

温控目标下部署太阳地球工程的气候经济影响初步评估

廖 华^{1,2,3,4,*}, 郑国梁^{1,2,3,4}

1. 北京理工大学 能源与环境政策研究中心, 北京 100081;
2. 碳中和系统工程北京实验室, 北京 100081;
3. 碳中和系统与工程管理国际合作联合实验室(教育部), 北京 100081;
4. 北京理工大学 管理学院, 北京 100081



摘 要 : 由于1.5℃和2℃温控目标实现难度大,围绕“是否及如何部署太阳地球工程(又称太阳辐射干预, Solar Radiation Modification, SRM)”的讨论日益增多。本文拓展了经典气候经济动态综合评估模型的系统边界,将SRM的冷却机制、部署成本、新增损害(如温度骤变、海洋酸化加剧、臭氧损失、空气污染等)纳入模型,尝试探究在以上温控目标下灵活部署、延迟部署、禁止部署等3类SRM部署策略的气候经济影响。结果表明:选择不同部署策略会显著改变碳减排最优路径。2℃温控目标下,灵活部署策略下的最优碳价基本维持在禁止策略下碳价一半的水平,最优初始碳价为34\$/tCO₂。反映出灵活部署SRM能够降低减排成本、削弱减排力度。延迟部署策略(2℃温控目标、1.5℃部署阈值)下的最优初始碳价高达140\$/tCO₂,并依赖于大规模负排放技术,且大约在2065年增长到最高值,约为500\$/tCO₂。表明在降温效果、新增损害、挤出减排等机制的动态交互作用下,延迟部署SRM反而会加大早期减排力度(与禁止部署策略相比)。相比于禁止部署策略,组合实施SRM和碳减排以实现温控目标,能够显著改善社会福利。同时,相比于2℃目标,1.5℃目标下实施SRM的福利改善效果更大。高风险、缺共识的SRM是国际气候治理新动向,建议加强SRM相关的前瞻性研究。

关 键 词 : 地球工程;气候政策;太阳辐射干预;综合评估建模

中图分类号 : F015; F205 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-4981(2025)02-0163-11

DOI: 10.3724/j.issn.2097-4981.JECC-2025-0013

Preliminary Assessment of the Climate-Economic Impact of Deploying Solar Geoengineering under Temperature Targets

LIAO Hua^{1,2,3,4,*}, ZHENG Guo-Liang^{1,2,3,4}

1. Center for Energy and Environmental Policy Research, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Beijing Lab for System Engineering of Carbon Neutrality, Beijing 100081, China;
3. Joint International Research Laboratory of Carbon Neutrality System and Engineering Management, Beijing 100081, China;
4. School of Management, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract : In the context of the 1.5℃ and 2℃ temperature targets, there is a growing discussion about

收稿日期: 2025-03-10; **接受日期:** 2025-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(71925008, 724B2005, 72293600)

通讯作者: 廖华(1980—), 博士, 教授, 主要从事能源与气候经济研究。E-mail: hliao@bit.edu.cn

"Whether and how to deploy solar radiation modification (SRM)". This paper extends the system boundary of the classical climate economic integrated assessment model by endogenizing the cooling effects, deployment cost, and associated damages (abrupt temperature change, exacerbated ocean acidification, ozone loss, air pollution, etc.), and tries to explore the climate-economic impacts of the three types of SRM deployment strategies, including flexible, delayed, and banning deployment, under the temperature control targets. The preliminary results show that SRM deployment strategy choices significantly change optimal abatement actions. Under 2°C temperature control targets, the optimal carbon price of the flexible strategy, with an initial carbon price 34\$/tCO₂, stays at roughly half the level of the carbon price of the banning strategy, reflecting that flexible deploying SRM reduces abatement cost and abatement efforts. Under the 2°C temperature control target, the initial optimal carbon price of the delayed strategy (with the 1.5°C SRM deployment threshold), is as high as \$140/tCO₂ and relies on large-scale negative emission technologies, with a carbon price that grows to a maximum value of about \$500/tCO₂ in 2065, suggesting that, the delayed SRM may require an increase in early carbon mitigation efforts (compared to the banning strategy) due to the dynamic interaction of the cooling effect, associated damages, and extrusion of abatement. Compared to not deploying SRM at all, a combination of SRM and abatement significantly improves social welfare in achieving temperature targets. Compared with the 2°C target, there is a greater welfare improvement effect of deploying SRM under the 1.5°C target. High-risk and less-consensus SRM is a new trend in global climate governance, and SRM-related prospective studies need to be carried out in advance.

Key Words : geoen지니어ing; climate policy; solar radiation modification; integrated assessment modeling

0 引言

当前,全球气候行动尚不足以应对日益严峻的气候挑战。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change)指出,当前国家自主贡献目标和实际减排行动均未达到《巴黎协定》温控目标所需的快速且深度的减排水平^[1]。因此,为实现温控目标,针对采用地球工程手段进行人工干预气候系统的讨论日益增多^[2]。地球工程分为两大类:①太阳辐射干预(Solar Radiation Modification, SRM),又称太阳辐射修正或太阳辐射管理,指在较大地球尺度或规模上,通过人为干预地球系统辐射平衡抵消全球变暖及其一些有害影响,例如平流层气溶胶注入和海洋云层增亮等^[3];②二氧化碳移除,指人为捕集并储存大气中的二氧化碳,例如,直接空气捕获和海洋施肥等^[4]。碳移除被视为广义的碳减排措施(负排放),因此,太阳地球工程常指太阳辐射干预。

