C2G
卡内基气候治理倡议

卡内基国际事务伦理学理事会的倡议
CARNEGIE COUNCIL for Ethics in International Affairs

证据摘要

人工影响太阳辐射

2020年1月21日

概述

这份摘要总结了人工改变太阳辐射(SRM)从而影响气候的两种重要技术——海洋云增亮(MCB)和平流层气溶胶注入(SAI)的最新证据。本文介绍了这两种技术，探讨了技术成熟度、当前研究、适用的治理框架和其它社会政治考量。本文分析了这些技术可能引发的包括安全在内的地缘政治问题和隐忧，以及现有的治理是否有助于解决这些问题。此外，本文还概述了与其治理相关的现有重要治理法规。

关于卡内基气候治理倡议：

尽管卡内基气候治理倡议(C2G)对是否应该研究、测试或部署SAI与MCB保持中立态度。它希望提高公众的认知，并向政策制定者提供有关这些影响气候技术的公正信息，并推动有关这些技术未来治理的讨论。C2G还编制了一些其它摘要，以探讨各种二氧化碳移除和人工改变太阳辐射技术以及相关问题。欲知详情，请参见 我们的网站.

目录

引言 . . . 3
第一节—海洋云增亮和平流层气溶胶注入 . . . 4
介绍 . . . 4
海洋云增亮 (MCB) . . . 5
平流层气溶胶注入 (SAI) . . . 8
第二节—人工改变太阳辐射、地缘政治和安全 . . . 15
介绍 . . . 15
SRM部署可能会如何发展，为何会造成紧张局势？ . . . 15
SRM的不均衡影响 . . . 16
缺少终止部署的权力 . . . 17
单方面部署SRM . . . 17
SRM引发“自由司机”问题 . . . 18
反部署 . . . 19
武器化和军事利益 . . . 19
冲突和战争 . . . 19
终止冲击 . . . 20
地缘政治定位 . . . 20
国家政治 . . . 21
道德风险和国际合作减少 . . . 21
联合国安全理事会 . . . 21
联合国秘书长 . . . 22
非国家行动者 . . . 22
第三节–治理工具 . . . 23
《生物多样性公约》 . . . 23
《保护臭氧层维也纳公约》和1987年《蒙特利尔议定书》 . . . 24
《环境修改公约》(ENMOD) . . . 24
《远程跨界大气污染公约》(CLRTAP) . . . 24
1972年《伦敦公约》和1996年《伦敦议定书》 . . . 25
《联合国海洋法公约》(UNCLOS) . . . 25
《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) . . . 26
2015年《巴黎协定》 . . . 26
经1978年议定书修订的1973年《国际防止船舶造成污染公约》(MARPOL) . . . 26
研究治理 . . . 27
其它进程或议程 . . . 28
结论 . . . 28
参考 . . . 29

引言

气候变化的《巴黎协定》气候变化条款生效的四年后，人们越发认识到，如果不加快行动，仅靠减排或现有的二氧化碳移除手段，无法将全球平均升温幅度控制在1.5-2摄氏度以内。科学家们已经开始研究更多的大规模干预措施来限制气候影响，包括二氧化碳移除(CDR)技术和人工改变太阳辐射(SRM)技术（就这些潜在的技术评论，请参见Zhang等人的研究（2015年））。科学家们提出了诸多SRM方法，这些不同的技术差异极大。本文主要介绍两种人们认为具有最大降温潜力的SRM方法--海洋云增亮和平流层气溶胶注入。科学家提出的其它SRM技术包括卷云薄化和增强地表反照率。

SRM技术旨在增加地表或大气的反射率，即所谓的“反照率”。将更多太阳光（太阳辐射）反射回太空，会改变地球的辐射平衡，就像一个遮光板，从而达到降温作用，并抵消一部分温室效应。

大气中二氧化碳的浓度比工业化前的水平增加一倍，达到百万分之550ppm，这预示着全球将升温3˚C（IPCC，2007年）。据估计，如果实施SRM，需要将2%的阳光反射回太空中，以抵消变暖影响（Shepherd，2009年）。然而，无论是SAI或MCB都不能代替将碳排放量降为“净零排放”，乃至“净负排放”，因为它们无法解决全球变暖的根本原因，即大气中温室气体的浓度变高（Robock，2018年）。这些方法对海洋酸化的影响很小。此外，考虑到气候系统的复杂性，如果以改变气候的规模部署这两种技术中的任何一种，都可能产生意想不到的后果（Russell等人，2012年，Robock，2018年）。

SRM技术可潜在给全球气候降温，或暂时减少超出《巴黎协定》升温目标的数量和超出的持续时间，因此人们对SRM的兴趣在升温（Asayama，2019年）。这将是一项短期措施，只有在减少和移除二氧化碳排放的速度不够快的情况下，才会实施。一旦减少或移除过量温室气体的行动取得成功，部署就会结束。然而，SRM仍然是一个涉及技术、社会政治和治理的复杂挑战。例如，政府间气候变化专门委员会(IPCC)关于全球变暖1. 5°C的特别报告（2018年）指出：“虽然有些SRM措施理论上可以有效减少超标，但这些措施面临巨大的不确定性与知识缺口，以及有关治理、道德和可持续发展影响的巨大风险、制度和社会约束。它们也无法缓解海洋酸化。”

本文并没有全面、详细地评估SRM，或是SAI和MCB这两种技术，而是对相关的技术成熟度、研究现状，以及治理、地缘政治、安全和社会政治问题进行了描述和简要分析。第一节依次介绍了这些技术，第二节探讨了可能出现的地缘政治问题和隐忧，第三节探讨了可能适用的治理工具和法规。IPCC的任务是在其第六次评估报告(AR6)中充分展现SRM技术的全球知识及其如何影响路径，该报告可能在适当时候提供更详细的分析。

第一节—海洋云增亮和平流层气溶胶注入

介绍

本节介绍了SRM的两种主要方法，简要描述了它们的技术成熟度、当前研究、适用的治理框架和其它社会政治考量。C2G采用IPCC对治理的定义，仅供参考--治理是一个全面、广泛的概念，涵盖所有决策、管理、实施和监控政策及措施的方法。尽管政府是严格按照民族国家来界定，但治理这一概念更具包容性，认可各级政府的贡献（全球级、国际级、地区级、地方级和当地级），以及私营部门、非政府行动者和民间组织在解决国际社会面临的诸多问题时发挥的巨大作用（IPCC，2018年）。

表1概述了两种技术，以及技术成熟度和一些治理挑战。

提出的技术		技术成熟度	具体治理挑战
	海洋云增亮 • 在海面上方形成云团并使之增白，最可能使用的是海盐喷雾，将太阳辐射反射回太空。 • 有望在实施后立即形成局部快速降温效果。 • 每年每单位辐射强迫 ($W\ m^2$) 的预估成本为2亿美元[1] （Shepherd，2009年）	• 技术处于理论阶段，以天然类似物和电脑模型为依据。 • 到2020年，可能会进行小规模的户外实验。	• 如果在专属经济区 (EEZ) 内进行，治理只针对一个国家。 • 如果在公海进行，将受到国际惯例法的监管。 • 影响存在地区差异（例如温度和水文）。 • 社会接受度仍然不确定。
	平流层气溶胶注入 • 在平流层注入反射气溶胶。 • 建模结果表明，地球降温有可能在一年内实现。 • 每年减少1 $W\ m^2$ 辐射强迫的成本预计为每年50亿美元[1]（Stavins 和Stowe，2019年）。这表明，二氧化碳浓度翻倍的影响每年可通过花费250-500亿美元的反措施来解决。	• 只了解技术的理论知识。 • 实施机制尚未建立。 • 难以判断归因问题。	• 治理措施可能包括国家或惯例法、CBD、UNFCCC以及可能包括空气污染规定和《维也纳公约》等修订法规。 • 有证据表明，潜在的地缘政治和安全问题可能会出现，SRM可能会给国际制度与合作造成压力。有可能出现道德风险和其它形式的减排妨碍因素。

[1] 比工业前时代的二氧化碳浓度增加一倍可产生3.7 $W\ m^2$的辐射强迫（Salter，2008年）。1$W\ m^2$相当于将二氧化碳浓度增加一倍所产生的暖化效应降低27%。

海洋云增亮 (MCB)

原理

MCB的基本原理与SAI的一样，都是为了增加反照率。MCB是通过工程手段将海洋上空的云层变得更明亮，增加折射回太空的阳光，从而实现降温效应。与SAI一样，MCB无法解决导致全球变暖的根本原因也就是温室气体浓度，也会引发道德风险问题，即SRM具有可能会削弱个体、集体或政治力量的减排动力的风险（Lin，2012年）。

技术与成熟度

在海洋大气中相对无尘的区域，增加云凝结核（微粒周围的水汽凝结成云）的数量可以显著提高云的反照率，也会增加云的生命期（Albrecht,1989年），正如E-PEACE项目实地展示的一样（Russell等人，2013年）。MCB干预措施将试图通过向云层中喷洒微粒（可能是盐水）来增加云凝结核的数量。

这项技术的效应规模可能非常大。例如，北美洲和南美洲的西海岸以及非洲西海岸的海洋层云的自然云滴浓度增加一倍，将抵消大气中二氧化碳浓度提高一倍带来的后果（Latham等人，2009年）。然而，将MCB扩大到地区层面的潜力尚不清楚。

输送机制在技术上可能并不复杂。例如，有人提出太阳能船或飞机可以常规地将所需的微粒精确地输送到所需的位置（Wood等人，2018年）。但如何设计喷嘴，以便始终将适宜尺寸的微粒输送到适宜的高度，仍然是一个研究挑战。

建模显示，MCB可以在北极地区内部署，实现快速降温效果（Parkes, 2012年），从而减缓冰川融化，并在适当的时候进一步冷却地球（Nalam等人，2017年）。然而，这样的部署也可能导致热量从北极以南地区进入北极地区，给该地区带来更温暖的空气，抵消MCB部署直接引发的一些效应。

随着反照率增强，如明亮的地表，MCB也可以在局部部署，确保地区级利益，悉尼海洋科学研究所(Sydney Institute of Marine Science)目前正在研究这类干预措施（Ellis-Jones，2017年），澳大利亚国家政府和昆士兰州政府正在资助一些探索将MCB用于保护大堡礁的项目（BRF, 2018年）。

潜在风险和关键未知因素

虽然SRM建模研究让科学家能够选择条件、场景和路径进行模拟和试验，这些仅凭以往经验根本无法实现，而且也忽视了某些可能与治理和地缘政治相关的方面。McLaren（2018年）强调了‘文献存在不足（尤其涉及SAI），文献中常常隐含了有效性、精确性和可控性的假设，衡量标准和信息整合方法的假设，以及与事实不符的过于夸大气候变化。’（McLaren, 2018年）。McLaren的第一个观点可能会低估失败风险、道德风险和不确定的分布效应。第二个观点会低估潜在的局部性、多样化的弱点，以及可能加剧目前的不平等现象。最后一个观点侧重“避免极端气候影

响的技术手段，远离历史排放和其它能源系统不公正所带来的道德义务。”（出处同上）。因此，从关于SRM如何影响气候风险的建模得出的关键结论，取决于是否忽视这些因素。

关于建模工作中存在的变量，一个尚未解决的关键技术挑战是要决定使用哪种微粒，以及如何在海上稳定地制成合适的直径和数量的微粒。最有可能的候选基础材料是海水，这种材料与SAI候选材料不同（见下文），不会对环境或健康造成更广泛的影响。

面对MCB可能造成的大规模辐射强迫，目前还不确定气候将做出怎样的反应。气候模型表明，MCB可以非常有效地缓解全球变暖（Kravitz等人，2014年）。然而，可以想象到的风险包括水分和大气的动态传输发生变化，从而影响天气系统和重要的当地气候现象，如季风降雨和生态系统功能（Park等人，2019年，Keith等人，2016年，Mercado等人，2009年）。这种破坏可能导致受影响的国家或地区出现旱地扩大、水灾、环境退化和粮食安全问题。

如果使地球降温后MCB部署终止期很短，可能会导致温度明显、快速地‘反弹’，同时气候重新稳定（Kosgui，2011年）。这种快速升温被称为‘终止冲击’，可能会导致温度升高到超过不实施MCB情况下的升温，并可能造成重大破坏（Robock，2018年）。这种终止冲击有可能造成大规模的环境、经济和社会影响（Matthews和Caldeira，2007年）。然而，Parker和Irvine认为（2018年），如果实施SAI技术，它也可能造成终止冲击，但在一个健全的治理体系下，不会明显出现快速终止可能发生的场景，这意味着，了解终止可能产生的后果也许足以确保全球治理体系的弹性。这将在第二节中进一步讨论。

当前研究活动

2019年12月，美国政府首次批准向美国国家海洋和大气管理局(NOAA)拨款400万美元，用于“太阳气候干预”研究，包括“为影响气候而注入物质的提议”（Temple，2019年）。这项投资的范围包括MCB和SAI。

与此相关的是，2019年12月19日，加州国会议员麦克纳尼(McNerney)向美国国会提交了一项法律提案，该提案将使NOAA能建立起一个正式的项目来开展气候干预研究。大气气候干预研究法案(Atmospheric Climate Intervention Research Act)–H.R.5519（ACIRA，2019年）旨在‘提高测量和评估能力，以便了解大气干预技术对地球气候的影响，包括优先考虑干预平流层和云层气溶胶过程产生的影响’（ACIRA，2019年）。这项法案旨在提高人们对平流层化学，以及SAI和MCB的潜在影响和风险的认知。重要的是，它还将授予NOAA监督的权力，以此来审查和上报美国其他研究团体提出的SAI和MCB实验。

目前还没有开展包括小规模部署在内的实地试验。然而，华盛顿大学开展的海洋云增亮项目是这方面的一项前沿研究活动，并且已经制定了研究计划（Wood，2018年）来帮助应对一些仍未解决的挑战，包括：MCB实地试验，从而更好地洞察“云层–气溶胶相互作用以及MCB对云物理学的影响；如何以生态良性的方式产生、输送及观察微粒；研究地区性气候影响。目前，在澳大利亚政府的资助下（BRF，2018年），科

