

地面大规模辐射制冷技术对行星反照率的即时影响

阿卜力米提·艾力¹ 杨荣贵²

(1. 浙江大学长三角智慧绿洲创新中心, 浙江 嘉兴 314102;

2. 北京大学工学院, 北京 100871)

摘 要: 当前可规模化生产的具有超过 95% 太阳反射率的被动式日间辐射制冷材料(包括超材料薄膜和涂料等)已在建筑热管理、城市热岛效应缓解等多个领域得到应用。先前的大量研究指出, 该类技术可通过减少制冷能耗相关的人为温室气体排放来间接缓解全球变暖。然而, 关于大规模辐射制冷技术能否通过减少地球能量失衡来直接缓解全球变暖的潜力, 目前尚缺乏定量研究。为填补此研究空白, 本研究旨在量化陆基大规模辐射制冷技术对行星反照率的即时影响。分析表明, 在绝大多数区域, 由于大气层对地表反射太阳辐射的屏蔽效应(反射与吸收), 地表反照率的提升对行星反照率的贡献被显著削弱。进一步定量分析发现, 即使大规模部署(例如覆盖全球陆地面积的 5%)日间辐射制冷技术也无法直接完全地抵消当前观测到的地球能量失衡趋势。

关键词: 日间辐射制冷; 行星反照率; 地表反照率; 气候工程; 全球变暖

中图分类号: TB66 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11972/j.issn.1672-8785.2025.11.001

The Immediate Impact of Land-Based Large-Scale Radiative Cooling Technologies on Planetary Albedo

Ablimit Aili¹, YANG Rong-gui²

(1. Innovation Center of Yangtze River Delta, Zhejiang University, Jiaxing 314102, China;

2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Currently, mass-producible passive daytime radiative cooling materials (including metamaterial films and coatings) with solar reflectivity exceeding 95% have been applied in various fields such as building thermal management and mitigation of the urban heat island effect. Previous studies have indicated that this type of technology can indirectly mitigate global warming by reducing anthropogenic greenhouse gas emissions associated with cooling energy consumption. However, quantitative research is lacking regarding the potential of large-scale radiative cooling technology to directly mitigate global warming by reducing Earth's energy imbal-

收稿日期: 2025-11-18

作者简介(Biography): 阿卜力米提·艾力(1991-), 男, 特聘研究员, 主要从事工程热物理、绿色数据中心、绿色建筑及智能微电网等方面的研究。E-mail: ablimit.aili@zju.edu.cn

杨荣贵(1973-), 男, 讲席教授, 主要从事传热学与能源技术方面的研究。E-mail: ronggui@pku.edu.cn

ance. To fill this research gap, this study aims to quantify the immediate impact of land-based large-scale radiative cooling technology on planetary albedo. Analysis shows that in most regions, the contribution of increased surface albedo to planetary albedo is significantly weakened due to the atmosphere's shielding effect (reflection and absorption) of solar radiation reflected from the surface. Further quantitative analysis reveals that even large-scale deployment (e.g., covering 5% of the global land area) of daytime radiative cooling technology cannot directly and completely offset the currently observed trend of Earth's energy imbalance.

Key words: daytime radiative cooling; planetary albedo; surface albedo; climate engineering; global warming

0 引言

人为碳排放很可能是导致地球能量失衡、全球变暖的主要原因^[1]。研究人员提出了多种气候工程方法, 主要包括二氧化碳移除^[2]、备受争议的太阳地球工程^[3-4]、被动式日间辐射制冷等^[5], 均旨在通过直接或间接途径应对全球变暖。二氧化碳移除的路径是从根源上解决问题, 其初衷是通过降低大气中的温室气体浓度来削弱所产生的正辐射强迫^[6]。太阳地球工程则采取一种更为直接的干预策略, 其核心机制在于增强地球系统(特别是大气层)对太阳辐射的反射率, 从而试图直接抵消由温室气体累积等因素产生的正辐射强迫^[7]。

与前两种旨在直接干预全球气候系统的技术不同, 被动式日间辐射制冷技术的设计初衷并非是宏观的气候工程技术, 而是一种面向局部应用的节能技术^[8-11]。它的核心机制是基于材料本身的高太阳反射率和其在透中红外大气窗口中的高发射率, 将热量以红外辐射的形式直接排放至浩瀚无垠的外太空。因此, 该技术的根本目标是利用这一被动式物理过程, 在建筑冷却、工业节能等具体场景中, 替代或辅助高能耗、高碳排放或高水耗的传统制冷方式, 从而达到节能降碳目的^[12-20]。被动式日间辐射制冷技术目前已应用于增强型围护结构^[21-23]、低能耗制冷系统^[24-27]、淡水生成^[28-31]、个人热管理^[32-36]以及城市热岛效应缓解^[37-41]等领域。