SRM能够打破地球碳循环系统的惯性约束,因而与碳减排和负碳技术形成互补^[5]。包括Schelling、Crutzen和Nordhaus等多位诺贝尔奖获得者在内的科学家,对SRM予以高度关注。Crutzen^[6]指出,SRM可作为应对全球气候剧烈变暖风险的潜在方案;

Schelling^[7]认为,SRM有望将复杂的全球气候治理难题转化为相对简单的成本分摊问题;Nordhaus^[8]认为,SRM具有抵消人为气候变暖的潜力,但其潜在影响具有巨大不确定性,同时会给国际合作带来复杂后果。政策界同样高度关注SRM技术的发展和潜在影响,部分国家和机构正在推进SRM研究。2023年,美国白宫科技政策办公室发布了一项报告,旨在为SRM领域制定研究计划,并探讨其科学、社会和治理的相关问题^[9];欧盟委员会呼吁,全面评估SRM的风险与不确定性,并推动新型国际治理框架的讨论^[10];联合国环境规划署支持国际社会投入资源了解SRM的潜在风险和不确定性、探索潜在治理方案^[11];美国国家科学基金会、欧洲研究理事会等已推动或支持SRM研究项目,涉及地球物理学、工程技术科学、经济管理科学等多个领域;我国的国家科技计划系列也布局了相关研究。

SRM由于无法解决气候变化的根源(即温室气体累积)问题,被部分专家视为一种不完善的补充手段^[12]。同时,受限于相关自然科学研究进展缓慢,SRM仍存在诸多风险与不确定性。例如,气候响应、生态后果、健康威胁等^[13-16]。因此,无论是在学术界还是政策界,围绕SRM的部署策略仍存在大量分歧。部分学者担心SRM的低成本和快速降温效果可能产

射强迫； M_t^{at} 、 M_*^{at} 分别为 t 时期和工业化前的大气碳浓度； F_t^{abate} 为可消减的非二氧化碳温室气体的外生辐射强迫； F_t^{ex} 为不可消减的温室气体和其他来源的外生辐射强迫； g_t 为第 t 期的辐射控制率，表示SRM所抵消的辐射部分。

因此， $\eta \times \log_2(M_t^{\text{at}} / M_*^{\text{at}}) + F_t^{\text{abate}} + F_t^{\text{ex}}$ 为SRM部署前的由温室气体累积所引起的正常情况辐射强迫，而实际辐射强迫 F_t 取决于 g_t 。

部署SRM的新增损害（以输出百分比衡量） D_t^g 取决于 g_t 。遵循Gramstad和Tjøtta^[36]的设定， D_t^g 为辐射控制强度的二次函数，为边际递增函数，如式（2）所示：

$$D_t^g = \omega^g \times g_t^2 \quad (2)$$

SRM的部署成本 Φ_t^g 如式（3）所示：

$$\Phi_t^g = \theta_1^g \times g_t^{\theta_2^g} \quad (3)$$

其中， ω^g 为损失参数； θ_1^g 、 θ_2^g 为成本参数。以上参数校准参照文献^[32]进行。其中， ω^g 在基准情景中设定为3%，即由于完全抵消辐射强迫（ $g_t=1$ ）而造成全球GDP总量3%的损失，这是以往文献对SRM损害的较高估计值。

1.2 与SRM有关的气候损害

部署SRM取代了部分减排行动，因此碳浓度上升可能直接增加气候损害（如海洋酸化）。Heutel等^[32]对碳浓度相关的损害进行了建模，但忽略了与温度骤变相关的气候损害。因此，假设气候变化损害 D_t 来自碳浓度 D_t^M 和大气温度 D_t^T ，碳浓度损害部分遵循以往文献的建模和校准方法，但在温度相关损害中纳入了温度骤变的损害。

$$D_t = D_t^M + D_t^T \quad (4)$$

$$D_t^M = \varphi_1 (M_t^{\text{at}} - M_*^{\text{at}})^2 \quad (5)$$

其中， φ_1 为碳浓度损害参数； $\varphi_1(M_t^{\text{at}} - M_*^{\text{at}})^2$ 为由于 t 时期碳浓度增加而造成的气候损害，表示SRM没有解决与大气中二氧化碳增加相关的损害，如海洋酸化。由于SRM会迅速影响辐射平衡，温度骤变也可能造成损害。因此，大气温度造成的气候损害 D_t^T 取决于长期和短期温度变化。

$$D_t^T = \beta_1 (T_t^{\text{at}})^2 + \beta_2 (T_t^{\text{at}} - \overline{T_{s,t}^{\text{at}}})^2 \quad (6)$$

其中， T_t^{at} 为第 t 期的温升幅度（即与工业化前水平相比，大气温度的升高）； $\overline{T_{s,t}^{\text{at}}}$ 为过去 s 年中 T_t^{at} 的平均值。式（6）中的第一项表示长期温度变化造成的损害，其形式与DICE模型中的损害函数相同；第二项表示温度骤变损害，其中， $T_t^{\text{at}} - \overline{T_{s,t}^{\text{at}}}$ 表示短期温度变化^[37]，由于DICE模型的短期温度变化很小，因此加入这一项对其结论没有显著影响。 φ_1 和 β_1 根据文献^[32]进行校准， β_2 和 s 缺乏相关信息。假设基线为5年平均（ $s=5$ ），即假设温度骤变的影响主要在5年内体现，并假设温度骤变1℃会造成5%的经济损失，即 $\beta_2=5\%$ 。

