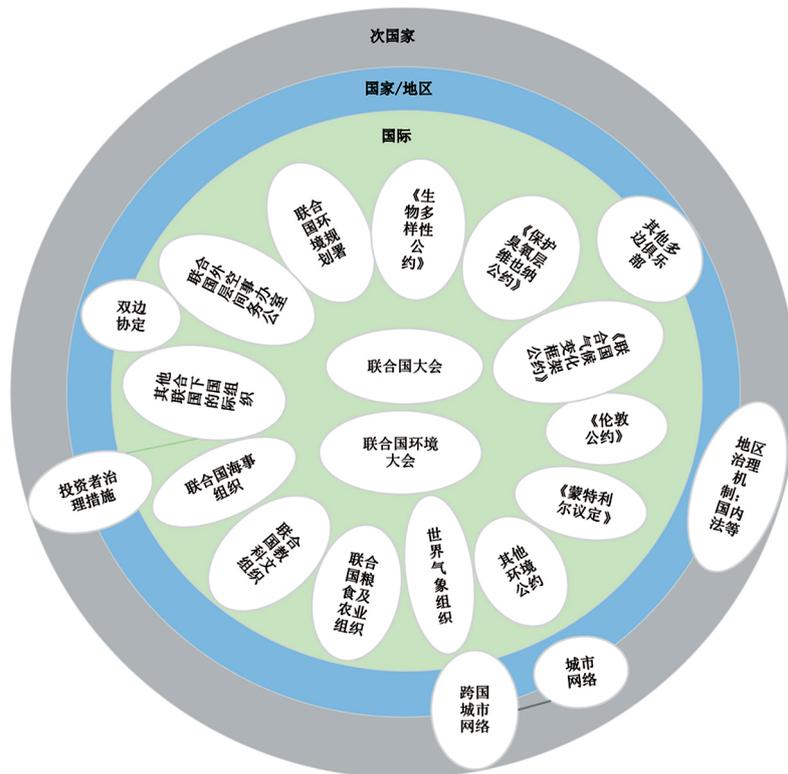


图1 地球工程的多平台协同治理机制

注:笔者绘制。

其次,推动地球工程的多平台协同治理需要加强能力建设,以科学共识推动政治进程。需要加强学术界国际交流与合作研究,如国际“地球工程模型间比较计划”(GeoMIP);以科学研究为基石,促进政府与学者之间的对话并推进政府间对话。在地球工程科学认识还不充分的情况下,要进一步加强地球工程综合影响和风险的科学评估,需要各领域的科学评估报告作为达成科学共识的基础。其中,最主要的就是IPCC气候变化评估报告和特别报告,也包括特定领域(如海洋)或专项技术(如负排放技术)的评估报告,后续还需要更多其他领域的科学评估报告提供决策支撑。

第三,地球工程的全球治理需要把握关键时间节点。在联合国框架下地球工程的多平台协同治理模式呼之欲出,瑞士撤回在联合国环境大会的提案实属无奈,后续可能会在诸多时间节点继续就地球工程治理议题开展磋商谈判,从而开启地球工程议题的政治化进程。例如,北极谈判可能涉及地球工程。近来有科学家提出北极“精准地球工程”(targeted geoengineering)方案^[45-46]。生物多样性公约前期曾通过禁止大规模地球工程的决议,在地球工程引发高度关注的背景下也可能重提地球工程治理议题。此外,2023年《巴黎协定》第一次全球盘点,减排成果低于预期,地球工程也可能被提议作为未来弥合气候行动与目标之间差距的重要选项出现在谈判议程中。

5 中国政府的应对策略

地球工程是一柄“双刃剑”,如何在两难困境中权衡利弊得失,如何有效治理避免新技术被滥用,如何弥补当前国际治理规则的缺失,是全球环境和气候治理领域国际社会共同面临的严峻挑战。地球工程国际治理的讨论已经拉开帷幕,还将长期受到关注,在联合国框架下地球工程多平台协同治理的模式呼之欲出。在地球工程问题上,国际社会也高度关注中国的态度。与发达国家相比,中国的研究尚显薄弱,在国际讨论中声音微弱,而国际上对中国各种猜测和质疑的声音却越来越多。