上述方法在缓解地球能量失衡的机制上存在显著差异: (1) 二氧化碳移除旨在通过降低大气温室气体浓度, 从根源上解决全球变暖问题。(2) 太阳地球工程试图通过增加反射回太

空的太阳辐射量, 直接抵消地球的能量失衡正向趋势。(3) 被动式日间辐射制冷则是一种混合路径, 既可通过减少能耗间接减少碳排放, 也可能直接地增加地球系统的太阳反射率。

不同的气候减缓方法所需的基础设施也各不相同: (1) 二氧化碳移除需依赖能够通过化学或物理过程从大气中提取二氧化碳的专用基础设施^[42-44]。(2) 备受争议的太阳地球工程的相关技术则需向大气平流层注入反射性气溶胶, 或在大气层顶端部署反射镜^[45-46]。(3) 被动式日间辐射制冷技术的部署相对简单, 可在公路或屋顶覆盖高反射性制冷涂料或安装辐射制冷板等^[47-48]。

显然, 大规模实施被动式日间辐射制冷(Radiative Cooling, RC)技术可被视为一种潜在的陆基太阳地球工程技术, 具备直接和间接缓解全球变暖的潜力^[8,49]。大量研究已采用多种方法论证并量化了其间接的全球变暖缓解潜力: 此类技术通过减少制冷能耗来降低温室气体排放^[22-23,38,50]。区别于上述节能降耗的间接路径, 陆基辐射制冷技术还可能通过增强行星反照率来减少地球系统当前的能量失衡, 从而展现出更为直接的缓解全球变暖的潜力^[8,22,37]。为评估这一直接潜力, 本文聚焦于一个具体且关键的切入点: 量化大规模辐射制冷技术应用对地球行星反照率的即时影响。

1 地表反照率与行星反照率之间的关联

在地球系统中行星反照率与地表反照率存在根本差异: 行星反照率直接决定了进入地球系统顶部(Top of Atmosphere, TOA)的太阳能总量, 是衡量全球能量平衡的根本性

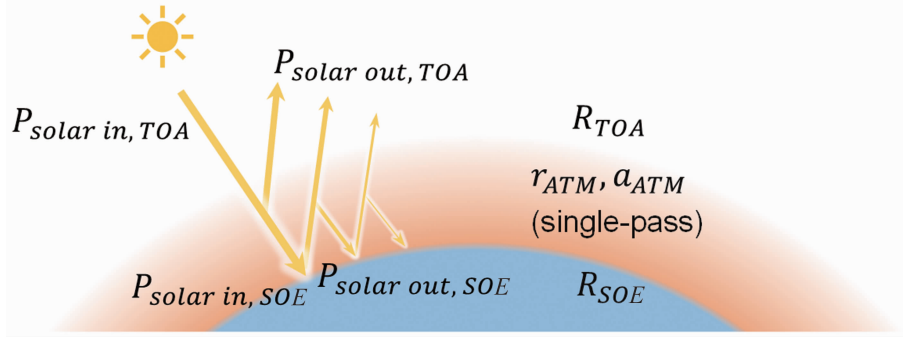


图 1 地球系统的太阳辐照度与反照率示意图。其中, $P_{solar\ in,\ TOA}$ 与 $P_{solar\ out,\ TOA}$ 为大气层顶端入射与出射太阳辐照度; $P_{solar\ in,\ SOE}$ 与 $P_{solar\ out,\ SOE}$ 为地表入射与反射太阳辐射度; R_{TOA} 为行星太阳反照率; R_{SOE} 为地表太阳反照率; r_{ATM} 与 a_{ATM} 为大气单次太阳反射率与吸收率

变量;而多数辐射制冷技术的应用与效果评估,则主要集中于地表(Surface of Earth, SOE)上的太阳辐照度调控。为评估并比较地表与大气各自对行星反照率的贡献,我们首先基于图 1 所示的原理框架进行分析。本研究使用的数据来源于哥白尼气候变化服务中心提供的地理空间历史数据集^[51],包括大气层顶端与地球表面的入射及出射太阳辐照度月平均值,其时间分辨率为小时级。

基于文献[52]的方法,行星反照率(R_{TOA})与地表反照率(R_{SOE})可通过大气单次太阳反射率(r_{ATM})与吸收率(a_{ATM})建立关联:

$$R_{TOA} = r_{ATM} + R_{SOE} \frac{(1 - r_{ATM} - a_{ATM})^2}{1 - R_{SOE}r_{ATM}} \quad (1)$$