1.3 部署策略设置

本文主要对比3种典型部署策略：

- 1) 灵活部署策略：灵活且不受约束地综合使用减排和SRM手段，以实现社会福利最大化；
- 2) 延迟部署策略：由于温升越过1.5℃后的气候风险显著上升，在全球平均温度升高至1.5℃之后再启动SRM部署；
- 3) 禁用部署策略：完全不部署SRM，仅依靠传统减排措施实现气候目标。

下面介绍模型的目标函数和3个控制变量（ g_t 、排放控制率 μ_t 、消费 C_t ）之间的权衡关系，以及如何模拟3类典型的部署策略。

目标函数为在 T 期间使社会福利 W 最大化。

$$\max_{g_t, \mu_t, C_t} W = \sum_{t=1}^T U_t \times e^{-\rho t} \quad (7)$$

其中， U_t 为第 t 期的效用； ρ 为贴现率。

决策者通过选择每个时期的 g_t 、 μ_t 和 C_t ，最大化规划期间的 W 。每个时期的效用 U_t 为第 t 期的总人口 L_t 和 C_t 的函数，如式（8）所示：

$$U_t = L_t \times \frac{(C_t/L_t)^{1-\alpha}}{1-\alpha} \quad (8)$$

其中， α 为跨期替代弹性的倒数。

决策者需要在每个时期权衡 g_t 、 μ_t 和 C_t 。三者的权衡关系如下：①增加当期 C_t 可以直接提升当期福利，但会减少投资量，进而减少未来资本存量及未

来产出。②提升 μ_t 会通过减缓气候变化,提高未来可用于消费和投资的产出量,但伴随的减排成本会减少产出量。③提升 g_t 会通过快速降低温度减少气候损害,从而提高可用于消费和投资的产出量。然而,一方面,部署SRM会带来新的产出损害。另一方面,由于部署SRM减少气候损害的效果会降低减排的边际收益,可能会减少削弱 μ_t ,进而增加碳浓度损害(如海洋酸化)。

通过对控制变量施加约束,刻画不同SRM部署策略。对于SRM灵活部署策略,不施加约束;对于禁用部署策略,在所有时期,施加 $g_t = 0$ 的约束。对上述两种策略的建模均为非线性连续系统最优控制建模。对于SRM延迟部署策略,应用大 $\mathcal{M}$ 法刻画:引入一个足够大的正数 $\mathcal{M}$ 和一个二元变量 δ_t (取值为0或1),使“在全球平均温度升高至 $\overline{T^{\text{at}}}$ 后再启动SRM部署”这一约束成立,此处 $\overline{T^{\text{at}}} = 1.5^\circ\text{C}$ 。此时,模型转变为混合整数非线性系统最优控制模型。具体施加如下3个约束:

$$T_t^{\text{at}} \leq \overline{T^{\text{at}}} + (1 - \delta_t) \times \mathcal{M} \quad (9)$$

$$T_t^{\text{at}} > \overline{T^{\text{at}}} + \left(-\delta_t \times \overline{T^{\text{at}}} \right) \quad (10)$$

$$g_t \leq (1 - \delta_t) \quad (11)$$

其中, $\overline{T^{\text{at}}}$ 为SRM启动阈值。 $\delta_t = 1$ 表示当 $0 < T_t^{\text{at}} \leq \overline{T^{\text{at}}}$ 时, $g_t \leq 0$, 即不允许部署SRM; 而 $\delta_t = 0$ 表示 $T_t^{\text{at}} > \overline{T^{\text{at}}}$ 时, $g_t \leq 1$, 即允许开始部署SRM。

通过对控制变量施加不同约束分别模拟3种典型部署策略。3种策略的比较评估均遵循相同基准:社会规划者均在统一的气候经济系统约束下通过选择最优的SRM政策(g_t)、减排政策(μ_t)、经济政策(C_t)实现社会福利最大化。对于社会规划者而言,3种策略的不同在于:由于对控制变量施加不同约束条件,社会规划者在实现福利最大化目标时,可供选择的行动集(政策组合)存在差异。

2 主要结果

以往文献探索了SRM与减排政策的最优组合^[24]。然而,对于不同SRM部署策略带来的影响,现有讨

论仍显不足。鉴于部署策略对成本效益的重要影响,本节评估了在 1.5°C 和 2°C 温控目标下,不同SRM部署策略下的最优气候政策组合(减排和SRM)和气候经济综合影响,并进一步探讨了SRM在实现温控目标过程中改善福利的程度。

2.1 2°C 温控目标下SRM部署策略的影响

图2为不同SRM部署策略下的最优减排政策(以碳价表示)、碳排放(GtCO_2)和最优SRM政策(以辐射控制率表示)、相比于工业化前的升温幅度($^\circ\text{C}$)。其中,碳价由边际减排成本表示,即减少一单位额外碳排放的成本。

灵活部署策略下的最优碳价与禁用部署策略下的最优碳价变化趋势一致,均为持续上升,但前者基本维持在后者的一半水平。灵活部署策略下的初始最优碳价为 $34\$/\text{tCO}_2$,禁用部署策略下为 $64\$/\text{tCO}_2$ 。表明灵活部署策略通过削弱减排力度,同时增加SRM部署实现 2°C 温控目标。灵活部署策略允许从初期开始使用SRM,并且逐年增加辐射控制率来实现温控目标。2020—2100年间,辐射控制率呈现出持续上升趋势,至2100年达到40%。由于该策略允许灵活组合SRM和减排手段,较早部署SRM可以减少减排投入。这种部署方式在前期对减排的依赖较低,减排成本随之显著下降。图2(d)表明灵活部署策略下的升温幅度始终低于 2°C ,表明在实现社会福利最大化条件下,灵活组合SRM和减排手段能够实现 2°C 温控目标。