面对地球工程议题,中国应以生态文明思想为指导,在正确认识其风险特性的基础上,将其纳入应对气候变化大框架,并坚持多边主义立场,深入参与地球工程的全球治理。

5.1 正确认识地球工程作为应对气候变化措施的风险特性

气候变化的影响和风险本身充满不确定性,引入地球工程来应对气候变化,会给自然生态系统和社会经济系统带来新的风险和不确定性。所以,地球工程(尤其是SRM)对气候治理来说就如同一副有强烈副作用的救命

药,正如全世界都期望研发出特效药或疫苗来治疗和预防正在全球范围大爆发的新冠病毒疫情。新冠疫情影响了气候治理进程,但从风险防控和管理的角度,新冠疫情防控也为气候治理以及地球工程治理提供有益的启示。

一方面,气候变化和新冠病毒一样都具有“黑天鹅”属性,突然发生且损害巨大。研发疫苗有望预防新冠病毒,但不能挽回生命和经济损失。地球工程是气候治理的一剂“急救药”,能快速降温,避免气候变暖导致的极端气候灾害,但其副作用强烈且不确定性大,最终的综合影响是正是负,还未可知。

另一方面,气候变暖和新冠疫情还都具有“灰犀牛”属性。回顾历史,从较长的时间维度上看,新冠疫情并不是单纯的“黑天鹅”事件,历史上曾出现的SARS、MERS等病毒以及各种禽流感,早已经给人类敲响了警钟。气候变化既有极端气候事件也有缓慢变暖过程而且已经造成了一定的灾难和损失。人类面临这些风险和灾难,会寄希望于技术来解决问题,但其根源都与人类自身的生产和生活方式密切相关。所以,从风险管理的角度,首先要做的是从历史灾难中吸取教训,从导致气候变暖加快的根源入手,坚定不移地推动经济社会的绿色低碳转型,从源头减少碳排放,而不能只寄希望于用技术来修复已经变暖的地球家园。

5.2 将地球工程纳入应对气候变化大框架,优化气候策略组合

地球工程作为在全球范围内管理气候风险的新策略,可以用来优化已有的以减缓和适应为主的气候策略组合。以技术和策略组合的形式应对气候变化既有助于降低成本,也能提升应对气候风险的能力。特别是能实现负排放效果的二氧化碳移除,可以打破碳排放和气候风险之间原本单调的关系,作为技术和政策工具纳入气候政策可以为降低气候风险的策略增添新的选项。从这个角度,中国应提前部署地球工程相关技术的研究,提供切实的资金支持,从中探寻应对气候变化的多样化技术和策略。

第一,重视地球工程并将其纳入应对气候变化大框架。在应对气候变化的共同目标下,地球工程与传统气候变化减缓和适应手段不仅有着紧密的联系,甚至还存在一些交叉重叠。以降低全球平均温度为目标,地球工程可以视为非常规的减缓技术。一些地球工程技术也兼有适应的作用,例如植树造林在吸收碳的同时主要改变局地小气候,改变城市下垫面反照率有利于减少城市热岛效应。加强全球气候治理,促进三者发挥协同效应,将地球工程纳入应对气候变化大框架是大势所趋。必须强调并使公众认识到,启动地球工程治理进程,加强相关研究和科学评估,绝不意味着支持实施地球工程,放松或削弱减缓和适

应的努力。

第二,区别对待碳地球工程和太阳地球工程不同类别的地球工程,加紧关键技术的研发和前瞻性布局。实现全球 2°C 目标还是 1.5°C 目标,CDR应用都是必然趋势,BECCS、DAC等负排放技术对于全球实现2050净零排放目标至关重要。中国需要评估BECCS、沿海蓝碳、陆地碳去除与封存等负排放技术在中国发展和部署的潜力、成本和负面影响等。此外,中国在能源端应用CCS/CCUS已有技术基础,如何在此基础上进一步开发和部署BECCS需要重点评估。特别是大规模BECCS受到土地和水的制约,而中国土地和水资源紧张,国际技术合作可能是未来的机遇。中国应把握机遇,积极学习国外先进的DAC技术,寻求商业合作。同时,要谨慎对待SRM,加强环境风险和健康影响评估、伦理学分析和国际治理机制研究。