同时,地表入射与大气层顶端入射太阳辐照度之比定义为

$$f = \frac{P_{solar\ in,\ SOE}}{P_{solar\ in,\ TOA}} = \frac{1 - r_{ATM} - a_{ATM}}{1 - R_{SOE}r_{ATM}} \quad (2)$$

这里需要明确的是, R_{TOA} 由数据库中大气层顶端入射与出射辐照度比值($P_{solar\ in,\ TOA}$ 与 $P_{solar\ out,\ TOA}$ 的比值)确定,而 R_{SOE} 则由地表入射与反射辐照度比值($P_{solar\ in,\ SOE}$ 与 $P_{solar\ out,\ SOE}$ 的比值)得出。基于式(1)和式(2),即可求解大气单次反射率(r_{ATM})与吸收率(a_{ATM})。

同时,行星反照率可分解为大气与地表的贡献之和:

$$R_{TOA} = R_{TOA \leftarrow ATM} + R_{TOA \leftarrow SOE} \quad (3)$$

显然,大气单次反射率完全贡献于行星反照

率;相比之下,地表反照率仅产生部分贡献,原因在于太阳辐照度在抵达地表以及反射回太空的路径上均受到大气衰减。

除了上述地理空间太阳属性之外,我们亦关注其全球平均值。这里我们忽略地球扁率及其时间变化的影响,在对全球地理空间太阳辐照度进行积分时,以纬度余弦作为权重因子。

2 基准地表与行星反照率

图 2 为计算得到的年均行星反照率、地表反照率、求解得出的大气单次太阳反射率与吸收率、以及地表与大气对行星反照率贡献的地理空间分布图。这几个分布图将作为后续反照率增强分析的基准。由图 2(a)可见,行星反照率在两极区域及其周边、某些高海拔干燥寒冷地区、部分沙漠气候区以及孤立的湿润区域显著偏高(40%~70%)。这种空间分布模式在不同区域由不同因素主导:在两极区,高行星反照率源于高反射性覆雪表面(见图 2(b))与相对较高的大气反射率(见图 2(c))的共同作用;在干燥沙漠或高海拔地区,主要归因于高地表反照率(见图 2(b));而在孤立的湿润区域,则主要由较高的大气反射率引起(见图 2(c))。另外,图 2(a)与图 2(b)中的结果与文献[52]的报道完全一致。

相比之下,行星反照率在大多数的其它区域较低(10%~30%),如图 2(a)所示。这主要可归因于全球大部分地区较低的地表与大气反射率,尤其是在几乎所有海洋与人口密集区

