

# 地球工程的研究进展简介与展望

辛源<sup>1, 2</sup>

(1 中国社会科学院研究生院, 北京 102488; 2 中国气象局发展研究中心, 北京 100081)

**摘要:** 地球工程是指为了应对气候变化及影响, 人们采用的有计划、大规模改变地球环境的行动。梳理了地球工程的背景、定义和当前地球工程研究涉及的主要领域, 从地球工程的机理、工程方案、风险评估以及气候伦理、国际治理等方面综述了地球工程的研究进展。对地球工程在国际应对气候变化行动的大背景下的前景进行了分析, 指出中国应在地球工程研究领域承担起应有角色。

**关键词:** 地球工程, 进展, 展望

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.04.004

## A Brief Review and Outlook of Geoengineering

Xin Yuan<sup>1, 2</sup>

(1 Graduate School of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 102488 2 China Meteorological Administration of Development and Research Centre, Beijing 100081)

**Abstract:** Geoengineering means human activities that change the earth's environments in plans and large scale to response to climate change and its influence. This article reviews the background and the main research areas of geoengineering, involve scientific theories, plans of projects, risk assessment and the mechanism of ethical and international governance, and so on. Then we analyze the possibilities of geoengineering in the future based on the international actions, and finally propose some suggestions about China's roles in the field of geoengineering research.

**Keywords:** geoengineering, review, outlook

### 0 引言

“地球工程”(geoengineering)是近几年来国际学术界在应对气候变化研究领域的新兴话题。地球工程概念出现以后,在社会上引起了广泛争论。这些争论中有些是学术领域的讨论,还有不少主观臆测。地球工程不是科幻,也不是马上付诸实施的“高大上”的工程。之所以出现各种争论,可能在于很多人对地球工程的概念、热点、实践等缺乏系统了解。基于此,本文对当前国内外地球工程的研究进展情况进行初步梳理和分析。

### 1 地球工程的背景与定义

#### 1.1 地球工程的提出背景

全球气候变暖是21世纪人类面临的最严峻挑战之一。IPCC第五次气候变化评估报告<sup>[1]</sup>指出:气候系统变暖毋庸置疑,人类活动对气候系统变化影响明显,未来温室气体继续排放将导致全球气候系统进一步变

暖,限制气候变化需要大幅度 and 持续地减少温室气体排放。但是,减缓和适应作为应对气候变化的“A计划”(Plan A),在实现2100年升温2℃以内的目标上不容乐观。为了抑制全球暖化趋势,近年来一些科学家提议以地球工程手段人工为地球降温,作为应对气候变化的“B计划”(Plan B)。在定位上,地球工程是应对气候变化“减缓和适应”两种“常规”手段之外的“非常规手段”。

Rayner等<sup>[2]</sup>总结了提出地球工程的主要原因:1)国际气候谈判陷入僵局,举步维艰。为应对全球气候变化,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,各方利益分歧依然严重;2)迄今为止,世界范围内基本没有一个国家接近减缓目标,而且还在紧紧跟随着IPCC预计的最高排放轨道;3)既定的减缓目标也仅仅是“看上去很美”,因为IPCC预设未来单位GDP的碳排放量会降低,但实际上并非如此;4)减缓行为可能会在短期内加剧变暖趋势,因为二氧化碳排放量的降低会减少大气中的气溶胶,而这些气溶胶颗粒是反射太阳辐射、抵偿二氧化碳暖化效应所必不可少的;5)地球工程措施具有“削去”全球变暖峰值的作用,还可以

收稿日期:2016年6月10日;修回日期:2016年7月4日  
第一作者:辛源(1983—),Email:xinyuanforever@163.com  
资助信息:国家重点基础研究发展计划项目(2015CB953603)

为减少二氧化碳排放赢得时间；6) 地球工程在经济上比通常的减缓措施更“便宜”；7) 地球工程技术在发展、建设和操作层面更具有商业潜力。

Crutzen<sup>[3]</sup>于2006年呼吁人们重视地球工程。之后，地球工程得到国际社会的持续关注，尤其是2009年英国皇家学会(The Royal Society)发布《地球工程：科学、治理与不确定性》报告<sup>[4]</sup>，引起很大反响，进一步激发了各领域学者的研究兴趣，各种研究成果不断涌现。

## 1.2 地球工程的定义

IPCC第五次气候变化评估报告将地球工程定义为：所有旨在改变气候系统以应对气候变化的方法。英国皇家学会将地球工程定义为：为了应对气候变化及其影响，人类对地球气候环境和气候采取的有计划、大规模的人工技术与方法<sup>[4]</sup>。因为地球工程专指人们为应对气候变化问题所采取的各种工程设想，近两年来越来越多的学者和团体倾向于将地球工程也称为气候工程(climate engineering)，如2015年美国国家科学院就持此定义<sup>[5]</sup>。

