

• 论坛 •

# 地球工程开展现状及其对生物多样性的影响

银森录 李俊生 吴晓蕾 李果 徐靖\*

(中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

**摘要:** 与气候相关的地球工程(Climate-Related Geoengineering, 简称地球工程)是为了减缓气候变化及其影响的目的, 采取一系列大规模的人工技术和方法对地球环境或气候系统进行干预。地球工程的研究和开展受到越来越多的关注, 已经成为《生物多样性公约》讨论的焦点之一。地球工程项目在全球进行了不同程度的实验和推广, 与我国的利益密切相关。本文通过参与相关会议讨论以及对会议材料和相关文献的整理, 梳理了地球工程的定义和内涵、介绍了不同类型地球工程的开展现状, 分析了地球工程对生物多样性的潜在影响, 并阐述了《生物多样性公约》对地球工程的争论。研究表明: 地球工程主要通过改变区域或局地的气候和环境间接影响生物多样性, 由于目前对地球工程的影响缺乏足够了解, 对生物多样性有潜在影响的大规模地球工程将被禁止, 但节能减排工作的义务使地球工程仍然具有应用前景。笔者对未来地球工程发展提出了自己的意见, 认为地球工程技术的研究应兼顾高效、低廉和环境安全标准, 开展地球工程活动应采取预先防范措施, 并探讨建立监管机制的可能性。

**关键词:** 生物多样性公约, 二氧化碳移除, 太阳辐射管理, 履约谈判

## Current situation of geoengineering and its impact on biodiversity

Senlu Yin, Junsheng Li, Xiaopu Wu, Guo Li, Jing Xu\*

*State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012*

**Abstract:** Interests in the process of geoengineering have grown and geoengineering is a focus for the Convention on Biological Diversity now. Geoengineering programs and experiments have been carried out to varying extent globally and are of significance to Chinese interests. This paper originates from a review of a conference discussion and of relevant literatures. It introduces the concept of geoengineering, describes the current status of its development and discusses the potential impacts geoengineering may have on biodiversity. Arguments about geoengineering in the Convention on Biological Diversity are also discussed. Researches show that geoengineering programs mainly affect biodiversity by changing the local or regional climate and environment. Large scale geoengineering programs may be prohibited in future due to uncertainty over their potential impacts on biodiversity. However, the necessity for energy saving and obligations to reduce emissions will drive the progress of geoengineering. The future development of geoengineering is also examined. It is concluded that the techniques involved need to be of a high standard, highly efficient, low in cost and environmentally safe. Precautionary measures should be taken in the implementation of geoengineering related activities, and mechanisms for monitoring their effects should be thoroughly explored.

**Key words:** Convention on Biological Diversity, Carbon Dioxide Removal, Solar Radiation Management, Compliance negotiations

全球气候变化已经成为一个不争的事实, 随着全球变暖的不断加剧, 减少温室气体排放和应对气

候变化成为全世界的热点和国际合作的焦点议题, 也是生物多样性保护重点关注的领域之一(Sala *et*

收稿日期: 2013-01-25; 接受日期: 2013-04-19

基金项目: 环保公益性行业科研专项“气候变化下我国生物多样性保护优先区脆弱性评估与保护对策研究”(编号 201209031)和环境保护部《生物多样性公约》项目(编号 1441100036)

\* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: xujing263@163.com

*al.*, 2000; IPCC, 2007)。近年来, 利用大尺度的人工干预技术即地球工程来对抗气候变化的设想引起了越来越多的关注。虽然实验和模型显示地球工程能够不同程度地缓解气候变化及其影响, 但与此同时, 大部分地球工程技术可能会对气候系统和生物圈产生潜在的负面影响(Vaughan & Lenton, 2011)。由于目前地球工程技术不能同时满足低价、快捷和环境安全的要求, 因此只有少数进行过实地实验(Royal Society, 2009)。尽管如此, 仍有一些地球工程项目得到了不同规模的推广。在《生物多样性公约》第十次和第十一次缔约方大会上, 地球工程都成为各缔约方讨论的焦点问题之一(吴军等, 2011; IISD, 2012)。我国是生物多样性大国之一, 在应对全球气候变化方面的作用也相当重要, 有关地球工程的辩论与我国利益密切相关。本文试图通过梳理地球工程的定义和内涵、开展现状, 地球工程技术对生物多样性的影响, 以及《生物多样性公约》有关地球工程的争论, 为我国有关人员参加《联合国气候变化框架公约》、《生物多样性公约》及《伦敦公约》等多边条约地球工程议题谈判时, 明确本国立场、思考谈判策略提供参考。

