2001年至2025年陆地表面反照率动态的全球格局与驱动因素

黄晓婷[1], 刘竹[1]

[1] 清华大学地球系统科学系、教育部地球系统建模重点实验室、全球变化研究院，中国北京，100084。

通讯作者：刘竹 (zhuliu@tsinghua.edu.cn)

更广泛的背景

地表反照率决定了地球反射和吸收太阳能的比例，将陆地状况与气候、生态系统和水资源可利用性联系起来。然而，我们对陆地反照率变化及其环境驱动因子的全球综合认识仍然有限。本研究利用卫星观测和环境数据集表明，陆地反照率变化具有显著的区域差异。2001年至2025年，南极洲以外的陆地上显著的长期增亮和变暗现象并存，这表明近期的反照率变化受区域差异化地表过程主导，而非遵循单一的全球趋势。研究还表明，积雪、植被和土壤水分在世界不同地区主导着反照率变异。这些格局十分重要，因为陆地反射率的变化能够揭示气候、生态系统和地表水文的更广泛变化。从长期来看，这项研究有助于推动基于反照率的环境变化监测和气候风险评估的发展。研究还强调，遥感、气候科学、生态学和水文学领域的协作对于解读持续变暖背景下的地表响应具有重要价值。通过提高对区域特异性陆地表面变化的检测能力，这项研究可为气候评估、生态系统监测以及更科学的适应、土地管理和环境决策提供支持。

摘要。

陆地表面反照率是全球辐射平衡的基本决定因素，但对其长期变化轨迹和多圈层环境驱动因素的空间综合认识仍然不足。利用MODIS观测数据（2001年–2025年），本研究综合采用Theil–Sen趋势分析、标准化异常诊断和逐像元多元线性回归框架，量化全球反照率动态，并将其归因于生物物理驱动因素。结果表明，全球反照率变化呈现显著的空间异质性，而非统一趋势：23.3%的陆地表面表现出显著增亮，18.9%表现出显著变暗。多驱动因素归因分析显示，控制因素具有清晰的纬向分布：积雪覆盖主导北部高纬度地区的反照率变异（占分类区域的46.9%）；而归一化植被指数（41.0%）和土壤湿度（12.1%）分别控制热带植被区和水分受限过渡带。这些发现表明，尽管陆地反照率是地球系统变化的稳健指标，但其解释高度依赖区域性的冰冻圈、生物物理和水文背景。

关键词
陆地表面反照率；长期趋势；时空异质性；异常分析；气候变化。

1 引言

陆地表面反照率是一项基本的陆地表面属性，决定了入射短波辐射在反射与吸收之间的分配[1,2]。通过直接控制地表辐射交换，反照率会影响地表温度、边界层发展、陆气耦合及全球气候反馈[3,4,5,6]。因此，这一属性不仅仅是一个光学参数，更是陆地表面生物物理状态的综合体现。陆地反照率的变化可能源于植被结构与覆盖、积雪和冰况、土壤暴露以及地表湿润状况的改变，从而将局地陆地表面变化与更广泛的、与气候相关的能量再分配联系起来。遥感和气候科学文献已广泛强调地表反照率在地表能量平衡和气候反馈中的核心作用[1,7]。 因此，阐明多过程耦合作用下反照率在不同空间和时间尺度上的复杂动态，是理解陆地表面过程与气候反馈的核心问题。

陆地表面反照率的动态变化具有内在的异质性，因为控制反照率的过程在不同生物群系、气候和季节间差异显著[8]。在植被茂密的生态系统中，反照率与冠层结构、叶面积、背景土壤遮蔽和物候变化密切相关[9]。在干旱地，反照率往往受稀疏植被覆盖、裸土暴露和土壤湿度之间微妙平衡的影响，因此在干旱发展或土地退化期间可能发生显著变化[10,11]。在高纬度地区，反照率受到积雪覆盖、积雪持续性以及植被对积雪的遮蔽效应的强烈调节，使积雪—反照率反馈成为气候系统中最强效的生物物理机制之一[12]。从北方森林造林影响到全球绿化分析，大量研究均已证实森林反照率效应、积雪反照率反馈和植被介导的辐射变化具有重要的气候意义 [7,13]。