学家们正在局部范围内研究干预措施，目的是减少导致大堡礁部分地区珊瑚白化的季节性升温。这一措施有望造福于与大堡礁相关的旅游业。

社会政治考量

目前并没有成熟的市场或理论上的市场来推动部署。基础设施（部署的运输设备）目前也没建成。尽管英国的一项研究表明，MCB的可控性可能会降低公众对技术治理的担忧，但公众对MCB的认知和可能出现的反应还不确定（Bellamy等人，2017年）。鉴于可能存在的问题，以及公众参与技术变革的已知价值，已经有人呼吁了解公众对大堡礁采用MCB技术的看法（McDonald等人，2019年）。

治理

MCB需要治理，不仅是因为它能够人为影响地球气候，以及所有的地球生物，还因为它可能影响其它系统，如海洋、气候、农业、局部水循环和生物生产力（Shepherd，2009年），对各国与地区造成不同的正面和负面影响。因此，实施MCB可能带来地缘政治紧张局势以及相关安全治理方面的挑战（有关MCB和SAI地缘政治和安全问题的讨论，请参见第二节）。此外，终止冲击有可能引发其它决策、监控和验证治理问题（Kosgui，2011年）。研究治理以及从研究升级到实地试验和部署的问题与这些影响息息相关（SRMGI，2011年，Parker，2014年）。

假设采用海水喷洒法部署，《联合国海洋法公约》(UNCLOS)、《伦敦公约》和《伦敦议定书》(LC/LP)有关防止海洋环境污染的条款不会制约这些技术的实施。除非，正如海洋环境保护科学问题联合专家组（GESAMP, 2018年）发布报告的第24节提到的那样，根据《伦敦议定书》，假如海洋表面的盐粒沉积被视为 ‘废物或其它物质’的沉积。否则，各国通常可以在公海上自行实施MCB技术，只要这样做时“适当顾及了”其它国家的利益。但如果使用其它微粒，那些想要开展实地试验并大规模部署的科学家就要受到《伦敦公约》和《伦敦议定书》的制约。监控实施效果将涉及治理问题，而如何监控MCB（实施及效果）尚未得到解决。

平流层气溶胶注入 (SAI)

原理

SAI希望通过增加平流层下部的反射气溶胶微粒数量，降低全球平均气温。气溶胶是悬浮在大气（或另一种气体）中的微小固体微粒和液体颗粒，自然界中的气溶胶包括雾和尘埃。已有证据显示了这些微粒在自然环境中的影响。例如，1991年，菲律宾的皮纳图博火山(Mount Pinatubo)爆发，向平流层排放了约2000万吨二氧化硫。皮纳图博火山引发的硫酸盐微粒增加了全球反照率，将大量的太阳能反射回太空，致使全球气温在随后两年平均下降0.5 ˚C，之后温度又回升到与当时温室气体浓度相匹配的水平。

SAI将在海平面以上7至15公里的平流层注入气溶胶（Labitzke和Van Loon，2012年）。平流层是大气中一个相对稳定的区域，垂直混合少于水平混合的气态成份混合，这意味着气溶胶微粒可以留在平流层，在数年的时间里将太阳辐射反射回太空（Keith，2013年）。如果在对流层人为注入气溶胶（大气层的下方），微粒很快会陷入大气旋流中，并在几周内回落到地面。预计SAI将几乎立刻、直接带来降温效果，并有可能在一年内实现全球范围的降温（Keith，2013年）。

技术与成熟度

气溶胶输送机制尚未解决，尽管飞机输送有望成为最可行、最经济的方法（Robock等人，2009年，Keith，2013年，Stilgoe，2015年）。考虑到平流层气溶胶的降温能力似乎随着海拔高度而增加（Krishnamohan等人，2019年），要想充分生效，飞机需要在约20,000米的高度飞行，并配备喷洒装置来输送微粒（Keith，2013年）。喷射出理想大小的气溶胶的喷嘴是可行的，但目前尚未开发或测试（参见下方研究活动）。虽然飞机可以在20,000米的高度飞行，但目前还不能在这个高度携重物长时间飞行（Smith和Wagner，2018年）。

两个关键因素让人们对SAI产生兴趣：它能快速生效，并且降温效率高、直接部署成本低。理论上，SAI有望对人为碳气候强迫造成非常大的影响力。有人认为，平流层中的1公斤硫可以抵消几十万公斤二氧化碳造成的暖化效应。Keith（2013年）计算出，通过每年注入100万吨气溶胶，人类活动自工业革命以来排放的2400亿吨碳所产生的额外辐射强迫可以减少一半。如果安排20架飞机，尽管它们可以输送足够的辐射强迫来产生可检测到的气候降温（Keith，2013年），但因为微粒会随着时间的推移（估计三年）而脱离平流层，因此它们需要不断更换，从此保持降温幅度。更大规模的效果则需要更复杂的飞机方案，但这些方案也许可以通过改造现有的飞机技术来实现。因为只需少量的材料就能带来可检测到的效果，因此人们担心，从小型项目升级到可能改变气候的研究，如何来控制未来的实地试验规模。下面的研究治理章节将进一步讨论。

理论上相对容易实施，加上气溶胶的辐射效率，表明SAI的直接成本可能低于减排成

本（Brahic，2009年）。评估表明，SAI可以利用飞机输送，每年花费不到100亿美元，从而抵消2 Wm^{-2} 辐射强迫（Stavins和Stowe，2019年）。相比之下，CO_2浓度从工业化前的水平提高一倍，达到550ppm，则辐射强迫约为3.7 $W\ m^{-2}$，全球平均升温约3°C（范围为2.0至4.5°C）（IPCC，2007年）。

英国皇家学会的一份评估报告估计，其它一些影响气候技术的成本比实施SAI的成本高约1000倍左右（Shepherd，2009年）。然而，MacKerron（2014年）让人们关注间接经济成本相对直接成本估算的重要性——将SAI和核工业相并。最初人们预计核工业能提供“便宜到无法估算”的能源（Strauss，1954年），但现在却需要国家补贴来维持。例如，许多SAI成本估算不包括补偿“输家”计划等间接成本，也不包括SRM导致的社会或国际冲突所产生的成本（见下文）。更综合的成本评估表明，SAI能够将全球变暖的速度降低一半（辐射强迫减少0.25 Wm^{-2}）的花费是每年22.5亿美元，在此之前，还需投资在基础设施上，包括飞机研究和设计，约为35亿美元（Smith和Wagner， 2018年）。

潜在风险和关键未知因素

选择哪种微粒这一问题尚未得到解决。微粒大小十分重要，因为气溶胶需要尽可能地“反射”，并且应该尽可能地待在原处、保持稳定（Rasch等人，2008年）。微粒越大（大于0.2微米），在一定数量的情况下，它们散射光的效率就越低（Keith，2013年）。大微粒还会凝结、聚集，并且比小微粒增大的速度快，因此比小微粒更快地脱离平流层。

硫酸盐是几种候选微粒之一，引入硫酸盐不会对大气化学成分造成不寻常的变化，因为自然环境中，硫酸盐一直被排放到大气中。例如，大气尘埃、火山喷发和来自海洋、陆地、化学和工业源的排放都含有硫酸盐（Keith，2013年）。硫酸盐已经在大气中发生相互作用，科学家也对此开展了相关研究。例如，Eyring等人称（2010年），海上运输所排放的硫酸盐有降温效果，而且全球平均温度可能比没有海上运输时低0.25 ˚C。这些观点在评估硫酸盐优于其它微粒的论据中起到了重要作用（Shepherd，2009年，Stilgoe，2015年）。

人们对其它可能的SAI气溶胶在大气中的行为和相互作用了解较少。美国宇航局开展了多项研究，以便了解航天飞机的火箭羽流（包括氧化铝的数量）可能会对臭氧产生怎样的影响，但人们对氧化铝如何影响平流层的了解并不全面（Ross和Sheaffer，2014年）。氧化铝在天然矿物粉尘中很常见，为未来研究其影响提供了数据源（Lawrence和Neff，2009年）。此外，从氧化铝作为工业材料的用途来看，人们对它的了解更广泛（Weisenstein等人，2015年）。虽然有证据表明金刚石纳米颗粒对生物系统无毒害（Schrand等人，2007年），但Keith等人（2016年）提出将金刚石纳米颗粒用于SAI的证据基础并不完善。

SAI可能会导致臭氧损失被视为实施SAI的一个重要风险（Morton，2015年 Robock，2018年）。臭氧保护地球上所有的生物免受有害的紫外线辐射（GES-DISC，2016年）。平流层中气溶胶的变化会影响化学反应，减少平流层中臭氧的浓度（Tilmes和Mills，2014年）。1991年皮纳图博火山爆发后，科学家们测量到了这种

影响（McCormick，1995年），这个例子表明了现有知识可对SAI的理解提供信息。由于臭氧层还处在被人造氯氟烃(CFCs)破坏后的恢复中，研究表明，在2050年之前，任何会对臭氧气柱总量造成的新压力，尤其是在高纬度和中纬度地区，将导致地表的紫外线光大幅增加（Heckendorn等人，2009年），并且南极臭氧空洞的恢复期可能被延长至少40年（Tilmes和Mills，2014年）。

某些潜在SAI微粒可能会增强臭氧层。氧化铝是一种固体气溶胶，它本身不会增加水硫酸的体积，水硫酸会促进硫酸盐的反应，后者可导致臭氧耗损（Keith，2013年）。然而，它们确实可引入新的风险，可能包括作为催化剂引起可能破坏臭氧的反应（Keith等人，2016年）。

一些候选气溶胶可能会造成危害，因为它们从平流层落至对流层，会形成酸雨或空气污染，影响陆地环境（Keith，2013年）。由此导致的死亡或患病人数尚不确定，因为“坠落”会分散在全球不同地方，包括偏远的无人区。然而，Keith（2013年）认为，死亡率将明显低于与人为气候变化相关的死亡人数，气候变化导致的死亡可以通过SAI引发的降温来避免。

目前还不确定气候对SAI可能造成的大规模辐射强迫有怎样的反应。气候模型表明，理论上理想的SAI化合物可以非常有效地缓解模型模拟的全球变暖（Kravitz等人，2014年）。然而，可以想象，风险可能包括水分和大气的动态传输变化加快，从而影响天气系统和重要的当地气候现象，如季风降雨和生态系统功能（Keith等人，2016年，Mercado等人，2009年）。Simpson等人（2019年）提出，如果在温室气体浓度较高的情景下实施，亚马逊河流域、非洲部分地区和印度可能会出现严重的干旱，严重危害生态系统和农作物产量。在温室气体浓度较高的情景下，SAI也可能改变高纬度地区的季节周期，导致冬季变暖、夏季变冷（Jiang等人，2019年），这可能对环境和其它方面产生重要影响。

与MCB一样，SAI可能存在终止冲击。虽然由于气溶胶留在原地的时间长于增亮云，停止SAI引发的辐射强迫变化速度预计会低于MCB，但是考虑到全球气候回暖所需要时间，终止冲击的速度可能不会明显不同。

如果实施SAI的规模足够大，可能会改变天空的外观。天空晴朗无云时特有的蓝色可能不再看到。相反，天空可能会看上去笼罩着一层高空薄雾或云层（Kravitz等人，2012年）。尽管漫射光可以促进农作物等植物（包括作物）生长得更快，但它对人类和其它生物的情感和心理影响还是未知。

与MCB一样，有人建议在北极实施SAI。建模表明，SAI有望快速减少极地放大效应，减缓冰川融化，并降低全球变暖（Nalam等人，2017年）。然而，它也可能产生与MCB类似的副作用，包括产生的热量从地区以南进入北极，这可能抵消实施SAI产生的一些影响（Tilmes等人，2014年）。此外，建模显示，除非在南半球实施同等规模的SAI技术（Nalam等人，2018年），否则在北极实施SAI可能会导致热带辐合带向南移动，给该地区的气候包括季风带来负面影响（Nalam等人，2017年）。

当前研究活动

迄今为止，所有的SAI研究都是理论上的（Berdahl等人，2014年，Irvine 等人，2009年），要么根据气候模型研究气候影响或有潜力的工程手段，尤其是试图更好地了解治理问题（Horton等人，2018年，Macnaghten和Owen ，2011年，Stavins和Stowe，2019年，Rouse ，2018年），要么研究公众对该技术的看法（Bellamy等人，2012年，Stilgoe，2015年）。这些领域的工作还在继续并分布在全球不同的地方（尽管该领域的大多数学者都在美国和欧洲工作）。

如上所述，2019年12月，美国政府批准了400万美元的资金用于NOAA的研究，其中包括SAI研究（Temple，2019年）。此外，提交的大气气候干预研究法案（ACIRA，2019）如果获得通过，将为SAI研究提供资金，并授予NOAA对美国SAI实验的审查和上报监督权，这可能是一项重要的进展。

目前，大多数SAI物理科学研究都侧重于SAI实验的建模，其中许多是通过“地球工程模型互比项目”（GeoMIP，2020年）进行的，该项目是世界气候研究计划（Tilmes等人，2015年）的一个社会协作项目。第一个在实验室外的SAI实验目前正在进行中。平流层控制扰动实验(ScoPEx)于2017年3月24日对外公布（Temple，2017年），旨在进一步了解平流层气溶胶与SAI可能的关系（ScoPEx，2019年）。该项目将使用一个可控气球，将仪器装置输送到平流层，在那里它将释放0.1-2公斤的碳酸钙，也可能还有硫酸盐，形成一个长1千米，宽 100米的扰动空气团。该仪器装置随后将测量扰动空气的变化，包括化学变化、气溶胶密度以及光的散射方式（ScoPEx，2019年）。该项目由哈佛大学获得的慈善捐款资助。项目旨在进一步了解SAI的潜在功效及风险。这些发现有望提高模型的能力，以便更好地预测大规模实施将如何破坏平流层臭氧（ScoPEx，2019年）。作为项目内部治理的一部分，一个专家咨询委员会已经成立，以便了解和识别进行相关研究会产生怎样的社会和政治影响。该项目预计在2020年测试高空气球和仪器装置，没有有效载荷。