延迟部署策略下的最优减排力度在前期反而大于禁用部署策略(用碳价反映),这与常规直觉截然不同。这是在动态最优框架下,降温效果、新增损害、挤出减排等机制动态交互以及阈值设定(1.5°C)的结果。图2(a)表明延迟部署策略的最优初始碳价高达 $140\$/\text{tCO}_2$,显著高于灵活部署策略的 $34\$/\text{tCO}_2$ 和禁用部署策略的 $64\$/\text{tCO}_2$ 。在2065年左右,延迟部署策略下的最优碳价达到峰值 $500\$/\text{tCO}_2$ 。以上结果表明,在延迟部署策略中,前期完全依赖严格的减排政策控制温升,导致碳价和减排成本大幅增加。这种巨大的减排力度预计需要大规模采用超常规的技术手段,例如碳捕集与封存(Carbon Capture and Storage)、直接空气捕集(Direct Air Capture)等。

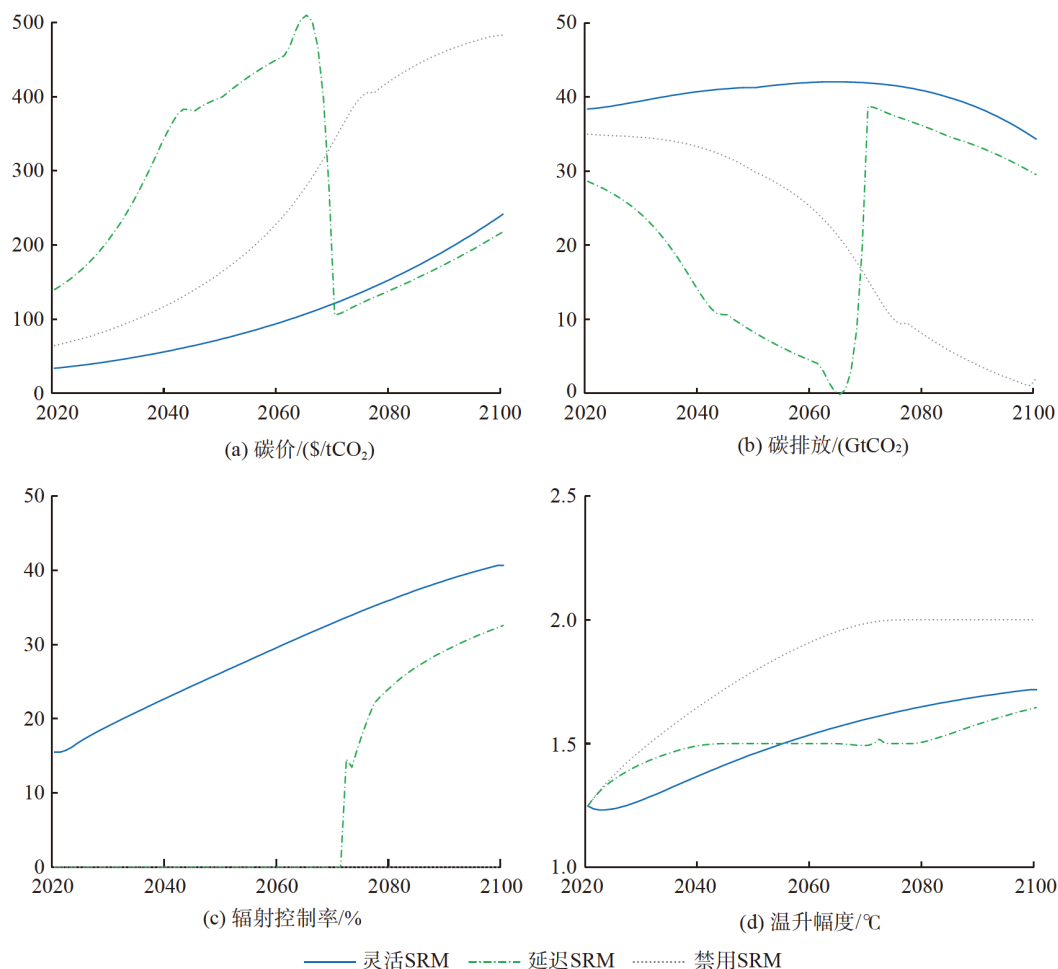


图2 2℃温控目标下的不同SRM部署策略的模拟结果

Fig.2 Simulation results of different SRM deployment strategies under 2°C temperature control target

随着温升逐渐超过1.5℃的SRM启动阈值，部署SRM后的减排政策力度迅速下降，碳价在2065年后明显降低。该结果表明，延迟部署策略能够通过强化前期减排努力来控制温升，但在后期对SRM的依赖显著增加。

图2(b)为不同部署策略下的碳排放变化趋势。在完全不使用SRM的情况下，碳减排从2020年的约35GtCO₂开始持续下降。表明必须依靠持续且愈发严格的减排措施来实现温控目标。

灵活部署策略下的排放路径呈现出先缓慢上升再下降的趋势。排放量从2020年的约38GtCO₂开始，到2040—2050年间达到约42GtCO₂的峰值，之后逐渐下降至2100年的约34GtCO₂。表明即使在允许灵活使用SRM的情况下，仍然需要一定程度的碳减排，但减排力度相对较小。

