



## Views &amp; Comments

## 气候干预：对全球安全和恢复力可能产生的影响

Marcia McNutt

Editor-in-Chief, Science Journals

### 1. 气候变化的挑战

气候变化已不再只是一件未来可能发生的事：已经有足够的证据表明气候正在发生变化。海平面正加速上升[1]，风暴变得更加猛烈[2]，依靠雪山融水生存的人们在干旱季节面临水资源供应不足的境况<sup>†</sup>。超过70亿的人口要艰难地适应这些变化。然而更令人担忧的是，人们还要承受由干旱、洪水和海平面上升造成的难民带来的不稳定因素的影响。例如，目前导致叙利亚内战的一个原因就是中东地区连年遭受干旱困扰[3]。由于气候变化可能对全球安全造成严重影响，它是我们这个时代要面临的最重要的重大挑战之一，与能源、可持续性和健康等重大挑战并存。如果我们能够解决气候变化这个重大挑战，那么在其他问题上也将取得重大进展。

### 2. 气候干预

到目前为止，大多数应对气候变化影响的研究都聚焦于通过减少温室气体排放来减缓气候变化，或者使人类和自然系统适应气候变化所带来的影响。近期，美国国家科学院(NAS)召开了一次委员会会议来寻求第三种解决方案，那就是气候干预，也称之为地球工程[4,5]。

会议报告的主要结论是，气候干预不能作为减缓或适应气候变化的替代品。应对气候变化的努力的重点应该继续放在减缓温室气体排放上，同时使人类自身适应气候变化带来的影响，因为这些方法目前已被较好地定

义且量化风险不高，技术准备度较高。而气候干预策略还处于早期发展阶段。

许多关于有效性、经济成本和意外后果潜在性等方面的问题亟待解决。也就是说，在未来，气候干预有可能成为气候策略组合的一部分。

#### 2.1. 二氧化碳清除

作为气候策略组合的一部分，二氧化碳清除收效大，风险低。二氧化碳清除可以采用自然方法，增强生物或地质碳汇，如土地利用管理方面的有益变化和加速岩石风化；也可以采用工业方法，如直接空气捕集封存(DACS)或生物质发电联合碳捕集封存(BECCS)。需要进行更多的研究来开发可行、可扩展、价格实惠的技术，特别是要降低能源和材料消耗。

这一类气候干预方法的主要优点是，它能直接解决导致气候变化的根本原因——大气中过量的温室气体。然而，该方法的缺点是实施起来比较缓慢，并且难以衡量实际的解决效果。海洋铁施肥(OIF)是一种可能会产生不利环境后果的二氧化碳清除方法。NAS委员会建议在确定OIF为一种有效或安全的策略之前应该进行更多的研究。

需要特别指出的是，工业方法必须与可靠的二氧化碳储存方法并行实施数千年。符合要求的、储存量足够大的可能场所是已枯竭的油气储层和盐碱含水层。

需要进行额外的研究来寻找注入二氧化碳的最佳方法，特别是带有坍塌孔隙空间的枯竭的油气储层、监测和泄漏检测。如果能够找到将捕集的气体进行工

<sup>†</sup> An example is shown in <http://www.water.ca.gov/climatechange/>.

业再利用的方法，那么二氧化碳捕集的经济效益将得到快速提高。

## 2.2. 反照率修正

第二种气候干预方法是反照率修正：减少地球吸收的日光以降低地球表面温度。NAS委员会深入考虑了两种策略：部署平流层气溶胶(具体来说就是向平流层注入二氧化硫等气溶胶前体，随后通过一系列反应转化成气溶胶)和海洋云增白(通过在云底附近引入气溶胶来提高云层的反射率，该方法多用于海洋上空的云层)。其他方法如部署空间反射镜或改变表面反照率(把屋顶涂成白色)尚未进行细节方面的研究，因为以往的工作已经表明，这些方法太昂贵而且可扩展性较差。研究人员曾简单测试了经修饰的卷云，但在这一点上的研究很有限。

反照率修正可以快速降低地球表面温度，且与二氧化碳清除方法相比较为便宜。然而它的主要缺点是，该方法作用于气候系统中高度敏感且目前人们了解最少的一部分——地球辐射平衡。关于反照率修正值得关注的是，人们试图用一个高度敏感的控制旋钮去“调低”地球的温度，但是这个旋钮的控制能力是未知的。