## 1 地球工程的定义和内涵

与气候相关的地球工程(Climate-Related Geoengineering, 简称地球工程)目前尚无统一的定义, 包括英国皇家学会(The Royal Society, 2009; IPCC(IPCC, 2011)和《生物多样性公约》(SCBD, 2012a)等对地球工程都有各自的定义, 虽然表述方式不同, 但内容基本上一致, 即为了减缓气候变化及其影响的目的, 采取一系列大规模的人工技术和方法对地球环境或气候系统进行干预。地球工程主要包括两大类技术: 二氧化碳移除技术(Carbon Dioxide Removal, CDR)和太阳辐射管理技术(Solar Radiation Management, SRM)。二氧化碳移除技术是通过移除大气中的CO<sub>2</sub>, 从根本上处理气候变化的技术, 主要包括: 海洋施肥(ocean fertilization)、土地利用管理(land use management)、加速风化(enhanced weathering)、生物炭及生物质碳封存和储存(biochar & sequestration of carbon as biomass and its subsequent storage), 以及二氧化碳捕获和储存(carbon capture and storage, CCS); 太阳辐射管理技

术试图通过减少到达地面的太阳辐射和减少地面太阳辐射的吸收来对抗地球变暖, 主要包括: 太空反射技术(space albedo approaches)、平流层气溶胶注入(stratospheric aerosols)、云层白化(cloud whitening)和地面反射技术(surface albedo approaches)等。除此之外, 对于某些大规模人工干预气候的技术如人工影响天气(weather modification)等是否属于地球工程的范畴, 还存在一定的争议。而地球工程与生态工程(ecological engineering)(Mitsch & Jørgensen, 1989)之间, 目前也没有明确的界线。

## 2 地球工程的开展概况

地球工程的想法由来已久。早在20世纪60年代, 美国总统科学顾问委员会在一份名为“恢复我们的环境质量”的报告中指出, CO<sub>2</sub>排放正在改变地球的热量平衡, 需要认真探索人工干预对抗气候变化的可行性, 并建议每年花费50亿美元在热带地区安置反射性材料, 以及利用增加云层等手段来应对气候变化(Tukey *et al.*, 1965)。这是第一个正式应对气候变化的研究报告, 也是第一次在政府层面提出的大规模人为干预气候变化的设想(Marchetti, 1977)。

到20世纪70年代, “地球工程”一词开始出现在描述将CO<sub>2</sub>注入海洋以减轻大气温室气体负担这一设想的报告中, 并成为人为大尺度改变地球气候的一系列设想的代名词(Keith, 2000)。在之后几十年内, 随着全球气候变化愈演愈烈, 对类似的人为大规模干涉气候的设想、实验及其可行性的探讨从未停止。美英科学家是支持开展地球工程研究的主要力量, 多位著名的科学家和诺贝尔奖获得者都参与了相关的讨论, 在*Science*、*Nature*等杂志上发表了支持开展地球工程实验的文章(Hoffert *et al.*, 2002; Crutzen, 2006), 这些研究结果可能会影响政府决策。

《京都议定书》对地球工程快速发展有重要推动作用。2002年, 签署《京都议定书》的国家超过55个, 达到议定书强制生效的两个条件之一; 2004年12月, 签约国家温室气体排放量达到议定书附件中规定的国家1990年排放量的55%, 达到了强制生效的另外一个条件。2005年2月, 《京都议定书》在上述两个条件满足之后90天后强制生效([http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/status\\_of\\_ratification](http://unfccc.int/kyoto_protocol/status_of_ratification)

/items/2613.php), 减排以法律形式成为发达国家的义务。以2002年为分水岭, 美、英、德、俄及加拿大等国家政府开始对地球工程表现出了浓厚兴趣, 并对相应的研究活动给予经费支持, 期望以较少的资金投入达到快速减缓气候变化的目的, 完成减排义务。这些国家政府内部对地球工程的可行性进行了多次评估, 美国商业界也在游说政府实施地球工程。地球工程迅速成为政府和媒体宣传的热点, 一些国家和组织甚至把地球工程上升到国家层面(The Royal Society, 2009; GAO, 2011)。