延迟部署策略下，排放量从2020年的28GtCO₂起快速下降，到2065年实现净零排放，随后出现几乎垂直的上升，在2070年左右回升至约38GtCO₂，并在此后保持相对稳定。这种独特的V形排放曲线反映了延迟部署策略的阶段性特征——前期因无法使用SRM而进行严格减排（表现为高达140\$/tCO₂的初始碳价），当温升达到1.5℃阈值并维持在该水平大约30年后，SRM开始部署，减排政策力度迅速下降，导致排放量急剧反弹。经济系统在接近碳中和情形下，其碳排放量突然急剧增长，说明前期减排主要依靠负排放技术，而不是能源系统低碳化转型（高昂的碳价也说明了这一点），一旦负排放设施停运，碳排放量将会迅速增加。

尽管图2(a)中延迟部署策略的碳价在2070年后略低于灵活部署策略，但其碳排放量始终小于灵活

部署策略。这是由于在延迟部署策略下，早期强力的减排行动减少了用于生产的投资，从而减少了未来的经济产出和总排放量，在一定程度上降低了碳价。

图2(c)表明延迟部署策略的辐射控制率在2070年之前始终为0，表明其在前期完全不使用SRM。该时段(2040—2070年)的温升能够维持在1.5℃，不再上升，这是早期大力减排的结果。2070年后，SRM开始部署，并使辐射控制率快速增长，在2100年接近35%。这种后期集中部署SRM的方式表明，延迟SRM策略需要后期的强力SRM干预来实现2℃温控目标。

从图2(d)的温度路径看，延迟部署策略在前期因完全依赖减排政策，温度上升趋势较为陡峭，当温升达到1.5℃阈值并维持在该水平大约30年后，SRM部署开始介入。此后，通过迅速提升辐射控制率，将温升控制在2℃以内。与灵活部署策略相比，延迟部署策略前期的温升速度更快，但后期的温升幅度较低。由于早期大量减排，温度路径在后期始终低于灵活部署策略。

注意到，延迟部署策略在温升达到1.5℃时不立即部署SRM，而是继续依赖减排政策。这是因为，在温升达到1.5℃时，直接部署SRM的边际成本高于继续通过减排政策限制气候损害的边际成本，因此延迟了SRM的启动。具体而言，由于前期进行了高强度的减排(表现为高碳价)，当温升接近1.5℃时，减排的累积效果仍然能够有效缓解气候损失。如果在1.5℃时立即启动SRM，则可能需要较高的辐射控制率来迅速降低温升，导致SRM部署成本和新增损害在短期内大幅增加。此时，继续减排比立即启动SRM的总成本更低。

总体而言，部署策略的选择会显著影响最优碳减排力度和路径。已有研究普遍认为，部署SRM通常会削弱减排行动^[25]。然而，本研究发现，在2℃温控目标下，以1.5℃为阈值的延迟部署策略会在前期(尤其是21世纪中叶之前)强化减排努力。其基本逻辑为：如果前期不强化减排努力，快速气候变化将显著增加前期气候损害，并进一步显著降低社会福利的现值。如果强化减排努力，一方面可以降低前期的气候损害；另一方面，由于目前排放的CO₂中仅

有一半可以在一百年内从大气中得到自然清除，早期大量减排的效益不仅体现在当下，也延展到未来时期。而SRM的降温效果则集中于当下，例如，气溶胶颗粒(硫酸盐及其前体)在平流层仅能停留约一年时间，导致平流层气溶胶注入技术的降温效果是短暂的。因此，早期大量减排可以减少未来SRM部署量以及伴随的新增损害。因此，在延迟部署策略下，决策者在前期强化减排努力是最优的气候变化应对方案。此外，不同的SRM部署策略会显著影响温控目标实现路径(图2(d))。

2.2 1.5℃温控目标下SRM部署策略的影响

图3为1.5℃温控目标下碳价(减排力度)、碳排放量、辐射控制率(SRM部署强度)、升温幅度的变化趋势。图3(b)表明，在禁止部署策略下，碳排放从2020年的约28GtCO₂开始持续下降，比2℃目标下的初始碳排放更少，而且下降速度更快。这反映了在SRM禁用策略下，实现1.5℃目标必须依靠更严格的减排措施。

在SRM灵活部署策略下，1.5℃温控目标下的最优初始碳价为34\$/tCO₂，碳价路径与2℃温控目标下相近，对应的碳排放路径同样与2℃目标下相近。此外，在温升幅度到达1.5℃前，1.5℃温控目标下的辐射控制率路径与2℃温控目标下的路径相似，但在温升幅度超过1.5℃后，辐射控制率快速增加，到2100年达到50%，显著高于2℃目标下的辐射控制率(40%)。该结果表明，为实现更严格的温控目标(1.5℃)，允许灵活组合SRM和减排的策略会主要依赖于部署SRM，而非更严格的减排措施。

与灵活部署策略类似，延迟部署策略也主要依赖SRM而非减排，来实现1.5℃温控目标(相比于2℃温控目标)。如图3(a)所示，1.5℃温控目标下的最优初始碳价为143\$/tCO₂，其碳价路径与2℃温控目标接近。图3(b)表明，1.5℃目标与2℃目标下的碳排放路径相近。此外，开始部署SRM的时间与2℃温控目标下的时间也较为接近(2070年)。但开始部署SRM后，辐射控制率增速更大，到2100年达到40%，显著高于2℃温控目标。图3(d)表明，SRM延迟部署与灵活部署策略下的温度路径具有明显差异。相比于灵活部署策略，由于早期不启用SRM，延迟部

