

应对全球气候变化 B 计划引发的思考

陈 迎 刘 哲

(中国社会科学院城市发展与环境研究所)

摘要:人类社会应对全球气候变化面临一系列严峻的挑战,如何推进国际气候进程仍是摆在政治家们面前的一道难题。被称为应对全球气候变化 B 计划的地球工程引起国际社会的关注,地球工程的可能影响、风险、伦理以及全球治理等问题在国际上引起很多争论。本文就地球工程的概念、特点、伦理问题和全球治理进行初步讨论,并提出中国应该采取的对策建议。

关键词:全球气候变化,地球工程,太阳辐射管理,伦理,全球治理



陈迎教授

全球气候变化问题是人类社会面临的最严峻的挑战之一。自工业革命以来的两百年间,人类活动大量燃烧化石能源排放温室气体使得大气中二氧化碳的浓度不断上升,大约从工业革命前的 280ppm,增长到目前接近 400ppm。根据美国夏威夷的莫纳罗亚山气象观测站的最新观测数据,2013 年 5 月 9 日以夏威夷当地时间日平均二氧化碳浓度为 399.73ppm,如果采用国际协调时间(UTC)计算当日二氧化碳平均浓度为

作者简介:陈迎,中国社会科学院城市发展与环境研究所研究员。研究方向为全球气候治理,能源和气候政策。

400.08ppm^①。这意味着在80万年的人类历史上,大气中二氧化碳浓度首次突破400ppm大关,创下新纪录。

越来越多的科学证据证明全球气候变化已是不争的事实,全球范围频发的气候灾害也不断为人类敲响警钟,必须认真对待气候变化对自然和人类系统带来的不利影响。然而,1990年启动的国际气候谈判,历经20多年艰难坎坷的发展历程,依然进展缓慢,举步维艰。为了抑制全球变暖的趋势,近年来一些科学家提议以地球工程(geoengineering)或气候工程(climate engineering)手段实现人工为地球降温。相对于通过节能、发展可再生能源等传统途径实现温室气体的减排(A计划),地球工程被称为应对全球气候变化的B计划。目前,地球工程在国际上引起很大争议,特别是地球工程的风险和不确定性,以及相关伦理和国际治理等问题,引发普遍的担忧,甚至恐惧。作为一类潜在的、特殊的技术手段,目前人们对其机理、特性、影响等方面的认识还十分有限。中国作为新兴发展中大国,在国际气候合作中占有举足轻重的地位,积极应对气候变化已纳入国家社会经济中长期发展战略。从维护国家利益和发展权益出发,理应对地球工程给予充分的重视,并及早制定符合自身国情的应对策略。

一、地球工程的概念和特点

迄今为止,对地球工程还没有统一的定义,通常采用广义的定义,指人类有计划地大规模改变地球环境以应对气候变化的措施^[1]。地球工程从最初的科学设想^[2],正逐步走向以实用为目的的科学和工程研究。

有关地球工程的各种方案,可以有不同的分类标准。根据作用机理可以分为两大类:一类是二氧化碳碳移除(CDR—carbon dioxide removal),即通过植树造林、土壤固碳、碳捕获与封存(CCS)或转化等技术来减少碳排放,降低大气温室气体浓度;另一类手段是太阳辐射管理(SRM—solar radiation management),它绕开二氧化碳浓度和排放,基于日地关系,通过改变太阳对地球的反照率来减少太阳辐射对地球升温的作用,即利用在平流

^① The Keeling Curve, A Daily Record of Atmospheric Carbon Dioxide from Scripps Institution of Oceanography at UC San Diego, <http://keelingcurve.ucsd.edu/>.

