

News & Highlights

## 利用太阳能地球工程减缓全球变暖——前景仍不明朗

Sean O'Neill

Senior Technology Writer

2021年3月，一项罕见的现场试验在澳大利亚大堡礁展开，试验的内容是海洋云层增亮（MCB）技术。研究人员通过配有新型喷嘴的涡轮机，将海水水雾从研究管道的尾部喷送至空气中，观察产生的白色羽流升至空中（图1）[1]。

过去5年间，该地区的珊瑚礁出现了多次大面积白化，原因是气候变化导致海水温度升高[2]。海洋云层增亮项目由位于澳大利亚科夫斯港的南十字星大学（Southern Cross University）的高级讲师Daniel Harrison负责。作为珊瑚礁恢复和适应项目（Reef Restoration and Adaptation Program）[3]的一部分，海洋云层增亮项目由政府资助并发起倡议，目的是“对新型干预措施进行开发、测试及风险评估，以帮助恢复珊瑚礁生态系统。”

Harrison及其团队使用无人机和第二个管道上的各种气溶胶遥感设备，研究了试验产生的海水水雾的特征。结果显示，喷出的水雾量不足以对云层产生明显的改变。但应该进一步发展该项技术并扩大其规模，这样可增大珊瑚礁上方的云量，提高其对太阳光线的反射能力，从而在小范围内降低水温，保护珊瑚礁脆弱的生态系统。

研究人员虽然还没有正式公布结果，但是当看到喷出的大多数海水水雾蒸发，留下大量的微盐粒子升入空中，并融入上方的底层云后，他们对这样的结果还是很满意的。Harrison说：“在珊瑚礁上方制造羽流的一个最大的担忧，就是由蒸发引起的冷却会导致羽流沉积，并顺着海水扩散，因为这会决定整个方案是否可行。但我们发现实验中80%的羽流都升入了空中，这一结果让我们很受鼓舞。”



(a)



(b)



(c)

图1. 2021年3月，在澳大利亚大堡礁举办的一次现场海洋云层增亮技术试验中，研究团队使用配有定制喷嘴技术的涡轮机（a），将海水水雾通过其研究管道尾部射入空气（b）；从一张无人机拍摄的照片中可以看到这种白色羽流是如何升入空中的（c）。来源：（a）Alejandro Tagliafico；（b）、（c）Brendan Kelaher, Southern Cross University, 经允许。

该项工作将大众的目光转移到太阳能辐射干预 (SRM) 或太阳能地球工程这一新领域。该类型的试验很少见, 因为通过技术刻意改变气候在政治及环境角度都有争议, 而且也很少能受到资助。但随着气候变化的前景越来越令人担忧[4], 有细微迹象表明, 在逐步实施削减温室气体排放政策的同时, 对于太阳能辐射干预帮助缓解气候变化的潜力也进行了再评估。

太阳能辐射干预可分为很多子类别, 海洋云层增亮和平流层气溶胶注射 (SAI) 是其中最主要的两部分。该技术操作遵循的原则都是将更多的太阳光反射到太空中, 对地面达到一个冷却的效果。在海洋云层增亮技术操作中, 风将大海中喷出的粒子送入层积云, 该粒子发挥云凝结核 (CCN) 的作用——空气中的水分需要这种粒子凝结成云。扩大可供水分凝结的云凝结核数量, 会增加云层的反射表面积, 以及海面上该区域云层的亮度。

虽然过去几十年在利用播云技术提高降雨及降雪量方面进行了很多实践研究[5]——其本质和海洋云层增亮技术产生的效果相反, 但是海洋云层增亮技术的潜力只是由模拟实验的结果支持, 原因是这些实验并非故意释放足够的粒子去发挥作用或扰乱云层, 以及制造足够多的云, 专门用于太阳能辐射干预。底层海洋云层在船泄漏的污染轨迹附近以条痕形式变亮 (图2), 这一现象被称为“船

