小规模平流层注入气溶胶实验有助于地球工程研究

曹龙

浙江大学地球科学学院大气科学系, 杭州 310027

E-mail: longcao@zju.edu.cn

2018年12月12日, 国际著名学术期刊 *Nature* 刊登了“2018年度十大科学长篇专题报道: 这一年最难忘的科学故事”(https://www.nature.com/articles/d41586-018-07748-5). *Nature* 评选出 2018 年度最受欢迎的十大科学长篇专题报道: 从首个遮挡太阳的实验, 到传统中医的兴起, 再到拯救消失的野生动物. 其中, “遮挡太阳实验(sun-dimming experiment)”因为和利用地球工程(Geoengineering)方法给地球降温措施的紧密关联而受到广泛关注(https://www.nature.com/articles/d41586-018-07533-4).

所谓的遮挡太阳实验是“平流层控制扰动实验”(Stratospheric Controlled Perturbation Experiment(SCoPEX))的通俗说法. 在这项实验中, 来自哈佛大学的研究团队(由大气化学家 Frank Keutsch 教授和物理实验学家 David Keith 教授领导)计划最早于 2019 年向平流层大气中注入颗粒物, 并观测注入颗粒物在平流层中的物理和化学演变过程. 根据研究团队的计划(https://projects.iq.harvard.edu/keutschgroup/SCoPEX), SCoPEX 将利用气球承载仪器, 在美国西南地区约 20 km 的上空注入 100~1000 g 的碳酸钙(CaCO_3)颗粒(颗粒大小约 0.5 μm), 并观测这些颗粒如何在平流层扩散, 颗粒之间如何相互作用, 气溶胶颗粒的微物理和化学过程演变, 以及新注入的碳酸钙颗粒对周边平流层动力和化学性质的影响. 碳酸钙本身是一种自然界常见的无毒化合物, 不超过 1000 g 的注入量不会对环境产生负面影响. 值得强调的是, SCoPEX 实验本身的目的并不是考察向平流层注入碳酸钙颗粒能否通过遮挡太阳光给地球降温, 而是观测和分析在小尺度上, 这些注入平流层颗粒的理化演变特性和对周边平流层动力和化学性质的影响. 这对于深入理解平流层气溶胶地球工程的机理具有重要意义.

地球工程(geoengineering), 又称气候工程(climate engineering)或者气候干预(climate intervention), 指在大规模尺度上通过人工的方法干预气候, 从而使地球降温. 地球工程通常分为两大类: 二氧化碳移除(carbon dioxide removal, CDR)和太阳辐射管理(solar radiation management, SRM). CDR 旨在通过人为方法增强陆地和海洋碳汇, 或者直接捕捉大气中的 CO_2 , 通过降低大气中的 CO_2 浓度给地球降温^[1]. CDR 是实现二氧化碳负排放的重要手段. SRM 是通过各种方法降低到达大气和地面的太阳辐射, 从而抵

曹龙 浙江大学地球科学学院大气科学系教授、博士生导师. 主要研究领域为: (1) 大气二氧化碳、海洋碳循环、海洋酸化和气候变化的反馈作用; (2) 气候系统对不同外源强迫的响应机制; (3) 气候系统对不同地球工程措施的响应机制.

消温室气体的暖化效应. 目前提出的 SRM 措施主要包括向平流层注入硫酸盐气溶胶, 设置太空反光镜, 海洋上空积云白化, 增加海表或者沙漠的反照率等^[2].

《巴黎协定》确定了全球控温目标, 即在 21 世纪末, 把全球平均气温升幅控制在相比工业革命前 2℃之内, 并努力将气温升幅限制在 1.5℃之内. 2018 年, IPCC 发布了《全球升温 1.5℃特别报告》^[3], 强调了要将全球平均增温控制在 1.5℃之内, 从而避免一系列全球变暖带来的不利影响. 通过常规的减排措施, 2℃或 1.5℃的控温目标很难实现. 而所有的 1.5℃控温路径都需要实现二氧化碳的负排放^[3]. 地球工程有可能在实现 2 或 1.5℃的控温目标中起到补充作用^[4,5].