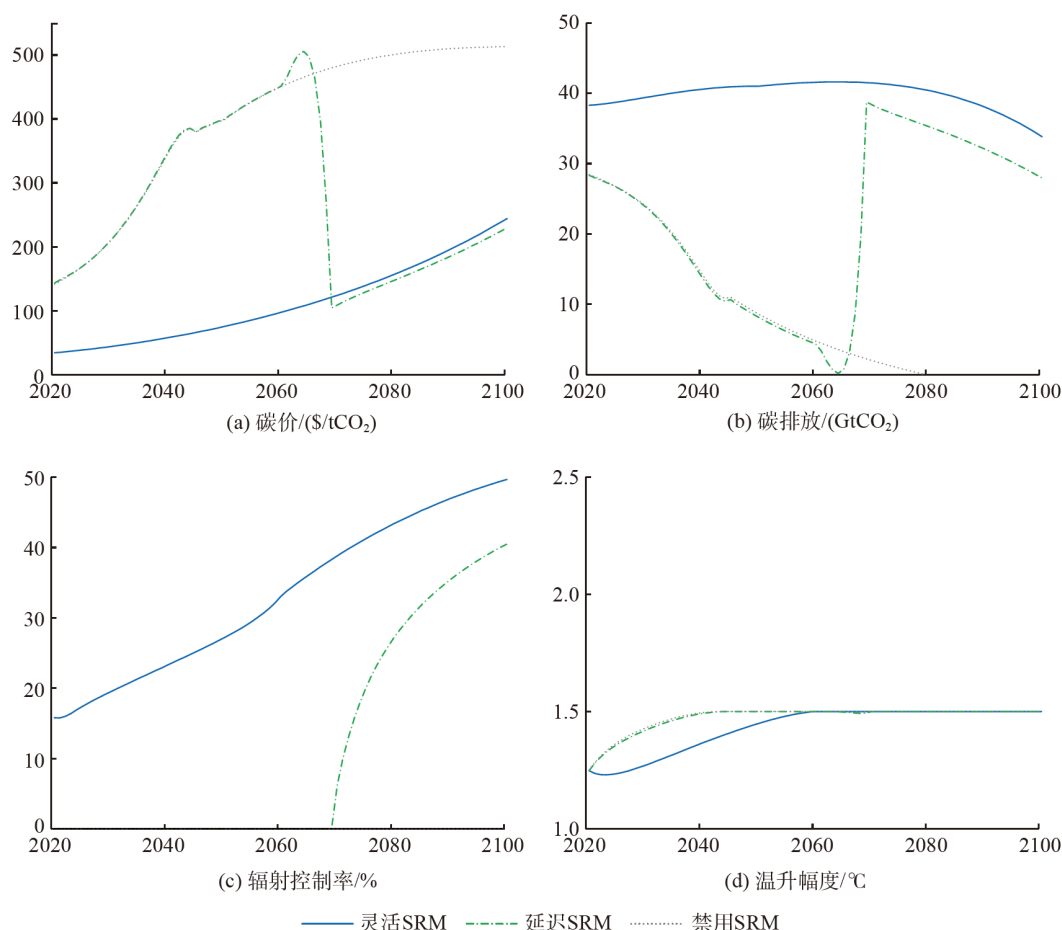


图3 1.5℃温控目标下的不同SRM部署策略的模拟结果

Fig.3 Simulation results of different SRM deployment strategies under 1.5°C temperature control target

署策略的早期温度路径更为陡峭。

2.3 温控目标下不同SRM部署策略的福利比较

图4为不同部署策略下的社会福利。可以看出，在禁用部署策略下，相比于无温控目标，实现1.5℃或2℃温控目标时的社会福利有所降低。而通过SRM实现温控目标，能显著改善禁用部署策略下的社会福利，表明SRM降低了应对气候变化的总成本。具体而言，在1.5℃或2℃的温控目标下，相比于禁用SRM，无论是SRM灵活部署策略还是延迟部署策略，实现的社会福利均有所增加。相比于2℃目标，1.5℃目标下的社会福利改善程度更大。

总体而言，不同部署策略对应的最优减排路径和SRM路径显著不同，合理选择SRM部署策略至关重要。在SRM灵活部署策略下，1.5℃和2℃温控目标对应的排放路径接近，最优减排路径的变化幅度较

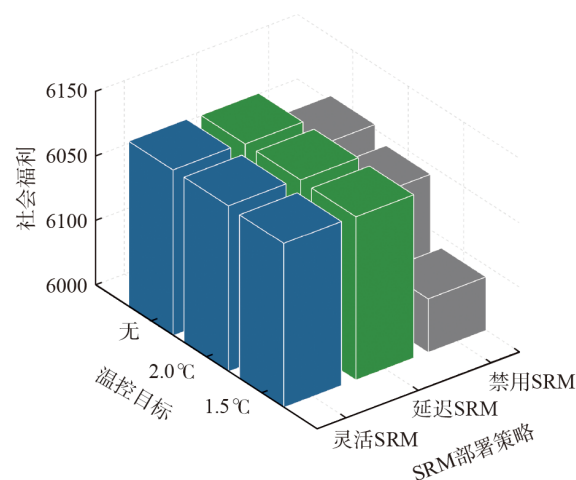


图4 不同温控目标下的社会福利

Fig.4 Social welfare under different temperature control targets

小。表明SRM的降温效果将大幅削弱减排作用，主要依赖SRM来实现更严格温控目标。

SRM延迟部署策略将减排作为前期控制温度的主要手段,而在后期通过快速增加辐射控制率以实现温控目标。尽管早期采取了严格减排政策,其在1.5℃和2℃温控目标下的碳排放路径相似。这表明,延迟部署策略也主要依赖SRM来实现更严格的温控目标。

