人工干预太阳辐射：
风险比较分析

摘要

2022年3月

C2G Carnegie Climate Governance Initiative
An initiative of CARNEGIE COUNCIL for Ethics in International Affairs
Duke Center on Risk in SCIENCE & SOCIETY

作者
Tyler Felgenhauer - 美国杜克大学杜克风险中心；
Govindasamy Bala - 印度科学理工学院大气和海洋科学中心；
Mark E. Borsuk - 美国杜克大学普拉特工程学院和杜克风险中心；
Matthew Brune - 美国杜克大学杜克风险中心；
Inés Camilloni - 布宜诺斯艾利斯大学精确与自然科学学院大气和海洋科学系、阿根廷科学技术研究委员会(CONICET)海洋和大气研究中心
Jonathan B. Wiener - 美国杜克大学法学院、尼古拉斯学院、桑福德学院和杜克风险中心
徐建华 Jianhua XU - 中国北京大学环境科学与工程学院环境管理系和全球健康发展研究院

发布信息
该报告由卡内基国际事务伦理学理事会（Carnegie Council for Ethics and International Affairs，简称CCEIA）旗下的卡内基气候治理倡议(C2G)委托并提供经费。文中内容仅代表作者的个人观点，并不代表作者所在组织的官方立场，或C2G、CCEIA，审稿人及其他投稿人的观点。

本报告经知识共享(Creative Commons) CC BY-NC-SA（署名-非商业性使用-相同方式共享）协议许可。若出于教育宣传或非营利目的，以任何形式使用本报告的全部或部分内容，无需C2G特别许可，但必须注明出处。

建议引用方式
Felgenhauer, T., Bala, G., Borsuk, M., Brune, M., Camilloni, I., Wiener, J.B., Xu, J. (2022). Solar Radiation Modification: A Risk-Risk Analysis - Summary, Carnegie Climate Governance Initiative (C2G), February, New York, NY: www.c2g2.net

致谢
本报告作者非常感谢C2G的Nicholas Harrison、Janos Pasztor、Cynthia Scharf和Kai-Uwe Schmidt，以及国际风险治理中心的Marie-Valentine Florin、Perspectives Climate Research和乌得勒支大学哥白尼可持续发展研究所的Matthias Honegger等外部审稿人所付出的精力和提供的重要见解。此外还要感谢美国国家大气研究中心(NCAR)的Simone Tilmes、伊利诺伊大学法学院的Arden Rowell，以及印第安纳大学Paul H. O’Neill公共与环境事务学院的John D. Graham给出的额外宝贵意见。

如有问题或更正，请发送电子邮件至：contact@c2g2.net

从该网址下载：**www.c2g2.net**

摘要

将人工干预太阳辐射作为一种附加的气候风险降低策略

气候变化给人类社会和环境带来了多重风险，这些风险相互作用，而且可能只会随着地球的进一步变暖而持续恶化。未来要有效地控制这些风险，需要制定一系列的应对政策。减缓策略（包括减少温室气体(GHG)排放和从大气中移除二氧化碳(CDR)）必须仍然作为政策的重点，因为它们是解决气候变化根源的唯一手段。然而，仅靠减缓可能很难实现《巴黎协定》的1.5-2oC温控目标。此外，由于二氧化碳（当前气候变化的主要驱动因素）在大气中的存留时间很长，因此在没有达到净负排放的情况下，二氧化碳和气温可能会持续升高数百年。适应策略可能有助于降低与特定变暖水平相关的风险，但其有效性和可持续性有限。出于上述原因，人工干预太阳辐射作为一种辅助方法被提出来，在加大降低大气中的温室气体浓度力度的同时，以求快速降低现阶段全球变暖导致的诸多风险，并有助于避免达到不可逆转的气候临界点。

人工干预太阳辐射(SRM)是一系列方法的总称，旨在通过有意识地增加被大气层反射回太空的射入太阳光来减缓或阻止全球变暖。迄今为止研究最多的SRM方法就是平流层气溶胶注入(SAI)，这种技术会将高反射率的细微颗粒或其前体物注入到平流层；还有一种方法被称为海洋云增亮(MCB)，即有目的地提高海洋上空云层的反照率。虽然还有其他SRM方法，但本报告重点讨论SAI和MCB，因为它们似乎是最有效的选择。若与减排和CDR联合部署，对达到《巴黎协定》的温控目标可能有一定的促进作用。