鉴于上面描述的不确定性，进一步的研究可能有助于更好地了解在北极和其它地区实施SAI如何影响地球上其它地区的气候。

与SAI相关的潜在负面健康影响（Effiong和Neitzel，2016年）表明，进一步的SAI研究应该寻求更好地了解暴露于有潜力的硫酸盐和其它物质的毒性特性会造成哪些后果，并对其进行评估。

社会政治考量

虽然研究的数量有限，但公众普遍并不赞同SAI。例如，这些研究表明，公众可能最关心的是无法确定实施造成的影响，产生有害后果的可能性，以及这些后果可能意味着什么。研究也表明，公众认为SRM，尤其是SAI，是非常强大的技术，具有深远的影响力，而科学家们正在“扮演上帝”的角色（Macnaghten和 Szerszynski，2013年，Pidgeon等人，2012年，Merk等人，2015年，Braun等人，2018年）。

SAI的一些研究人员已经意识到，当他们致力于开发控制气候的方法时，他们已经缺少谦卑的心态，或者被认为缺乏谦卑心态。Keith（2013年）已经意识到，这种远大

目标可能会被视为自大。有人认为，研究人员已经意识到公众对于其它有争议的研究领域（如纳米技术和合成生物学）的接受度，并建议对相关技术的开发持谨慎态度（Sarewitz，2010年）。

迄今为止，很少有非专业人士参与有关SRM未来发展的讨论。例如，在影响气候技术文献中，土著人被广泛地视为一个重要的受影响群体，如在北极。然而，一些人指出，在关于SRM未来发展的讨论中，土著人的身影尚未出现（Buck，2018年）。更普遍的是，很少有研究‘试图了解这些群体可能怀有的担忧，以及这些担忧会如何影响道德和政策讨论’（Carr和Preston，2017年）。但是，让公众及政策制定人“快速、深入地了解SRM是什么，其潜在益处和风险是什么，以及科学家们为什么研究这些有潜力的技术，能够解决参与SAI讨论的群体有限以及对相关知识了解有限（Pidgeon等人，2012)的问题（Wagner和Zizzamia，2019年）。

至于谁会选择实施SAI，谁会为其买单，以及实施可能带来的任何损失或伤害，都存在不确定性（Reynolds，2019年）。人们认为SRM未必是个直接的人道主义项目，但正如Buck（2012年）所建议的，它可以被用来满足广泛的利益。慈善家参与资助研究，以及关于公共资助的讨论，引发了关于如何或是否应该推动研发的重要问题（Nisbet，2019年），关于哪些利益可能与SRM一致或相反的讨论正在进行中。有些人担心，气候怀疑论者可能迅速从气候否定立场转变为SRM支持立场（Morton，2015年），一些被认为花巨资来避免或推迟减缓的团体，可能会选择推动SRM发展，以此来实现或保护他们的商业模式（McLaren，2016年）。

最近对多个自由意志主义智库的一项调查显示，尽管很多智库仍然不了解SRM，但大多数声明立场的智库支持将资助SRM研究作为减缓的替代方案（Collomb，2019年）。在一份详细的声明中，致力于鼓励政府采取行动应对气候变化的全球最大民间社会组织国际气候行动网络(CAN)一致建议将适应和减缓作为支持SRM的一线解决方案。鉴于相关的风险，国际气候行动网络也强烈反对开展户外SRM实验和实施（CAN，2019年）。

民间有一个名为Chemtrailers的松散团体，他们认为，大规模的天气和气候调节计划或人口控制计划将一种未知的化学物质通过飞机喷洒进大气中，留下的踪迹形成了飞机尾迹（Cairns，2014年）。这个群体认为这些想法与SAI密切相关。虽然这是一个边缘现象，但2017年，合作国会选举研究表明，10%的美国人确信‘化学凝结尾(chemtrail)阴谋论完全正确’，另有20-30%的人认为该理论‘在一定程度上正确’（Tingley和Wagner，2017年）。这个例子说明在信任、政治和沟通方面存在着广泛问题，并说明了理论技术是如何不可避免地融入到复杂的社会及国际环境，而在该条件下融入将来可能对SRM的全面治理具有挑战。

治理

SAI需要治理，不仅是因为它能够人为影响地球气候的能力，还因为它可能影响其它系统，如海洋、气候、农业、局部水循环、平流层臭氧、对流层高海拔云层和生物产量（Shepherd，2009年），以及社会体系、结构和根深蒂固的价值观。鉴于这些影响可能对各国与地区造成不同的正面和负面影响，实施SAI可能会带来地缘政治和相

关安全治理方面的挑战。有人提出，这些挑战可能包括第二节所讨论的冲突风险。已知和未知的人类、社会和经济影响使治理问题更复杂。已知和未知的人类、社会和经济影响使治理问题更复杂。此外，可能出现的终止冲击，道德风险或者减缓阻碍也引发了决策、监控和验证等重要问题（Kosgui，2011年）。与这些影响息息相关是如何治理SAI研究的问题，因为SAI研究从建模和实验室可发展到户外实验（SRMGI，2011年；Parker，2014年）。

鉴于SAI伴随着风险、利益、公平与不确定性等问题，具有政治和经济复杂性，并可能对不同地区造成不同的环境影响，因此有人建议（Stilgoe，2015年，Macnaghten和Owen，2011年，Buck，2019年），民众对于如何发展SAI的意见应该以合作的形式尽早被纳入治理考虑过程中。

事实证明，民众参与能改进创新过程（Genus和Stirling，2018年），在SAI方面，有人提出，在技术和方法如何影响国际社会和地区气候变化的脆弱性和弹性方面，民众参与将产生新的认识（Buck，2018年）。因此，正如向美国政府建议的那样（Parthasarathy等人，2010年），让民众参与所有规划发展应该被视为这一过程的关键部分。

气候工程之平流层微粒注入(SPICE)研究项目是一个有用的案例研究，展现了出乎意料的公众对SAI的反应，以及SAI研究治理的不确定性和复杂性。媒体持负面态度大肆报道了该项目（Cooper，2011年；Ruz，2011年；Monbiot，2011年；Daily Mail，2011年），项目的部分进度被推迟六个月，以便与利益相关者进一步讨论。在宣布推迟项目的当天，英国能源和气候变化大臣收到了一份请愿书（ETC，2011年），请愿书称，鉴于项目引发的担忧，并且项目可能与CBD，UNFCCC和联合国可持续发展大会存在利益冲突，因此呼吁暂停这个项目。经过协商，资助者决定进一步推迟项目的部分进度，以便让项目团队进行更广泛的研究工作（Macnaghten和Owen，2011年）。

表2- MCB和SAI的优势、劣势与风险概述

优势	劣势	风险
潜在效果强大，预计能实现全球降温	尽管研究表明，实施在技术上是可行的，但实施机制的细节尚未敲定。	实地试验、部署或部署威胁可能造成不同国家和地区之间的紧张局势（见下文第二节）。
鉴于可能实现的效果，成本较低。	目前尚不清楚如何来治理这两种技术。	如果选择硫酸盐作为优选的SAI活性剂，它们可能会减少大气臭氧。使用海水的MCB技术没有这样的风险。
人们比较了解云层在大气中的作用。虽然对火山喷发的研究确实提供了一些见解，但人们对平流层中气溶胶相互作用的了解较少。	MCB和SAI对气候造成的影响还不确定。例如，降水模式可能发生变化。	随着天气模式的变化，可能会出现大规模的人类迁徙。
虽然需要海上船只和高空部署装置（可能是飞机），但不需要调整全球基础设施或能源供应体系。	需要更多的研究证据来未治理讨论提供信息。	如果部署突然终止，可能导致气温迅速上升的气候终止冲击。
	这两种方法可能都不为社会所接受。	如果这些技术取代了减缓气候变化的措施，海洋酸化将继续有增无减。

经过进一步的讨论，该项目的实验部分最终于2012年5月被完全取消。根据SPICE项目网站的信息（Watson，2012年），这是基于治理和知识产权问题做出的决定。

由于SAI可能造成跨界影响，一定程度的国际监管治理将极为关键，而且目前的一些规定确实对SAI具有约束力（以及本摘要中讨论的其它影响气候的技术）。本摘要第三节探讨了部分可能适用于SAI的规定、非约束性原则或行动守则。在讨论之前，第二节更详细地阐述了SRM的地缘政治和安全相关问题。

第二节—人工改变太阳辐射、地缘政治和安全

介绍

鉴于上一章节技术评估中所识别的风险和不确定性，本章节阐述了地缘政治和安全相关问题，包括军事力量的威胁、使用和控制，治国方略和战略有关的更广泛问题，以及涉及社会、人类和环境安全等更普遍性问题。

气候变化已经引发了全球安全问题，包括因粮食和水资源枯竭以及不断变化的疾病传播媒介和传播范围相关的气候移民造成的紧张局势。气候变化正引发新的风险，而政府、机构和社会却无法预测或控制。这些风险和相关的压力形成‘威胁扩增器’，加剧了已经十分脆弱的局势，进而导致社会动荡和其它暴力冲突（Ruttinger等人，2015年）。例如，气候变化被视为导致叙利亚内战爆发的一个威胁扩增器（Kelley，2015年）。在叙利亚、伊拉克和土耳其，气候引发的水资源短缺导致家畜死亡，抬高了食品价格，并影响了公众健康。结果，150万农村居民移居到叙利亚城市，这些城市已经接纳了大量来自伊拉克战争的移民，造成了严峻的紧张局势（Kelley，2015年）。

SRM部署可能会如何发展，为何会造成紧张局势？

尽管SAI和MCB在理论上能够快速改变气候，但并非任何部署都可能让地球非常快速地降温。例如，SAI要求通过飞机（或其它方式）缓慢、持续地将气溶胶注入平流层（Keith，2013年）。理论上，这需要一个渐进的过程，气溶胶的体积和密度在几个月内增加，然后它们的聚集才开始对温度产生可测量的影响（Morton，2015年）。就MCB，虽然一艘船或几艘船可以快速到位并增亮云层，但要产生可能导致政治紧张局势的气候规模效应，就需要一个庞大的船队（Shepherd，2009年）。MCB有时需要更小的规模来实现局部降温，例如保护濒危的生态系统，如珊瑚礁，或让沿海城市降温。如果这些城市处于有争议或局势紧张的地区，即使这种降温对各方都有利，在没有警告或沟通的情况下，单方面部署可能会触发紧张局势。

实施SRM与其它应对气候变化措施的顺序并不确定。例如，实施SRM可能在所有减排努力实施之后才会开始。SRM可能被部署来降温，形成一个过渡时期，等到二氧化碳移除的力度（在技术和规模方面）加大直到影响到气候。这时，SRM可以减弱，因为碳移除已经在起作用。也有可能出现另一个不同的场景，例如，实施SRM可能会与减排同时进行。在这种情况下，二氧化碳移除技术将被引入，并逐渐加大，当它们的规模对气候产生影响时，SRM将逐渐减少。其它建议包括将SRM作为“应急”工具，在危机时刻提供降温。每个场景都构成了一系列不同的治理挑战。例如：谁以及基于何种证据，来判断减排和二氧化碳移除措施已失败，应及时部署SRM；或如何监控和验证二氧化碳移除措施，以及谁来授权评估SRM，并决定何时部署SRM或减弱部署力度。在当前的治理环境中，如何解决这一复杂问题并不确定。例如，谁来主持有关部署设想技术的顺序的讨论，以及权力从何而来？

任何大规模的SRM实施对温度的影响都是渐进的，从安全角度看这十分有用。安全错误（包括冲突）经常在人们的信息和情报不足，又需要紧急响应时出现，典型的情况

就是快速做出战略决策的过程中可能会出现错误和误判（Chalecki和Ferrari，2018年）。

然而，有关SRM和气候变化的全球政治格局不仅复杂，还有不确定性。就SRM而言，既没有得到经过实践检验的治理框架支持（Reynolds，2019年），人们也没有对技术的目的或功能形成统一的认知。各国在气候、发展、安全以及其它相互关联、广泛的目标方面的优先选择和展望已经截然不同。在这种背景下，人们对SRM的认识可能极为不同，认为它未必是阻止危险的全球气候变化的必要紧急措施。例如，它可能被视为在北极新近地获取资源的威胁；殖民主义的延续或延伸；或继续甚至扩大现有的基于化石燃料和开采的经济。

此外，如果SRM确实能够影响气候，无论是真实的还是设想的，对各国和地区预期带来好处（或避免问题）的理由可能很充分，也有可能造成更多的紧张局势和争议（Parker等人，2018年）。如果能够通过SRM实现降温，国际社会需要对希望共同创造何种气候做出决定。适宜的温度是多少，成本是多少，在什么基础上达成一致？换句话说，‘谁来设置全球或局部的恒温器？’在这一决策过程中，战略和地缘政治过程可能是什么？最普遍的行动逻辑是什么？

有些国家可能喜欢比其它国家更低的温度，接受不同类型或级别的风险，或采用不同的整体框架——权力关系将是如何解决这些问题的关键（Schellnhuber，2011年）。科学家应该在其中扮演什么角色？他们是要成为气候保护的国际警察，还是在一个更大规模的过程中充当顾问，而他们的证据只是被当作无关重轻的杂音？实力强大的地区或国家会愿意就共享或放弃对恒温器的控制展开讨论吗？实力较弱的国家会默许这种做法吗？或者，我们应该像Macnaghten（2013年）建议的那样，就地球的未来设想，寻求一个真正多元的全球对话吗？如果是这样，如何运作，谁将最终做出决定并承担责任？

在什么情况下，谁可能选部署SRM，这些都不清楚（Barrett，2014年），国际体系的未来可能出现合并、持续或滑向无序等特点。不同选择场景下产生的问题变化无常。如果全球就部署达成共识，这一共识是基于多方讨论通过并就是否部署SRM、在何处部署、成本、持续时间和目标达成一致，并且设置一个严格、合法的监控与验证计划，安全紧张局势可能就微不足道。否则，单方面（局部）实施SRM，没有国际协商，也没有明确的目标和目的，国际社会可能会做出负面反应（Barrett，2014年）。