如果不考虑人工降雨等人工影响天气的技术, 从20世纪60年代开始提出地球工程的设想至今, 以美国为首, 越来越多的国家和地区开展了地球工程技术的研究, 并进行了不同程度的实验和应用。由于技术限制和不确定性, 目前太阳辐射管理技术中只开展过平流层气溶胶和地面反射技术的较大规模工程, 云层白化等相关工程正在筹备实施, 而太空反射技术还处于理论探索阶段。这些项目或者是在海洋上开展, 或者在陆地上进行一些技术成分不高、环境影响不显著的工程; 而二氧化碳移除技术由于对环境和生物多样性有利(如土地利用管理等), 或者影响相对较小, 并且二氧化碳捕获和储存技术还具有石油开采和工业生产等商业用途, 因而得到了更广泛的应用。

### 3 不同地球工程对生物多样性的影响

人为导致的气候变化对生物多样性造成了不同程度的影响, 并且由于全球碳循环和气候系统的反馈机制, 即使全世界范围内采取严厉的控制碳排放措施, 全球温度仍然会持续缓慢上升(IPCC, 2007), 对生物多样性的影响也将会持续。太阳辐射管理技术能够在短期内降低全球平均温度, 二氧化碳移除技术能够降低大气CO<sub>2</sub>浓度, 因此开展地球工程可以在一定程度上缓解温室效应及其影响, 进而减少全球变暖对生物多样性的威胁(Russell *et al.*, 2012)。

另一方面, 地球工程也会对生物圈和生物多样性带来不确定和不利的影 响(The Royal Society, 2009), 主要表现在地球工程的实施可能改变气候和生态环境状况, 还可能影响某些生态系统过程, 从而使生物多样性面临新的风险。太阳辐射管理技

术虽然能在短时间内缓解全球变暖和海平面上升等问题, 但并不能从根本上减缓温室气体的持续增加和海洋酸化和其他一系列问题; 而且一旦工程停止, 气温将恢复至工程实施前的水平甚至更高。二氧化碳移除技术的实施往往涉及到土地利用变更或者生态环境的物理化学性质的改变, 虽然相对太阳辐射管理技术的风险较低, 但对生态系统和生物多样性的影响也不容忽视(Vaughan & Lenton, 2011)。

由于大规模开展过的地球工程非常少, 因此评估其对生物多样性的影响主要根据已经开展过的项目和进行过场地实验的技术, 如海洋施肥、土地利用管理(主要是人工造林)、二氧化碳捕获和储存, 以及平流层气溶胶注入。随着发达国家开展地球工程的呼声持续高涨, 越来越多的研究采用计算机模型模拟其对气候系统和生态环境的影响, 但这些评估大部分涉及的是太阳辐射管理技术(Bala *et al.*, 2008; McCusker *et al.*, 2012)。

#### 3.1 二氧化碳移除工程的影响

**海洋施肥:** 海洋施肥工程采用的技术主要有: (1)向海洋中施加铁元素, 促进浮游生物大量生长, 提高固定CO<sub>2</sub>的能力; (2)向海洋中施加氮、磷等营养元素, 加快浮游生物的代谢过程, 加速CO<sub>2</sub>沉淀到海底的速率; (3)将深层海水抽到表层, 向海洋表层提供营养元素, 同时加快表层的碳固定到海底的速率。20世纪90年代以来, 全球至少进行了13个大规模的海洋施肥实验, 涉及海域超过1,400 km<sup>2</sup>, 参与的国家包括美国、加拿大、澳大利亚、英国、法国、巴西、墨西哥、日本、菲律宾、荷兰、中国等(SCBD, 2009)。

海洋施肥可能会导致海洋热量平衡的改变, 由此可能增加低纬度海域极端气象事件的频率(Gnanadesikan *et al.*, 2010); 海洋系统营养循环也将受到影响, 营养元素的大量添加, 将使限制海洋生物生理活动的营养元素发生改变, 同时深层海水会产生缺氧现象, 导致深层海水酸化, 并可能产生其他温室气体如N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>等(Cao & Caldeira, 2010)。在生态系统层面, 不同类型的海洋生物对营养元素的需求不同, 施肥可能改变浮游生物的群落结构, 有害藻类有可能爆发(穆景利等, 2011); 另一方面, 浮游生物的群落结构和生产力变化可能导致海洋

生态系统食物网的改变(Boyd *et al.*, 2007)。由于难以预知的潜在影响, 2006年, 《生物多样性公约》第八次缔约方大会决定暂停开展海洋施肥活动。