作为一种降低气候风险的候选方案，SRM与减缓策略完全不同。SRM不是从源头（即通过减少温室气体排放）解决气候变化或试图扭转气候变化（通过CDR），而是以另一种形式来影响气候。虽然这种方法还存在诸多不确定因素，但潜在好处是，一旦开发出必要的技术和基础设施，它也许能够在全球范围内快速、有效且低成本来为地球降温。但SRM也有不足之处，它不能在所有地区和季节抵消气候变化的影响。此外，SAI和MCB的部署都需要持续进行，因为它们的作用应该只是暂时的。这些新技术也可能存在风险，比方说它们会与气候相互作用，还可能加剧已存在的风险并带来新的生物物理和社会风险，包括前所未有的治理挑战。本报告将重点探讨SRM潜在降低气候风险与自身可能带来的抵消性风险之间的权衡。

风险比较权衡框架

文中所述的风险比较权衡框架用于比较部署SRM和不部署SRM来应对气候变化时的不同结果。风险比较权衡框架考虑了某个决策可能产生的重大后果的各种组合或范围。在框架中，风险是通过不良后果的严重程度和这些后果发生的可能性来衡量的。一项行动或政策所应对的特定风险被称为目标风险，解决目标风险时产生的额外风险称为抵消性风险，附带降低非目标风险和其他益处被称为衍生益处。该

框架还能确定用于比较这些风险的关键属性，包括与各种行动或政策相关的后果类型、严重程度、可能性、时间和分布情况。风险比较权衡框架旨在帮助分析师摆脱思维局限，不单单只考虑降低目标风险的直接成本和效益。与所有公共政策一样，社会公众对SRM以及其他气候政策方案都可能做出“非理性”的反应，这可能会严重影响决策。本报告提出的风险比较框架可以为相关政策的实施提供指导，通过科学的方法带来得到普遍社会认可的结果。

风险比较框架内的人工干预太阳辐射

最新研究文献指出，将SRM添加到假设的减缓和适应政策组合中可能产生以下影响（其中大部分影响来自SAI在全球范围内的部署，除非另外注明是MCB带来的影响）：

将SRM添加到减缓和适应政策中的影响

	积极影响	负面影响
SRM对目标风险的影响：气候变化影响	**对气候有益** SRM有望迅速降低与全球大部分地区气温升高相关的未来重大风险。主要益处包括： • 降低极端温度和降水的频率与强度 • 减缓北极海上浮冰和冰山的融化速度 • 减缓格陵兰和南极冰盖的消失 • 减缓海平面上升 • 缓解大西洋经向翻转环流的减弱趋势 • 降低热带气旋的强度 • 缓解土壤水分的下降 • 略微降低大气中的二氧化碳浓度	**气候风险** SRM不会逆转气候变化，而是一种不同的、额外的影响气候的方法，会产生不同的影响，其中最重要的影响包括： • 意外的气候变化（由于预估所需SAI数量的不确定性，从而导致气温意外上升或过度下降） • 区域降水发生变化

SRM的附带影响：非气候变化影响	**衍生益处** 实施SRM的同时，可能会对生物物理和社会产生降低其他风险或增加价值等附带积极影响，例如： • 减少对流层臭氧 • 增加热带地区陆地上的可用水量(MCB)	**抵消性风险** 根据所采用的技术，SRM带来了对生物物理和社会的一些新风险，包括： • 高纬度原始地区酸沉降增加 • 影响平流层臭氧 • 光扩散和变暗 • 可能造成国际冲突和其他社会风险 • 可能与火山大爆发相互影响 • 突然终止带来的冲击 • 陆地上盐沉积增加(MCB)
	积极或负面影响 • 对减排政策或行为动机的影响 • 光扩散和变暗及其对人类健康、生态环境和农业的影响 • 对程序公平和分配公平以及其他道德问题的影响	

当然SRM的部署不会孤立地发生，因此其益处和风险取决于许多其他因素，包括部署SRM的特定目标、所遵循的排放路径和适应计划作为大背景、所追求的可持续发展目标以及现有的治理框架等。从概念角度来看，排放路径和预期的适应能力决定了SRM可以应对的剩余气候风险水平。此外，SRM的部署及相关治理力求同时将这些气候风险最小化、额外益处最大化，并限制其自身带来的气候和抵消性风险。为更好地阐述其中的权衡，我们在这份报告中讨论了三种特定的气候风险管理情景，其中减缓措施和SRM的相对贡献不同。