这些空间变异的控制因素还意味着，相同方向的反照率变化可能对应着截然不同的潜在地表过程。在湿润或温带地区，反照率下降可能表明冠层密度增加和植被覆盖增强；而在积雪主导区，这可能反映出随着灌木和森林扩张，积雪遮蔽作用增强，或区域变暖导致积雪持续性降低[14,15]。相反，在干旱和半干旱环境中，反照率升高可能与植被退化、裸土暴露增加或土壤湿度严重不足有关。经验和观测研究一致表明，裸土反照率对土壤含水量高度敏感[16], ，而大尺度反照率变异可能与积雪覆盖、植被动态和水文气候因子协同变化。这种依赖生物群区的可解释性使陆地反照率具有重要的科学信息价值，但也要求对全球尺度诊断进行谨慎表述，以避免物理误读。

如今，卫星观测为长期、全球范围监测陆地反照率提供了前所未有的能力。尤其是，MODIS BRDF/反照率框架建立了一套一致且基于物理原理的地表反照率全球反演算法[17,18]，，后续验证研究也证实，在不同条件下，这些产品均具有足够的精度，可用于严谨的科学分析[19]。与此同时，近期综述强调，尽管反演算法、空间缺口填补和跨传感器协调已取得重大进展，但针对不同土地类型和气候区制的地表反照率动态，全球综合认识仍不完整[20]。许多以往研究聚焦于区域变化、特定的土地覆盖转变或单个过程领域，而较少有研究在单一观测框架内，系统整合长期反照率变化轨迹、近期极端异常以及多变量环境驱动因子。

将近期异常置于长期变化的背景下，对于从物理意义上准确解读当今地表动态尤为重要。长期趋势分析可以识别地表是否经历了持续增亮或变暗，从而确立陆地辐射变化的背景轨迹。相比之下，异常分析则着重分离偏离气候预期的短期变化，并且对近期扰动、气候变率以及极端水文气候事件高度敏感。事实证明，这种趋势—异常组合在近期大尺度监测研究中非常有效，可将最新重点年份置于多年代基准的背景下进行解读[21,22]。对于陆地表面反照率而言，这一框架能够明确揭示近期状况究竟是在强化、抵消，还是完全偏离长期地表动态轨迹。

除了记录时空格局之外，明确归因反照率动态的驱动因素对于进行稳健解读也至关重要。由于反照率综合反映了植被、水文气候和冰冻圈过程在地表的复杂表现，其长期变化轨迹和近期异常均由多个相互作用的控制因素共同驱动，而非由某一个孤立因素单独决定。在本研究中，我们利用卫星反演的陆地短波反照率观测，采用稳健的Theil–Sen估计量量化长期时空趋势（2001–2025），并明确刻画标准化异常和历史排名，重点关注2025年。具体而言，我们利用多元线性回归框架评估其潜在环境驱动因素。为刻画与陆地表面反照率变率相关的环境因素，我们纳入了代表冰冻圈（积雪覆盖）、生物物理（归一化差异植被指数，NDVI）和水文（土壤湿度）过程的三个变量。通过采用标准化回归系数和严格的多重共线性诊断，我们旨在系统量化各环境驱动因子对反照率扰动的相对贡献及其空间主导性。最终，通过整合长期趋势轨迹、极端异常诊断和多变量驱动归因，本研究将陆地表面反照率确立为一种具有物理可解释性的全球气候和地表监测指标。

2 数据与方法

2.1 陆地表面反照率的卫星观测

本研究采用MODIS MCD43C3（第6.1版）每日地表反照率产品，空间分辨率为0.05°[23]。鉴于短波反照率与地表能量收支直接相关，我们选取短波（0.3–5.0 μm）白空反照率（WSA）作为主要分析变量。为确保像元级时间序列的一致性和可靠性，在分析前实施了一套质量保证与质量控制（QA/QC）程序。首先，仅保留反演质量良好的像元（质量标志≤2），以减少低质量反演带来的噪声。其次，像元必须满足Percent_Inputs ≥ 50这一标准，以确保反照率反演在合成时段内有足够数量的有效晴空观测作为支持。在完成每日像元级筛选后，将保留的观测通过像元均值聚合为月合成产品。这种时间聚合进一步降低了短期变异性，为后续趋势和异常分析提供了更加稳定的基础。在回归分析中，将月度数据通过面积加权平均上采样至0.25°空间网格，以匹配气象驱动数据集的分辨率。