我国也有一些学者对地球工程有自己的看法与定义。潘家华<sup>[6]</sup>指出，地球工程是指包括所有能源生产和消费以外的、不涉及工业生产过程管理，在较大地球尺度或规模上，去除大气中的二氧化碳或直接控制太阳辐射而降温的各种人为工程技术手段，而采用工程技术手段节能、开发利用可再生能源以及核能、地热利用、工业生产过程等均不在地球工程之列。胡国权等<sup>[7]</sup>认为，地球工程是指人为对地球系统的物理、化学或生物特质反应过程进行干预来应对气候变化，减少并有效管理气候变化带来的风险的工程项目。

总而言之，关于地球工程的具体定义虽然众说纷纭，但存在基本共识，即指“为了应对气候变化及影响，人们采取的有计划、大规模改变地球环境的行动”。

## 2 地球工程研究的主要领域及进展

欧美国家目前在地球工程研究领域处于国际领先地位，相关研究最早可以追溯到20世纪六七十年代。早在1965年，美国总统科学顾问委员会便建议利用增加云层、在热带地区安置放射性材料等人工手段对抗气候变化<sup>[8]</sup>。“地球工程”一词最早出现在文献中是1977年Marchetti的研究报告<sup>[9]</sup>，他提出将二氧化碳注入海洋以减轻温室气体效应。目前，关于地球工程的研究涉及到科学机理、工程方案、风险评估以及气候伦理、国际治理等多个领域。

### 2.1 地球工程的原理与方案

目前，国际共识的地球工程方案(图1)主要可以分为两大类：第一类是碳移除和转移(Carbon

Dioxide Removal, CDR)，即通过各种碳捕获、封存和转化技术来降低大气中的温室气体浓度；另一类是太阳辐射管理(Solar Radiation Management, SRM)，即通过人工手段减少到达地表的太阳辐射来达到降温目的。

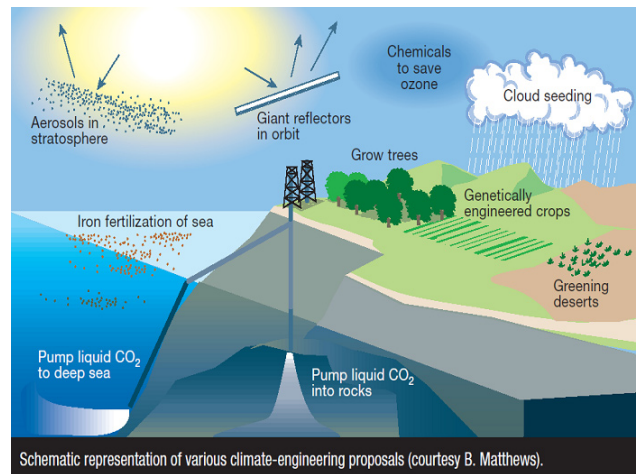


图1 地球工程方案与机理示意图<sup>[14]</sup>

Fig. 1 The schematic diagram of geoengineering scheme and mechanism

#### 2.1.1 碳移除和转移(CDR)方案

CDR致力于降低大气中温室气体的浓度，碳捕获与埋存(CCS)、碳捕获与利用(CCUS)就属于CDR范畴。国外一些研究认为，依据碳的移除方式及“归宿地”的不同，可将CDR分为陆地生物圈封存、海洋碳封存、岩石圈封存三种技术手段<sup>[10]</sup>。这一分类方案在IPCC第五次评估第三工作组报告也得到了采用。

1) 陆生物圈封存。陆地生物圈封存技术手段中占突出地位的是造林和再造林。陆地生物圈封存手段，既增加陆地生态系统碳储备又解决环境污染问题，是地球工程的优先选择之一。很多国家先后实施了一批大规模人工造林工程。不过，有必要把人类主导的林业生态恢复与地球工程区分开来。如我国的“三北防护林”计划、“长江流域自然保护区”计划等有相当程度应当属于生态恢复，不应属于地球工程范畴。然而，如Ornstein等<sup>[11]</sup>提议的在撒哈拉沙漠和澳大利亚荒漠地区植树造林这种人类有目的、主动改变原有地球环境的方案，就很符合地球工程的定义。