SRM的不均衡影响

部署可能会改善一些国家的气候，但会恶化另一些国家的气候（Robock等人，2009年）。关于在不同部署情景中可能发生的不均衡影响，目前还没有足够的证据来提出有力见解，这可能需要进一步的研究。如果部署后，出现负面的不均衡影响，出现损害或损失，应该如何补偿。如果确实可以做出补偿，在哪个管辖区由谁补偿，这些还没有在政策层面中讨论，但科学家已经在一些学术文献中进行了探讨，如Parker等人（2018年），以及Chelecki与Ferrari（2018年）。归因让这个问题更加复杂。目前，尽管科学技术正在快速发展，但气候建模还不够灵敏到有信心地将近期极端气候

事件归咎于人为温室气体排放（Pielke，2019年）。

目前就更没有能力、甚至是一种理论方法，来确定部署SRM后发生的一个极端事件或一系列事件是否由部署SRM或SRM试图解决的气候变化引起的，又或者这些是正常的有破坏性的天气事件。别说无归因能力，即使有这种能力，在实施SRM后经历极端事件的情况下，一个国家或地区或其公民可能会认为这些事件与实施直接相关，并将所有伤害和损失归罪于那些负责实施SRM的人（Chalecki，2018年）。如果在政治局势已经紧张的国家或地区之间出现这种情况，其影响可能是重大的。例如，如果两个具有核武器能力并处于高度紧张状态的邻国出现这种情况，紧张局势的升级可能具有极大的破坏性。

缺少终止部署的权力

目前，并没有已实施的治理机制，包括适合或能够提供SRM框架的监管框架或国际法（Reynolds，2019年）。因此，没有任何法律约束能够阻止任何国家（或其他行为者）选择部署MCB或SAI。虽然国际社会可能会修订或落实一系列法规和国际机制，以便提供一个框架，但目前尚未开始这些工作（第三节进一步阐述了这些法规和机制）。

一个全球有效、透明、问责型的治理体系，或是一个多中心、拼凑型的法规和措施模式，是否最适合SRM，仍有争议（Nicholson，2018年；Redgwell， 2011年，Armeni和Redgwell，2015年）。本摘要并没有详细探讨这些问题，但可能有助于指出一些尚未回答的关键问题。这些问题包括：如何能够或应该达成一个由多个政府、国际组织、民间社会组织、环境和反对团体及其他相关人士支持的全球共识吗？（Macnaghten和Owen，2011年）；对可产生全球范围影响的一个干预措施，如何能够或应该建立一个全球、透明和问责型的可操作的治理体系，以便民间组织充分参与，所有行为者以民主的方式自由参与（Bellamy等人，2012年）。

单方面部署SRM

目前并没有治理机制能够阻止坚决要部署SRM的人员，这引起了人们对单方面部署的担忧。虽然地缘政治力量和(或)经济实力有限的小国可能因制裁或甚至军事干预的威胁而取消部署，但强国或团结一致的国家联盟可能不那么容易被阻止。如果SAI或MCB在技术上可行，那么单方面、不受管制的部署，就可能对全球安全构成严重威胁。

一些研究SRM部署理论的科学家认为，单方面实施不太可能（Parson和Ernst，2013年）。他们认为，单方面实施需要的物理和技术力量比许多国家（除了规模最大、实力最强的国家）可能具备的能力更强。此外，Horton（2011年）认为，在一个全球化的世界中，通常地缘政治的相互依赖、相互依靠和合作需求会削弱一个国家单独行动并部署SRM的意愿。然而，其他人认为，大国、强国和小国联盟，包括受海平面上升等气候变化影响最大的国家，可能有能力和动机采取行动（Ricke等人，2010年；Chalecki和Ferrari，2018年）。

Parker等人（2018年）认为，鉴于目前几乎没有治理机制，并且超级大国拥有更广

泛的政治和经济权力，因此超级大国有可能单独部署SRM，并且无人可阻挡，至少在最初是这样。这样的行动可能会引起争议，并产生新的地缘政治问题。如果这个国家确实部署了SRM，并且由于实施而造成或被认为是由于部署造成重大的损害和损失，则可能由于人们对之间因果关系的直觉而造成地缘政治危机，不论这种直觉是否正确。除非事先形成有效的SRM治理机制，否则国际社会如何解决这个问题尚不得知。Barrett（2019年）曾提出，如果一个国家考虑部署SRM，那么任何阻止性条约都不会有效，因为那些可能考虑单方面部署的国家也不太可能签署这样的条约。

对于“自愿联盟”的小国，虽然不是真正意义上的单方力量，但他们组成了Parker等人（2018年）声称的“微单边”，这样的势力更能抵抗单独一个国家可能承受的压力。人们可能会认为这样的联盟行动与一个小国实施SRM的不合法性差不多，造成类似于超级大国单方面实施SRM会引发的国际紧张局势。如果形成了一个微单边群体，有人称，（Lloyd和Oppenheimer，2014年）这样的群体可能会吸引其它国家，并发展成更合法、更强大的势力。

SRM引发“自由司机”问题

SRM引发了一个新的集体行动问题，这与传统上被视为公共利益的气候变化缓解措施不同。一个国家的减缓活动所带来的效益不具有竞争性和排他性，因为当一个国家为减缓活动付出经济成本和其它成本的同时，全世界都能享受到减排产生的环境好处。这就产生了一个‘搭便车’问题（Stavins等人，2014年），一个国家有动机依靠其它国家的减缓，自己却选择不采取类似的减缓措施。然而，SRM会引发Weitzman（2015年）声称的“自由司机”问题。

由于SRM的效益-成本比很大，部署国或“SRM集体”可以选择部署SRM的方式，以便最适应他们自己感知的气候需求，他们将反过来决定世界上所有其它国家的降温水平。自由司机问题十分重要，因为新创造的气候对部署方（无论是联盟还是单个国家）来说很理想，对其它国家来说可能不适宜，新建气候的过程可能会违反常见的程序公正标准。例如，一些国家目前正受益于气候变化，更倾向维持这些好处。另一方面，实施SRM可能导致或威胁导致未部署国家的气候发生变化，其中可能包括降水变化，从而导致水资源或粮食生产问题。

SRM的‘自由司机’特性让人们十分关注这种全球颠覆性技术所带来的挑战上。在当前的开发阶段，如果没有治理协商，分散、无治理的地缘政治环境将依然存在。部署SRM对单个国家或联盟的好处可能在政治层面上太有吸引力，以至于无法阻止部署决定（Parker等人，2018年）。如果这些国家正经历与气候变化相关的频繁极端天气事件，或正面临来自公民或盟友施加的应对气候变化的政治压力，或他们所在国家或地区的其它政治压力，这种情况就可能发生。在这种政治环境下，包括小国在内的国家可能不愿寻求多边协议，并部署SRM。在这种情况下，国际社会几乎无法或根本无法阻止部署，除非进行军事干预，而军事干预本身可能是非法的（见下文的冲突和战争）。Barrett等人和Gertner（2014年和2017年）提出，反部署可能是替代军事干预的一种选择。

反部署

Parker等人（2018年）将反部署定义为’使用技术手段来抵消部署SRM导致的辐射强迫变化’。这一定义表明，一个国家或多个国家可能会威胁着抵消其它国家部署SRM的降温效果，要么一开始就阻止部署，要么逆转或减缓任何实际部署引发的效果。使用什么技术手段可以做到这一点并不确定，目前也没有这方面的研究工作。然而，可以想像的是，他们可能使用暖化剂（如大规模释放温室气体，或者故意停止减缓措施），或利用物理中断寻求中和效应（如移除或利用化学手段改变已喷洒的气溶胶，或使用非常大的云凝结核改变增亮云的特点）。第三个选择是对实施基础设施采取直接军事行动，这一措施可被视为战争行为。

反实施措施的结果具有高度不确定性（Parker等人，2018年）。例如，它们是会导致新型的气候冲突，亦或是导致部署和反部署之间的‘军事竞赛’不断加快？反部署能力可能是一种有用的政策工具，既与SRM控制有关，在全球政治进程中也更广泛，而使用反部署措施的威胁可能是一种威慑。未来谁应该或可能控制任何反部署措施的使用，是感到受威胁的个别国家，还是受条约或协定支持的国际气候服务组织？

武器化和军事利益

纵观历史，军方对人工影响天气的技术一直感兴趣，例如，在越战期间，大力水手行动(Operation Popeye)试图通过影响降雨模式，来破坏运输和通信能力。Briggs（2013年）认为，SAI的‘低可控性’和靶向性不高，再加上SRM引发的争议，让其作为一种军事武器，没有吸引力。不过，如果未来部署SRM，可能会由军方利用军事基础设施进行。因此，SRM可能成为更广泛的国际战略和地缘政治利益的一部分（Nightingale和Cairns，2014年）。即使在没有恶意或战略意图的情况下实施SRM，SRM也会被诸多困难所困扰。作为全球气候所依赖的一个潜在的超级关键基础设施的一部分（考虑到终止威胁问题），SRM可能成为安全措施的目标，避免其遭受反对团体、生态破坏分子、恐怖分子、国家行动或自然灾害的影响。SRM与安全机构和行动者之间的联系可能会因形势发展而加强。

冲突和战争

如果SRM由单方或一些国家联盟部署，它会导致或被认为造成大规模的环境破坏，如对季风造成负面后果，影响数百万人。没有任何法律规定可以针对那些造成伤害的部署实行合法的军事行动（Chalecki和Ferrari，2018年）。

根据正义战争的原则，任何报复的合法性都值得怀疑。虽然国家有权利捍卫自己的主权，但目前国家的生态主权权利存在不确定性，个体国家的主权受到一些限制，这些限制源于避免损害他国主权的义务。此外，虽然在一个极端的情况下，SRM可能带来战争一样的环境破坏，即使没有《日内瓦协议》条款中规定的战争事件，这也可能发生，与当前‘法律战争’原则相矛盾（Chalecki和Ferrari，2018年）。用安全部队进行的任何报复都很难在法律上证明正当性，并且需要对正义战争的基本原则作出新的解释，如正义理由、正当目的、合法权威、成功的可能性、相称性、非战斗人员、最后手段和相对正义。在SRM造成伤害的情况下，这些都不能通过冲突的正常理解来解

决（Chalecki和Ferrari，2018年）。例如，谁是非战斗人员，如何实现相对正义？然而，法律规范和创新以意想不到的方式出现，通常是因戏剧性事件产生，例如9/11恐怖袭击之后发生的事件。因此，国际社会可以根据对SRM的威胁或实际军事反应，迅速表明一个法律立场。

终止冲击

如上所述，MCB和SAI都存在潜在终止冲击风险（Jones等人，2013年）。气候建模表明，如果快速终止任何一种SRM方法的部署，全球温度将‘反弹’，全球气候快速变暖。气候快速变暖可能会对天气、降水模式以及极端事件的数量和规模等产生重大影响（Jones等人，2013年）。此外，生物多样性也会受到影响，物种虽然能适应缓慢的气候变化，但快速变化会对物种造成严重胁迫（Shah，2014年）。世界部分地区当下的变暖速度已造成一定影响，而这一变暖速度远远慢于SRM突然终止可能带来的变化（Shah，2014年）。气候和与之相关联的可能的大规模生态系统破坏将给人类带来重大挑战，远远超出迄今为止气候变化带来的考验，并有可能引发重大的地缘政治紧张局势。但是，突然终止是不太可能发生的场景。

如果SRM部署国终止其SRM计划，那么它将遭受其他国家面临的一些后果。如果面临其他国家的严重威胁，SRM部署国可能会考虑快速终止，来抵抗威胁。否则，共同承受的必然变暖和相关损害，以及国际社会可能采取的经济制裁和其它制裁等反制措施，让人们认为部署国选择终止的情况很少（Parker和Irvine，2018年）。然而，如果SRM部署国更富裕，拥有更先进的技术，因此也更能够适应突然温度变化带来的影响，那么其避免终止的倾向可能会有所削弱。尽管如此，如果不止一个国家具有部署SRM能力，那么终止冲击带来的威胁会更小。如果是这样的话，任何一个国家的终止决定都可能被第二个有能力选择部署SRM以稳定气候的国家所抵消。

Baum等人（2013年）提出，给人类带来生存或极端危机的社会全面崩塌（如核战争造成的后果）可能会使幸存者无法维持SRM部署。由此产生的终止冲击可能会给幸存人口带来更大压力，造成‘双重灾难’（ Cairns，2014年）。一个部署SRM的世界对系统性冲击的弹性可能会因此降低。很难想象有一个能够应对这些极端情况的治理系统。

地缘政治定位

如果国家或联盟选择建议或部署威胁来获得战略优势，那么具备SRM能力可能会产生安全风险。例如，地缘政治定位可以用来对北极、喜马拉雅或中东等具有争议的重要地区施加压力，使区域甚至全球范围的国家相互对立（Cairns，2014年）。相对低成本和被认为可能带来强大影响力的SRM方法可能会使其成为传统威胁的替代方案，特别是对于那些无法施展权力的国家，尽管SRM不精确的效果会形成风险。在这些场景下，MCB可能是首选技术，因为它更可控，而SAI不具备这样的特征。例如，能够或被认为能够在中东造成干旱（不论这种说法是否正确）的MCB部署可能会对该地区造成压力，迫使其作出反应，要么满足所有要求，要么以某种形式进行报复。如果没有任何形式的治理框架，就很难看出如何避免或解决这些假设情况。

国家政治

一个国家选择在SRM投入，可能不仅仅是为了应对气候变化，还可能是出于内部政治原因（Morton，2015年）。例如，即使部署似乎并不可行，但SRM也可能被认为是国家权力的一种表现，具有政治吸引力，因为它具有潜在的大规模影响（类似核武器能力）（Corry，2017年）。也许，考虑到MCB和SAI的预期成本，从国家声望来看，投资回报对某些政府而言，可能被认为是物有所值（Symons，2019年）。然后，在投资和发展了国家SRM能力之后，对于某些政府来说，部署压力可能难以忽视（Gardiner，2010年）。这种情况可能会给全球气候治理界带来不确定性。