2.2 环境驱动因子

为厘清控制地表反照率动态的多种机制，本研究整合了代表不同冰冻圈、水文和生物物理控制因素的三个独立数据集。首先，为捕捉主要的冰冻圈强迫作用，从MOD10CM产品中获取积雪覆盖率数据[24]。其次，利用ERA5-Land提供的表层体积含水量数据，量化陆地表面的水文状况[26], ，该因素通过土壤变暗效应从物理上改变裸土的光学性质。第三，采用源自MODIS MCD43C4产品的归一化差异植被指数（NDVI）[27] ，将其作为植被冠层动态和结构物候的代理指标。所有辅助数据集在统计分析前均按月聚合为月平均值，并采用保守的面积加权平均方法重新采样至统一的0.25°网格。

2.3 长期趋势分析

为量化地表反照率的长期时间演变，首先计算每个像元的年平均反照率。随后采用 Theil–Sen（TS）中位数斜率估计量估算长期趋势，并使用 Mann–Kendall（MK）非参数检验评估其统计显著性[25]。这种方法广泛用于遥感时间序列，因为与普通最小二乘回归相比，它对噪声和极端值不那么敏感，且无需假设数据服从正态分布。

对于每个像元，使用 Theil–Sen 中位斜率估算长期趋势的幅度（β）：

$$\beta = \mathrm{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall 1 \le i < j \le n \quad (1)$$

其中，x_i和x_j分别表示年份i和j的反照率观测值，n 为时间序列的长度。正的β 表示反照率随时间呈上升趋势，而负的β 表示下降趋势。随后，使用 Mann–Kendall 检验评估 TS 派生趋势的统计显著性。该检验无需假设特定的数据分布，即可检测时间序列中的单调变化。MK 检验统计量（S）定义为：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sgn(x_j - x_i) \tag{2}$$

其中，sgn 为符号函数：

$$sgn(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta > 0 \\ 0, & \theta = 0 \\ -1, & \theta < 0 \end{cases} \tag{3}$$

对于具有 $n \geq 10$ 的时间序列，统计量 S 近似服从正态分布。因此，标准化检验统计量（Z）计算如下：

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{Var(S)}}, & S < 0 \end{cases} \tag{4}$$

根据标准化的 Z 值，将像元级趋势分为显著和不显著两类。本研究采用的显著性水平为 $p < 0.05$，对应于 $|Z| > 1.96$。

2.4 时空异常提取

为量化地表反照率异常的幅度及其空间分布，本研究采用了逐月异常框架。这一方法是必要的，因为地表反照率呈现显著的季节周期，直接与单一多年平均值比较会将真实异常与正常季节变率混为一谈。通过将每个日历月份与其自身的历史基准值进行比较，异常估计值能够更准确地反映相对于预期季节状态的偏离。

对于每个像元，利用参考时段内雪影响最小化的月度反照率记录，分别计算每个日历月份的长期平均值（μ_m）和标准差（σ_m）m。随后将年份t中月份m的标准化异常定义为：

$$Z_{m,t} = \frac{\alpha_{m,t} - \mu_m}{\sigma_m} \tag{5}$$

其中，$\alpha_{m,t}$ 表示m年t月的观测月平均反照率。正值表示地表反照率高于该月的历史平均值，而负值表示低于正常水平。这种标准化处理表示了相对于每个像元历史变率的异常幅度，因此提高了

不同背景反照率状况区域之间的可比性。为在更广泛的空间尺度上概括异常状况，进一步根据纬度余弦，采用面积加权平均将像元级月异常汇总为区域和全球平均值。这种加权方式考虑了地理坐标系下像元面积随纬度增加而减小的特点，确保大尺度平均值不会偏向高纬度网格单元。

为进一步将异常置于长期背景中考察，我们对汇总后的区域和全球异常序列进行了时间排序分析。在完整观测记录中，对月度和年度异常值进行排序，以确定各年份和月份的相对位置。该方法可直接衡量某一时期的异常状况在历史记录中属于最高还是最低水平，并使大尺度异常事件能够在地表反照率变异的更广阔时间背景下得到解读。

2.5 月地表反照率与环境驱动因子的回归分析

为量化陆地表面反照率与主要环境驱动因子之间的相对关联，我们使用 0.25° 月分辨率下的原始月地表反照率、积雪覆盖、土壤水分和归一化植被指数，进行了逐像元标准化多元线性回归，因为月度反照率变异受到冰冻圈、水文和生物物理过程相互作用的影响。对于每个陆地像元，模型表示为：