2) 岩石圈封存。岩石圈封存主要是指从大气中直接捕获二氧化碳，并进行地壳深埋封存，将其转化为稳定的固态储存。研究发现，生物碳是惰性产品，可与土壤混合或埋藏于地下保存上百年至上千年。冰岛有试验表明，在加压条件下向玄武岩蓄水层中注入二氧化碳能加强封存作用，具有大量玄武岩蓄水层的

地区，如冰岛、印度中西部、西伯利亚地区和美国西北部，富含橄榄岩的阿曼等地，将有可能发挥岩石圈封存潜力<sup>[12]</sup>。

3) 海洋碳封存。海洋碳封存技术手段主要是指依托海洋系统为载体，通过向海洋施加铁肥、加速海洋与大气的中和反应、改变大洋环流等手段来改变大气中的二氧化碳含量。其中，向海洋施加铁肥是一个讨论较多的方案，施加铁肥可以改变海洋生态系统，加速有机碳深海传输和海洋对大气中二氧化碳的吸收。还有研究<sup>[13]</sup>提出直接将石灰石粉末加入海洋中达到中和大气二氧化碳的目的，或者也可以通过加速海洋的上升流或下降流来加速海洋对大气二氧化碳的吸收。

### 2.1.2 太阳辐射管理 (SRM) 方案

SRM方案是在不减少大气中二氧化碳含量的情况下通过减少到达地面的太阳辐射来缓解地球升温。其基本思路是通过增加行星反照率来减少地球吸收的短波辐射，这种技术可在太空、大气和地球表面实施，主要包括太空反射法、平流层气溶胶注入法、云层亮化（增白）法和地面反射法等。太空反射法是指在太空设置反射镜以减少进入地球大气层的太阳辐射的设想。平流层气溶胶注入法源于火山活动的气候效应，其主要手段是在平流层注射硫酸盐气溶胶等颗粒物以达到反射太阳辐射的目的。云层亮化（增白）法是指通过向低层海云喷洒海水微粒使云增白来增加低云的反照率。地面反射法是指增加陆地表面的反照率，包括将建筑物屋顶涂白、人为增加农作物的反照率和在亚热带国家沙漠地区安装反射镜等手段。其中，平流层气溶胶注入法因其速效、成本相对较低，被认为是目前最经济可行、最容易实现的地球工程手段。

## 2.2 地球工程的风险与评估

虽然模型模拟显示地球工程相比应对气候变化的常规减缓措施具有成本低、见效快等优势，但同时地球工程的影响也具有很大不确定性和风险性（图2），大部分地球工程方案可能会对生态系统带来潜在的负面影响。地球工程的影响以及相应的风险及评估是当前国际研究的重点<sup>[15]</sup>。

### 2.2.1 对 CDR 方案风险的研究

对于陆地生物圈封存技术手段，其森林固碳方法能降低大气二氧化碳浓度，从根本上解决全球变暖问题，但效果缓慢、成本较大，同时受到自然条件的限制。以造林和再造林为例，一方面有助于增强陆地碳汇，另一方面也会改变陆地的地表性质，比如改变地表的反照率和粗糙度，进而可能影响气候。

对于岩石圈封存技术手段，在现有技术条件下，从大气中直接捕获二氧化碳的费用十分高昂，还没有关于大规模、工业化发展该技术的经济性与可行性的可信研究，其有效性主要取决于应对气候变化目标的紧急程度、相对于其他减缓措施的经济性以及相关技术的适用范围。

对于海洋碳封存方案，一些模拟研究发现，向海洋施铁肥对大气二氧化碳浓度降低的作用有限，可能会导致深海海洋酸化、海洋生态破坏等一系列的负面影响，使海洋生态系统产生不可逆的变化。不过在海洋中施加铁肥也可能增加海水的碱性，加速天气过程，并最终去除大气中的二氧化碳，这多少会抵消掉海洋酸化的影响，并因此具有长期固碳的潜力，但是对这些技术方案目前还缺少深入探索，同时潜在的费用也很高。