层注射硫酸盐气溶胶(SPI)等反射性颗粒物、设置太空反射镜、云层增白、屋顶涂白等手段来减少到达地表的直射太阳辐射。地球工程方案也可以根据实施辖区分为全球共同管辖区(global commons-based),包括大气、海洋和外太空,以及国家主权管辖区(territorial)^[3]。例如太阳辐射管理,太空反射镜、平流层硫酸盐气溶胶注入和云增白等技术的实施涉及全球共同管辖区,而屋顶涂白和沙漠反射镜等则可在国家主权管辖区范围内实施。二氧化碳移除技术、海洋施肥涉及全球共同管辖区,植树造林、碳捕获与封存技术则属于国家主权管辖区内的活动。此外,地球工程也可以根据大气、陆地和海洋等不同作用载体进行分类。例如,硫酸盐气溶胶注入的载体是大气,植树造林、地下碳封存的载体是陆地,海洋施肥、海洋碳封存的载体是海洋。

近年来,地球工程逐渐受到国际社会的关注,有关地球工程的研究也日渐活跃,主要集中在理论研究、模型模拟和伦理学探讨等学术研究。2010年2月,加拿大著名国际治理智库“国际治理创新中心”在多伦多举办国际研讨会,就地球工程的国际治理问题展开国际交流与研讨。鉴于有关地球工程的科学文献大量涌现,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第5次气候变化科学评估报告(AR5)第三工作组专门在第6章“评价路径转型”对地球工程有效性、成本和风险的最新研究进展进行评估。2011年6月,IPCC第三工作组在秘鲁利马举办“地球工程专家研讨会”,为报告编写准备素材,进一步提高了对地球工程的关注度。IPCC评估报告即将于2013—2014年陆续推出,将对未来国际气候进程走向有重要影响。

目前还没有全球范围大规模实施地球工程的实例,但一些相对小规模尝试已经引起国际社会的关注,引发公众的担忧。例如1996年,挪威国家石油公司运营的Sleipner项目首次以商业规模将CO₂封存在地下咸水深层,该项目每年可封存100万吨CO₂。为了提高碳封存技术,挪威政府从2006年开始,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。2012年7月,美国商人Russ George和伙伴们单方面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,从而强化整个海洋食物链。2010年,英国政府批准了在平流层中注入反光微粒气候工程(SPICE),但最后迫于公众压力,暂停了施放热气球的野外实验。

地球工程有多种技术选择,不同技术的特点不同,对全球自然生态系统和人类社会的影响程度和范围也存在很大的差异。例如,植树造林在减缓

气候变化的同时可以改善生态环境。很多国家先后实施了一批较大规模和投入巨大的林业生态工程,包括美国的“罗斯福工程”、前苏联的“斯大林改造大自然计划”、加拿大的“绿色计划”、北非五国的“绿色坝工程”、印度的“社会林业计划”等^[4]。然而人类居住和农业对土地空间需求的巨大压力意味着植树造林的范围有限,实施时间长,不可能短期内大幅度增加固碳量。CCS 技术作为一种可以大规模实施的 CO₂ 末端处理技术,有较大的减排潜力,已经有商业性示范项目,但受到特殊地质结构的选址限制,以及减排成本、额外能源消耗、泄漏和溢出风险等方面的制约,燃煤电厂要普遍采用 CCS 技术还有很大的距离。而海洋碳封存比陆地碳封存成本更高,风险更大,技术远不成熟。海洋施铁肥对大气 CO₂ 浓度降低的作用有限,而且会导致深海海洋酸化等一系列的负面影响。

实际上,国际上最为关注、争议最大的地球工程方案是太阳辐射管理,特别是硫酸盐气溶胶注入技术。无论是飞机、热气球或特制管道向大气平流层注入气溶胶,都可以通过改变太阳对地球的反照率,达到给地球降温的效果。这一技术的特点首先是技术简单易行,成本低,见效快。据估计,利用现有飞机运送 100 万吨气溶胶到 20 到 30 公里高空,每年需花费 10 亿到 30 亿美元;利用飞艇实施每年需要花费大约 20 亿美元;利用系在氢气球上的 20 公里长管子每年需要花费 40—100 亿美元。20 亿美元的投入,不足全球 GDP 的十万分之一,就有可能使地表温度下降 1℃。单从经济角度考虑。该技术相比传统减排措施的成本有效性优势十分明显,因而一些支持地球工程的人认为这是最经济可行、也最有可能应用的方案^[1]。然而该技术一旦实施,其影响是全球性的,由于作用机理复杂,影响不确定性很大,而且不可逆,对自然生态系统和人类社会可能带来潜在的巨大风险,也引发一系列有关伦理学的讨论。