平流层气溶胶地球工程是最被广泛提出的 SRM 地球工程方法. 其基本原理是向平流层注入硫酸盐等具有散射性质的气溶胶, 向太空散射更多的太阳辐射给地球降温. 早在 1977 年, 科学家就提出了向平流层注入硫酸盐气溶胶给地球降温的设想^[6]. 大气化学家、诺贝尔化学奖获得者 Paul Crutzen^[7]的观点文章进一步激发了科学界对平流层气溶胶地球工程的研究兴趣. 平流层气溶胶地球工程之所以成为最被广泛提出的地球工程方法, 其中一个主要原因是它与火山喷发引起的气候效应有很大程度的可比性. 大规模火山喷发向平流层注入大量硫酸盐气溶胶, 散射太阳光, 从而使地球降温. 1991 年 6 月菲律宾沿海皮纳图博(Pinatubo)火山爆发, 向平流层注入约 2000 万吨的二氧化硫(SO_2), 使全球地表平均温度在随后的 18 个月间降低了约 0.5℃. 随后 2~3 年, 当火山喷发产生的硫酸盐气溶胶沉降后, 全球平均温度随之升高. 因此, 为产生持续的降温

效应,地球工程需要持续的向平流层注入硫酸盐气溶胶。向平流层注入硫酸盐给地球降温的同时可能破坏平流层臭氧层^[8]。因此,SCoPEx 实验中,首先计划向平流层注入碳酸钙颗粒。碳酸钙颗粒可能降低甚至逆转对平流层臭氧的破坏。随着实验的进展,有可能在未来进行向平流层注入硫酸盐的实验(<https://projects.iq.harvard.edu/keutschgroup/SCoPEx>)。通过向平流层注入碳酸钙颗粒,SCoPEx 实验也将帮助我们理解除了硫酸盐,是否可能向平流层注入其他类型的气溶胶,在降温的同时尽量降低对环境的负面影响(比如破坏臭氧层)。

由于太阳辐射管理地球工程的复杂性和对气候与环境影响的高度不确定性,迄今为止,还没有相关的外场实验。同时,小规模的外场实验(比如 SCoPEx)也很难直接预测大规模地球工程实施对气候系统的影响。因此,迄今为止,所有关于地球工程对气候和环境影响的直接研究都是通过数值模拟的方法开展。通过一系列气候和地球系统模式模拟发现,向平流层注入硫酸盐气溶胶理论上可以抵消二氧化碳增加产生的温室效应,减缓海冰融化和海平面升高,但是同时也会造成一系列问题,包括降温的地区差异、全球和地区降水分布的变化、大气环流的变化、平流层动力和化学性质的变化等^[9]。同时,平流层气溶胶地球工程通过改变光照强度和气候条件,会进一步影响农作物生长。这些问题都存在很大的不确定性,值得深入研究。

笔者认为,SCoPEx 实验有几个方面的重要意义。首先,它将从外场实验的角度直接观测新注入的气溶胶颗粒在平流层中的理化特性(例如气溶胶滞留时间、气溶胶凝结碰撞过程、气溶胶空间分布、气溶胶大小演变、气溶胶辐射特性等)及其对周边平流层动力和化学过程(平流层热力和环流结构、水汽浓度和分布,臭氧浓度和分布、对流层-平流层交换等)的影响,这是理解平流层气溶胶地球工程对气候系统影响的基础。其次,以 SCoPEx 实验结果为参照,通过相应的模式模拟,可以检验模式对平流层注入气溶胶响应的模拟能力,从而为进一步改进气候模式中的气溶胶微物理过程和平流层动力和化学过程模拟提供参考。