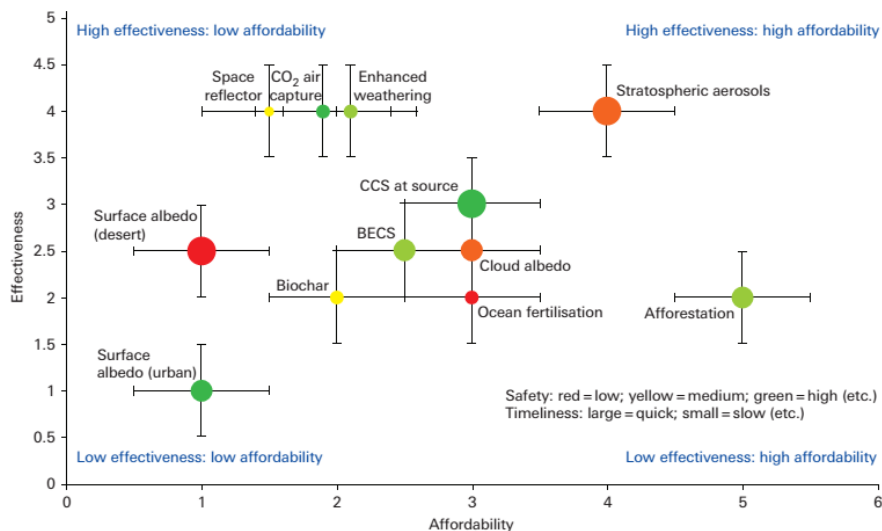


图2 地球工程各种技术方案的风险分布<sup>[4]</sup>

Fig. 2 The risk distribution of various geoenvironmental technologies

从CDR方案的综合效果来看,在严格减排情景下,特别是在减排目标即将完成的后期阶段,CDR与传统减缓措施相比更加具有竞争力,不过这也取决于与实施CDR相关的环境和社会风险。

### 2.2.2 对 SRM 风险的研究

目前,地球工程方案中争议最大的还是SRM方案。CDR由于在机理和技术上与传统应对气候变化的减缓途径具有很多共性,虽存在一些争议,但总体上争议较少,相关争议主要集中在SRM上。对SRM的争议和质疑主要原因有三:一是机理上不能直接降低大气中温室气体含量;二是人为改变大气层自然状态,带来很多不确定性和风险,如模拟结果显示向热带和北极地区的平流层注射气溶胶会破坏亚洲和非洲的季风系统,可能降低季风活动强度、加剧干旱地区的水资源枯竭等<sup>[16]</sup>;三是时间尺度上SRM的有效性与传统减缓措施相比要短暂得多,一旦工程停止,升温反弹效应可能会非常明显。IPCC第五次评估报告<sup>[17]</sup>甚至指出,SRM关于太阳辐射的管理与温室气体(GHG)对太阳辐射的改变在作用机理上存在着根本差异,用SRM方法来缓解温室气体引起的气候问题是不可能的。

关于SRM成本经济性的研究结果也是复杂多样。SRM的直接费用相比传统减缓手段可能相对便宜,但是其引起的潜在风险却难以准确估量。目前只有很少的研究定量评估了SRM的效果,但这些评估也主要局限在小范围区域,并且忽略掉了许多重要的因子,如不确定性等。而且,绝大部分的研究数据都是聚焦于SRM引起的气候要素变化,如温度、降水等,极少研究关注其综合影响,如海平面上升等,而这些实际上是判断SRM有效性的关键指标。

### 2.2.3 地球工程综合风险评判

地球工程能否从实验室的数据模拟最终走向现实,关键取决于地球工程对经济社会以及生态系统的综合影响结果评判,这更是一个复杂的问题,目前相关研究总体上还处在起步阶段。

在地球工程影响人类生存环境的机理和风险评估研究方面,当前国际学术界通过大量的风险模拟研究有了一定的积累,如开展了“地球工程模型间比较计划”(GeoMIP)。不过,大部分模拟研究都集中在模拟地球工程对某几个气候要素(如温度、降水等)的影响,而对地球工程如何影响气候系统各圈层以及各圈层间相互作用还知之甚少,延伸到对人类生存环境直接相关的生态系统影响研究还主要是一些推论。例如,SRM对陆地和海洋生态系统的结构、功能、生物多样性等方面的影响都还很不清楚。

在地球工程对经济社会系统的影响方面,目前的研究主要集中在能源、减排、地球工程的经济性与商业潜力、军事潜力以及国家安全等方面。有意思的是,与其他领域中负面结论比较集中的情况相反,地球工程经济社会影响研究有不少支持性结论。有研究<sup>[18]</sup>认为,地球工程会对全球粮食生产产生潜在影响,在保持当前化石燃料消耗不变的情景,地球工程会使全球大部分地区作物产量增加,只不过各种农作物产量的季节和区域的差异较大。MacMartin等<sup>[19]</sup>研究表明,由于全球地球工程的不确定性和区域差异,通过开展有针对性的地球工程,优化控制在不同地区、不同季节的太阳辐射,可以限制地球工程的副作用和风险,有可能提高以太阳辐射管理为基础的地球工程减缓气候变化的有效性。Heutel等<sup>①</sup>建立了一套经济模型,说明地球工程相对于传统的减缓措施的经济优势,认为CDR和SRM的边际效用要明显高于减缓措施的边际效用,而且在大多数常规情景下,SRM都有着良好的成本收益效应。当然,也有很多研究指出,地球工程可能会降低人类温室气体减排的动机与压力,导致高碳化石能源利用增加、化石能源资源耗竭、环境污染加剧、可再生能源发展受挫等不可忽视的问题。总体上,在地球工程经济社会影响研究方面,大多数还是一些概念和观点的讨论,缺少系统科学的定量研究。