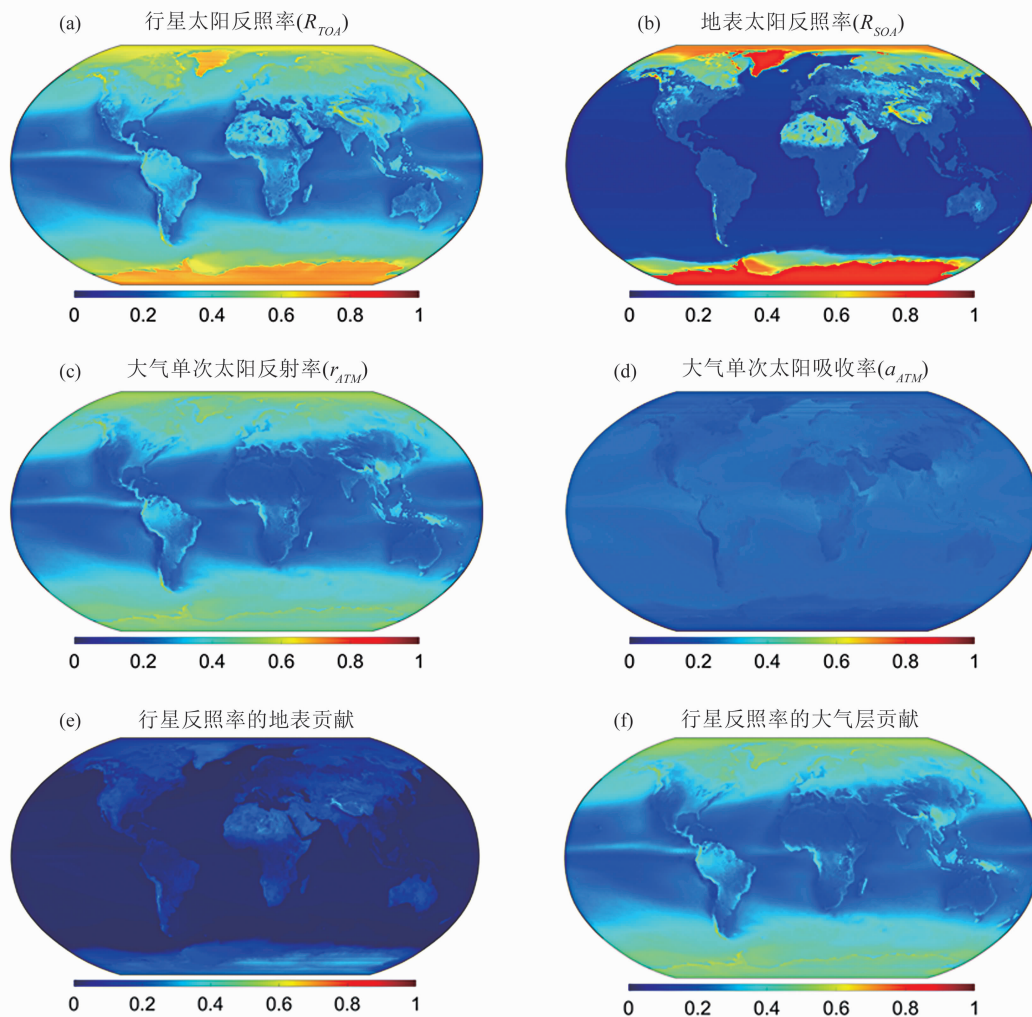


图 2 全球地表及行星反照率: (a)行星太阳反照率(R_{TOA}); (b)地表太阳反照率(R_{SOE}); (c)~(d)求解得出的大气单次太阳反射率(r_{ATM})与吸收率(a_{ATM}); (e)~(f)地表及大气对行星反照率的实际贡献($R_{TOA \leftarrow ATM}$ 与 $R_{TOA \leftarrow SOE}$)

(见图 2(b)与图 2(c))。求解得到的大气太阳吸收率全球分布如图 2(d)所示,其幅度普遍较低,与图 2(c)中大气反照率表现出的显著空间变异性形成鲜明对比。大气反射率和吸收率的空间分布模式与卫星观测到的全球云量一致^[53]。

图 2(e)与图 2(f)展示了地表反照率与大气反射率对行星反照率的全球贡献分布。可以看出,地表贡献显著偏低,在大多数区域最多仅达 10% (见图 2(e));而大气贡献则相对较高,介于 15%至 40%之间(见图 2(f))。尽管两极区地表反照率很高,但其贡献仍然很小,原因在于其很大程度上被大气衰减。此外,由于极

区接收的太阳辐照度远低于低纬度地区,它们对全球平均行星反照率的贡献微乎其微。地表与大气贡献的对比表明,从理论上讲,增加大气反射率(例如通过气溶胶注入)可能是比增加地表反照率(例如通过大规模部署被动式日间辐射制冷材料)更为有效的途径。

3 地表反照率增加带来的即时影响

接下来,我们向地表反照率与大气单次反射率引入一个微小扰动(例如 1 个百分点或 0.01 的增大),以量化它们各自对行星反照率的即时影响。该扰动被均匀施加于所有地理坐标。这里我们假设,在两种情形下大气的单次太阳吸收率均保持不变,这是因为即便大气反