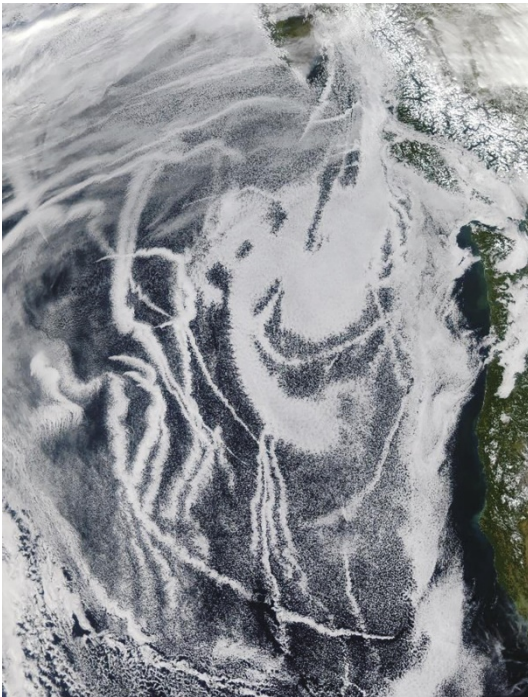


图2. 美国西海岸底层海洋云层泛白的条痕就是“船尾迹”, 由船用发动机排放到大气中的粒子造成。来源: Jeff Schmaltz, Moderate Resolution Imaging Spectrometer Rapid Response Team, National Aeronautics and Space Administration/Goddard Space Flight Center (public domain)。

尾迹” (ship track)。“船尾迹”可以算作偶然发现的一个海洋云层增亮技术的例子——并且该技术确实也是受此启发。

而平流层气溶胶注射则需要将气溶胶 (液态或固体粒子) 注入平流层, 使其扩散至全球, 在大气层高处形成反射层。巨型火山的喷发就很好地展示了平流层气溶胶注射对地球的冷却能力。例如, 1991年菲律宾 Mt Pinatubo 火山的喷发, 使得硫化氢和二氧化硫扩散至空气中。后来形成的反射性硫酸盐粒子将至少一年的全球气温拉低了  $0.5^{\circ}\text{C}$  [6]。

太阳能地球工程面临争议, 主要原因是其大规模实施带来的各种意外和地区性副作用。英国牛津大学大气、海洋和行星物理学教授 Philip Stier 说: “作为一种小规模科学试验, 云层增亮技术非常有趣——不仅仅因为其处于地球工程的背景之下, 还因为可以通过这种方式加深对气溶胶以及云层的理解。然而, 大规模应用就是另一码事儿了。比如说你实施了太阳能辐射干预技术, 由此造成该地区的大气循环改变, 进而可能导致邻国遭受突然的干旱。这种情况怎么处理? 谁又对造成的损失负责?”

尽管海洋云层增亮技术的小规模区域测试与未来将要进行的大规模应用区别很大, 但研究本身还是会引起很多争议[7-8]。美国西雅图华盛顿大学的高级研究员 Sarah Doherty [她还是海洋云层增亮项目 (Marine Cloud Brightening Project, MCBP) 的负责人, 该项目聚集了美国全部的大气科学家及工程师, 其目的是深入了解云层受气溶胶粒子的影响]说道: “一部分人从意识形态的角度考虑, 反对任何对气候系统进行的更改, 然而从更实际的角度说, 目前气候正在发生改变, 其温度将在几十年以后显著升高。面对这种危机我们应该采取怎样的一系列措施?”

在大堡礁现场试验中, Harrison 团队使用由海洋云层增亮技术设计的喷嘴, 将特定尺寸的海水水雾粒子高速喷至空气中 (图3)。其目的是使水分迅速蒸发, 空气中残留的微盐粒子可以发挥云凝结核的作用。该喷嘴技术由一个退休工程师团队负责完成, 该团队由美国加利福尼亚州帕洛阿尔托研究中心的多产发明家 Armand Neukermans 带领, 他同时还是早期喷墨技术的先驱。Doherty 说: “我们亲切地叫他 ‘Old Salts’。考虑到子孙以后的生存环境, 这些工程师很担忧气候问题。”

喷出粒子的大小对海洋云层增亮技术来说很重要。内部有大量更小液滴 (由更小的云凝结核造成) 的云层会比内部含有较大液滴的云层反射更多的太阳光——这种现象被称为图梅效应 (Twomey effect) [9]。海洋云层增亮项目团队认为喷射系统一定会产生海水水雾液滴, 这些水雾



图3. 海洋云层增亮技术现场试验中的定制喷嘴会产生大量极小的海盐粒子（干燥直径约50 nm），通过在小腔体中制造高压的两相流动混合物，喷出空气及液滴，并避免因迅速碰撞导致粒子体积变大。来源：Palo Alto Research Center，经允许。