Lockley（2019年）提出，使用或提出使用SRM可能导致内乱，包括抗议和直接对SRM基础设施和供应链采取行动。这些活动可能会引发多国的联合行动，还可能蔓延成恐怖主义干预。恐怖分子声称“代表”那些遭受SRM部署负面影响的人行事，可能采取包括针对SRM运行、人群密集区、政治人物或地标建筑物的任何行动。Lockley（2019年）还提出，恐怖分子可能会选择破坏SRM基础设施，以抗议其它与SRM或气候变化无关的不公正行为。

道德风险和国际合作减少

Stilgoe（2015年）等人探讨了道德风险问题。SRM的冷却效应可能会为某些利益群体带来一个借口，让他们以当前速度甚至是更快的速度继续使用化石燃料。理论上的建模也可能会导致这样的结果——如果建模研究中识别的SRM前景，使人们认为碳的未来社会成本会降低，进而会削弱近期减排的努力。

国际社会多年来制定与气候变化相关的共识、原则、规则和目标的努力，如《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)，一直是有力的全球外交机制（Depledge，2005年）。虽然他们尚未找到全面的气候变化解决方案，但在地缘政治方面发挥了重要作用，帮助各国团结起来应对共同的挑战，并借此发展了新的信任和关系（Bulkeley，2010年）。Morton（2015年）提出，如果SRM破坏国际气候外交，并且全球社会与二氧化碳的关系以及减碳必要性形成新框架，这些强有力的全球讨论机制可能会被削弱。如果SRM在全球气候谈判中引入更直接的‘扰乱者’，或以其它方式削弱合作和相互理解力度，人们可能认为不需要进行紧急的多边讨论，SRM也可能会引发对气候损害和天气事件的更敌对态度。相反，SRM可能会激发全球气候外交（Keith和Parker，2013年），但通过引入新的分歧原因，更有可能削弱未来保护全球气候或其它环境及相关问题的能力。这样的场景可能会对未来的全球政治产生不确定的潜在影响，不仅是对环境而言，还有更广范围的影响。然而，Morrow（2019年）提出，关于SAI开展任务驱动型研究计划，如设计合理，不仅可以促进对SAI部署影响的了解，还可以促进正义、合法性，并减少出现道德风险情景的可能性。

联合国安全理事会

由于威胁部署或切实部署SRM而在理论上可能产生的各种情景，联合国秘书长和安全理事会可能会参与到治理进程（Jamieson，2013年）。安理会努力维护国际和平与安全的责任是被《联合国宪章》(UN Charter)第七章所承认，该宪章授权安理会‘确

定是否存在和平威胁、破坏和平的行为或侵略行为，并采取军事和非军事行动恢复国际和平与安全’（联合国，2019年）。

作为安理会的职责之一，安理会可根据《联合国宪章》第四十二条，建议调整方法或解决条件，并可以实施制裁或使用武力维护或恢复和平。

自2007年4月安理会首次举行公开讨论，探讨气候变化对国际和平与安全的潜在影响以来，安理会是否是讨论气候变化的合适机构一直存在争议（Chalecki 和 Ferrari，2018年）。尽管安理会于2019年1月举行了公开讨论，探讨了与气候相关灾害对国际和平与安全的影响，但这一问题尚未得到明确解决（联合国，2019年）。安理会做出的任何针对SRM威胁或部署的决定，都可能在联合国体系内造成紧张局势。

联合国秘书长

迄今为止，SRM还未进入到联合国的考虑范畴。例如，为响应法国在2017年要求联合国制定‘全球环境公约’的提议和联合国大会决议(A/RES/72/277)要求，联合国秘书长于2018年发布名为《国际环境法与相关环境法规的空白：达成一项世界环境公约》（联合国秘书长，2018年）的报告，在讨论生物多样性时只略微提及影响气候的技术，根本没有提及SRM。

鉴于目前联合国体系中有限提及SRM，负责维和行动规划、筹备、管理和指导的联合国部门维持和平行动部(DPO)和致力于预防和解决世界各地致命冲突的联合国政治和建设和平事务部(DPPA)不太可能对SRM有了解。当然，到目前为止，两个部门都没有发布任何有关这一问题的材料。因此，很难预测联合国秘书长或安理会将如何应对可用的SRM或引起地缘政治或安全问题或担忧的任何潜在情景。

非国家行动者

当前的SRM成本预估表明，非国家行动者也许也能负担SRM部署（Crutzen，2006年；Smith和Wagner，2018年）。有人认为，大集团、所谓的单独行动的“绿手指”（Victor，2008年）个体，或众筹计划未来也许都能具备部署SRM的能力（Morton，2015年）。这样的部署动机可能是什么，或者国际社会可能如何应对这类群体的部署，以及可能存在的地缘政治影响是什么，目前尚不明确（Horton，2019年）。例如，如果众筹或慈善家赞助的国际激进分子集体自行发射微型气溶胶装置气球，国际社会将如何应对？制造这些气球的部件可轻易获得。如果实现冷却只带来积极影响，或冷却造成重大的环境、政治甚至安全挑战，那么应对措施会是什么呢？如果只有一个国家的激进分子在部署，而另一个不友好的国家正在遭受负面影响，就可能出现更复杂的局面。

第三节–治理工具

介绍

过去十年中，对SRM的治理工具和规定进行了大量的普遍性辩论。其中，旨在产生全球效应的技术，如SAI和MCB，一直是中心议题。本章节重点讨论现行法律和一些适用的关键非约束性原则或行动守则。本章节的目的是强调最重要的规定，而不是对其深入分析。如果希望了解更多，Reynolds（2018年）、Scott（2013年和2015年）和Redgwell（2011年）对影响气候技术相关的国际法进行了深入阐述。简要概述见表3。

表3——针对MCB和SAI的法规适用性

法律规定	当前适用性	
	MCB	SAI
《生物多样性公约》	是	是
《保护臭氧层维也纳公约》和1987年《蒙特利尔议定书》	否	是，只涉及损害臭氧的气溶胶
《环境修改公约》	只有作为军事武器使用的情况下	只有作为军事武器使用的情况下
《远程跨界大气污染公约》	否	否
《联合国海洋法公约》	是	否
《伦敦公约》和1996年《伦敦议定书》	否	否
《联合国气候变化框架公约》	不明确	不明确
2015年《巴黎协定》	可能作为帮助提高透明度和讨论市场机制的规定	可能作为帮助提高透明度和讨论市场机制的规定
经1978年议定书修订的1973年《国际防止船舶造成污染公约》	否	否

《生物多样性公约》

1993年《生物多样性公约》（196个缔约方）有三大目标：

- 保护生物多样性；
- 可持续利用生物多样性；
- 公平、公正地共享由遗传资源产生的惠益。

《生物多样性公约》是直接讨论影响气候技术的少数公约之一。《生物多样性公约》最初的重点是海洋肥化活动，在第九届公约缔约方会议上，通过了IX/16决定，要求缔约方‘确保在有充分的科学依据证明海洋肥化活动的正当性之前，不进行海洋肥化活动，包括评估相关风险，并为这些活动建立透明有效的全球性控制和监管机制，沿海水域的小规模科学研究除外’（生物多样性公约，2008年，第7页）。

2010为保护生物多样性，《生物多样性公约》在第十届缔约方会议上，鼓励缔约方、其他国家政府和相关组织，并要求执行秘书做出决定(X/33(8)(w))，在开展生物多样性和气候变化工作时，任何合适的情况下考虑 ‘除非有充分科学依据证明此类活动的正当性以及对环境和生物多样性的相关风险以及相关社会、经济和文化影响进行合适的考虑，否则不开展可能影响生物多样性的与气候相关的地球工程活动，’（生物

多样性公约，2010年，第五页）。但是，要指出的是，《生物多样性公约》建议不包括在受控环境下进行有助于确定潜在环境影响的小规模科学研究。随后，第11届和第13届缔约方会议重申了这一决定。

虽然《生物多样性公约》的立场很坚定，但它对缔约方没有约束力，美国也不是缔约方之一。使用的措辞很“温和”，只是请缔约方考虑指导意见，而不是要求缔约方遵守，而且只是在《生物多样性公约》生物多样性保护和生物资源可持续利用规定的基础上有所延伸（Reynolds，2018年）。但是《生物多样性公约》提出的预防原则可能是国际法愿意及时采取措施的重要证明。然而，《生物多样性公约》的局限性也着重表明，各项现有议定书和公约只能构成不完整的全球管制基础（Redgwell，2011年），形成重要的治理元素，因为它们分别适用于分别的具体议题和问题，而大规模的SAI运作跨越目前的条约限制。

《保护臭氧层维也纳公约》和1987年《蒙特利尔议定书》

1985年《保护臭氧层维也纳公约》（联合国环境规划署，1985年）和1987年《蒙特利尔议定书》（联合国环境规划署，1987年）（获197个国家（所有联合国成员以及欧盟、Holy See、纽埃岛和库克群岛）批准）旨在防止臭氧层消耗。鉴于注入气溶胶，特别是硫酸盐，可能损害大气臭氧，这两个规定可能都适用于SAI。然而，现阶段尚不清楚臭氧层是否会被SAI破坏或破坏到何种程度（Keith，2018年），因此其适用于SAI的范围还不明确。《蒙特利尔议定书》最近提出要求，准备探索SAI对臭氧层的潜在影响的报告，这可能有助于弄清楚这一问题。

《环境修改公约》(ENMOD)

1977年《环境修改公约》（联合国，1977年）（之前名为1976年《禁止为军事或任何其他敌对目的使用改变环境的技术的公约》）禁止一方为敌对目的故意利用环境改造对付另一方，并且完全禁止使用气象战，美国曾在越战期间采取过这种行动（Hersh，1972年）。除非首先将SAI其用作军事武器，否则预计《环境修改公约》并不适用。虽然SAI有可能被这样使用（Brzoska等人，2012年），但这一般被认为是不可能的（Rayner，2017年）。其次，该公约的影响力有限——只有73个国家签署了该公约，许多非签署国可以自由行动，包括作为联合国安理会常任理事国的法国。

《远程跨界大气污染公约》(CLRTAP)

《远程跨界大气污染公约》（CLRTAP，1979年）于1983年生效，由欧洲监测及评估项目执行，联合国欧洲经济委员会提供指导。该公约涵盖22种污染物，其中大多数是农药和杀虫剂。该公约目前有51个签署国，因此，面临着与《环境修改公约》相同的应用范围难题。此外，硫酸盐或其它可能的SAI气溶胶以及潜在的MCB微粒均未被列为禁用污染物。该公约还将跨边界空气污染定义为‘物理来源完全或部分位于一国管辖区域内，并对另一国管辖区域造成不利影响，其边境距离一般无法区分个别排放源或各类来源混合的空气污染’（CLRTAP，1979年，第2页）。考虑到如果部署了SAI或MCB，就有可能确定微粒来源（尽管人们应该认识到这可能是一项复杂的任务），该公约当前版本可能很难适用。鉴于该公约的目的是防止污染物，这就造成了一个矛

盾，MCB和SAI可能不会造成污染，而且在减轻人为温室气体影响的功能方面可不可能被视为污染物，但尽管没有被列入公约的温室气体本身就被视为污染物。

1972年《伦敦公约》和1996年《伦敦议定书》

《防止倾倒废弃物及其他物质污染海洋公约》又被称为《伦敦公约》，于1972年通过，并于1975年生效。1996年《伦敦议定书》于2006年生效。这两项法规并行起效，《伦敦议定书》通过时，缔约方同意不对《伦敦公约》做出进一步修正。《伦敦议定书》直接处理SRM问题（以及CDR技术），它是在海洋“地球工程”相关辩论不断演变的背景下发展的。关键条款第3.1条，要求缔约方“采取预防性环境保护方法，使环境免遭废弃物或其它物质倾倒”。本条款经附件4修正，包括海洋“地球工程”活动的物质处置。

2007年6月，缔约方首次讨论了影响气候技术的问题。当时有人提议进行海洋肥化试验，在海洋中放置铁微粒，加速浮游生物的生长，从而促进吸收二氧化碳，（Brahic，2007年）。随后在2008年，《伦敦公约》和《伦敦议定书》1(1)决议认定，海洋肥化活动（除了合法的科学研究）违反了两项规定的目标。2010年，缔约方通过了海洋肥化科学研究评估框架(OFAF)（《伦敦公约》和《伦敦议定书》2(2)决议）。虽然这两项决议都不具有法律约束力，但2013年通过了《伦敦议定书》4(8)决议规定的海洋肥化活动修正案。这些修正案不适用于MCB或SAI。然而，对于可能影响气候的技术，缔约方决定修订协议，这表明，如果MCB或SAI导致破坏性物质可能进入海洋，那么缔约方可能愿意行使权力来监管MCB/SAI研究或部署。

《联合国海洋法公约》(UNCLOS)

《联合国海洋法公约》于1982年通过，并于1994年和1995年修正。第12部分‘保护和维护海洋环境’和第13部分‘海洋科学研究’规定适用于MCB活动的相关环境保护义务。关键条款包括：

- 第192条：国家有责任保护和维护海洋环境；
- 第194条：要求各国采取措施，预防、减少和控制海洋环境污染，其中包括温室气体和海洋‘地球工程’活动造成的污染；
- 第195条：禁止将危害物或污染物直接或间接从一个地区转移到另一个地区；
- 第204(2)条：要求各国监测其允许的活动，确定是否可能造成污染；
- 第206条：要求各国评估其活动的潜在影响（如果有理由认为活动可能造成污染/伤害）；
- 第210(6)条：要求遵守《伦敦公约》/《伦敦议定书》的倾倒条款；
- 第240(d)条：要求各国确保在其管辖范围内或公海开展的海洋科学研究符合《联合国海洋法公约》的海洋环境保护规定 ；
- 第257条：给予各国和主管国际组织在专属经济区以外（如全球公域范围内）进行海洋科学研究的权利；
- 第263条：要求各国和主管国际组织负责确保研究的开展符合公约。

第257条和第263条提出了关于下列情况的问题：谁来决定是否为合法科学研究；在设备、资金和信息充足的情况下，谁以及政府使用何种机制来管理科学研究；以及如何才能保持部署和研究的独立性，以符合公约；由谁进行，以及产生何种效果？联合国在《联合国海洋法公约》下协商并达成新的国际协议的意义在于让公约不断改进。一项涉及多个政府的议程正在进行中，有望依据公约，在保护和可持续利用国家管辖范围以外区域海洋生物多样性方面，达成具有法律约束力的国际规定。