反照率修正目前存在显著的风险。研究人员虽然对环境风险有一定了解，但又知之甚少，如平流层臭氧量的减少、降水量和降水模式的变化以及尚未明确的区域性差异。反照率修正不影响大气中的二氧化碳含量，因此需要继续实施，直到其他自然或人为干预使二氧化碳浓度达到可接受程度。反照率修正在政治、社会、法律、经济和伦理等方面可能产生不可预料、难以控制且令人遗憾的后果。这些后果虽然难以量化，却很重要。基于这些原因，NAS委员会建议当前不应该大范围实施可能

改变气候的反照率修正。

然而，在未来有可能出现这种情况，届时社会需要更好地了解反照率修正的意义和潜在后果。例如，在面对环境危机时，决策者需要知道采用反照率修正的风险是否比不采取任何措施的风险更大。另一种情况是，如果某方单边/不对等地实施了反照率修正，全球决策者需要了解可能产生的后果。想要确定反照率修正能否作为策略组合的一部分，就得考虑第三种状况。例如，暂时冷却地球，为二氧化碳清除提供充足的时间以减少温室气体至安全水平。

基于这些原因，人们需要对反照率修正进行更多的研究。想要更好地约束反照率修正的潜在影响和风险，研究策略的第一部分就是要提高全球检测和测量辐射强迫变化以及与气候相关变化的能力。目前的观测性能缺乏足够的能力来检测和监控部署反照率修正产生的环境影响。

迄今为止，反照率修正研究涉及大量的建模。最终，一些有限的现场部署也将是有益的。在启动现场工作之前，委员会建议启动审慎的程序，以调查除已有研究之外，反照率修正研究需要的研究管理类型，以及需要此类管理的研究类型，这就需要考虑对辐射强迫的预期影响幅度、潜在的直接和间接的不利影响和其他因素。

表1对比总结了上述两种气候干预方法。

## 3. 结论

气候变化问题是当今时代所面临的重大挑战之一，有可能对全球安全造成影响。气候干预与减缓气候变化和适应气候变化所带来的影响一样，是解决这一挑战的一种手段。二氧化碳清除方法比较安全，但是要进行必

表1 气候干预的不同方法对比研究

Carbon dioxide removal proposals...	Albedo modification proposals...
...address the cause of human-induced climate change (high atmospheric greenhouse gas (GHG) concentrations)	...do not address the cause of human-induced climate change (high atmospheric GHG concentrations)
...do not introduce novel global risks	...introduce novel global risks
...are currently expensive (or comparable to the cost of emission reduction)	...are inexpensive to deploy (relative to cost of emissions reduction)
...may produce only modest climate effects within decades	...can produce substantial climate effects within years
...raise fewer and less difficult issues with respect to global governance	...raise difficult issues with respect to global governance
...will be judged largely on questions related to cost	...will be judged largely on questions related to risk
...may be implemented incrementally with limited effects as society becomes more serious about reducing GHG concentrations or slowing their growth	...could be implemented suddenly, with large-scale impacts before enough research is available to understand their risks relative to inaction
...require cooperation by major carbon emitters to have a significant effect	...could be done unilaterally
...for likely future emissions scenarios, abrupt termination would have limited consequences	...for likely future emissions scenarios, abrupt termination would produce significant consequences

要的研究以提高技术成熟度和经济竞争力。另一方面，反照率修正可快速实施且相对便宜，然而就全球和区域性后果来说，此类解决方案难以控制，因此当前不应考虑。

## 致谢

笔者对“地球工程气候：技术评估和影响探讨”项目委员会的以下成员为本文所做的努力深表感谢：Waleed Abdalati, Ken Caldeira, Scott C. Doney, Paul G. Falkowski, Steve Fetter, James R. Fleming, Steven P. Ham-

burg, M. Granger Morgan, Joyce E. Penner, Raymond T. Pierrehumbert, Philip J. Rasch, Lynn M. Russell, John T. Snow, David W. Titley, and Jennifer Wilcox。

## References

- [1] Hay CC, Morrow E, Kopp RE, Mitrovica JX. Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. *Nature* 2015;517(7535):481–4.
- [2] Marvel K, Bonfils C. Identifying external influences on global precipitation. *Proc Nat Acad Sci* 2013;110(48):19301–6.
- [3] Gleick PH. Water, drought, climate change, and conflict in Syria. *Wea Climate Soc* 2014;6(3):331–40.
- [4] National Research Council. *Climate intervention: carbon dioxide removal and reliable sequestration*. Washington, DC: The National Academies Press; 2015.
- [5] National Research Council. *Climate intervention: reflecting sunlight to cool Earth*. Washington, DC: The National Academies Press; 2015.