液滴能够转化为直径为30~100 nm的海盐粒子[10]。尺寸稍小的粒子的效果不如云凝结核好，而大一点的又会降低凝结效率。Doherty说：“任何在尺寸上明显更大的粒子实际上都会引发云层中的降水，云层在失去水分的时候会变暗。”

最近一次的海洋云层增亮项目喷嘴技术对云层实际影响的现场试验已经是很多年前的事了，该团队将注意力主要集中在研究高分辨率气溶胶模型和云层互动模型，以便更好地理解这种潜在效应（图4）。与海洋云层增亮技术一样，大多数针对平流层气溶胶注射技术的工作还只限于模拟。因其成本高，又得不到资助，而且实验将粒子释放到大气中也会遭到公众坚决的反对。例如，2021年3月由于公众的强烈抗议，一项由哈佛大学（美国马萨诸塞州剑桥）研究团队带领进行的现场试验只能终止。研究人员本来计划在瑞典雅斯兰吉太空中心（Esrange Space Center）上方的南极圈内，利用高空气球，进行平流层受控扰动实验（Stratospheric Controlled Perturbation Experiment, SCoPEX）。第一次飞行不会在空中喷射任何东西，目的是通过使用设备获取一些经验。然而，由于利益相关者（包括环保人士、科学家以及瑞典萨米族原住民社区）的反对，

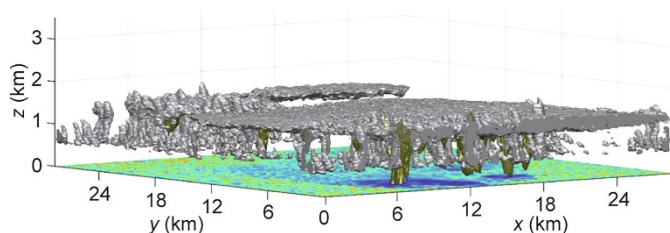


图4. 该模拟云场是通过高分辨率的巨大波流仿真模型制作而成，海洋云层增亮项目团队用它来研究从底层云喷射海盐气溶胶对低空海洋云层的影响。云层下面的白色和灰色代表海平面水温，蓝色表示温度低，黄色表示温度高。垂直的黄色区域代表降水。来源：Peter Blossey, University of Washington，经允许。

研究人员最终取消了这次试验[11]。

在进一步开展工作之前，平流层受控扰动实验咨询委员会建议“应该在瑞士推动社会参与”[12]。美国加利福尼亚大学圣克鲁斯分校的环境学副教授 Sikina Jinnah 说：“有些人会一直持反对意见，而其他人士可能会表示赞同并渐渐加入进来。花时间和精力让公众参与研究并正视其社会影响是很重要的。” Sikina Jinnah 于2021年5月加入了该平流层受控扰动实验咨询委员会。

Doherty 说，在该地区工作的科学家面临的其中一个问题就是，该项试验的小范围基础安全研究与太阳能辐射干预的实际实施情况大体相同。“在决定应用这些技术之前，我们一定要进行严格的讨论。但是这就会与基础研究完全脱离了，因为基础研究正是对试验的可行性进行探究。在多次对话中，这种差异并没有为人们所认识。”

Stier 同意这种说法，认为对研究太阳能辐射干预以及其他地球工程策略持反对意见是一种“道德危机”。他说：“如果人们认为政客会谨慎解释此类研究，并且认为这不会对缓解气候变化的减排活动造成影响，那么可能会有更多的人支持进行实验。人们的担忧来源于将研究误解为‘不需要对减排负责’。”

2019年3月，几个为此担忧的国家在联合国环境大会上提出一项方案，旨在收集信息，并为太阳能辐射干预与直接碳捕获（DCC）技术（见参考文献[13]中的一份近期的DCC发展报告）建立一种初级治理模型，但还没就此达成协议[14]。Jinnah 说：“要治理很难，从根本上来说，就不存在治理，目前几乎没有。”

然而，关于太阳能辐射干预的政治和文化惯性可能正在转变。例如，2021年年初，在瑞士的平流层受控扰动实验被搁置的同时，美国国家科学院、工程院与医学院发布了一份关于太阳能地球工程的报告，征集1亿~2亿美元用来资助探究此类干预措施的可行性[15]。关于预算，报告阐述如下：“该资金要能支持主要现场研究活动的进行，”而这需要满足非常严苛的条件，其中包括“提供尚未获得的关键观测数据，且该数据不可能通过实验室研究、建模和机会试验获得（如观测火山爆发、火箭羽流或‘船尾迹’）。”