二、地球工程相关的伦理问题

以硫酸盐气溶胶注入技术为例思考地球工程相关的伦理问题。首先,我们需要了解这一技术可能产生的影响以及影响的复杂性。由于还没有具体实施,目前太阳辐射管理的影响评估都是通过模型模拟分析得到的。

早期的研究工作通过理想化的模拟试验,分析了太阳辐射强度减少对

温度和降水的影响^[5]。研究表明,减少到达地面的太阳辐射可以在短时间内抵消由于 CO₂ 等温室气体增加产生的增温效应,却不能使不同的气候要素(比如温度、降水、海冰等)同时恢复到 CO₂ 等温室气体浓度增加前的状态。也就是说,如果以控制全球平均温度为目的,就必须承受由此带来的降水、海平面变化等方面的影响。如果要减缓海平面上升的速率,所带来全球温度变化可能是自然生态系统和人类社会所不能承受的。因此,多气候要素目标之间不能同时达到最优,就存在一个权衡取舍的问题。

更为复杂的是,气候变化的影响具有区域性的特点。即使实现控制全球平均温度的目标,对不同区域的影响也是不同的。极地相对较暖,而低纬度地区可能降温更明显。同样,降水变化也具有地区差异性。在全球平均降水减少的同时,一些地区有可能干旱或洪涝灾害加剧。且某些特定区域或脆弱生态系统的影响受到格外的关注,例如非洲和亚洲的季风系统,极地格陵兰冰盖的融化等。可以想见,所有国家都以本地区影响最优化作为决策依据,必然出现巨大的利益分歧,控制目标的选择将十分艰难。一些模型模拟不同时间、地点和方式向平流层注射硫酸盐气溶胶对气温、降水、海冰和平流层化学等的影响^[6],可以为决策者提供更多的信息。还有模型试图通过优化控制在不同地区 and 不同季节的太阳辐射,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^[7]。当然,由单个模式模拟结果具有很大的不确定性,为了更系统地进行多模式间比较,Kravitz 等人倡导开展了地球工程模型间比较计划(GeoMIP—The Geoengineering Model Intercomparison Project)^[8]。这一计划目前有多个不同气候研究机构的 12 个地球系统模式参加,中国北京师范大学的 BNU-ESM 也是项目成员之一。

太阳辐射管理还可能带来其他方面的不利影响。例如,通过太阳辐射管理虽然可以在某种程度上抵消 CO₂ 排放的增温效应,但不能缓解 CO₂ 排放造成的海洋酸化问题。在地球和太阳之间设置一个巨大的“阳光防护窗”,在抵挡射向地球的阳光的同时,也会造成一个巨大的臭氧层空洞,给人类和其他生物带来空前的灾难。除此之外,如果太阳辐射管理技术被某些别有用心的个人、机构或国家用于军事目的,气候也可能成为新的战争武器,引发国际争端,威胁国家安全。

迄今为止,人们对硫酸盐气溶胶注入技术进行太阳辐射管理的影响评

估还是初步的,是否还有始料不及的影响也未可知。著名地球工程评论家、澳大利亚查尔斯特大学公共伦理学教授克莱夫·汉密尔顿,在《地球之主:气候工程时代的黎明》一书中把地球工程形容成一个“深深的困境”,“是坐视格陵兰冰盖崩溃,还是向大气中喷一些硫微粒?”是一个两难的选择^①。

在风险和不确定性条件下的决策是高度复杂的,需要考虑政治、经济、技术、环境等诸多因素进行综合决策,而正义(justice)是人类进行价值伦理判断的一个重要标准。美国学者 Tuana 从伦理学角度提出,评价某项实施太阳辐射管理行动的正义性应包含 5 个方面:分配正义、代际正义、矫正正义、生态正义和程序正义^[9]:

(1)分配正义是指某个行动带来的影响,包括利益和危害,应该被公平地分配。严格的平均主义要求对每个主体的影响完全相等,而罗尔斯正义理论认为如果影响是有差异的,至少最不利的群体福利应得到改善。

(2)代际正义是指不仅要考虑对当代人的影响,还要考虑对后代人的影响。

(3)矫正正义,或补偿正义,与平均主义的分配正义不同,某个行动对一部分个人或群体的影响,要从道德的角度考虑他们是否应该受到这样的影响,是否应该获得补偿。在气候变化问题上体现在历史责任问题,保护弱势群体的利益被赋予更大的权重。

(4)生态正义是指不仅要考虑对人类的影响,还有考虑对动物、植物和生态系统的影响。

(5)程序正义是指决策程序必须公正合理。罗尔斯正义理论强调所有将受到决策影响的人都应该有为决策过程做出贡献的能力,或者有人能代表他们的利益。程序正义还要求决策过程公开透明。

是否采取某项太阳辐射管理行动,如何制定硫酸盐气溶胶注入的目标,以及在何时、何地、以何种方式实施的具体方案,都需要依据上述 5 个方面的正义原则进行全面的影响评估,权衡取舍并做出谨慎的选择。

^① 参见 奥利维亚·博伊德 . 地球工程:中国带头拯救世界? <http://www.xn—fiqv9xmjcf70f.net/article/show/single/ch/5952-China-could-move-first-to-geoengineer-the-climate>.

三、地球工程的全球治理

由以上分析可见,地球工程的特殊复杂性使得决策变得异常艰难。任何鲁莽的单边行动可能对自然生态系统和人类社会造成难以挽回的严重后果。至少目前还不宜大规模实施太阳辐射管理。为了防止单边行动,包括野外科学实验,迫切需要建立相应的国际制度进行全球治理。

地球工程已经成为气候变化研究的新领域,尽管还没有列入国际气候谈判议题,当前的国际气候制度对于地球工程包含的具体技术的监管、核算等规则并非空白。土地利用、土地利用变化和林业(LULUCF)、通过减少砍伐森林和减缓森林退化减少温室气体排放和增加碳汇(REDD+)是重要的谈判议题,碳捕获与封存技术(CCS)已有商业示范,IPCC、IEA 等机构开发的未来排放情景都对 CCS 的应用前景充满信心。目前最为缺失的是针对太阳辐射管理尚无规则可循。未来随着国际社会对地球工程关注度的提高,将太阳辐射管理纳入国际气候制度是必然趋势,应明确地球工程的全球治理是全球气候治理的一个重要组成部分。

关于太阳辐射管理类的地球工程,人类选择无外乎有几种:完全禁止,作为主要气候政策应用,与减排措施联合使用,或者约定只有当突发灾难性气候事件时才可使用^[10]。构建地球工程的全球治理框架需要考虑一些基本要素,例如功能、规范、目标、治理主体、决策程序、相关伦理和法律政策等等。许多学者呼吁应尽早就地球工程全球治理的基本框架和要素达成共识,避免造成不可挽回的损失。在缺乏国际统一的地球工程研究监管机制的条件下,有必要形成一套地球工程研究的国际规范^[11]。需要就地球工程开展系统的科学、技术、经济、法律和国家安全等方面的相关研究,提高科学认知度,为国际谈判和政策选择提供决策依据^[12]。

与此同时,地球工程的全球治理还要考虑与现有国际气候制度的衔接。实施太阳辐射管理带来最大的政治的风险是冲击或降低传统减缓行动的政治意愿,所谓“道德危害”效应(moral hazard effect)。换言之,应对全球气候变化的 B 计划与 A 计划之间有可能形成一定的冲突。这是非常不可取的。即使未来太阳辐射管理成为特定条件下不得已采取的行动,也不能替代节能减排、发展可再生能源和增加碳汇等传统减缓行动,即使没有气候变