**土地利用管理:** 即通过生态系统管理, 增加陆地碳汇, 从而移除CO<sub>2</sub>。大规模的人工造林、再造林和森林保护活动已在全球范围内开展, 但这些活动并非都以缓解气候变化为目的, 因此是否能称为地球工程仍值得商榷。森林面积的扩大将改变地表反射率和热量流动, 影响局部气候; 森林提供了特种栖息地, 并且森林比其他大部分生态系统初级生产力更高, 有利于生物多样性的保护。但另一方面, 人工造林中发生的非本地物种引入、单一林种植、原有生境的改变等, 都可能使生物多样性受到干扰(The Royal Society, 2009)。

**生物炭:** 即在低氧条件下处理有机生物体, 形成难以分解的炭黑(charcoal), 再将炭黑埋进土壤, 增加土壤碳库。在国际生物炭动议组织(IBC)的推动下, 全球包括许多发达国家和发展中国家在内的40多个国家开展了生物炭的研究和实验。但许多国家和地区使用生物炭的主要目的并非减排, 而是作为肥料或改善土壤质地(ETC Group, 2010)。在土壤贫瘠的地区, 生物炭能够提高作物产量, 改善土壤肥力, 并增加土壤微生物的生物量和多样性(Lehmann *et al.*, 2011)。然而, 生物炭的生产需要占用大面积土地来种植特定的作物或树木, 是此类工程对生物多样性最主要的影响。此外, 国际上对生物炭在土壤中的稳定性及其对土壤肥力和作物产量的改善等方面的研究尚无一致的结论(谢祖彬等, 2011)。再者, 作为一种固碳技术, 使用生物炭在减少土壤有机碳的同时可能影响其他温室气体的排放(Zhang *et al.*, 2010), 因而对降低温室气体的作用可能并不显著。

**加速风化:** 加速风化技术的原理是通过与硅酸盐(如硅酸钙、硅酸镁或硅酸铁等)发生化学反应, 使气态的CO<sub>2</sub>转变成离子态, 方程式为:  $\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$ , 或者  $\text{CaSiO}_3 + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{SiO}_2$ 。

2011年, 坦桑尼亚一家采矿企业开展了加速风化的田间实验, 将橄榄石矿的废弃物理进土壤或投入河流, 以加速CO<sub>2</sub>与硅酸盐的反应从而将其从大气中移除。虽然目前缺少对该项目的环境影响的评

估, 但这种尾矿处理方式很可能带来土壤和水污染。加速风化过程每固定一吨二氧化碳, 需要至少1.4吨硅酸钙或硅酸铁, 这就需要开采大量的矿石, 对矿区环境和生物多样性将造成巨大的破坏(The Royal Society, 2009)。此外, 实施加速风化的过程中, 重金属离子容易通过雨水和径流污染土壤、河流和地下水, 威胁矿区以外的环境和生物多样性。

**二氧化碳捕获和储存:** 该技术是指将大气中CO<sub>2</sub>压缩后运输到选定地点长期封存, 包括注入到一定深度的地质构造、深海或者通过工业流程将其凝固在无机碳酸盐之中(张军和李桂菊, 2007)。该技术类似于植物固碳过程, 因此又叫做“人工树”。截至2011年底全世界目前共有74个大型人工树项目, 其中正在运营的有8个, 正在建设的有6个, 其余的分别处于立项、评估和定义阶段。正在运营的大型项目每年捕获并封存的CO<sub>2</sub>接近2,000万吨; 建设中的项目预计2015年前将全部投入运营, CO<sub>2</sub>处理能力超过1,000万吨/年。美国自1972年开始将CO<sub>2</sub>注入地下用于石油开采, 迄今美国每年注入地下和海洋的CO<sub>2</sub>超过1,000万吨, 累计注入量超过3,500万吨; 挪威自1996年开始将CO<sub>2</sub>注入海底, 目前有两个大型人工树项目, 每年约有170万吨CO<sub>2</sub>注入海洋或者岩层; 加拿大自2000年来已经将超过2,000万吨CO<sub>2</sub>注入其Saskatchewan省地下; 阿尔及利亚自2004年起每年约捕获100万吨CO<sub>2</sub>并储存。美国、加拿大和澳大利亚都在建设大型人工树项目。