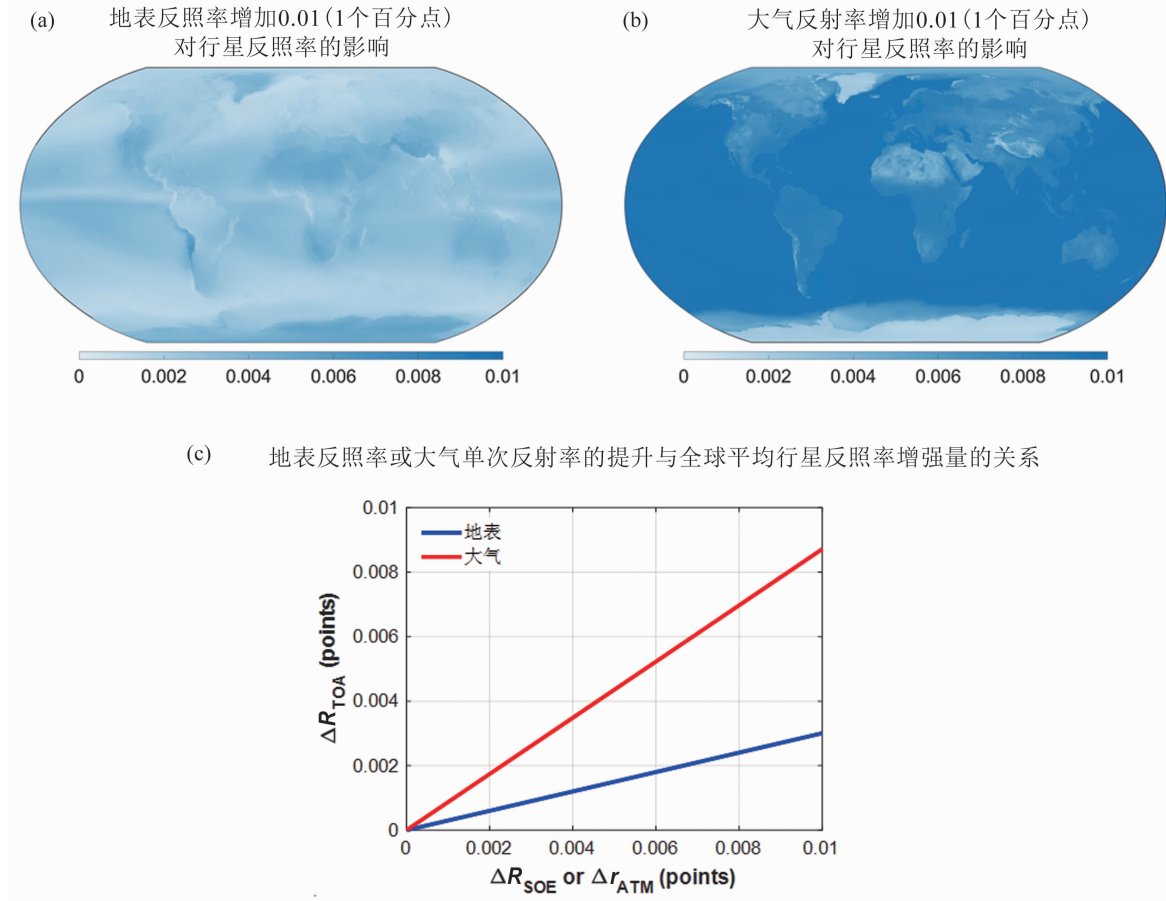


图 3 地表太阳反照率或大气单次太阳反射率的提升对行星反照率的影响

射率发生显著变化,其全球变异性也极小(见图 2(c)与图 2(d))。此外,具体的实施技术不在本文讨论范围内。

如图 3(a)所示,当地表反照率增加 1 个百分点时,其在大多数区域引发的行星反照率增强量普遍较低(小于 0.002,即 0.2 个百分点);在干燥与沙漠气候区,其贡献略高,可达 0.005(0.5 个百分点)左右。然而,如图 3(b)所示,同等幅度(1 个百分点)的大气反射率增幅则更为有效,其在海洋区域上空的贡献可超过 0.009(0.9 个百分点)。

如图 3(c)所示,对比了地表反照率与大气反射率提升对全球平均行星反照率的增强效应。可以看出,地表反照率每增加 1 个百分点,平均行星反照率的增幅约为 0.003(0.3 个百分点);而大气反射率同等幅度的增加,则能产生超过 0.008(0.8 个百分点)的平均增幅,约为前者的 2.7 倍。该结果明确显示,提升地

表反照率的效果远不及提升大气反射率。

4 大规模铺设陆基辐射制冷技术的即时影响

此外,我们通过假设将具有 95% 高太阳反射率的辐射制冷(RC)技术覆盖一定比例(比如 5%)的陆地表面,以评估其对行星反照率的即时影响。令 f_{RC} 表示 RC 面积覆盖率,则施加于每个地理网格单元的反照率增量可表示为

$$\begin{aligned} \Delta R_{\text{SOE}}(\theta, \phi) \\ = f_{\text{RC}} \cdot [R_{\text{RC}}(\theta, \phi) - R_{\text{SOE}}(\theta, \phi)] \cdot H_1(\theta, \phi) \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$H_1(\theta, \phi) = \begin{cases} 1, & \text{if } (\theta, \phi) \in \text{land} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