5.3 深度参与地球工程全球治理 坚持多边主义治理逻辑

其一,必须澄清人工影响天气与地球工程SRM有本质不同,避免一些西方国家有意无意地混淆。中国发展人工影响天气已有60a,主要目的是局部防灾减灾。中国对于SRM的研究还相对薄弱,处于模拟研究评估阶段,没有户外实验的计划,更不可能单边实施。二者的科学原理、技术手段、潜在影响等都有本质不同。需要加强基于科学研究的科普宣传,提高政府和公众都对地球工程的认知。对于一些大规模人工影响天气的研究和实验,引起了公众和国际社会关注和质疑,论证应更加规范透明,加强监管,表明中国作为负责任大国的态度,避免引起国际社会尤其是周边国家的担忧。

其二,加强地球工程相关研究,促进自然科学与社会科学的融合,为深入参与地球工程全球治理做好准备。随着对地球工程的关注和评估逐渐增强,地球工程国际治理进程的启动已经势在必行。地球工程治理进程启动意味着后续有大量科学评估、论坛、磋商、谈判等活动,中国作为负责任大国,需要尽快在科学、技术、政策、伦理、法律等诸多方面加强研究,尤其要促进自然科学与社会科学的融合。相关部门应加强协调,及早为参与、贡献和引领地球工程治理进程做好知识、技术、人才等方面的准备。根据不同机制平台的特点,把握关键时间节点,深入参与地球工程全球治理,发挥引领作用,共同构建公平有效的地球工程全球治理机制。

其三,坚持多边主义,警惕SRM的单边部署威胁国家安全。随着SRM在气候政策中越来越受关注,中国要坚持多边主义治理逻辑,也要保持警惕,避免某些国家运用军事化逻辑单方面部署SRM来保障气候安全,而对其他国家的安全产生威胁。目前,美国军事、情报和外交政策制定部门已经在参与SRM的管理,从资助研究到主办会

议、出版报告以及上报国会^[24]。从地缘政治生态学的角度,为应对气候危机,SRM一旦被军事化逻辑控制,用于助推化石燃料的扩张和维护霸权主义,将不利于全球低碳转型进程和全球气候治理行动,还可能加剧或造成新的国际关系紧张,威胁全球安全。鉴于此,中国应更加重视地球工程议题,从气候安全角度上升到国家安全层面,坚持多边主义治理逻辑,并在联合国框架下更好发挥引领作用,引领全球生态文明建设,构建人类命运共同体。

(编辑:刘呈庆)

参考文献

- [1]温作龙,姜玖,曹龙. 太阳辐射管理地球工程对海洋酸化影响的模拟研究[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(1): 41-53.
- [2]孔锋,孙劭,王品,等. 地球工程对中国未来降雨时空分异格局的潜在影响(2010—2099)[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 99-107, 121.
- [3]段宏波,汪寿阳. 中国的挑战:全球温控目标从 2°C 到 1.5°C 的战略调整[J]. 管理世界, 2019, 35(10): 50-63.
- [4]陈迎. 地球工程的国际争论与治理问题[J]. 国外理论动态, 2016(3): 57-66.
- [5]潘家华. “地球工程”作为减缓气候变化手段的几个关键问题[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(5): 22-26.
- [6]MARCHETTI C. On geoengineering and the CO_2 problem[J]. Climatic change, 1977, 1(1): 59-68.
- [7]BUDYKO M I. Climatic changes[M]. Washington DC: American Geophysical Union, 1977: 244.
- [8]CRUTZEN P J. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? [J]. Climatic change, 2006, 77(3-4): 211-220.
- [9]The Royal Society. Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty [R/OL]. 2009. <https://royalsociety.org/~media/RoyalSocietyContent/policy/publications/2009/8693.pdf>.
- [10]IPCC. Global warming of 1.5°C : summary for policymakers [R/OL]. 2018. <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>.
- [11]IPCC. Climate change 2014: mitigation of climate change [R/OL]. 2014. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>.
- [12]NORDAUS W. Climate change: the ultimate challenge for economics [J]. American economic review, 2019, 109(6): 1991-2014.
- [13]Silver Lining's 2019 report for U. S. policymakers. Ensuring a safe climate: a national imperative for research in climate intervention and earth system prediction [R/OL]. 2019. <https://www.silverlining.ngo/safe-climate-report>.
- [14]曹龙. CMIP6地球工程模式比较计划(GeoMIP)概况与评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 487-492.
- [15]National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Negative emissions technologies and reliable sequestration: a research agenda [M]. Washington DC: The National Academies Press, 2019.
- [16]GESAMP. High level review of a wide range of proposed marine geoengineering techniques [R/OL]. 2019. <http://www.gesamp.org>.