## 2.3 地球工程的伦理与治理

由于地球工程不确定性和风险的存在,使不同人群对地球工程的态度也各不相同。有研究<sup>[20]</sup>认为地球工程实际上向人类展示了一幅“用风险抵御风险的图景”(risk-risk scenario)。由于风险和争议的存在,引发了对地球工程全球治理的广泛思考。治理与伦理又紧密联系在一起,这方面涉及的问题十分复杂,国际相关研究也比较分散。

### 2.3.1 对地球工程伦理问题的讨论

地球工程伦理关系的基础主要在于从不同角度看待成本与收益的分配,相关文献主要从代内和代际公平两个角度来考虑相关问题。地球工程的代内公平问题主要涉及分配和再分配正义、全球正义、程序正义及环境正义等问题。不同国家和群体对地球工程结果的承受能力因人口密度、经济发展水平、生态韧性、社会系统及文化传统的不同而产生很大差异,谁有资格部署和实施地球工程?产生的利益与损失应如何分配?这些问题是代内伦理要考虑的。代际伦理是地球工程需要考虑的另一个重要伦理基础,一般涉及到代际正义、矫正正义、生态正义、分配正义和程序正义等。

① Heutel G, Moreno-Cruz J, Ricke K. Climate engineering economics. <http://www.nber.org/papers/w21711>. 2015-11.

伦理取向直接影响对地球工程的认识与态度。2010年,学者Barrett<sup>[21]</sup>总结了地球工程的四种决策态度:1)绝对禁止;2)将地球工程视为应对气候变化的一种常规手段;3)将地球工程视为减排和适应以外的第三种方法,为减排和适应赢得时间;4)严格限制地球工程的实施,只有在遭遇“突然和灾害性”的气候事件时方可启动。大多数人认可第三和第四两种决策态度,即将地球工程视为应对气候变化中减缓和适应的一种“保险”手段,其试验和实施应遵循现有应对气候变化国际治理框架和原则,杜绝一国单独行动,只有在所有国家和利益相关者达成一致决定时才可以实施地球工程。

### 2.3.2 关于地球工程治理规则的争论

学者们从不同立场和角度出发,对地球工程治理规则纷纷发表意见。Humphreys等<sup>[22]</sup>从地球工程实施辖区上考虑,将地球工程分为全球共同管辖区(global commons-based)和国家主权管辖区(territorial):全球共同管辖区包括大气、海洋和外太空;CDR技术在全球共同管辖范围内设想的主要包括海洋施肥,而国家主权管辖区范围内的则包括植树造林和岩石圈封存等;SRM在全球共同管辖范围内设想的包括太空反射镜、平流层硫酸盐气溶胶注入和云增白技术,而在国家主权管辖区范围内设想的则包括屋顶涂白和沙漠反射镜等。Scott等<sup>[23]</sup>针对单边国家行动、单边个人行动、轻易禁止等不同情景,探讨了将地球工程纳入全球治理的相关问题,如功能、规范、目标、治理主体、决策程序、伦理和法律政策等。Parson等<sup>[24]</sup>认为,关于地球工程的国际治理体系最重要的是将所有相关研究和可能的行动公开化,增加透明度,并且任何实施行为都要协商一致。

2013年英国牛津大学的学者提出了地球工程国际治理的五项原则,被称为“牛津原则”<sup>[2]</sup>,主要内容包括:1)将地球工程作为公共品加以管制;2)确保公众在地球工程实施决定中的参与权;3)地球工程相关研究结果向全球无偿公开;4)对影响进行独立评估;5)在实施具体工程措施前先搭建好治理框架。