目前的人工树项目往往在沙漠中开展, 或者位于工厂、矿山附近, 对土地需求不多, 因此尚未发现此类工程对生物多样性有直接的影响。

### 3.2 太阳辐射管理工程的影响

**平流层气溶胶:** 即在平流层大气中注入硫酸盐等物质形成气溶胶, 增加太阳光散射并将部分太阳辐射反射回太空。2009年, 俄罗斯开展了第一个平流层气溶胶注入的实地实验, 并通过模型证明, 注入约100 m厚的平流层气溶胶, 到达地表的太阳辐射能够减少1-10%(Izrael *et al.*, 2009)。英国曾通过了“气候工程的平流层颗粒注入(SPICE)”项目, 计划于2011年至2013年实施, 但由于民众反对而中止。2011年, 美国在加利福尼亚海域上实施了“东太平洋气溶胶云实验(E-PEACE)”, 项目正在进行中([http://aerosols.ucsd.edu/E\\_PEACE.html](http://aerosols.ucsd.edu/E_PEACE.html))。

**云层白化:** 云层白化技术主要通过增加低空云层中凝结核的密度, 使云层更白、持续时间更长, 反射更多的太阳辐射, 从而达到降低气温的效果。自2006年来, 英国一直在进行云层白化相关技术及其可行性的研究, 以及相关设备的研制; 美国自2010年开始进行云层白化的模型研究和设备研制, 相关研究还得到了比尔盖茨基金会赞助。2012年, 土地和大气回复力倡议组织(The Land-Atmosphere and Resilience Initiative, LARI)提出“全球降温计划”, 在美国、澳大利亚、印度和非洲西海岸等国家或地区进行云层白化相关活动, 通过增加近海云层的规模实现区域和全球降温, 该项目正在筹备中(<http://www.theglobalcoolingproject.com/lari/lari.shtml>)。

平流层气溶胶和云层白化工程直接影响对象和范围主要是大气层, 对生物多样性以间接影响为主。相关模型研究结果表明, 减少2%的太阳辐射产生的降温效果, 相当于抵消了CO<sub>2</sub>浓度倍增产生的温室效应(Crutzen, 2006), 将有效缓解全球升温引发的生物多样性威胁如极地冰川消融、海平面上升等。但是, Robock等(2008)通过全球气候模型(GCM)研究发现, 平流层气溶胶注入工程会改变亚洲和非洲的季风, 减少降水和地表径流, 导致难以估量的生物多样性问题, 可能威胁数十亿人的粮食安全。云层白化工程在降温方面与平流层气溶胶注入有相似的功效, 不同的是气溶胶能够相对均匀地分部在平流层, 全球降温相对均匀; 而增加的云主要位于海洋上, 降温具有显著的区域性, 大气环流、洋流、降水格局等都可能因此发生变化(Bala *et al.*, 2008), 导致生物多样性和物种分布格局改变的连锁反应。

**地面反射技术:** 即通过增加地表反射率, 减少地表对太阳辐射的吸收。2006年, 美国加利福尼亚州通过了“百万太阳能屋顶”计划, 计划投资32亿美元, 用11年时间完成300万千瓦太阳能发电板的安装(<http://www.environmentcalifornia.org/programs/million-solar-roofs>)。该项目主要在城市和居民区等区域开展, 对生物多样性的直接影响并不显著。2010年, 秘鲁一名男子赢得了世界银行的“100种拯救地球的想法”竞赛, 获得了20万美元的资助。他和他的团队用环保漆覆盖了安第斯山3座山峰共70 ha

的地面, 增加了地表的反射率, 以减缓安第斯山脉冰川的融化速度。该项目主要在山地冰川消融后的石漠上开展, 因此项目本身对生物多样性影响并不大。除此之外, 许多基于地面反射技术的设想, 如在极地和沙漠地区地面铺设反光材料、种植反射率更高的农作物和草地等, 目前还没有大规模的实验或项目的报道。但可以肯定的是, 即便是沙漠和极地这样生命稀少的区域, 在地表铺设大面积反光材料, 也会严重影响区域生物的生理生态特性, 种植反射率更高的农作物和草种, 可能会改变植物群落结构, 而且可能降低土地的生产力(The Royal Society, 2009)。

**太空反射技术:** 此类技术主要通过太空架设遮蔽物以减少到达地球的太阳辐射。目前只有美国开展了相关的研究, 拟向太空发射大量小型无动力飞船形成大片太空云, 可减少10%的太阳辐射到达地球。但目前尚无实地项目和实验(ETC Group, 2010)。

#### 4 《生物多样性公约》对地球工程的争论

在《生物多样性公约》第十次缔约方大会(COP-10)上, 地球工程就已成为争论的焦点之一(吴军等, 2011)。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规模地球工程活动(SCBD, 2010)。《生物多样性公约》第十一次缔约方大会(COP-11)期间, 地球工程问题也是受到广泛关注的焦点问题, 各方围绕该问题展开了辩论(IISD, 2012)。