化,许多减缓行动依然是促进人类社会可持续发展的“无悔”选择。也有专家认为 B 计划未必对 A 计划不利,如果人们充分认识并努力避免 B 计划可能产生的副作用,或许会自觉强化当前的减缓行动。

2009 年哥本哈根会议前夕,英国牛津大学的几位学者向英国议会科技委员会提交建议,提出地球工程国际治理的 5 项原则,被称为“牛津原则”(Ops)^[13],包括:(将地球工程)作为公共物品加以管制;鼓励公众参与决策;披露地球工程研究并公开发表研究结果;对地球工程的影响开展独立评估;先治理后实施。依据牛津原则,地球工程的全球治理框架应该以维护全球公共利益为最终目标,基于科学,广泛参与,公开透明,力求指导实践。为此,还需要进一步将这 5 项原则细化为具体的措施,例如通过国际合作研究项目加强影响评估和相关研究,建立科研信息登记和成果分享平台,鼓励和规范私营部门参与,加强面向公众的宣传,组织各利益相关方参与的对话和讨论等。

四、中国应对策略

值得注意的是,某些西方学者在有关地球工程的争论中往往有意无意地把中国列入最有能力实施地球工程的国家之一,暗指中国最有可能独自实施气溶胶注入之类的地球工程手段^①。其理由可归纳为几个方面:一是中国生态环境脆弱,地区差异性大,对气候变化不利影响的脆弱性较强。气候变化相关自然灾害频发,可能引起社会不稳定。二是中国处于快速工业化和城市化进程中,随着经济快速发展,能源需求大幅增长,温室气体排放总量已居世界第一位,人均排放也不断上升,中国面临日益强大的国际减排压力。三是,中国重视和频繁使用人工影响天气^②作为抗旱和水资源管理的技术手段。中国气象局称,2002 年到 2012 年间通过人工影响天气作业

① 参见奥利维亚·博伊德:《地球工程:中国带头拯救世界?》。<http://www.xn—fiqv9xmjcf70f.net/article/show/single/ch/5952-China-could-move-first-to-geoengineer-the-climate>。

② 人工影响天气是指为避免或者减轻气象灾害,合理利用气候资源,在适当条件下通过科技手段对局部大气的物理、化学过程进行人工影响,实现增雨雪、防雹、消雨、消雾、防霜等目的的活动。虽技术手段与地球工程有相似之处,但实施范围有限,严格意义上不属于地球工程范畴。

增加降水 4900 亿吨,是三峡工程蓄水量的 12 倍^①。四是,部分受到气候变化影响严重的发展中国家,如面临生存威胁的小岛国,出于自身利益考虑可能欢迎和支持中国实施地球工程。此外,外界认为中国最高领导层大多数具有工科背景,相对更容易接受采取地球工程手段来应对气候问题。

的确,中国作为新兴发展中大国,在国际气候谈判格局中占有举足轻重的独特地位,温室气体减排面临非常严峻挑战。根据国际能源署(IEA)统计,2010 年中国化石燃料燃烧排放 72.6 亿吨二氧化碳,约占全球 23.8%,美国占 17.7%,欧盟占 12.1%^[14]。假设中国维持 8% 左右的经济增长速度,2020 年即使实现单位 GDP 排放强度降低 40—45% 的目标,中国排放也可能接近百亿吨二氧化碳。中国政府一贯重视应对气候变化问题,将应对气候变化纳入国家可持续发展战略。在坚持走绿色低碳发展的道路,通过增汇与减排并举积极应对气候变化的同时,从前瞻性和战略性的高度重视地球工程问题是必然的,无可厚非的,但是,这并不意味着中国会冒然单边实施地球工程。

对于地球工程这一新领域,恐惧和盲目乐观都不可取,中国的应对策略首先是从前瞻和战略高度对地球工程研究进行系统部署和相关科技项目的支持,加强科学研究,提高科学认知,培养与国际接轨的高水平科研人才和队伍。其次是通过国际合作、交流和磋商积极参与地球工程的全球治理。应根据地球工程在技术、经济、伦理等方面的可行空间,提出地球工程全球治理的原则、要素等框架性意见。在做好战略和科技储备的前提下,中国应该也可以在地球工程的全球治理中发挥积极和建设性的作用。