“牛津原则”明确了地球工程作为全球公共产品的属性,强调了在地球工程研究、实施、治理各环节中保持客观、公平、公正的伦理原则,引起了广泛关注。

### 2.3.3 国际框架组织对地球工程的关注

地球工程在上升为国家意志之前,国际框架组织(特别是应对气候变化框架下的国际组织)承担起了组织、协调以及“评定”地球工程相关研究与成果的重要角色。

对于CDR方案,早在2000年,IPCC就针对土地利用与林业撰写了特别报告<sup>[25]</sup>,系统描述了造林、再

造林等大规模生物固碳的技术和经济问题。在碳的捕获与埋存技术应用方面,IPCC第三次评估报告对其相关技术做了减缓技术和社会经济方面综合评估,认可其作为具有巨大潜力的减缓手段<sup>[26]</sup>。随后IPCC又专门立项,经过数百名科学家近三年的综合评估,于2005年形成了《碳捕获与埋存特别报告》<sup>[27]</sup>,提交给各国政府参考。对于SRM方案,早在1999年,IPCC第一和第三工作组就航空器尾气的科学和减缓含义进行了联合评估,但并非作为一种减排的工程手段进行推荐<sup>[28]</sup>。2000年,IPCC第三工作组完成的排放情景特别报告<sup>[29]</sup>,就人为排放到大气的SO<sub>2</sub>和气溶胶的降温效应进行了讨论。IPCC第五次气候变化科学评估报告第三工作组报告专设章节,对地球工程的有效性、成本、风险等方面的国际权威、最新研究进展进行了评估,虽然最后没有给出一个确定性的结论,但总体认为现有的关于地球工程的知识非常有限,有待进一步研究。

国际《生物多样性公约》直接表明态度,明确在当前情况下禁止开展地球工程活动。在《生物多样性公约》第十次(2010·COP-10)、第十一次(2012·COP-11)缔约方大会上,地球工程成为各缔约方争论的焦点之一。COP-10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。COP-11最终通过了关于地球工程的第20号决定,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,认为人们目前对地球工程的影响缺乏了解,所以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。值得一提的是,在《生物多样性公约》第十一次(COP-11)缔约方大会上,非政府组织提出人工降雨等人工影响天气活动也应被看作地球工程,但该提案没有得到响应<sup>[30]</sup>。

## 3 地球工程的未来

### 3.1 反对声中地球工程逐步付诸实践

由于担心一些国家具有单独实施地球工程的动机和能力,出于国际治理机制公平的考虑,总体上目前国际上对地球工程的态度是抵制的,特别是非政府组织(NGO)和一些学术团体的抵制比较强烈。这种背景下,欧美国家目前还没有大规模实施地球工程的案例,但出于各种目的(也可能包含军事应用前景),一些国家已经开始了各种层面的试验活动,美国、英国、挪威近几年陆续曝出一些私人公司或研究机构在开展相关行动。1996年,由挪威国家石油公司运营了世界上首个将海水深层二氧化碳封存商业项目,从

2006年开始,挪威政府持续投资近10亿美元在蒙斯塔德建造世界最大的碳捕获技术研究中心。2010年英国政府批准了向平流层中注入反光微粒的气候工程,最后迫于公众压力暂停了野外试验。2012年7月,美国商人Russ George向太平洋倾倒了将近100吨的硫酸铁,用来促进浮游植物的生长等。

未来,人类社会将进一步面临全球气候变暖与减排的巨大压力。2013年,IPCC第五次气候变化科学评估报告第一工作组的核心评估结论指出气候系统变暖毋庸置疑<sup>[1]</sup>。2015年12月,“巴黎气候大会”上达成的《巴黎协定》指出,要致力于实现2100年全球升温2°C以内的目标,并努力寻求将气温升幅限制在1.5°C。要实现这一情景,一方面必须尽早实现全球温室气体排放峰值,另一方面要实现2050年全球排在2010年基础上减少40%~70%,随后实现净的零排放。但考虑到气候协定的约束力、国际气候治理的难度以及各国减排目标的差异性,国际气候行动的前景很难令人乐观,这也会进一步加剧国际社会对地球工程问题的关注和研究。而且,目前尚未有任何一个国际条约对单一国家或实体组织开展气候工程(SRM)进行过明确规范<sup>[31]</sup>。2016年4月,美国参议院拨款委员会呼吁加强对地球反射能力的研究,以此抵抗气候变暖的方法,包括将在2017财年资助美国能源部、陆军工程兵团及其他机构开展相关研究。展望未来,各国关于地球工程的行动将如何抉择?很难说得清楚。

### 3.2 中国在地球工程研究领域应承担起应有角色

我国学者关于地球工程的研究才刚刚起步,目前原创性的研究成果还比较少,但是近两年在研究团队建设和研究成果上进展较快,在一些领域呈现出迎头赶上的趋势。如,北京师范大学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);中国社会科学院城市发展与环境研究所逐渐成为国内外研究地球工程经济社会影响的一支重要力量。此外,中国科学院、浙江大学、中国气象局等也有一些学者从各种角度关注地球工程研究。2015年6月,我国启动了第一个地球工程973项目,计划对地球工程的科学机理、经济社会影响和国际治理等问题进行系统研究。