讨论焦点主要集中于地球工程的定义和范围、是否应当禁止室外地球工程, 以及建立相关监管框架等三个方面。首先, 各方对地球工程的定义和范围存在不同理解。巴西等参加了“保护和可持续管理森林以增加森林碳汇”(conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks, REDD+)的国家认为, 不应将碳捕获和储存以及REDD+活动列为地球工程; 新西兰等国则认为, 所有造林、再造林和恢复(afforestation, reforestation and restoration)活动都不属于地球工程。非政府组织提出的人工降雨等人工影响天气活动也应看作地球工程的提案, 虽因无人附和而遭搁

置,但需要引起重视。其次,少数发展中国家提出的禁止室外地球工程活动的提案遭到发达国家一致反对,原因在于英国、日本、欧盟、加拿大及美国等国的科学界已在室外条件下开展了大量实验活动。最后,菲律宾、玻利维亚等提出在《生物多样性公约》框架下建立地球工程的监管机制,也未达成共识,原因一是发达国家的阻挠;二是各方对地球工程受哪个国际条约(UNFCCC或CBD)管辖还存在不同理解。

会议最终通过了关于地球工程的第XI/20号决定(SCBD, 2012b)。该决定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,虽然承认人们目前对地球工程的影响缺乏了解,但认为应采取预先防范原则,对具有跨境影响的地球工程活动开展监管很有必要。

## 5 中国开展的地球工程相关活动

中国在1997年引进了海洋施肥增殖渔业资源的技术,并计划引进海洋施肥增殖饵料生物、吸引鱼群聚集的技术并在南海区域实施,用于保护渔业的可持续性(邱永松, 2013)。

1978年,中国启动了三北防护林体系建设工程,截至2000年造林面积达2203.7万ha,自1998年启动天然林保护工程,至2002年新增人工林302.6万ha。这些大规模的工程提升了森林碳储量和固碳能力(方精云和陈安平, 2001; 胡会峰和刘国华, 2006),产生了显著的生态效益,但也出现了严重影响生物多样性的问题(刘璨等, 2005; 张力小和宋豫秦, 2003)。类似的工程还有退耕还林等。

中国生物炭的研究伴随着中国生物能源研究而开展。20世纪90年代中期沈阳农业大学引进了一套生物质热裂解装置,之后国内许多大学和研究院所开展了生物质热裂解的研究,生物炭作为副产物,主要用作燃料,直到近几年才开始进行农用研究(何绪生等, 2011)。

全球碳捕集与封存机构(Global CCS Institute)调查表明,2011年中国有6个规划和筹建中的项目属于“人工树”(Global CCS Institute, 2011),一般由国有大型电力、石油和天然气公司实施。这些项目得到了发改委等政府部门和开发银行等国际合作伙伴,以及一些非政府组织的支持。中国从20世纪

50年代开始开展人工影响天气活动,如人工降雨、人工消雹等,至今此类技术已经相对成熟,在全国范围内已多次开展(姚展予, 2006)。虽然这一活动影响的区域比当前许多地球工程实验区域面积大,但是也只是改变了局部区域短时间内的气象状况,对于区域的长期气候并没有显著的影响。另一方面,中国进行此类活动的最主要目的在于辅助生产和减少极端天气造成的损失,而非缓解气候变化。从这个角度看,人工影响天气并不适合列入地球工程范畴。目前对于人工影响天气活动对生物多样性的影响研究开展还比较少,它是否会像部分地球工程一样严重干扰生物多样性,还需要进一步探索。

## 6 展望

绝大部分地球工程实施的目的在于缓解气候变化,而通过缓解气候变化保护生物多样性只是目的之一。地球工程本身对生物多样性直接的影响并不是十分显著,值得关注的是开展地球工程极可能导致全球或区域产生新的气候和环境变化,由此将对生物多样性造成未知的影响。