3 结论与展望

本文拓展了现有气候经济系统建模的系统边界,将可直接干预地球系统辐射强迫的SRM内生纳入气候经济综合评估模型,对比了1.5℃和2℃温控目标下不同SRM部署策略的气候经济后果。主要结论如下:

(1) 不同的SRM部署策略显著影响减排政策的最优动态路径。灵活部署策略削弱减排努力(2℃温控目标下,初始碳价为34\$/tCO₂,显著低于禁止部署策略下的64\$/tCO₂),而延迟部署策略则会促使在跨越1.5℃温控目标之前采取更严格的减排行动(初始碳价高达140\$/tCO₂,显著高于禁止部署策略)。以往文献大多认为部署SRM会削弱减排动力。然而,本研究表明延迟部署SRM会显著增强前期减排力度,与灵活部署策略下减少减排力度的结论相反。

(2) 在1.5℃或2℃的温控目标下,部署SRM能显著改善社会福利。与禁止部署策略相比,无论以何种方式部署SRM(灵活或延迟部署),其在实现温控目标中均存在巨大潜力。灵活或延迟部署策略在实现温控目标过程中都表现出对SRM的过度依赖。与2℃目标下最优SRM和减排政策组合相比,灵活或延迟部署策略主要通过加强SRM而非减排力度来实现1.5℃目标。

上述研究结论提供了重要的政策启示。研究发现,如果选择在未来温升幅度超过1.5℃后再启用SRM,不仅不会削弱现有减排力度,反而可能会有所增强。表明在SRM延迟启用条件的基础上,从现阶段逐步推进SRM研究对实现温控目标是有利的:若科学验证SRM技术有效且风险可控,则可为应对气候变化提供技术储备,并在未来应用成本较低的SRM;若发现SRM技术无效或风险过高,由于前期已实施的强有力减排措施,温控目标仍能得以实现。因此,SRM的延迟启用条件对于“SRM是否有利于实现温控目标”至关重要,需要科学合理地探索设计。

SRM是一个新兴研究领域,本文的结论并不是最终的,还有诸多问题需要探索。本文尝试通过成本效益分析初步推进SRM研究,还存在一些可拓展之处。目前的模型只有一个经济部门,隐含假定减排设施与其他生产设施是同质的,可以随意转产,没有考虑减排资产专用性,导致延迟部署策略下的碳排放一度出现剧增情况,也可能高估了负碳技术的应用。未来建模需要区分资产异质性,尤其是减排资产的专用性。此外,部署SRM可能带来新的生态环境风险^[38],其部署成本和新增损害存在不确定性。最后,SRM的“搭便车”效应还可能改变全球气候治理体系甚至威胁国际和平^[39]。因此,SRM可能影响现有国际政治和治理框架,需要注重各利益方之间(如政府、企业等)的利益冲突与协调问题。以上内容不在本文的研究范畴之内,未来SRM的综合评估建模研究需要进一步纳入风险因素和国际博弈。

减缓措施是人类应对气候变化的主要手段。然而,现有的气候行动可能不足以应对和预防严重气候损害。SRM是有风险的,但拒绝研究、讨论和实施SRM也是有风险的^[40]。在缺乏科学证据的情况下仍坚持实施SRM可能有害,但先验地拒绝SRM将使人类社会失去对抗气候变化影响的潜在辅助工具。因此,相比于直接忽视SRM,加强对SRM的研究和评估是更可取的。

SRM可能是继减缓和适应之后的应对气候变化的第三手段或补充手段,更是一种高风险、缺共识的气候干预手段。发达国家针对SRM的研究处于起步阶段,并已开展少量实地试验。对于我国,审慎推进SRM研究至关重要。建议在前期开展成本相对较低的SRM决策分析与计算模拟等前瞻性研究,再根据自身条件与国际气候治理动向考虑是否有必要进一步开展试验研究。地球科学、管理与经济科学、国际政治学等多学科领域的专家需要通力合作,提升对SRM这一跨学科问题的科学认知,也为未来气候谈判中可能凸显的太阳地球工程治理议题提供支撑。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2022: Mitigation of climate change[R]. 2022.