《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)

《联合国气候变化框架公约》于1992年通过，为政府间气候变化应对工作提供了一个总体框架。未来，它可能在影响气候技术（如SAI和MCB）的全球治理方面发挥作用。然而，目前尚不清楚作用是什么（如果有的话）。在这方面，公约的三个关键要素是：

- 前言——“申明应当以统筹兼顾的方式把应付气候变化的行动与社会和经济发展协调起来，以免后者受到不利影响，同时充分考虑到发展中国家实现持续经济增长和消除贫困的正当的优先需要”；
- 第2条——“该公约以及缔约方会议可能采用的相关法律规定的最终目标是，根据公约的相关规定，将大气中温室气体的浓度稳定在预防气候系统受到危险的人为干扰的水平上。这一水平应当在足以使生态系统能够自然地适应气候变化、确保粮食生产免受威胁并使经济发展能够可持续进行的时间范围内实现”；
- 第4(1)(d)条——“促进可持续地管理、并酌情维护和加强《蒙特利尔议定书》未予管制的所有温室气体的汇和库，包括生物质、森林和海洋以及其它陆地、沿海和海洋生态系统。”

上述第2条和第4条是在道德风险的背景下提到的，即如果部署SAI或MCB，可能会抵消减少温室气体排放的努力。

2015年《巴黎协定》

《巴黎协定》于2015年12月通过，是《联合国气候变化框架公约》下的协议。该协定的关键目的是加强全球对气候变化威胁的响应，将本世纪全球温度上升幅度控制在相比工业化前水平2°C之内，并寻求将气温上升幅度限制在1.5°C。在对《巴黎协定》进行的分析中，Craik和Burns（2016年）提出，虽然SAI不在协定管理范围内，但它可能提供程序性法规和机制，有助于满足透明度要求，为实施SAI和MCB公开讨论提供平台，可能确定为今后部署提供资金的市场机制，并建立监测和核查结构。在后来对如何将影响气候技术成功纳入协定范围的分析中，Craik和Burns（2019年）指出，需要明确核算的运作和对技术的激励机制。

经1978年议定书修订的1973年《国际防止船舶造成污染公约》(MARPOL)

MARPOL公约由国际海事组织(IMO)制定，旨在将海洋污染降至最低，专注于船舶倾倒、石油和空气污染。该公约于1983年生效，缔约方为156个国家。虽然Talberg等人（2017年）认为MARPOL与海洋肥化相关，对SRM相关国际治理机制的评论一般并没有讨论该公约。如果今后部署MCB，根据国际海事组织和缔约方如何界定利用的

MCB微粒，这种技术可能会受到公约的约束。然而，公约可能起到的作用是什么并不清楚。

研究治理

目前，没有研究人员主张大规模部署SRM以改变气候。大多数工作的重点是为了更好地了解SRM的潜力及其效果，主要通过建模和实验室研究完成。一些研究人员还计划进行实地试验，例如在大堡礁进行MCB试验，并以非常小的规模向平流层注入微粒。这类研究目前依据机构和专业团体的标准研究协议开展。然而，SRM研究存在争议，它引起了许多问题。这在某种程度上鼓励一些人提倡自愿制定SRM研究行动守则的想法，而在美国，有人建议将有限的监督责任交给国家科学机构（如下）。

太阳辐射管理治理计划(SRMGI)是一个由国际非政府组织推动的项目，旨在扩大全球关于SRM研究治理的对话，并提出以下关键问题（SRMGI，2019年）：

- 谁来决定研究是否进行，以及应该研究什么？
- 谁来支付研究费用？谁受益？
- 通过什么确保以透明的方式进行研究，并公开分享所有结果？
- 如何才能了解不同群体的不同研究重点
- 如何确保SRM研究不会分散公众和政治家对减少温室气体排放任务的注意力？

随着时间的推移，实地试验可能会扰乱气候，导致SRM应用具有不确定性、难以预测的影响和风险（Robock，2009年）。在研究/应用治理边界尚未解决的情况下，有人质疑是否应在两者之间划定界限，或者从建模和实验室研究到大规模大气测试的技术演变，是否应被视为持续治理目标（SRMGI，2011年和Parker，2014年）。Parsons和Keith（2013年）提出，以实地实验的冷却效果即瓦特每平方米为测量单位比较合适。他们还提出了其它措施，比如某种形式的社会响应指标（Sugiyama，2017年）。如果需要界限点，还不确定这可能是什么、谁可能决定它、如何对其监测和核查。

关于议程相关复杂问题，积极参与SRM和其它影响气候技术的人制定了一些不具约束力的行动守则，如《牛津原则》（Oxford Principles）（Rayner等人，2009年）、《气候工程技术研究阿西洛马原则》(Asilomar Principles for Research into Climate Engineering Techniques)（Asilomar，2010年）、《负责任地球工程研究行动守则》(Code of Conduct for Responsible Geoengineering Research)（Hubert，2017年）和《气候工程治理学术工作组》(Academic Working Group on Climate Engineering Governance)（Netra等人，2018年）。这些原则或守则都认同的是，决策透明、公众参与和公开发表研究成果是确保公众最大限度地参与和信任SRM研究治理（以及更广泛的影响气候技术）的关键。然而，尽管这些守则鼓励研究人员以负责任的方式慎重行事，但因为这些是基于自愿行为，不具任何惩罚，因此这些守则可能无法阻止执着的研究人员。

提交的美国大气气候干预研究法案——H. R. 5519（ACIRA，2019年），如果获得通过，不仅将在NOAA建立影响气候的研究计划，还将授予NOAA监督权并向美国政府

报告SAI和MCB实验的权力。如果被授予，这些权力的范围在现阶段仍然不清楚，有待法案取得任何得到澄清和讨论。然而，根据该法案，美国有可能建立新的研究治理机制，这也会引起其他国家的兴趣。

其它进程或议程

除了以上所介绍的，影响气候技术治理中可能涉及的其它进程或议程包括：联合国环境大会、联合国大会、联合国安全理事会、不同国家、非洲联盟和欧盟等地区机构、研究团体、民间社会组织、商业机构和公众。

结论

海洋云增亮和平流层气溶胶注入是两种人工改变太阳辐射的技术，上文已经进行了描述，并探讨了它们的技术成熟度、当前研究、适用治理框架以及其它社会政治考量。在这一分析背景下，讨论了一系列地缘政治问题，包括技术可能引起的安全问题，以及现有治理规定是否能够帮助应对这些问题。

目前，除了软实力之外，没有任何措施可以阻止研究人员或各国推进实地试验或达到影响气候的规模部署。鉴于已识别的地缘政治和安全问题，包括理论上可能发生的军事冲突、加剧国家或地区间的紧张局势、使气候外交以及更广泛的国际合作受挫、反部署可引起的争端和内乱，国际社会需要尽早讨论如何治理这些技术。

参考

ACIRA 2019 H.R.5519 - Atmospheric Climate Intervention Research Act. The House of representatives, US. 敬请访问 https://www.congress.gov/bill/116th-congress/house-bill/5519/text?r=15&s=1

AHLM, L. JONES, A. STJERN, C. MURI, C. KRAVITZ, B & KRISTJÁNSSO, J 2017 Marine cloud brightening–as effective without clouds. Atmospheric Chemistry Phyics. Vol. 17, 13071–13087. 敬请访问 https://doi.org/10.5194/acp-17-13071-2017

ALBRECHT, B., A. 1989. Aerosols, cloud physics and fractional cloudiness. Science, 245, 1227-1230. 敬请访问 https://science.sciencemag.org/content/245/4923/1227

ARMENI, C. & REDGWELL, C. 2015. International legal and regulatory issues of climate geoengineering governance: rethinking the approach. Climate Geoengineering Governance Working Paper Series. 09 March 2015: University College London, University of Oxford and University of Sussex.

ASAYAMA, S. & HULME, M. 2019. Engineering climate debt: temperature overshoot and peak-shaving as risky subprime mortgage lending. Climate Policy, 19, 937-946. 敬请访问 https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2019.1623165

ASILOMAR 2010. The Asilomar Conference Recommendations on Principles for Research into Climate Engineering Techniques 2010 Prepared by the Asilomar Scientific Organizing Committee November 2010 Climate Institute Washington DC. 敬请访问 http://www.climateresponsefund.org/images/Conference/finalfinalreport.pdf

BARRETT, S. 2014. Solar geoengineering's brave new world: Thoughts on the governance of an unprecedented technology. Review of Environmental Economics and Policy, 8, 249–269. 敬请访问 https://doi.org/10.1093/reep/reu011

BARRETT, S. 2019. Some Thoughts on Solar Geoengineering Governance p 33 in Governance of the Deployment of Solar Geoengineering. Edited by Robert N. Stavins and Robert C. Stowe. Cambridge, Mass. Harvard Project on Climate Agreements, February 2019.

BAUM, S., MAHER JR., T. & HAQQ-MISRA, J., 2013. Double Catastrophe: Intermittent Stratospheric Geoengineering Induced by Societal Collapse. Environment, Systems and Decisions, 33(1), pp.168 – 180

BELLAMY, R., CHILVERS, J., VAUGHAN, N. & LENTON, T. 2012. A review of climate geoengineering appraisals. Wiley Interdisciplinary Review of Climate Change, 3, 597-615. 敬请访问 https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcc.197

BELLAMY R, LEZAU J, PALMER J, 2017 Public perceptions of geoengineering research governance: An experimental deliberative approach Global Environmental Change Volume 45, July 2017, 194-202. 敬请访问 https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:d0805ee4-cffd-4de5-a46d-568676f21cf4

BERDAHL, M., ROBOCK, A., JI, D., MOORE, J. C., JONES, A., KRAVITZ, B. & WATANABE, S. 2014. Arctic cryosphere response in the Geoengineering Model Intercomparison Project G3 and G4 scenarios. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119, 1308-1321. 敬请访问 https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013JD020627

BOWER, K. & CHOULARTON, T. 2008. Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 366, 3969-87.

BRAHIC, C. 2009. Hacking the planet: The only climate solution left? New Scientist.Special report 25 Feb. 2009. 敬请访问 https://www.newscientist.com/article/mg20126973-600-hacking-the-planet-the-only-climate-solution-left/

BRAUN, C., MERK, C., PÖNITZSCH, G., REHDANZ, K. & SCHMIDT, U. 2018. Public perception of climate engineering and carbon capture and storage in Germany: survey evidence. Climate Policy, 18, 471-484. 敬请访问 https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2017.1304888

BRIGGS, C. M. (2013). Is Geoengineering a National Security Risk? Geo-engineering Our Climate Blog. 敬请访问 http://wp.me/p2zsRk- 8U

BRF 2018. Barrier Reef Foundation. Media release: Reef 'sun shield' trials show promise to prevent coral bleaching. 27 March 2018. 敬请访问 https://www.barrierreef.org/latest/news/reef-sun-shield-trials-show-promise-to-prevent-coral-bleaching

BRZOSKA, M., LINK, M. & NOTZ, N. 2012. Geoengineering - moglichkeiten und risiken Sicherheit and Frieden, 30, 185 - 193. 敬请访问 https://www.nomos-elibrary.de/10.5771/0175-274x-2012-4-185/geoengineering-moeglichkeiten-und-risiken-jahrgang-30-2012-heft-4

BUCK, H. 2012. Geoengineering: Re-making Climate for Profit or Humanitarian Intervention? Development and Change, 43, 253-270.

BUCK, H. J. 2018. Perspectives on solar geoengineering from Finnish Lapland: Local insights on the global imaginary of Arctic geoengineering. Geoforum, 91, 78-86.

BULKELEY, H. & NEWELL, P. 2010. Governing Climate Change, Manchester, Routledge.

CAIRNS, R. 2014. Discussion paper: Will Solar Radiation Management enhance global security in a changing climate? Climate Geoengineering Governance Project. Climate Geoengineering Governance Working Paper Series: 016. 12 November 2014. 敬请访问 https://core.ac.uk/download/pdf/30610485.pdf

CAN, 2019. CLIMATE ACTION NETWORK Position on Solar Radiation Modification (SRM) September 2019. Climate Action International (CAN). 敬请访问 http://www.climatenetwork.org/sites/default/files/can_position_solar_radiation_management_srm_september_2019.pdf

CARR, P & PRESTON, C. 2017 Skewed Vulnerabilities and Moral Corruption in Global Perspectives on Climate Engineering Environmental Values 26 (2017): 757–777. 敬请访问 https://ideas.repec.org/a/env/journl/ev26ev2630.html

CBD 2008. COP 9 Decision IX/16 Biodiversity and climate change. Convention on Biological Diversity. 敬请访问 https://www.cbd.int/decisions/cop/?m=cop-09

CBD 2010. COP 10 Decision X/33. Convention on Biological Diversity. 敬请访问 https://www.cbd.int/decisions/cop/?m=cop-10

CHALECKI, E. & FERRARI, L. 2018. A New Security Framework for Geoengineering. Strategic Studies Quarterly, 82-106. 敬请访问 https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/SSQ/documents/Volume-12_Issue-2/Chalecki_Ferrari.pdf

CLRTAP, U. 1979. UN Convention on Long-range Trans Boundary Air Pollution

COLLOMB, J. 2019. US Conservative and Libertarian Experts and Solar Geoengineering: An Assessment, European journal of American studies 14-2 2019. 敬请访问 http://journals.openedition.org/ejas/14717

COOPER, Q. 2011. Engaging with geoengineering. Material World. BBC Radio 4: British Broadcasting Corporation. 敬请访问 http://www.bbc.co.uk/programmes/b006qyyb

CORRY, O. 2017 The international politics of geoengineering: The feasibility of Plan B for tackling climate change. Security Dialogue. 2017;48(4):297–315. doi:10.1177/0967010617704142

CRAIK, A. & BURNS, W 2016 Climate Engineering under the Paris Agreement: A Legal and Policy Primer. Special report. Centre for International Governance Innovations. 敬请访问 https://www.cigionline.org/sites/default/files/documents/GeoEngineering%20Primer%20-%20Special%20Report.pdf

CRAIK, A. & BURNS, W 2019 Climate Engineering under the Paris Agreement. The Environmental Law Reporter. Vol 49 (12) December 2019. 敬请访问 https://elr.info/news-analysis/49/11113/climate-engineering-under-paris-agreement

CRUTZEN, P. 2006. Albedo Enhancement by Stratospheric Sulphur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? Climatic Change, 77, 211-220. 敬请访问 https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-006-9101-y

DAILY MAIL. 2011. A helium balloon the size of Wembley Stadium and a 14-mile garden hose: How scientists plan to cool down the planet. The Daily Mail, 1 September 2011.