- org/publications/high-level-review-of-a-wide-range-of-proposed-marine-geoengineering-techniques.
- [17] IPCC. Climate Change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability [R/OL]. 2014. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.
- [18] IPCC, Global Warming of 1.5 °C [R/OL]. 2018. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- [19] Business World. Refreezing the poles and greening the oceans: Centre for Climate Repair launches in Cambridge [EB/OL]. 2019 - 05 [2019 - 12 - 08]. <https://1businessworld.com/2019/05/green-business/refreezing-the-poles-and-greening-the-oceans-centre-for-climate-repair-launches-in-cambridge/>.
- [20] TOLLEFSON J. Sucking carbon dioxide from air is cheaper than scientists thought [J]. *Nature*, 2018, 558(7709): 173 - 173.
- [21] Climeworks establishes new market mechanism [N/OL]. 2018 - 02 - 15 [2019 - 12 - 08]. <https://www.gasworld.com/climeworks-establishes-new-market-mechanism/2014206.article>.
- [22] US and Saudi Arabia block geoengineering governance push [EB/OL]. 2019 - 03 - 14 [2019 - 11 - 07]. <https://www.climatechangenews.com/2019/03/14/us-saudi-arabia-block-geoengineering-governance-push-un-environment-talks/?from=timeline>.
- [23] 詹姆斯·N. 罗西瑙. 没有政府的治理 [M]. 张胜军, 等, 译. 南昌: 江西人民出版社, 2001: 4 - 5.
- [24] The Commission on Global Governance. Our global neighborhood: the report of the commission on global governance by the commission on global governance [R]. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- [25] 沈维萍 陈迎. 从气候变化经济学视角对地球工程的几点思考 [J]. *中国人口·资源与环境* 2019 29(10): 90 - 98.
- [26] SURPRISE K. Geopolitical ecology of solar geoengineering: from a 'logic of multilateralism' to logics of militarization [J]. *Journal of political ecology*, 2020, 27(1): 213 - 235.
- [27] 史军, 卢愿清, 郝晓雅. 地球工程的“道德风险” [J]. *自然辩证法研究* 2013 29(12): 47 - 52.
- [28] 柳琴, 史军, 李超. 气候地球工程的政治影响 [J]. *阅江学刊*, 2016 8(1): 26 - 31, 143 - 144.
- [29] SUAREZ P, VAN ALAST M K. Geoengineering: a humanitarian concern [J]. *Earth's future*, 2017, 5(2): 183 - 195.
- [30] RAYNER S, HEYWARD C, KRYGER T, et al. The oxford principles [J]. *Climatic change*, 2013, 121: 499 - 512.
- [31] JAMIESON D. Ethics and intentional climate change [J]. *Climatic change*, 1996, 33(3): 323 - 336.
- [32] GARDINER S M, FRAGIERE A. The tollgate principles for the governance of geoengineering: moving beyond the oxford principles to an ethically more robust approach [J]. *Ethics policy & environment*, 2018, 21(2): 143 - 174.
- [33] GHOSH A. Environmental institutions, international research programs, and lessons for geoengineering research [R]. *Geoengineering Our Climate*, 2014.
- [34] 辛源. 地球工程的研究进展简介与展望 [J]. *气象科技进展*, 2016 6(4): 30 - 36.
- [35] NETRA C, CHONG D. Governing solar radiation management [R]. Washington DC: Forum for Climate Engineering Assessment, American University, 2018.
- [36] 蔡拓 杨雪冬 吴志成. 全球治理概论 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2016: 10 - 13.
- [37] 银森录 李俊生, 吴晓蕾, 等. 地球工程开展现状及其对生物多样性的影响 [J]. *生物多样性* 2013 21(3): 375 - 382.
- [38] 德国持之以恒治理大气污染 [EB/OL]. 2015 - 03 - 02 [2020 - 04 - 11]. http://www.ccssn.cn/dzyx/dzyx_xyzs/201503/t20150302_1529396.shtml.
- [39] 《科学技术活动违规行为处理规定(征求意见稿)》公开征求意见 [EB/OL]. 中国科学技术协会, 2019 - 10 - 10 [2020 - 04 - 11]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1646945512568462989&wfr=spider&for=pc>.
- [40] 气象学家实名批“天河工程”不顾质疑仓促上马 [EB/OL]. 2018 - 11 - 22 [2020 - 04 - 11]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2018/11/420206.shtml>.
- [41] China's plan to seed Himalayan clouds is geoengineering-unintentional or otherwise [N/OL]. 2018 - 11 - 08 [2020 - 04 - 11]. <http://www.etcgroup.org/content/chinas-plan-engineer-himalayan-clouds-geoengineering-unintentional-or-otherwise>.
- [42] An exploration of a code of conduct for responsible scientific research involving geoengineering [R]. Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS), 2015.
- [43] GUPTA A, MOLLER I. De facto governance: how authoritative assessments construct climate engineering as an object of governance [J]. *Environmental politics*, 2019, 28(3): 480 - 50.
- [44] NICHOLSON S, JINNAH S, GILLESPIE A. Solar radiation management: a proposal for immediate polycentric governance [J]. *Climate policy*, 2018, 18(3): 322 - 334.
- [45] ZIMOV N S, ZIMOV S A, ZIMOVA A E, et al. Carbon storage in permafrost and soils of the mammoth tundra-steppe biome: role in the global carbon budget [J]. *Geophysical research letters*, 2009, 36(2): L02502.
- [46] FELDMANN J, LEVERMANN A, MENGEL M. Stabilizing the West Antarctic Ice Sheet by surface mass deposition [J]. *Science advances*, 2019, 5(7): 26 - 45.