- [2] Wedding L M, Moritsch M, Verutes G, et al. Incorporating blue carbon sequestration benefits into sub-national climate policies [J]. *Global Environmental Change*, 2021, 69: 102206.
- [3] Caldeira K, Bala G, Cao L. The science of geoengineering[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2013, 41: 231–256.
- [4] Wei Y M, Kang J N, Liu L C, et al. A proposed global layout of carbon capture and storage in line with a 2 °C climate target[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 112–118.
- [5] Weitzman M L. A voting architecture for the governance of free-driver externalities, with application to geoengineering[J]. *The Scandinavian Journal of Economics*, 2015, 117: 1049–1068.
- [6] Crutzen P J. Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma?[J]. *Climatic Change*, 2006, 77(3): 211–220.
- [7] Schelling T C. The economic diplomacy of geoengineering[J]. *Climatic Change*, 1996, 33: 303–307.
- [8] Nordhaus W D. The economics of tail events with an application to climate change[J]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2011, 5: 240–257.
- [9] White House Office of Science and Technology Policy (OSTP). Congressionally-mandated report on solar radiation modification [R]. 2023.
- [10] Elena Kleinmaier. Preparing the European Union for a geoengineering future: Exploring the interplay of EU and international law in geoengineering[EB/OL]. (2024-01-31)[2025-04-01]. <https://eulawenforcement.com/?p=8751>.
- [11] United Nations Environment Programme (UNEP). One atmosphere: An independent expert review on solar radiation modification research and deployment[R]. 2023.
- [12] Heutel G, Moreno-Cruz J, Ricke K. Climate engineering economics[J]. *Annual Review of Resource Economics*, 2016, 8: 99–118.
- [13] Robock A, Oman L, Stenchikov G L. Regional climate responses to geoengineering with tropical and Arctic SO₂ injections[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113: D16101.
- [14] Burton C, Betts R A, Jones C D, et al. Will fire danger be reduced by using solar radiation management to limit global warming to 1.5 °C compared to 2.0 °C?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(8): 3644–3652.
- [15] Hourdequin M. Geoengineering justice: The role of recognition [J]. *Science, Technology, & Human Values*, 2019, 44(3): 448–477.
- [16] Zheng G L, Liao H, Cai Y. Integrated climate-economic assessment of solar radiation modification and the breakup risk of marine stratocumulus clouds[R]. 2025.
- [17] Dannenberg A, Zitzelsberger S. Climate experts' views on geoengineering depend on their beliefs about climate change impacts[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9: 769–775.
- [18] McLaren D. Mitigation deterrence and the “moral hazard” of solar radiation management[J]. *Earth's Future*, 2016, 4(12): 596–602.
- [19] Macnaghten P, Szerszynski B. Living the global social experiment: An analysis of public discourse on solar radiation management and its implications for governance[J]. *Global Environmental Change*, 2013, 23(2): 465–474.
- [20] Liao H, Ye H Y. Endogenous economic structure, climate change, and the optimal abatement path[J]. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2023, 65: 417–429.
- [21] Ye H Y, Liao H, Zheng G L, et al. Industrialization, environmental externality, and climate mitigation strategies[J]. *Economic Modelling*, 2024, 139: 106826.
- [22] Wang F Z, Liao H, Tol R S J, et al. Endogenous preference for nonmarket goods in carbon abatement decisions[J]. *Decision Analysis*, 2024, 21(4): 235–251.
- [23] Heutel G, Moreno-Cruz J, Shayegh S. Climate tipping points and solar geoengineering[J]. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 2016, 132: 19–45.
- [24] Khabbazan M M, Stankoweit M, Roshan E, et al. How can solar geoengineering and mitigation be combined under climate targets?[J]. *Earth System Dynamics*, 2021, 12: 1529–1542.
- [25] Raimi K T, Maki A, Dana D, et al. Framing of geoengineering affects support for climate change mitigation[J]. *Environmental Communication*, 2019, 13(3): 300–319.
- [26] 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[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2018, 376(2119): 20160454.
- [27] Goes M, Tuana N, Keller K. The economics (or lack thereof) of aerosol geoengineering[J]. *Climatic Change*, 2011, 109: 719–744.
- [28] Bahn O, Chesney M, Gheysens J, et al. Is there room for geoengineering in the optimal climate policy mix?[J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 48: 67–76.
- [29] Bickel J E, Agrawal S. Reexamining the economics of aerosol geoengineering[J]. *Climatic Change*, 2013, 119: 993–1006.
- [30] Zheng G L, Liao H. Robust solar radiation modification under deep uncertainty[C]// 28th Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists. Limassol, Cyprus: 2023.
- [31] Sugiyama M, Ishii A, Asayama S, et al. Solar Geoengineering Governance[M]. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. Oxford: Oxford University Press, 2018.
- [32] Heutel G, Moreno-Cruz J, Shayegh S. Solar geoengineering, uncertainty, and the price of carbon[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2018, 87: 24–41.
- [33] Zarnetske P L, Gurevitch J, Franklin J, et al. Potential ecological impacts of climate intervention by reflecting sunlight to cool

- Earth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(15): e1921854118.
- [34] Diffenbaugh N S, Field C B. Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions[J]. Science, 2013, 341(6145): 486–492.
- [35] Barrage L, Nordhaus W D. Policies, projections, and the social cost of carbon: Results from the DICE-2023 model[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(13): e2312030121.
- [36] Gramstad K, Tjøtta S. Climate engineering: Cost benefit and beyond[R]. 2010.
- [37] Ghosh S, Bohra A, Dutta S. The Texas freeze of February 2021: Event and winterization analysis using cost and pricing data[C]// IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Toronto, Canada: 2021.
- [38] Zheng G L, Liao H, Cai Y, et al. Comprehensively assessing the tipping risks of solar radiation modification prior to its deployment[R]. 2024.
- [39] Biermann F, Oomen J, Gupta A, et al. Solar geoengineering: The case for an international non-use agreement[J]. WIREs Climate Change, 2022, 13(3): e754.
- [40] Wieners C, Hofbauer B, de Vries I, et al. Solar radiation modification is risky, but so is rejecting it: A call for balanced research [EB/OL]. (2023-01-01)[2025-04-01]. <https://www.call-for-balance.com/letter>.