2021年8月发布的最新联合国政府间气候变化专门委员会报告，呼吁进行大规模温室气体减排，将变暖幅度控制在接近1.5°C或2°C（超过预期）。虽然该报告承认太阳能辐射干预有能力帮助实现《巴黎协定》的目标，但对其当前的研究能力信心不足，无法准确地为战略政策提供帮助[4]。

信心不足当属意料之中。由于太阳能辐射干预技术在

实际操作中需要向大气中排放粒子，因此确保资助与政策支持仍面临困难。Doherty说：“这方面的研究到目前为止仍面临阻碍，原因是美国联邦资助机构不愿意对其进行资助。”

对于Harrison在大堡礁进行的试验，除非迫不得已，否则政府不会动用资金。Harrison说：“目前确实有一项危机，那就是珊瑚礁问题。如果不对此做些什么，它们就会消失。甚至从最积极的角度对气候行动进行预测，以目前的形势看，挽救珊瑚礁也为时已晚。”

如何才能使太阳能辐射干预科学在更广泛的程度上被利用起来？Jinnah说：“在解决问题的框架中思考太阳能地球工程，与同时认识到对其潜在危险的担忧即便较小也同样重要，二者本身就存在脱节。这对立的两方面使太阳能辐射干预饱受政治争议。若想使太阳能辐射干预科学未来能在全世界得到广泛实践，首先要解决的就是这一政治问题。”

## References

- [1] Tollefson J. Can artificially altered clouds save the Great Barrier Reef? *Nature* 2021;596(7873):476–8.
- [2] Readfearn G. Great Barrier Reef's third mass bleaching in five years the most widespread yet [Internet]. London: The Guardian; 2020 Apr 6 [cited 2021 Oct 27]. Available from: <https://www.theguardian.com/environment/2020/apr/07/great-barrier-reefs-third-mass-bleaching-in-five-years-the-most-wide-spread-ever>.
- [3] The Reef Restoration and Adaptation Program [Internet]. Brisbane: Reef Restoration and Adaptation Program; [cited 2021 Oct 27]. Available from: <https://gbrrestoration.org/>.
- [4] AR6 climate change 2021: the physical science basis [Internet]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change; [cited 2021 Oct 27]. Available from: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [5] Wang J, Yue Z, Rosenfeld D, Zhang L, Zhu Y, Dai J, et al. The evolution of an AgI cloud-seeding track in central China as seen by a combination of radar, satellite, and disdrometer observations. *JGR Atmos* 2021;126(11):2020JD033914.
- [6] Parker DE, Wilson H, Jones PD, Christy JR, Folland CK. The impact of mount Pinatubo on world-wide temperatures. *Int J Climatol* 1996;16(5):487–97.
- [7] Parson EA. Geoengineering: symmetric precaution. *Science* 2021; 374(6569):795.
- [8] Keith DW. Toward constructive disagreement about geoengineering. *Science* 2021;374(6569):812–5.
- [9] Twomey S. Pollution and the planetary albedo. *Atmos Environ* 1974; 8(12): 1251–6.
- [10] Murphy K, Cooper G, Doherty S, Wood R. Here's how we could brighten clouds to cool the earth [Internet]. New York City: IEEE Spectrum; 2021 Sep 7 [cited 2021 Oct 27]. Available from: <https://spectrum.ieee.org/climate-change>.
- [11] Fountain H, Flavelle C. Test flight for sunlight-blocking research is canceled [Internet]. New York City: The New York Times; 2021 Apr 2 [cited 2021 Oct 27]. Available from: <https://www.nytimes.com/2021/04/02/climate/solar-geoengineering-block-sunlight.html>.
- [12] SCoPEX Advisory Committee [Internet]. Cambridge: Harvard University; 2021 Mar 31 [cited 2021 Oct 27]. Available from: <https://scopexac.com/march-31-2021/>.
- [13] O'Neill S. Direct air carbon capture takes baby steps—giant strides are needed. *Engineering* 2022;8:3–5.
- [14] Jinnah S, Nicholson S. The hidden politics of climate engineering. *Nat Geosci* 2019;12(11):876–9.
- [15] The National Academics of Sciences Engineering Medicine. Reflecting sunlight: recommendations for solar geoengineering research and research governance. Washington DC: The National Academies Press; 2021.