这不仅仅有助于气候模式更好地模拟平流层气溶胶地球工程对气候系统的影响,而且也有助于气候模式更好模拟气溶胶过程和平流层过程,从而更好地预测气候变化。

从工业革命至今,由于化石燃料燃烧和土地利用,人类活动已经累积向大气排放了约 665 GtC(1 GtC=10⁹ t, 10 亿吨碳)的二氧化碳^[10]。二氧化碳和其他温室气体的排放,已造成了较工业革命前约 1℃的全球平均增温。如果我们不尽早采取强有力的减排措施,实现 2℃或者 1.5℃的控温目标难度非常大。地球工程作为应对全球变暖的备用方法之一,值得尽早开展深入的研究。太阳辐射管理地球工程也可以和温室气体减排与二氧化碳移除措施相结合以达到控温的目的。当二氧化碳强排放时,实施地球工程以达到控温目标。随着二氧化碳减排强度和二氧化碳移除措施的加大,不断减弱地球工程的实施强度,最后实现仅仅通过减排和碳移除达到控温目标^[3,11]。另外,对地球工程的研究本身也有助于对气候系统规律和气候系统对外源强迫响应机理的进一步认知。例如,SCoPEx 实验就可以帮助我们更好地理解气溶胶在平流层中的微物理和化学过程。

中国有关地球工程的研究近年来也有了较迅速的发展。由北京师范大学、浙江大学、中国气象局和中国社会科学院城市发展与环境研究所共同承担的科技部重点科学研究计划“地球工程基础理论和影响评估研究”(2015~2019)对太阳辐射管理地球工程的机理、气候响应和环境影响进行了系统的研究,取得了一系列创新性的研究成果:包括平流层注入气溶胶对飓风的影响^[12],平流层注入气溶胶对极端温度和降水的影响^[13],平流层气溶胶地球工程和卷云地球工程结合对气候系统的影响^[14],不同地球工程方法对气候系统影响的异同^[15],太阳辐射管理地球工程对碳循环和海洋酸化的影响^[16,17]等。针对地球工程的研究将有助于我们做好用非常规方法应对气候变化的准备,同时将加大我们在国际气候谈判中的话语权。笔者认为,在今后的研究中,除了继续开展地球工程的模拟研究,也可以在适当的时机,开展类似 SCoPEx 的外场实验,以更好地理解地球工程的作用机理和可能影响,引领国际研究的前沿。

致谢 感谢国家重大基础科学研究计划(2015CB953601)资助;感谢哈佛大学工程与应用科学学院博士研究生代祯(Frank Keutsch 教授和 David Keith 教授组成员,非 SCoPEx 团队成员)对 SCoPEx 的补充解释。

推荐阅读文献

- 1 National Research Council. Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration. Washington DC: National Research Council of the National Academies, 2015
- 2 National Research Council. Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth. Washington DC: National Research Council of the National Academies, 2015
- 3 Intergovernmental Panel on Climate Change. Special Report on Global Warming of 1.5°C. Cambridge: Cambridge University Press, 2018
- 4 Parker A, Geden O. No fudging on geoengineering. Nat Geosci, 2016, 9: 859
- 5 MacMartin D G, Ricke K L, Keith D W. Solar geoengineering as part of an overall strategy for meeting the 1.5°C Paris target. Philos

- Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci, 2018, 376: 2119
- 6 Budyko M I. Climatic Changes. Washington DC: American Geophysical Union, 1977
- 7 Crutzen P J. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Clim Change*, 2006, 77: 211–220
- 8 Pitari G, Aquila V, Kravitz B, et al. Stratospheric ozone response to sulfate geoengineering: Results from the Geoengineering Model Inter-comparison Project (GeoMIP). *J Geophys Res-Atmos*, 2014, 119: 2629–2653
- 9 Irvine P J, Kravitz B, Lawrence M G, et al. An overview of the earth system science of solar geoengineering. *Wiley Interdiscip Rev-Clim Change*, 2016, 7: 815–833
- 10 Quéré C L, Andrew R M, Friedlingstein P, et al. Global carbon budget 2018. *Earth Sys Sci Data*, 2018, 10: 2141–2194
- 11 Keith D W, MacMartin D G. A temporary, moderate and responsive scenario for solar geoengineering. *Nat Clim Change*, 2015, 5: 201–206
- 12 Moore J C, Grinsted A, Guo X, et al. Atlantic hurricane surge response to geoengineering. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 13794–13799
- 13 Ji D, Fang S, Curry C L, et al. Extreme temperature and precipitation response to solar dimming and stratospheric aerosol geoengineering. *Atmos Chem Phys*, 2018, 18: 10133–10156
- 14 Cao L, Duan L, Bala G, et al. Simultaneous stabilization of global temperature and precipitation through cocktail geoengineering. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 7429–7437
- 15 Duan L, Cao L, Bala G, et al. Comparison of the fast and slow climate response to three radiation management geoengineering schemes. *J Geophys Res-Atmos*, 2018, 123: 11980–12001
- 16 Jiang J, Zhang H, Cao L. Simulated effect of sunshade solar geoengineering on the global carbon cycle. *Sci China-Earth Sci*, 2018, 61: 1306–1315
- 17 Wen Z L, Jiang J, Cao L. Simulated effects of solar geoengineering on ocean acidification (in Chinese). *Clim Change Res*, 2019, 15: 41–53 [温作龙, 姜玖, 曹龙. 太阳辐射管理地球工程对海洋酸化影响的模拟研究. *气候变化研究进展*, 2019, 15: 41–53]

Summary for “小规模平流层注入气溶胶实验有助于地球工程研究”

Small scale stratospheric aerosol injection experiments benefits solar geoengineering research

Long Cao

Department of Atmospheric Sciences, School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
E-mail: longcao@zju.edu.cn

Solar geoengineering, also termed as solar radiation management or albedo modification, has been proposed as a potential means to mitigate anthropogenic global warming. Proposed solar geoengineering schemes include deployment of mirrors in space, increase of low-level cloud albedo, and enhancement of land or ocean surface albedo. One of the most widely discussed solar geoengineering methods is to inject sulfate aerosol or its gaseous precursors into the stratosphere to scatter more sunlight to space, and thus cool the Earth. To date, all studies on stratospheric aerosol injection have been climate modeling, engineering assessments, and social science research (including study of economic impacts, ethical/philosophical implications, governance issues, public perceptions). As an attempt to study fundamental processes related to stratospheric aerosol geoengineering, a team of scientists from Harvard University plans to release about 100 to 1000 grams of calcium carbonate particles into the stratosphere at an approximate height of 20 km above the Southwest United States as early as 2019. This experiment, named Stratospheric Controlled Perturbation Experiment (SCoPEX), would be the first field study intended to be relevant to solar geoengineering. *Nature* selected ten favorite feature stories in 2018: One of them is “First Sun-dimming experiment will test a way to cool Earth”, which refers to SCoPEX. Calcium carbonate aerosols, instead of sulfate particles, will be used in this experiment because past research showed negative effect of sulfate aerosols on stratospheric ozone. In my view, the SCoPEX experiment is useful in several aspects. First, the direct observation of the fate of injected particles into the stratosphere would help to deepen our understanding of the microphysics (such as aerosol dispersion and aerosol size distribution and evolution) of injected aerosols and the effect on ambient stratospheric dynamics and chemistry. This observation is important for understanding fundamental sciences relevant to climate response to stratospheric aerosol injection. Second, observational results from SCoPEX can be used to bridge the gap between plume-scale and GCM (General Circulation Model)-scale aerosol processes. These results can be used to test GCM-simulated physical and chemical processes of injected stratospheric aerosols, and help improve model’s ability in predicting climate response to stratospheric aerosol injection. Third, the insight gained from SCoPEX will not only be useful for solar geoengineering research, but in general provide new insights into our understanding of aerosol microphysics and its climate implication as well. Many useful insights into the climate response to solar geoengineering have been gained from climate modelling studies. However, model representation of climate physics and chemistry, in particular small-scale processes, rely on real world observations. Field experiments like SCoPEX will provide new opportunities for understanding climate response to stratospheric aerosol injection.

climate change, solar geoengineering, sun-dimming, stratospheric aerosol

doi: 10.1360/N972019-00300