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 SC_t + \beta_, SW_t + \beta_3 NDVI_t + \varepsilon_t \quad (6)$$

其中，y_t 表示月地表反照率，SC_t、SW_t和$NDVI_t$ 分别表示月积雪覆盖、土壤水分和归一化植被指数，ε_t 为残差项。为便于直接比较每个像元内各系数的大小，在拟合前沿时间维度对响应变量和预测变量进行了标准化。针对每个像元独立采用普通最小二乘法进行回归。回归中仅保留时间变化充分且数据可用性足够的预测变量。统计显著性在$p < 0.05$水平上进行评估。对于每个像元，将绝对标准化系数最大的显著预测变量确定为相关主导驱动因素；对于不存在任何显著预测变量的像元，则不归入任何主导类别。

3 结果

3.1 陆地表面反照率的气候态格局和长期趋势

陆地表面反照率的气候态分布呈现出清晰且具有物理一致性的空间结构（图1）。年平均反照率在湿润且植被茂密的地区通常较低，尤其是湿润热带森林带和东南亚；而在干旱地区和受积雪影响的高纬度地区则相对较高，尤其是撒哈拉、阿拉伯半岛以及北部受积雪影响的陆地区域。这种差异形成了显著的纬向格局[23],：湿润热带地区存在一条广泛的低反照率带，向亚热带和北部高纬度地区延伸时，反照率值逐渐升高。季节分布图进一步表明，这一格局并非静态不变。在北半球冬季，北半球欧亚大陆和北美洲的反照率显著升高，这与积雪暴露增加相一致；

而在夏季，随着积雪覆盖退缩、植被暴露程度增加，反照率大幅下降[28]。相比之下，热带地区的季节变化相对较弱，而过渡带则表现出更强的季节差异，表明反照率与植被覆盖、土壤暴露和地表湿润度变化之间存在更紧密的季节耦合。