《京都议定书》虽已失效,但发达国家仍有根据《哥本哈根协定》继续进行节能减排工作的义务,地球工程无疑是一个兼顾成本和效益的替代方案。由于看到地球工程的应用前景,发达国家一些企业和科研实体已经投入大量资金,并获取了多项专利,占据了技术领先地位(ETC Group, 2010)。然而当前的地球工程技术难以兼顾高效、低廉和环境安全,其大规模开展势必引发新的问题。鉴于此,包括《生物多样性公约》、《联合国气候框架公约》以及其他国际组织应共同要求各国对地球工程活动采取预先防范措施,并探讨建立监管机制的可能性,避免造成不可逆的损害。越来越多的国家和地区开展了小规模地球工程技术的实验,计算机模型也越来越广泛地运用于预测大规模实验,为评估地球工程对生态环境安全的影响打下了基础。作为发展中国家,中国在哥本哈根世界气候大会上承诺单位GDP减排40%,地球工程对实现这个目标有一定的帮助。目前在国内已开展了大量土地利用管理相关的工程,在生物炭使用和影响方面也开展了研究,同时也在筹建用于能源采集的人工树项目。地球工程的相关技术研究和实验在中国将进一步发

展,我国应综合考虑生物多样性受到的影响,积极探索高效、廉价和安全的地球工程技术的应用。

### 参考文献

- Bala G, Duffy PB, Taylor KE (2008) Impact of geoengineering schemes on the global hydrological cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **105**, 7664–7669.
- Boyd PW, Jickells T, Law CS, Blain S, Boyle EA, Buesseler KO, Coale KH, Cullen JJ, de Baar HJW, Follows M, Harvey M, Lancelot C, Levasseur M, Owens NPJ, Pollard R, Rivkin RB, Sarmiento J, Schoemann V, Smetacek V, Takeda S, Tsuda A, Turner S, Watson AJ (2007) Mesoscale iron enrichment experiments 1993–2005: synthesis and future directions. *Science*, **315**, 612–617.
- Cao L, Caldeira K (2010) Can ocean iron fertilization mitigate ocean acidification? *Climatic Change*, **99**, 303–311.
- Crutzen PJ (2006) Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, **77**, 211–220.
- ETC Group (2010) *Geopiracy: The Case Against Geoengineering*. [http://www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/publication/pdf\\_file/ETC\\_geopiracy\\_4web.pdf](http://www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/publication/pdf_file/ETC_geopiracy_4web.pdf).
- Fang JY (方精云), Chen AP (陈安平) (2001) Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. *Acta Botanica Sinica (植物学报)*, **43**, 967–973. (in Chinese with English abstract)
- GAO (2011) *Technology Assessment: Climate Engineering: Technical Status, Future Directions and Potential Responses*. U. S. Government Accountability Office, Washington, DC.
- Global CCS Institute (2011) *The Global Status of CCS: 2011*. Canberra, Australia.
- He XS (何绪生), Geng ZC (耿增超), She D (余雕), Zhang BJ (张保健), Gao HY (高海英) (2011) Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic. *Transactions of the CSAE (农业工程学报)*, **27**, 1–7. (in Chinese with English abstract)
- Hoffert MI, Caldeira K, Benford G, Criswell DR, Green G, Herzog H, Jain AK, Kheshgi HS, Lackner KS, Lewis JS, Lightfoot HD, Manheimer W, Mankins JC, Mauel ME, Perkins LJ, Schlesinger ME, Volk T, Wigley TML (2002) Advanced technology paths to global climate stability: energy for a greenhouse planet. *Science*, **298**, 981–987.
- Hu HF (胡会峰), Liu GH (刘国华) (2006) Carbon sequestration of China's National Natural Forest Protection Project. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, **26**, 291–296. (in Chinese with English abstract)
- IISD (2012) *Summary of the Eleventh Meeting of the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity*. <http://www.iisd.ca/biodiv/cop11/>.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: Synthesis Report*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- IPCC (2011) *IPCC Expert Meeting on Geoengineering*. <http://www.ipcc-wg3.de/publications/supporting-material-1/EM-GeoE-Meeting-Report-final.pdf>.
- Izrael YA, Zakharov VM, Petrov NN, Ryaboshapko AG, Ivanov VN, Savchenko AV, Andreev YV, Puzov YA, Danelyan BG, Kulyapin VP (2009) Field experiment on studying solar radiation passing through aerosol layers. *Russian Meteorology and Hydrology*, **34**, 265–273.
- Keith DW (2000) Geoengineering the climate: history and prospect. *Annual Review of Energy and Environment*, **25**, 245–284.
- Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D (2011) Biochar effects on soil biota: a review. *Soil Biology and Biochemistry*, **43**, 1812–1836.
- Liu C (刘璨), Meng QH (孟庆华), Li YM (李育明), Lv JZ (吕金芝) (2005) A case study on ecological and socioeconomic benefit evaluation of Sichuan Provincial Natural Forest Protective Project. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, **25**, 428–434. (in Chinese with English abstract)
- Marchetti C (1977) On geoengineering and the CO<sub>2</sub> problem. *Climatic Change*, **1**, 59–68.
- McCusker KE, Battisti DS, Bitz CM (2012) The climate response to stratospheric sulfate injections and implications for addressing climate emergencies. *Journal of Climate*, **25**, 3096–3115.
- Mitsch WJ, Jørgensen SE (1989) *Ecological Engineering: An Introduction to Ecotechnology*. Wiley-Interscience, New York.
- Mu JL (穆景利), Han JB (韩建波), Huo CL (霍传林), Lin XZ (林新珍), Han GC (韩庚辰) (2011) Study progress on ocean iron fertilization. *Marine Environmental Science (海洋环境科学)*, **30**, 282–286. (in Chinese with English abstract)
- Qiu YS (邱永松) (2013) Ocean fertilization and its potential for fishery development in the oligotrophic South China Sea. *Journal of Fishery Sciences of China (中国水产科学)*, **20**, 223–233. (in Chinese with English abstract)
- Rasch PJ, Tilmes S, Turco RP, Robock A, Oman L, Chen CC, Stenchikov GL, Garcia RR (2008) An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, **366**, 4007–4037.
- Russell LM, Rasch PJ, Mace GM, Jackson RB, Shepherd J, Liss P, Leinen M, Schimel D, Vaughan NE, Janetos AC, Boyd PW, Norby RJ, Caldeira K, Merikanto J, Artaxo P, Melillo J, Morgan MG (2012) Ecosystem impacts of geoengineering: a review for developing a science plan. *AMBIO*, **41**, 350–369.
- Sala OE, Chapin FS III, Armesto JJ, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke LF, Jackson RB, Kinzig A, Leemans R, Lodge DM, Mooney HA, Oesterheld M, Poff NL, Sykes MT, Walker BH, Walker M, Wall DH (2000) Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, **287**, 1770–1774.
- SCBD (2009) *Scientific Synthesis of the Impacts of Ocean Fer-*