在地球工程实践领域,过去几年我国在碳移除和转移(CDR)领域开展了一些二氧化碳捕集、封存以及利用(CCS、CCUS)等示范项目,取得了较大进步,已成功开展了工业级的项目运作。目前全国已运行的CCS、CCUS示范项目总减排规模达到了每年几十万吨当量,但是可能受制于成本和技术的约束,短期内还难以看到这些项目形成规模和发挥重大成效<sup>[32]</sup>。

我国在太阳辐射管理(SRM)的实践领域目前还基本处于一片空白。但是,从技术可行性上看,太阳辐射管理方案中的平流层播撒气溶胶技术具有很大潜力,而且也具有较弱的经济性优势,国外在这一领域正在进行各种层面的尝试。从现实需求上看,我国当前面临着减贫脱困任务重、减排压力大、减排成本高等挑战,而我国的能源自然禀赋和经济发展阶段却又决定了高碳能源结构将长期存在。从工程实施能力上看,我国从20世纪50年代就开始大规模组织开展人工影响天气活动,目前已经形成了比较完备的作业能力和组织体系。可能基于以上这些因素,现在外国学者普遍有一种担心,即认为中国最具有实施太阳辐射管理地球工程的强烈动机和强大实力。这种情况下,更需要我国对地球工程的整体发展进程进行审慎谋划和积极应对。但遗憾的是,目前国内在地球工程治理问题上还十分缺乏来自官方的明确态度,既没有相应的政府高层来主导和组织相关工作,也对未来发展方向缺乏清晰的路线图。这种状况与国外对中国的强烈关注形成了强烈反差,必须尽快改变。

综上所述,目前虽然还没有到必须对是否实施地球工程做出决断的阶段,但是从积极的、建设性的气候政策导向出发,我国应考虑尽快将地球工程列入议事日程,至少要努力避免在地球工程问题上被国外主导,以及由于技术和政策储备不足导致错失机遇、利益受损等情况出现。

### 参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2014.
- [2] Rayner S, Heyward C, Kruger T, et al. The Oxford principles. *Climatic Change*, 2013, 121: 499-512.
- [3] Crutzen P. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, 2006, 77: 211-219.
- [4] Shepherd J, et al. *Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty*. London: Royal Society, 2009.
- [5] National Research Council. *Climate intervention: carbon dioxide removal and reliable sequestration*. Washington, DC: The National Academies Press, 2015.
- [6] 潘家华. “地球工程”作为减缓气候变化手段的几个关键问题. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(5): 22-23.
- [7] 胡国权等. 地球工程. // 王伟光, 郑国光, 等. 应对气候变化报告(2011). 北京: 社会科学文献出版社, 2011.
- [8] 翁维力. 地球工程研究综述. // 王伟光, 郑国光, 等. 应对气候变化报告(2015). 北京: 社会科学文献出版社, 2015.
- [9] Maechetti C. On geoengineering and the CO<sub>2</sub> problem. *Climatic Change*, 1977, 1: 59-68.
- [10] Recap and Commentary: National Academy of Sciences Report on Carbon Removal. 2015. <https://carbonremoval.wordpress.com/tag/why-cdr/>.
- [11] Ornstein L, Aleinov I, Rind D. Irrigated afforestation of the Sahara and Australian Outback to end global warming. *Climatic Change*, 2009, 97: 409-437.
- [12] Matter J M, Broecker W, Stute M, et al. Permanent carbon dioxide storage into basalt: the CarbFix pilot project. Iceland. *Energy Procedia*, 2009, 1: 3641-3646.