DEPLEDGE, J. 2005. The Organization of Global Negotiations: Constructing the Climate Change Regime, Earthscan from Routledge.

EFFIONG, U. & NEITZEL, R. 2016. Assessing the direct occupational and public health impacts of solar radiation management with stratospheric aerosols. Environmental Health, 15.

ELLIS-JONES, F. 2017 Great Barrier Reef: Making clouds brighter could help to curb coral bleaching, scientists say, ABC News, 2017. 敬请访问 http://www.abc.net.au/news/2017-04-25/cloud-brightening-could-help-cool-great-barrier-reef/8469960

ETC 2011. RE: The Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering (SPICE) project. Open Letter to Chris Huhne, MP Secretary of State for Energy and Climate Change ed. 敬请访问 http://www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/publication/pdf_file/NR%20SPICE%20270911_3.pdf

EYRING, V., ISAKSEN, I. S. A., BERNTSEN, T., COLLINS, W. J., CORBETT, J. J., ENDRESEN, O.,GRAINGER, R. G., MOLDANOVA, J., SCHLAGER, H. & STEVENSON, D. S. 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. Atmospheric Environment, 44, 4735-4771.

GARDINER, S 2010 'Is arming the future with geoengineering really the lesser evil?' in S. Gardiner et al. (eds) Climate Ethics (Oxford: Oxford University Press), pp. 284–312.

GeoMIP (2020) Geoengineering Model Intercomparison Project. Information available at http://climate.envsci.rutgers.edu/GeoMIP/index.html GESAMP 2019. High Level Review of a Wide Range of Proposed Marine Geoengineering Techniques. GESAMP Reports and Studies. Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environment Protection. 敬请访问 http://www.gesamp.org/publications/high-level-review-of-a-wide-range-of-proposed-marine-geoengineering-techniques

GENUS, A. & STIRLING, A. 2018. Collingridge and the dilemma of control: Towards responsible and accountable innovation. Research Policy, 47, 61-69. 敬请访问 http://sro.sussex.ac.uk/id/eprint/71319

GERTNER, J (2017) Is it O.K. to tinker with the environment to fight climate change? The New York Times. 敬请访问 https://www.nytimes.com/2017/04/18/magazine/is-it-ok-to-engineer-the-environment-to-fight-climate-change.html

HECKENDORN, P., WEISENSTEIN, D., FUEGLISTALER, S., LUO, B. P., ROZANOV, E., SCHRANER, M., THOMASON, L. W., AND PETER, T.2009 The Impact of Geoengineering Aerosols on Stratospheric Temperature and Ozone, Environ. Res. Lett., 4, 045108, doi:10.1088/1748-9326/4/4/045108,

HERSH, S. 1972. Rainmaking is used as weapon by U.S. The New York Times, 3 July 1972. 敬请访问 https://www.nytimes.com/1972/07/03/archives/rainmaking-is-used-as-weapon-by-us-cloudseeding-in-indochina-is.html

HORTON, J. B., REYNOLDS, J. L., BUCK, H. J., CALLIES, D., SCHÄFER, S., KEITH, D. W. & RAYNER, S. 2018. Solar Geoengineering and Democracy. Global Environmental Politics, 18, 5-24. 敬请访问 https://www.mitpressjournals.org/doi/full/10.1162/glep_a_00466

HORTON, J 2019. Evaluating Solar Geoengineering Deployment Scenarios in Governance of the Deployment of Solar Geoengineering. Edited by Robert N. Stavins and Robert C. Stowe. Cambridge, Mass.: Harvard Project on Climate Agreements, February 2019.

HUBERT, A. M., 2017 Code of Conduct for Responsible Geoengineering Research October 2017. 敬请访问 https://www.ucalgary.ca/grgproject/files/grgproject/revised-code-of-conduct-for-geoengineering-research-2017-hubert.pdf

IPCC 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon SD, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquie M, Averyt KB, Tignor M and Miller HL (eds). Cambridge University Press: Cambridge and New York. 敬请访问 https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/

IPCC 2018. International Panel on Climate Change Special report on Global Warming of 1.5 degrees. 敬请访问 https://www.ipcc.ch/sr15/

IRVINE, P. J., LUNT, D. J., STONE, E. J. & RIDGWELL, A. 2009. The fate of the Greenland Ice Sheet in a geoengineered, high CO_2 world. Environmental Research Letters, 4, 045109. 敬请访问 https://research-information.bristol.ac.uk/files/34705839/1748_9326_4_4_045109.pdf

JAMIESON, D. 2013. Some what's, whys and worries of geoengineering. Climatic Change, 121, 527-537. 敬请访问 https://as.nyu.edu/content/dam/nyu-as/faculty/documents/JamiesonWhysandWherefores.pdf

JIANG, J., CAO, L., MACMARTIN, D. G., SIMPSON, I. R., KRAVITZ, B., CHENG, W., VISIONI, D., TILMES, S., RICHTER, J. H. & MILLS, M. J. 2019. Stratospheric Sulfate Aerosol Geoengineering Could Alter the High-Latitude Seasonal Cycle. Geophysical Research Letters, 46, 14153-14163.

JONES, A. 2013. The impact of abrupt suspension of solar radiation management (termination effect) in experiment G2 of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(17), pp.9743–9752. 敬请访问 http://doi.wiley.com/10.1002/jgrd.50762

KEITH, D. W. 2013. A Case for Climate Engineering. Boston Review Books. Cambridge, USA, MIT Press.

KEITH, D. W., WEISENSTEIN, D. K., DYKEMA, J. A. & KEUTSCH, F. N. 2016. Stratospheric solar geoengineering without ozone loss. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113, 14910-14914. 敬请访问 https://www.pnas.org/content/113/52/14910

KELLEY, C. P., MOHTADI, S., CANE, M. A., SEAGER, R. & KUSHNIR, Y. 2015. Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought. Proceedings of the National Academy of Sciences, 201421533. 敬请访问 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25733898

KOSGUI, T. 2011. Climate-economy modelling considering solar radiation management and its termination risk. 1st International Conference on Simulation and Modelling Methodologies, Technologies and Applications. 敬请访问 https://www.scitepress.org/Papers/2011/35800/pdf/index.html

KRAVITZ, B., MACMARTIN, D. G. & CALDEIRA, K. 2012. Geoengineering: Whiter skies? Geophysical Research Letters, 39. 敬请访问 https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/journal/19448007

KRAVITZ, B., WANG, H., RASCH, P., MORRISON, H. & SOLOMON, A. 2014. Process-model simulations of cloud albedo enhancement by aerosols in the Arctic. Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, 372, 20140052. 敬请访问 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25404677

KRISHNAMOHAN, K. P. S. P., BALA, G., CAO, L., DUAN, L. & CALDEIRA, K. 2019. Climate system response to stratospheric sulfate aerosols: sensitivity to altitude of aerosol layer. Earth Systems Dynamics 10, 885-900.

LABITZKE, K. G. & VAN LOON, H. 2012. The stratosphere: phenomena, history, and relevance, Springer Science & Business Media. 敬请访问 https://www.springer.com/gp/book/9783642636370

LATHAM, J., RASCH, P., CHEN, C. C., KETTLES, L., GADIAN, A., GETTELMAN, A., MORRISON, H., BOWER, K. & CHOULARTON, T. 2008. Global temperature stabilization via controlled albedo enhancement of low-level maritime clouds. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 366, 3969-3987.

LAWRENCE, C. R. & NEFF, J. C. 2009. The contemporary physical and chemical flux of aeolian dust: A synthesis of direct measurements of dust deposition. Chemical Geology, 267, 46-63. 敬请访问 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009254109000655

LIN, A. C. 2012. Does Geoengineering Present a Moral Hazard? Ecology Law Quarterly 40, 673. 敬请访问 https://heinonline.org/HOL/LandingPage?handle=hein.journals/eclawq40&div=32&id=&page=

LLOYD, I. & OPPENHEIMER, M. 2014. On the Design of an International Governance Framework for Geoengineering. Global Environmental Politics, 14, 45-63.

LOCKLEY, A 2019. Security of solar radiation management geoengineering. Front. Eng. Manag. 2019, 6(1): 102–116. 敬请访问 https://doi.org/10.1007/s42524-019-0008-5

MCCORMICK, M. P., THOMASON, L. W. & TREPTE, C. R. 1995. Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption. Nature, 373, 399-404. 敬请访问 https://www.nature.com/articles/373399a0

MCDONALD, J., MCGEE, J., BRENT, K. & BURNS, W. 2019. Governing geoengineering research for the Great Barrier Reef. Climate Policy, 19, 801-811. 敬请访问 https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14693062.2019.1592742

MCLAREN, D.P. 2016 Mitigation deterrence and the "moral hazard" of solar radiation management. Earth's Future, 4: 596-602. doi:10.1002/2016EF000445

MCLAREN, D.P. 2018. Whose climate and whose ethics? Conceptions of justice in solar geoengineering modelling, Energy Research & Social Science 44, 209-221)

MACKERRON, G. 2014. Costs and economics of geoengineering. Climate Geoengineering Governance Working Paper Series. Number 013. Oxford Martin School, University of Oxford, UK. 敬请访问 http://www.geoengineering-governance-research.org/perch/resources/workingpaper13mackerroncostsandeconomicsofgeoengineering.pdf

MACNAGHTEN, P. & OWEN, R. 2011. Environmental science: Good governance for geoengineering. Nature, 479, 293-293. 敬请访问 https://www.nature.com/articles/479293a

MACNAGHTEN, P. & SZERSZYNSKI, B. 2013. Living the global social experiment: an analysis of public discourse on solar radiation management and its implications for governance. Global Environmental Change, 23, 465-474. 敬请访问 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378012001483?via%3Dihub

MATTHEWS, H. D. & CALDEIRA, K. 2007. Transient climate-carbon simulations of planetary geoengineering. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104, 9,949–54. 敬请访问 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17548822

MASSON-DELMOTTE, V., P. ZHAI, H.-O. PÖRTNER, D. ROBERTS, J. SKEA, P.R. SHUKLA, A. PIRANI, W. MOUFOUMA-OKIA, C. PÉAN, R. PIDCOCK, S. CONNORS, J.B.R. MATTHEWS, Y. CHEN, X. ZHOU, M.I. GOMIS, E. LONNOY, T. MAYCOCK, M. TIGNOR, AND T. WATERFIELD 2018. Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.

MERCADO, L. M., BELLOUIN, N., SITCH, S., BOUCHER, O., HUNTINGFORD, C., WILD, M. & COX, P. M. 2009. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. Nature, 458, 1014-1017. 敬请访问 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19396143

MERK, C., PÖNITZSCH, G., KNIEBES, C., REHDANZ, K. & SCHMIDT, U. 2015. Exploring public perceptions of stratospheric sulphate injection. Climatic Change, 130, 299-312. 敬请访问 https://www.econstor.eu/bitstream/10419/130169/1/85620837X.pdf

MONBIOT, G. 2011. A balloon and hosepipe as the answer to climate change? It's just pie in the sky. The Guardian, 2 September 2011.

MORROW, D. R. 2019. A mission-driven research program on solar geoengineering could promote justice and legitimacy. Critical Review of International Social and Political Philosophy, 1-23

MORTON, O. 2015. The planet remade. How geoengineering could change the world. Granta Books, UK.

NALAM, A., GOVINDASAMY, B. & MODAK, A. 2017. Arctic Geoengineering: Effects on precipitation in tropical monsoon regions. 敬请访问 https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-017-3810-y

NALAM, A., BALA, G. & MODAK, A. 2018. Effects of Arctic geoengineering on precipitation in the tropical monsoon regions. Climate Dynamics, 50, 3375-3395. 敬请访问 https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-017-3810-y

NETRA, C, CHONG D, CONCA K, FALK R, GILLESPIE A, GUPTA A, JINNAH S, KASHWAN P, LAHSEN M, LIGHT A, MCKINNON C, THIELE L P, VALDIVIA W, WAPNER P, MORROW D, TURKALY C, NICHOLSON S,. 2018. Governing Solar Radiation Management. Washington, DC: Forum for Climate Engineering Assessment, American University. 敬请访问 https://doi.org/10.17606/M6SM17

NIGHTINGALE, P., & CAIRNS, R. (2014). The security implications of geoengineering: Blame, imposed agreement and the security of critical infrastructure. Arts and Humanities Research Council. 敬请访问 http://www.geoengineering-governance-research.org/perch/

NISBET, M. C. 2019 Climate Philanthropy and the Four Billion (Dollars, That Is). Issues in science and policy Winter 2019. 敬请访问 https://issues.org/wp-content/uploads/2019/01/Nisbet-Sciences-Publics-Politics-34-36-Winter-2019.pdf

PARK, C.-E., JEONG, S.-J., FAN, Y., TJIPUTRA, J., MURI, H. & ZHENG, C. 2019. Inequal Responses of Drylands to Radiative Forcing Geoengineering Methods. Geophysical Research Letters, 46, 14011-14020

PARKER, A. 2014. Governing solar geoengineering research as it leaves the laboratory. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences., 372. 敬请访问 https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2014.0173

PARKER, A., HORTON, J. B., & KEITH, D. W. (2018). Stopping solar geoengineering through technical means: A preliminary assessment of counter-geoengineering. Earth's Future, 6, 1058–1065. 敬请访问 https://doi. org/10.1029/2018EF000864

PARKER, A & IRVINE, P. 3/11/2018. The Risk of Termination Shock from Geoengineering. Earth's Future, 6, Pp. 456-467. 敬请访问 https://keith.seas.harvard.edu/publications/risk-termination-shock-solar-geoengineering

PARKES, B., GADIAN, A. & LATHAM, J. 2012. The Effects of Marine Cloud Brightening on Seasonal Polar Temperatures and the Meridional Heat Flux. ISRN Geophysics, 2012, 7. 敬请访问 https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/142872/

PARSON, E. A., & ERNST, L. N. (2013). International governance of climate engineering. Theoretical Inquiries in Law, 14, 12–23. 敬请访问 https://doi.org/10.1515/til-2013-015

PARSON, E. & KIETH, D. W. 2013. End the Deadlock on Governance of Geoengineering Research. Science, 339, 1278-1279. 敬请访问 https://www.uvic.ca/research/centres/globalstudies/assets/docs/publications/End-the-Deadlock-on-Governance-of-Geoengineering-Research-Parson-and-Keith.pdf

PARTHASARATHY, S., RAYBURN, L., ANDERSON, M., MANNISTO, J., MAGUIRE, M. & NAJIB, N. 2010. Geoengineering in the Arctic: Defining the Governance Dilemma Science, Technology, and Public Policy Program. Environmental Research Letters, 4.