- tilization on Marine Biodiversity*. Montreal, Technical Series No. 45.
- SCBD (2010) *Life in Harmony, into the Future. Decisions Adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity at Its Tenth Meeting*. Nagoya, Japan.
- SCBD (2012a) *Geoengineering in Relation to the Convention on Biological Diversity: Technical and Regulatory Matters*. Montreal, Technical. Series No. 66.
- SCBD (2012b) *XI/20 Climate-related Geoengineering*. Report of the Eleventh Meeting of the Convention of the Parties to the Convention on Biological Diversity. <http://www.cbd.int/meetings/>.
- The Royal Society (2009) *Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty*. The Royal Society, London.
- Tukey JW, Alexander M, Bennett HS, Brady NC, Calhoun JC Jr, Geyer JC, Haagen-Smit AJ, Hackerman N, Hartgering JB, Pimentel D, Revelle R, Roddis LH, Stewart WH, Whittenberger JL (1965) *Restoring the Quality of Our Environment*. Report of the Environmental Pollution Panel, President's Science Advisory Committee, Washington, D.C.
- Vaughan NE, Lenton TM (2011) A review of climate geoengineering proposals. *Climatic Change*, **109**, 745–790.
- Wu J (吴军), Zhang CY (张称意), Xu HG (徐海根) (2011) Climate change issue in Convention on Biological Diversity: negotiations and focuses. *Biodiversity Science* (生物多样性), **19**, 400–403. (in Chinese with English abstract)
- Xie ZB (谢祖彬), Liu Q (刘琦), Xu YP (许燕萍), Zhu CW (朱春悟) (2011) Advances and perspectives of biochar research. *Soils* (土壤), **43**, 857–861. (in Chinese with English abstract)
- Yao ZY (姚展予) (2006) Review of weather modification research in Chinese Academy of Meteorological Sciences. *Journal of Applied Meteorological Science* (应用气象学报), **17**, 786–795. (in Chinese with English abstract)
- Zhang AF, Cui LQ, Pan GX, Li LQ, Hussain Q, Zhang XH, Zheng JW, Crowley D (2010) Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **139**, 469–475.
- Zhang XL (张小力), Song YQ (宋豫秦) (2003) Efficiency of the Three-North Forest Shelterbelt Program. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (北京大学学报 自然科学版) **39**, 594–600. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑: 薛达元; 责任编辑: 时意专)