- [13] Lovelock J E, Rapley C G. Ocean pipes could help the Earth to cure itself. *Nature*, 2007, 449:403-403.
- [14] Keith D W. Geoengineering. *Nature*, 2001: 409.
- [15] 王伟光, 郑国光, 潘家华, 等. 应对气候变化报告. 北京: 社会科学文献出版社, 2014.
- [16] Robock A, Oman L, Stenchikov G L. Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO<sub>2</sub> injections. *J Geophys Res*, 2008, 113: D16101.
- [17] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge Univ Press, 2014.
- [18] Pongratz J, Reick C, Raddatz T, et al. Past land use decisions have increased mitigation potential of reforestation, *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L15701.
- [19] MacMartin D G, Keith D W, Kravitz B, et al. Management of trade-offs in geoengineering through optimal choice of non-uniform radiative forcing. *Nature Climate Change*, 2012, 3: 365-368.
- [20] Parker A. Governing solar geoengineering research as it leaves the laboratory. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2014, 372: 20140173.
- [21] Barrett S. Geoengineering's Governance, Written Statement prepared for the U.S. House of Representatives Committee on Science and Technology Hearing on 'Geoengineering III: Domestic and International Research Governance'. 2010. [http://archives.democrats.science.house.gov/Media/file/Commdocs/hearings/2010/Full/18mar/Barrett\\_Testimony.pdf](http://archives.democrats.science.house.gov/Media/file/Commdocs/hearings/2010/Full/18mar/Barrett_Testimony.pdf).
- [22] Humphreys D. Smoke and mirrors: some reflections on the science and politics of geoengineering. *J Environ Develop*, 2011, 20: 99-120.
- [23] Scott D. Philosophy of Technology and Geoengineering (Working Paper). 2013. <https://geoengineeringourclimate.com/2013/04/23/philosophy-of-technology-and-geoengineering-working-paper-2/>.
- [24] Parson E, Keith D. End the deadlock on governance of geoengineering research. *Science*, 2013, 339: 1278-1279.
- [25] IPCC. Special Report on Land-use, Land-use Change and Forestry. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [26] IPCC. Climate Change 2001: Mitigation. Working Group III Contribution to 3rd Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [27] IPCC. Special Report on Carbon Capture and Storage. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [28] IPCC. Special Report on Aviation Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [29] IPCC. Special Report on Emission Scenarios. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [30] 银森录, 李俊生, 吴晓菁, 等. 地球工程开展现状及其对生物多样性的影响. *生物多样性*, 2013, 21(3): 379-380.
- [31] Parson, Edward A, Ernst L N. International governance of climate engineering. *Theoretical Inquiries in Law*, 2013, 14: 307-338.
- [32] 第三次气候变化国家评估报告编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015.

## 学科建设不断完善 人才培养更切实际

### ——记“教指委”第四次工作研讨会

林巧

2013—2017年教育部大气科学类专业教学指导委员会(简称教指委)第四次工作研讨会于2016年7月17—18日在广东湛江召开。

**学科人才培养更加注重实践能力。**大气科学学科实践性很强。但是限于客观条件的不足,高校大气科学学科专业的课程设置中,普遍存在实验实践课程学分偏低,实践教学环节相对薄弱的问题。为了有效解决这个难题,提升实践能力和水平,各高校均从自身的实际情况出发,采取了“局校合作、内外结合”等方式,在已有的基础上不断给学生创造实践机会,提升动手能力。

在“局校合作”方面,中国气象局与21所高校签署局校合作协议,明确了重点合作领域和合作机制,同时省级气象部门及其所属单位与58所高校在科技研发、实习基地建设、人才培养等方面签署了106项合作协议。在“内外结合”方面,教指委主办了全国大气科学类本科生野外联合科考实践活动。首届活动于2015年7月由南京大学和兰州大学联合承办,13所高校的160余名师生参加,深入到榆中、武威、民勤、张掖等地的气象站,实际动手收集观测数据,考察沿途地形地貌,并制作气象台天气预报。第二届野外实践活动于2016年7月由中山大学承办。

**学科人才培养方式更加多元。**南京大学介绍了考察大学本科教育质量的重要维度——学习参与,引起了与会学

者的极大兴趣。学习参与关注的是实际的、客观的学习行为,在西方本科教育研究的哲学取向转向“学生为中心”后,被聚焦为本科教育质量的重要指标。

同时,互联网在人才培养和课程体系建设方面继续发挥重要的作用。现代科技对我们有多大影响?这是教指委副主任许小峰提出的疑问,他希望通过教指委研讨会的召开,对大气科学的基础教育、再继续教育方面到底应该怎么做,能够怎么样来适合变化适合需求进行认真讨论。

**学科发展基础进一步夯实,新鲜血液不断加入。**此次会议上中国地质大学(武汉)、复旦大学、中国民航大学和中国民用航空飞行学院等四所新建大气科学学科单位介绍其学科发展情况。中国地质大学(武汉)拥有本科-硕士-博士完整学位授予权。复旦大学2016年4月29日成立了大气科学研究院,并同时筹建大气科学系,拟开始招收本科生。至此,我国共有15所高校开展从本科生到研究生的气象学科建设,拥有大气科学人才完整培养体系。值得注意的是民航行业对航空气象专业人才的需求,预计未来15年,我国要建设47座运输机场,1980座通用机场,按每个机场仅配备6名气象人员计,新建机场需配备12162人,仅通用机场就达11880人。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)