此处, $H_1(\theta, \phi)$ 为二元掩码函数,在陆地区域取值为 1,非陆地区域取值为 0。图 4(a)展示

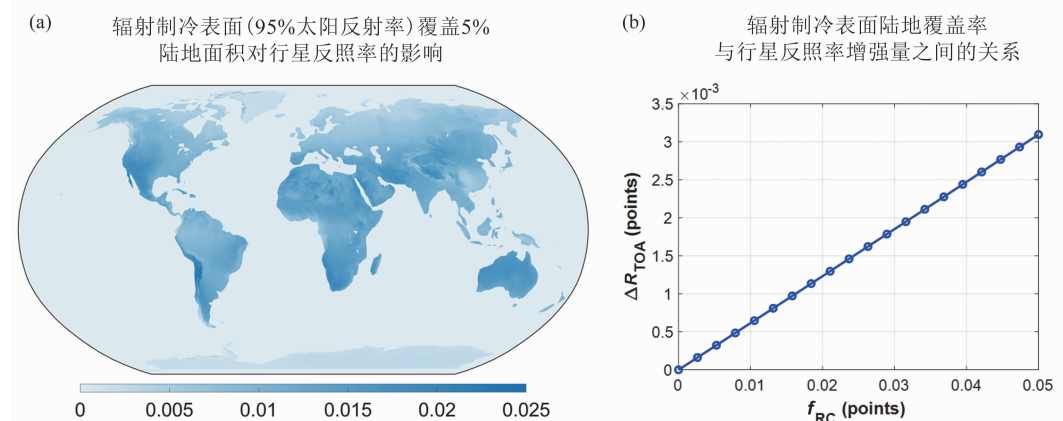


图 4 辐射制冷技术陆地覆盖率对行星反照率增强量的影响

了全球 5% 的陆地面积铺设高太阳反射率辐射制冷技术后, 行星反照率即时增强量的地理分布。其影响呈现不均匀性: 在基准地表反照率较低的区域, 地表反照率提升更大, 相应地, 其行星反照率的增强幅度最高可达 0.025 (即 2.5 个百分点); 在云量较少的区域, 该效应也更为显著。由此可见, 战略性地理布局是最大化辐射制冷技术带来的缓解潜力 (即通过提升行星反照率来减缓地球能量失衡) 的关键。

图 4(b) 进一步揭示了全球平均反照率增强量 ($\Delta R_{TOA, mean}$) 与辐射制冷技术 (RC) 陆地总覆盖率 (f_{RC}) 之间的关系。结果表明, RC 覆盖率每增加 1 个百分点, 全球平均行星反照率仅以近乎线性的方式微弱增加 0.0062 (0.62 个百分点), 相当于每覆盖陆地总面积的 1% 可产生 $-0.21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的瞬时辐射强迫 ($RF = \Delta R_{TOA, mean} \cdot P_{TOA in, mean}$)。5% 的 RC 覆盖率所对应的瞬时辐射强迫约为 $-1.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。此数值略高于 2025 年观测到的全球平均能量失衡 (约 $0.75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 但明显低于 2023 年观测到的能量失衡 (约 $1.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)。

5 结论

总而言之, 由于大气层对地表反射太阳辐射的屏蔽效应 (反射与吸收), 地表反照率对行星反照率的实际贡献被显著削弱。具体而言, 地表反照率对行星反照率的贡献普遍偏低 (多数区域低于 10%), 远低于大气反射率的贡献 (15%~40%)。

地表反照率每增加 1 个百分点, 仅能使全球平均行星反照率提升 0.003 (即 0.3 个百分点) 左右; 该效果明显逊于大气反射率同等幅度提升所带来的超过 0.008 (即 0.8 个百分点) 的增益。

通过对辐射制冷技术大规模理论部署方案的评估发现, 以 95% 的高反射率覆盖全球 5% 的陆地面积, 所产生的全球平均负辐射强迫约为 $-1.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。该数值虽可观, 但与当前观测到的严重地球能量失衡 (如 2023 年约 $1.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) 相比, 其直接抵消能力有限^[54]。

参考文献

- [1] RAGHURAMAN S P, PAYNTER D, RAMASWAMY V. Anthropogenic forcing and response yield observed positive trend in Earth's energy imbalance [J]. *Nat Commun*, 2021, **12**(1): 4577.
- [2] TERLOUW T, BAUER C, ROSA L, et al. Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies; a critical review [J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, **14**(4): 1701–1721.
- [3] LENFERNA G A, RUSSOTTO R D, TAN A, et al. Relevant climate response tests for stratospheric aerosol injection: A combined ethical and scientific analysis [J]. *Earth's Future*, 2017, **5**(6): 577–591.
- [4] IRVINE P J, KRAVITZ B, LAWRENCE M G, et al. An overview of the Earth system science of solar geoengineering [J]. *WIREs Climate*