Global governance of geoengineering: theory , framework and China ' s strategies

*CHEN Ying*¹ *SHEN Wei-ping*²

(1. Institute of Ecological Civilization , Chinese Academy of Social Sciences , Beijing 100028 , China;

2. University of Chinese Academy of Social Sciences (Graduate School) , Beijing 102488 , China)

Abstract To address the severe challenges of climate change , the concept of geoengineering has been proposed internationally by scientists. Exploring the possibility of changing the climate system through ultra-conventional large-scale engineering techniques is a new research hotspot in the field of climate change. Geoengineering is a general term for many complex technical solutions , which and is mainly divided into two categories: solar radiation management (SRM) and carbon removal (CDR) according to different mechanisms. Geoengineering also brings new risks while lowering the average temperature of the earth , which causes difficulties in global governance. In the face of unknown fields that affect the common interests of mankind , countries have launched relevant research projects and carried out multi-field scientific assessments. Some CDR projects have already begun commercial demonstrations , and the practice of global governance of geoengineering has also begun. The globality and externality of the impact of geoengineering determine that its governance requires global joint efforts. The complexity , broadness and uncertainty of its comprehensive impact determine that its governance is a cross-domain , multi-platform , multi-agent , and multi-level governance system. Its special economic attributes make global governance face many difficulties and challenges such as supply mode , dilemma , moral hazard , regional and intergenerational fairness , and so on. The global governance framework of geoengineering needs to clarify the basic elements such as principles , objects , goals , subjects , platforms , systems and mechanisms. It is necessary to establish a multi-platform collaborative governance mechanism under the framework of the United Nations on the basis of existing mechanisms , to promote the political process with scientific consensus , and to grasp the key time points nodes. Facing the issue of geoengineering , China should follow the concept of sustainable development and ecological civilization , correctly understand its risk characteristics , scientifically incorporate it into the framework for addressing climate change , adhere to a multilateralism position , participate deeply in the global governance of geoengineering , and strive to protect a Community of Shared Future for Mankind.

Key words climate change; geoengineering; global governance; solar radiation management (SRM) ; carbon dioxide removal (CDR)