参考文献

- [1] Royal Society Report. Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty, London 2009. <http://royalsociety.org/policy/publications/2009/geoengineering-climate/>.
- [2] Budyko M I. Climatic Changes. American Geophysical Union, Washington, DC: New York, 1977, 261.
- [3] Humphreys D. Smoke and mirrors: Some reflections on the science and politics of

^① 参见中外对话贝丝·沃尔克·奥利维亚·博伊:《中国地球工程计划遭质疑》。 <http://www.ftchinese.com/story/001050027? page=1>.

- geoengineering. The Journal of Environment & Development, 2011, 20(2): 99—120.
- [4] 李世东. 世界重点生态工程研究. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] Lunt, D J, Ridgwell A, Valdes P J, et al. Sunshade World: A fully coupled GCM evaluation of the climatic impacts of geoengineering, Geophysical Research Letters, 2008, 35(12): 12710.
- [6] Tilmes S, Müller R, Salawitch R. The sensitivity of polar ozone depletion to proposed geoengineering schemes. Science, 2008, 320(5880): 1201—1204.
- [7] 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.
- [8] Kravitz B, Robock A, Boucher O, et al. The geoengineering model intercomparison project (GeoMIP). Atmospheric Science Letters, 2011, 12(2): 162—167.
- [9] Tuana, Nancy. “The Ethical Dimensions of Geoengineering: Solar Radiation Management through Sulphate Particle Injection.” Working Paper, Geoengineering Our Climate, Working Paper and Opinion Article Series. 2013. [www. geoengineeringourclimate. com](http://www.geoengineeringourclimate.com).
- [10] A combined mitigation/geoengineering approach to climate stabilization; in Sciences. 2006, 314(5798): 452—454.
- [11] 孙凯, 王刚. 气候变化背景下地球工程研究的国际管制探析. 鄱阳湖学刊, 2012, 5: 5—10.
- [12] 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, 5: 22—26.
- [13] Kruger, Tim. A Commentary on the Oxford Principles. Opinion Article, Geoengineering, Our Climate Working Paper and Opinion Article Series. 2013. [www. geoengineeringourclimate. com](http://www.geoengineeringourclimate.com).
- [14] International Energy Agency (IEA): CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights—2012 Edition. [http://www. iea. org/publications/freepublications/publication/name,32870,en. html](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,32870,en.html).

Considerations on Plan B to Address Global Climate Change

CHEN Ying LIU Zhe

(Institute of Urban and Environmental Studies, CASS)

Abstract: Human society is facing great challenges to address global climate change. How to move the international climate process forward is still a serious problem for the politicians. Geoengineering, the so called Plan B to cope with climate change, has been paid great attentions of international community with a lot of debates on its impacts, risks, ethical issues as well as global governance. In this paper, we focus on some important issues of geoengineering, including the definition, characteristics, ethics and global governance, and then put forward some suggestions for China's considerations.

Key words: Global climate change, Geoengineering, Solar radiation management (SRM), Ethics, Global governance

(责任编辑 张岩)

(上接第 26 页)

Market Mechanisms Combating Climate Change: Supply Push and Demand Creation

WU Li-bo LI Chang-he

(Center for Energy Economics and Strategy Studies, Fudan University)

Abstract: In the post-Kyoto epoch, the global collaborative mitigation policy scheme might be substituted by unilateral, bilateral and multilateral policy schemes. The conflicts among these policy schemes were expected to become more frequent and serious. This paper is aiming at investigating the latest progress of market-based mitigation mechanism by exploring two aspects. On the one hand, a comparative study on the IPCC working group III report is conducted to look at the changes of relative discussion on these policies. Potential entry points and implementing pathways of the policies from both the supply side and the demand side are analyzed. On the other hand, this paper also presents a preliminary study on the possible correlation, coordination and collision among various kinds of policies.

Key words: Climate negotiation, Market mechanism, Supply push, Demand creation

(责任编辑 张岩)