- Change, 2016, **7**(6): 815–833.
- [5] ZHAO D, AILI A, ZHAI Y, et al. Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications [J]. *Applied Physics Reviews*, 2019, **6**(2): 021306.
- [6] LENTON T M, VAUGHAN N E. The radiative forcing potential of different climate geoengineering options [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(15): 5539–5561.
- [7] MACMARTIN D, RICKE R, KEITH D. Solar geoengineering as part of an overall strategy for meeting the 1.5 degrees C Paris target [J]. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 2018, **376**(2119): 20160454.
- [8] AILI A, JIANG T, CHEN J, et al. Passive daytime radiative cooling: Moving beyond materials towards real-world applications [J]. *Next Energy*, 2024, **3**: 100121.
- [9] CHEN H, LIU X, LIU J, et al. Radiative cooling applications toward enhanced energy efficiency: System designs, achievements, and perspectives [J]. *The Innovation*, 2025, **6**(10): 100999.
- [10] LEI L, WU T, SHI S, et al. Engineered Radiative Cooling Systems for Thermal-Regulating and Energy-Saving Applications [J]. *Nano-Micro Letters*, 2025, **18**(1): 21.
- [11] YANG K, WU X, ZHOU L, et al. Towards practical applications of radiative cooling [J]. *Nature Reviews Clean Technology*, 2025, **1**(4): 235–254.
- [12] AILI A, LONG W, CAO Z, et al. Radiative free cooling for energy and water saving in data centers [J]. *Applied Energy*, 2024, **359**: 122672.
- [13] AILI A, YIN X, YANG R. Passive sub-ambient cooling: radiative cooling versus evaporative cooling [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, **202**: 117909.
- [14] AILI A, ZHAO D, LU J, et al. A kW-scale, 24-hour continuously operational, radiative sky cooling system: Experimental demonstration and predictive modeling [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, **186**: 586–96.
- [15] AILI A, ZHAO D, TAN G, et al. Reduction of water consumption in thermal power plants with radiative sky cooling [J]. *Applied Energy*, 2021, **302**: 117515.
- [16] GU C, ZHENG Y, LV S. Integrated photothermal-thermoelectric-radiative cooling system for deep-space energy harvesting [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, **281**: 128753.
- [17] PANDIYAN R, PRAVEEN KUMAR G. Experimental analysis of a sky radiative cooling system and numerical investigation of its integration with a chiller and energy storage system for sustainable cooling applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, **275**: 126813.
- [18] SUHENDRI S, HU M, DAN Y, et al. Building energy-saving potential of a dual-functional solar heating and radiative cooling system [J]. *Energy and Buildings*, 2024, **303**: 113764.
- [19] XIE F, JIN W, NOLEN J R, et al. Subambient daytime radiative cooling of vertical surfaces [J]. *Science*, 2024, **386**(6723): 788–794.
- [20] ZHAO X, LI T, XIE H, et al. A solution-processed radiative cooling glass [J]. *Science*, 2023, **382**(6671): 684–91.
- [21] ZHAO D, AILI A, YIN X, et al. Roof-integrated radiative air-cooling system to achieve cooler attic for building energy saving [J]. *Energy and Buildings*, 2019, **203**: 109453.
- [22] BARBER E, VANSAL N, FANG Z, et al. Impacts of radiative cooling paints for CO₂ reduction and global warming mitigation [J]. *Energy and Buildings*, 2025, **332**: 115458.
- [23] CHEN J, LU L, GONG Q. Techno-economic and environmental evaluation on radiative sky cooling-based novel passive envelope strategies to achieve building sustainability and carbon neutrality [J]. *Applied Energy*, 2023, **349**: 121679.
- [24] AILI A, ZHAO D, LU J, et al. A kW-scale, 24-hour continuously operational, radiative sky cooling system: Experimental demonstration and predictive modeling [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, **186**: 586–596.
- [25] YANG Z, YANG Z, ZHANG Z, et al. Daytime radiative cooling coating for cooling energy effi-