PIELKE, R 2019 When Is Climate Change Just Weather? What Hurricane Dorian Coverage Mixes Up, On Purpose. Forbes, 4 September 2019. 敬请访问 https://www.forbes.com/sites/rogerpielke/2019/09/04/when-is-climate-change-just-weather-what-hurricane-dorian-coverage-mixes-up-on-purpose/influence on sea ice and climate system

PIDGEON, N., CORNER, A., PARKHILL, K., SPENCE, A., BUTLER, C. & POORTINGA, W. 2012. Exploring early public responses to geoengineering. Philos Trans A Math Phys Eng Sci, 370, 4176-96. 敬请访问 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22869796

RASCH, P., TILMES, S., TURCO, R., ROBOCK, A., OMAN, L., CHEN, J., STENCHIKOV, G. L. & GARCIA, R. 2008. An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols Phil. Trans. Royal Society A, 366, 4007-403.

RAYNER, S, KRUGER, T. SAVULESCU, J. 2009 The Oxford Principles of geoengineering research. 敬请访问 http://www.geoengineering.ox.ac.uk/www.geoengineering.ox.ac.uk/oxford-principles/history/index.html

REDGWELL, C. 2011. Geoengineering the climate: Technological solutions to mitigation – failure or continuing carbon addiction? Carbon & Climate Law Review, 5. 敬请访问 https://cclr.lexxion.eu/article/cclr/2011/2/177

REYNOLDS, J. 2019. Solar geoengineering to reduce climate change: a review of governance proposals. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 475, 20190255. 敬请访问 https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2019.0255

RICKE, K. L., MORGAN, M. G., & ALLEN, M. R. (2010). Regional climate response to solar-radiation management. Nature Geoscience, 3, 537–541. 敬请访问 https://doi.org/10.1038/ngeo915

ROBOCK, R. 2008. 20 reasons why geoengineering may be a bad idea. Bulletin of the Atomic Scientists 64, 14-18.

ROBOCK, A., MARQUARDT, A., KRAVITZ, B. & STENCHIKOV, G. L. 2009. The practicality of geoengineering. In: UNIVERSIT, R. (ed.) Submitted to Geophysical Research Letters. Online.

ROBOCK, A. 2018. Stratospheric Sulphur Geoengineering—Benefits and Risks American Metrological Society 98th Annual Meeting Austin, Texas.

ROUSE, P. 2018. How to govern the risks of stratospheric aerosol injection solar radiation management. PhD, University of Southampton. 敬请访问 https://eprints.soton.ac.uk/424730/

ROSS, M. N. & SHEAFFER, P. M. 2014. Radiative forcing caused by rocket engine emissions. Earth's Future, 2, 177-196. 敬请访问 https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2013EF000160

RUSSELL, L., RASCH, P., MACE, G., JACKSON, R., SHEPHERD, J., LISS, P., LEINEN, M., SCHIMEL, D., VAUGHAN, N., JANETOS, A., BOYD, P., NORBY, R., CALDEIRA, K., MERIKANTO, J., ARTAXO, P., MELILLO, J. & MORGAN, M. G. 2012. Ecosystem impacts of geoengineering: A Review for developing a science plan. AMBIO, 41, 350-369. 敬请访问 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/

articles/PMC3393062/

RUSSELL, L. M., SOROOSHIAN, A., SEINFELD, J. H., ALBRECHT, B. A., NENES, A., AHLM, L. WONASCHÜTZ, A 2013. Eastern pacific emitted aerosol cloud experiment. Bulletin of the American Meteorological Society, 94, 709-729. 敬请访问 https://arizona.pure.elsevier.com/en/publications/eastern-pacific-emitted-aerosol-cloud-experiment

RUTTINGER, L., SMITH, D., STANG, G., TÄNZLER, D., VIVEKANANDA, J., BROWN, O., CARIUS, A., DABELKO, G., DE SOUZA, R.-M., MITRA, S., NETT, S., PARKER, M. & POHL, B. 2015. A new climate for peace - taking action on climate and fragility risks. An independent report commissioned by the G7 members - Submitted under the German G7 Presidency. 敬请访问 https://www.newclimateforpeace.org/thematic-reading/risk-briefings

RUZ, C. 2011. Scientists criticise handling of pilot project to 'geoengineer' climate. The Guardian, 17 November 2011.

SALTER, S. SORTINO, G. & LATHAM, J. 2008 Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 敬请访问 http://doi.org/10.1098/rsta.2008.0136

SAREWITZ, D. 2010. Not by experts alone. Nature, 466. 敬请访问 https://www.nature.com/articles/466688a

SCHELLNHUBER, H.J., 2011. Geoengineering: the good, the MAD, and the sensible. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108(51), pp.20277–8. 敬请访问 http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3251148&tool= pmcentrez&rendertype=abstract

SCHRAND, A., HUANG, H., CARLSON, C., SCHLAGER, J., ŌSAWA, E., HUSSAIN, S. & DAI, L. 2007. Are diamond nanoparticles cytotoxic? The Journal of Physical Chemistry B, 111, 2-7. 敬请访问 https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp066387v

SCOPEX. 2019. Stratospheric Controlled Perturbation Experiment (SCoPEx) [Online]. 12, Oxford St, Cambridge, MA 02138, USA: Harvard University. 敬请访问 https://projects.iq.harvard.edu/keutschgroup/scopex

SCOTT, K. N. (2013). International Law in the Anthropocene: Responding to the Geoengineering Challenge. Michigan Journal of International Law, 34(2), 309–358. 敬请访问 https://repository.law.umich.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1004&context=mjil

SCOTT, K. N. (2015). Geoengineering and the marine environment. In R. Rayfuse (Ed.), Research Handbook on International Marine Law (pp. 451–472). Edward Elgar Publishing.

SHAH, A 2014 Climate Change Affects Biodiversity. Global Issues. Social, Political, Economic and Environmental Issues. Published 19 January 2014. 敬请访问 http://www.globalissues.org/article/172/climate-change-affects-biodiversity

SHEPHERD, J. 2009. Geoengineering the climate - science, governance and uncertainty. Royal Society Policy Document October 2009. London: The Royal Society.

SIMPSON, I. R., TILMES, S., RICHTER, J. H., KRAVITZ, B., MACMARTIN, D. G., MILLS, M. J., FASULLO, J. T. & PENDERGRASS, A. G. 2019. The Regional Hydroclimate Response to Stratospheric Sulphate Geoengineering and the Role of Stratospheric Heating. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124, 12587-12616.SNGA. 2017. Sierra Nevada Geoengineering Awareness. 敬请访问 http://sngawareness.weebly.com/

SMITH, W and WAGNER, G 2018 Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 years of deployment Environmental Research Letters, Volume 13, Number 1. 敬请访问 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aae98d

SRMGI 2011. Solar radiation management: the governance of research. Environmental Defence Fund, The Royal Society and TWAS. 敬请访问 https://royalsociety.org/~/media/Royal_Society_Content/policy/projects/solar-radiation-governance/DES2391_SRMGI%20report_web.pdf

SRMGI 2019. Solar radiation management governance initiative: about the SRMGI Website. 敬请访问 www.srmgi.org/

STAVINS, R & STOWE R 2019 Governance of the Deployment of Solar Geoengineering. Cambridge, Mass.: Harvard Project on Climate Agreements, February 2019. 敬请访问 https://geoengineering.environment.harvard.edu/files/sgrp/files/harvard_project_sg_governance_briefs_volume_feb_2019.pdf

STAVINS, R., ZOU, J., BREWER, T., CONTE GRAND, M., DEN ELZEN, M., FINUS, M., et al. (2014). International cooperation: Agreements and instruments.

IN O. EDENHOFER, R. PICHS-MADRUGA, Y. SOKONA, E. FARAHANI, S. KADNER, K. SEYBOTH, et al. (Eds.), Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (chap. 13,pp. 1001–1082). Cambridge, UK: Cambridge University Press

STILGOE, J. 2015. Experiment Earth. Responsible innovation in geoengineering, Abingdon, Oxford, Earthscan.

STRAUSS, L. 1954. Too cheap to meter, the great nuclear quote debate. This day in quote 16 September 1954. 敬请访问 http://www.thisdayinquotes.com/2009/09/too-cheap-to-meter-nuclear-quote-debate.html

SUGIYAMA, M., ARINO, Y., KOSUGI, T., KUROSAWA, A. & WATANABE, S. 2017. Next steps in geoengineering scenario research:

limited deployment scenarios and beyond. Climate Policy, 1-9. 敬请访问 https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14693062.2017.1323721

SYMONS, J. 2019. Ecomodernisim: technology, politics and climate change. John Wilesy and Sons pp224, ISBN 9781509531226

TALBERG, A., CHRISTOFF, P., THOMAS, S., KAROLY, D. 2018 Int Environ Agreements 18: 229.

TEMPLE, J. 2017. Harvard scientists moving ahead on plans for atmospheric geoengineering experiments [Online]. MIT. 敬请访问 https://www.technologyreview.com/s/603974/harvard-scientists-moving-ahead-on-plans-for-atmospheric-geoengineering-experiments/

TEMPLE, J 2019 'The US government has approved funds for geoengineering research' MIT Technology Review, 20 December 2019. 敬请访问 https://www.technologyreview.com/s/614991/the-us-government-will-begin-to-fund-geoengineering-research/

THOMASON, L., BURTON, S., LUO, B. & PETER, T. 2008. SAGE II measurements of stratospheric aerosol properties at non-volcanic levels. Atmospheric Chemistry Physics, 8, 983-995.

TILMES, S. & MILLS, M. 2014. Stratospheric sulphate aerosols and planetary albedo. In: FREEDMAN, B. (ed.) Global Environmental Change. Dordrecht: Springer Netherlands.

TILMES, S., MILLS, M. J., NIEMEIER, U., SCHMIDT, H., ROBOCK, A., KRAVITZ, B., LAMARQUE, J. F., PITARI, G. & ENGLISH, J. M. 2015. A new Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) experiment designed for climate and chemistry models. Geosci. Model Dev., 8, 43-49.

TINGLEY, D. & WAGNER, G. 2017. Solar geoengineering and the chemtrails conspiracy on social media. Palgrave Communications, 3, 12. 敬请访问 https://www.nature.com/articles/s41599-017-0014-3

UN 1977. Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques. Geneva: UN. UN 2019 Security Council Report, Climate Change and Security, January 2019 Monthly Forecast. 敬请访问 https://www.securitycouncilreport.org/monthly-forecast/2019-01/climate-change-and-security.php

UNEP 1985. The Vienna Convention for the Protection of The Ozone Layer. In: SECRETARIAT, T. O. (ed.). Vienna: UNEP.

UNEP 1987. The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer. In: SECRETARIAT, T. O. (ed.). Montreal, Canada.

UNSG 2018. Gaps in international environmental law and environment-related instruments: towards a global pact for the environment. United Nations General Assembly Document A/73/419. November. 敬请访问 https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27070/SGGaps. pdf?sequence=3&isAllowed=y.

VICTOR, D. 2008. "On the Regulation of Geoengineering." Oxford Review of Economic Policy 24 (2): 322-336. 敬请访问 http://doi.org/10.1093/oxrep/grn018

WAGNER, G., & ZIZZAMIA, D. 2019 Green Moral Hazards. NYU Wagner Research Paper Forthcoming. 敬请访问 SSRN: https://ssrn.com/abstract=3486990 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3486990

WATSON, M. 2012. Testbed news: A personal statement. SPICE - News. 敬请访问 http://www.spice.ac.uk/news/view/testbed-news SPICE.

WEISENSTEIN, D., KEITH, D. & DYKEMA, J. A. 2015. Solar geoengineering using solid aerosol in the stratosphere. Atmospheric Chemistry Physics, 15, 11835–11859. 敬请访问 https://www.atmos-chem-phys.net/15/11835/2015/acp-15-11835-2015.html

WEITZMAN, M. L. 2015. A voting architecture for the governance of free-driver externalities, with application to geoengineering. Scandinavian Journal of Economics, 117, 1049–1068. 敬请访问 https://doi.org/10.1111/sjoe.%2012120

WOOD, R. 2018 Marine Cloud Brightening: Science, Feasibility and a Plan for Research. Presentation by Robert Wood Department of Atmospheric Sciences, University of Washington, Seattle at Caltech. 敬请访问 http://workshop.caltech.edu/geoengineering/presentations/10-wood.pdf

ZHANG, Z., MOORE, J. C., HUISINGH, D. & ZHAO, Y. 2015. Review of geoengineering approaches to mitigating climate change. Journal of Cleaner Production, 103, 898-907.

技术及治理的摘要信息，
请参见C2G政策摘要：人工改变太阳辐射

本摘要以最新的文献为基础，并有待独立专家审核。如有任何重大修改建议，
请通知 contact@c2g2.net 本文可在C2G确认后转载。
建议引用：'C2G (2020). C2G证据摘要：人工改变太阳辐射。卡内基气候治理倡议(C2G)。纽约。2020' 20200115版本。