关键信息

(1) 在有关SRM的政策分析和决策过程中采用风险比较框架，可以更全面地评估、比较并管理与气候变化、减排、CDR、适应及SRM相关的风险。该框架包括识别和权衡对目标风险、抵消性风险和衍生益处的影响，认识到它们可能以复杂的方式相互关联。公众和政策制定者可能会产生影响决策的直觉和偏见，而借助风险比较框架可以对重要影响的所有组合进行全盘考虑。制定使总体风险最小化的措施可以帮助降低单一目标风险，同时限制或减少多个抵消风险。

(2) SRM锁定的目标风险是气候变化风险，兼顾排放情景以及减排、CDR和适应的影响。根据政策路径的不同，这些风险可能很大。

(3) 作为一项目标风险降低策略（连同实施减排、CDR和适应策略），部署SRM具有可能降低气候风险的潜力，直接为人类和自然生态环境带来巨大好处。通过减少全球平均气温的升高（或通过将气温稳定控制在既定目标内），SRM可能潜在减少气候变化在近期带来的不利影响并降低超出不可逆转的气候临界点的几率。

(4) SRM可能对生物物理系统构成抵消性风险。根据不同的SRM方法，其中可能包括平流层臭氧和地表紫外线辐射的变化、酸雨以及意外的气候变化，例如气温和降水模式的改变或过度降温。其中许多风险的水平将部分受到SRM部署的设计与治理的影响。

(5) SRM还可能对社会体系构成抵消性风险。根据不同的SRM方法，其中可能包括部署该技术导致的国际冲突（尤其是缺少治理的单方面部署、部署的预期或威胁，或对部署以及地方/区域意外影响的觉察到的损害）、突然终止导致气候迅速变化的风险（这也是一种生物物理风险）、SRM可能取代温室气体减排的风险，以及其他问题。同样，许多风险的水平将部分受到SRM部署的设计和治理的影响。

(6) SRM可以带来一些衍生益处。一些SRM方法的衍生益处可能包括增加太阳散射辐射（太阳光），这可能对某些生态系统和作物有益，以及略微减少中高纬度地区的对流层臭氧。然而，这些不确定的影响可能很小，应该不会对风险比较权衡产生明显作用。

(7) 在制定有关SRM的政策时，应比较其对多种风险的影响（包括目标风险降低、衍生益处和抵消性损害），它还应作为实施减排、CDR和适应政策组合的一部分。这些相互关联的影响应根据其可能性、影响程度、时间、不确定性、分布和相关因素进行评估。

(8) 不同力度的SRM可能会对整体风险产生不同的影响，具体取决于技术、部署和治理。更高力度的SRM可能会导致与温度相关的气候目标风险有更明显的降低，但同时也会增加SRM自身的抵消性风险。不同力度SRM所产生的目标和抵消性风险的具体水平与响应模式将取决于所采用的SRM技术、部署策略和治理机制。将整体风险最小化的SRM部署力度有可能是中低水平，这样可以在温室气体减排和CDR举措发挥作用的同时，降低变暖峰值，从而避免对近期气候造成最严重的影响。

(9) 随着温室气体减排量的增加，CDR和适应策略开始降低总体风险，对存在抵消性风险的SRM的需求可能会减少，从而降低整体风险敞口（受减排方案的抵消性风险影响）。必须进一步关注可能由共同原因或政策相互作用造成的多种风险之间的相互依存关系。

(10) 风险比较分析有助于将气候变化风险管理的重点放在更广的社会目标上，而不仅仅是控温目标。虽然控温也很重要，但有许多气候影响并不直接与温度成比例，还有除了气候以外的许多其他附带风险。用于评估联合国可持续发展目标(SDG)的指标可衡量人类福祉，可以用来评估SRM的多重风

险。该报告初步评估了相对于不适用SRM情况三种假设的风险管理组合即温室气体减排CDR，适应以及附加的SRM对实现SDG的影响。

(11) 可能需要借助新的治理体系或机制来限制对SRM的有害或不公正使用，确保任何部署都是有益且公正的，并评估和尽量减少任何抵消性损害。旨在应对气候变化及其影响的现有国际治理可能会提供一些有用的机制，但目前似乎不足以应对具有显著特征的SRM的需求。如果试图限制仓促或不明智的行动来控制全球性风险，SRM的治理可能更像是一种军备控制协议，而不是环境条约。