- ciency of conventional air conditioners [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, **261**: 125060.
- [26] AILI A, ZHAO D, TAN G, et al. Reduction of water consumption in thermal power plants with radiative sky cooling [J]. *Applied Energy*, 2021, **302**: 117515.
- [27] ZHANG Y, TSO C Y, TSE C F N, et al. A novel radiative sky cooler system with enhanced daytime cooling performance to reduce building roof heat gains in subtropical climate [J]. *Renewable Energy*, 2024, **220**: 119686.
- [28] HAECHLER I, PARK H, SCHNOERING G, et al. Exploiting radiative cooling for uninterrupted 24-hour water harvesting from the atmosphere [J]. *Science Advances*, 2021, **7**(26): 1–10.
- [29] GUO J, HOU J, WAN Y, et al. Integrating Passive Daytime Radiative Cooling into The Evaporation-Condensation System Enhances Thermal Convection for Sustainable Evaporation and Condensation in Closed Boundary [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025: e17644.
- [30] AHMAD S, SIDDIQUI A R, YANG K, et al. Lubricated Surface in a Vertical Double-Sided Architecture for Radiative Cooling and Atmospheric Water Harvesting [J]. *Advanced Materials*, 2024, **36**(51): 2404037.
- [31] CHEN M, WANG J, LI Q. Hybrid Directional Radiative Cooling and Solar Heating for Efficient Water Harvesting via Interior Natural Convection [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025: e07761.
- [32] WU R, SUI C, CHEN T-H, et al. Spectrally engineered textile for radiative cooling against urban heat islands [J]. *Science*, 2024, **384**(6701): 1203–1212.
- [33] GU B, DAI Z, PAN H, et al. Integration of prolonged phase-change thermal storage material and radiative cooling textile for personal thermal management [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, **493**: 152637.
- [34] MENG X, ZHAO Q, CHEN Z, et al. A Janus film coupling radiative cooling and heating for all-day active/passive personal thermal management [J]. *Materials Today Physics*, 2024, **46**: 101511.
- [35] WU X-E, WANG Y, LIANG X, et al. Durable Radiative Cooling Multilayer Silk Textile with Excellent Comprehensive Performance [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, **34**(11): 2313539.
- [36] HASAN K M F, CHEN J, CHEN S, et al. Advanced Bioinspired Personal Thermoregulation Textiles for Outdoor Radiative Cooling [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, **17**(2): 3436–47.
- [37] ADAMS N, BORGERES R, NEIRYNCK J, et al. Impact of photonic properties of a new radiative cooling material on the urban heat island and the radiation balance [J]. *Urban Climate*, 2025, **60**: 102364.
- [38] LI H, ZHANG K, SHI Z, et al. Cooling benefit of implementing radiative cooling on a city-scale [J]. *Renewable Energy*, 2023, **212**: 372–81.
- [39] LI Z, CHEN J, WANG C, et al. Enhancing sustainable urban environments in China: Daytime radiative cooling for building energy efficiency and heat island mitigation [J]. *Applied Energy*, 2025, **393**: 126138.
- [40] KOUSIS I, D'AMATO R, PISELLO A L, et al. Daytime Radiative Cooling: A Perspective toward Urban Heat Island Mitigation [J]. *ACS Energy Letters*, 2023, **8**(7): 3239–3250.
- [41] CARLOSENA L, RUIZ-PARDOÁ, FENG J, et al. On the energy potential of daytime radiative cooling for urban heat island mitigation [J]. *Solar Energy*, 2020, **208**: 430–444.
- [42] ROSA L, SANCHEZ D L, MAZZOTTI M. Assessment of carbon dioxide removal potential via BECCS in a carbon-neutral Europe [J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, **14**(5): 3086–3097.
- [43] LAKZIAN E, YAZDANI S, SALMANI F, et al. Supersonic separation towards sustainable gas removal and carbon capture [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2024, **103**: 101158.
- [44] MOHAMMED S, ELJACK F, AL-SOBHI S, et

- al. A systematic review: The role of emerging carbon capture and conversion technologies for energy transition to clean hydrogen [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, **447**: 141506.
- [45] PARSON E A, KEITH D W. Solar Geoengineering: History, Methods, Governance, Prospects [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2024, **49**: 337–366.
- [46] BELLAMY R. Responsible research for space-based climate geoengineering [J]. *Environmental Science & Policy*, 2025, **172**: 104213.
- [47] GOLDSTEIN E A, RAMAN A P, FAN S. Sub-ambient non-evaporative fluid cooling with the sky [J]. *Nature Energy*, 2017, **2**(9): 17143.
- [48] FENG J, KHAN A, DOAN Q V, et al. The heat mitigation potential and climatic impact of super-cool broadband radiative coolers on a city scale [J]. *Cell Reports Physical Science*, 2021, **2**(7): 100485.
- [49] AILI A, YIN X, YANG R. Global Radiative Sky Cooling Potential Adjusted for Population Density and Cooling Demand [J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(11): 1379.
- [50] LIANG J, WU J, GUO J, et al. Radiative cooling for passive thermal management towards sustainable carbon neutrality [J]. *National Science Review*, 2023, **10**(1): nwac208.
- [51] ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present [Z]. 2019. DOI: 10.24381/cds.68d2b-b30.
- [52] BATTISTI D S, DONOHOE A. Atmospheric and Surface Contributions to Planetary Albedo [J]. *Journal of Climate*, 2011, **24**(16): 4402–4418.
- [53] NASA. Cloudy Earth [Z]. www.nasa.gov, 2025.
- [54] MAURITSEN T, TSUSHIMA Y, MEYSSIGNAC B, et al. Earth's Energy Imbalance More Than Doubled in Recent Decades [J]. *AGU Advances*, 2025, **6**(3): e2024AV001636.