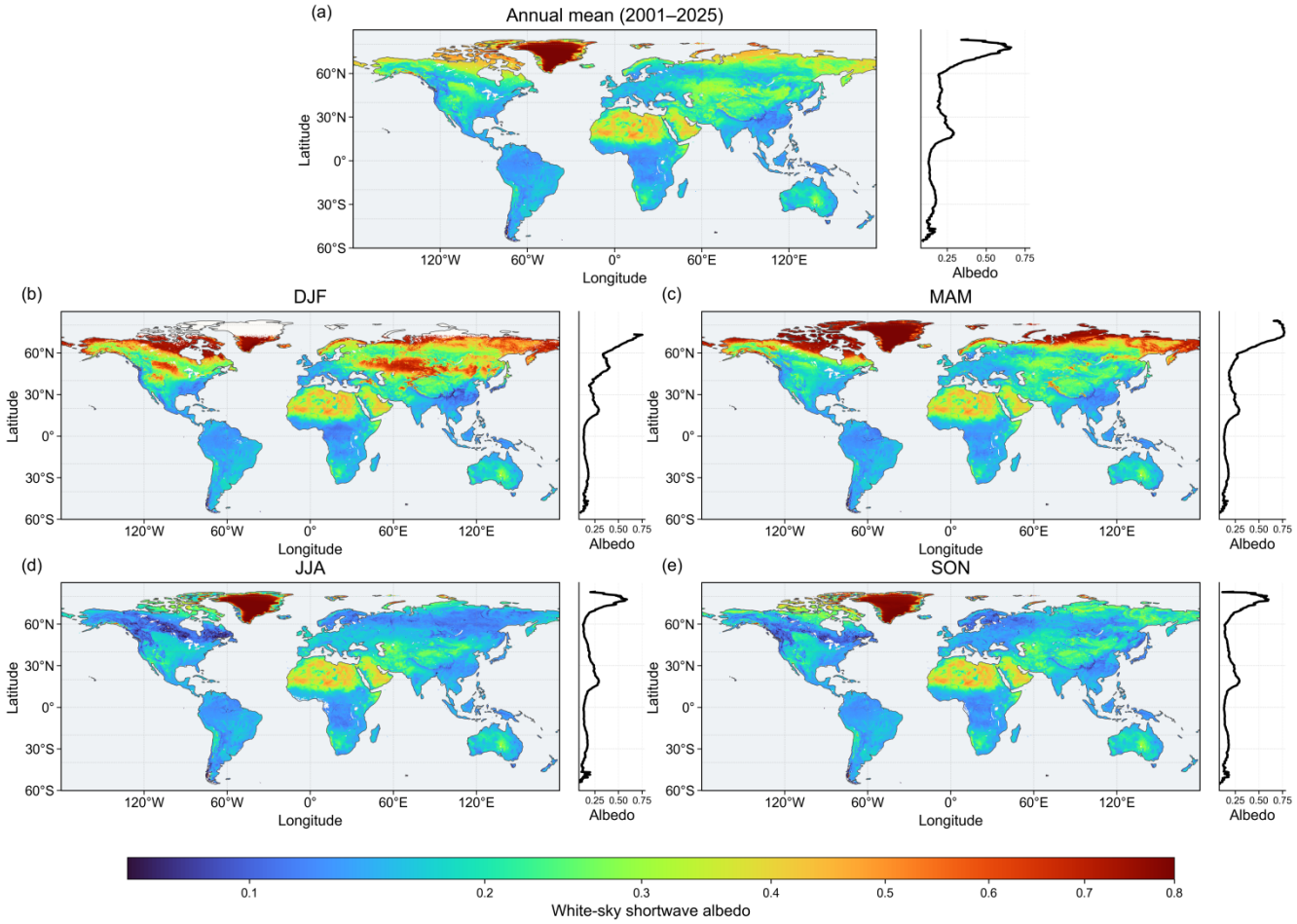

图1. 全球陆地地表反照率（2001–2025）的气候态空间格局与纬度剖面。 **(a)**年均白空短波反照率的空间分布及其对应的纬向平均剖面（右图）。**(b–e)**季节气候平均值的空间格局及其各自的纬向平均剖面，分别对应**(b)**12月至2月（DJF）、**(c)**3月至5月（MAM）、**(d)**6月至8月（JJA）和**(e)**9月至11月（SON）。每个子图中，右侧折线图展示了纬向平均反照率随纬度的变化。

在这一气候背景下，2001–2025年的长期趋势呈现出显著的空间异质性，而非全球一致的变化（图2a）。地表反照率的显著下降主要集中在印度次大陆、中欧亚，以及温带欧洲和北美洲的部分地区；相比之下，显著上升则更多见于阿拉伯

半岛及其周边干旱地、南美洲热带地区的部分区域，以及北美洲和东亚的局部地区。这些相反的区域性信号表明，近期反照率变化主要由具有地理差异的地表过程主导，而非源于单一且连贯的全球趋势。总体而言，23.3%的南极洲以外的陆地像元呈现显著正趋势，18.9%呈现显著负趋势，其余像元（57.8%）未表现出显著的长期变化（图 2b）。这些趋势像元并非均匀分布，而是集中在特定气候带，凸显了长期陆地反照率变化的空间选择性。

显著趋势的分布呈现出明显的纬度不对称性。正趋势主要集中在低纬度地区，而负趋势则主要分布在低纬度和中纬度地区。这一格局表明，长期反照率变化更多地受大尺度气候带结构影响，而非呈现空间均一的全球趋势。不同显著趋势类别的植物功能型组成呈现出鲜明的分布特征（图 2c）。在低纬度地区，显著正趋势主要分布于草地系统（39.8%）；在中纬度地区，则主要分布于裸土系统（41.0%）。对于显著负趋势，低纬度地区占比最高的是裸土（44.3%），而中纬度地区占比最高的是森林（34.9%）。总体而言，正趋势像元以草地为主（33.2%），负趋势像元则以裸土为主（33.4%）。总体来看，这些结果表明，与显著反照率趋势相关的主导地表背景因纬度带和趋势符号而异，但各趋势类别仍包含多种植物功能型。

对年度显著像元进行季节分解后发现，各季节对年度反照率趋势格局的贡献并不均衡。年度正趋势像元与 DJF 的关联最强（37.9%），而年度负趋势像元则与 MAM 的关联更强（36.0%）。JJA 对正趋势（17.9%）和负趋势（15.1%）年度区域的贡献占比均最小。从空间分布来看，MAM 主导的负趋势主要集中在北部高纬度地区，而 DJF 主导的负趋势在南美洲部分地区和北美洲高纬度地区更为明显。这些结果表明，年度趋势格局是由各季节贡献不同且具有地域差异的因素共同形成的。

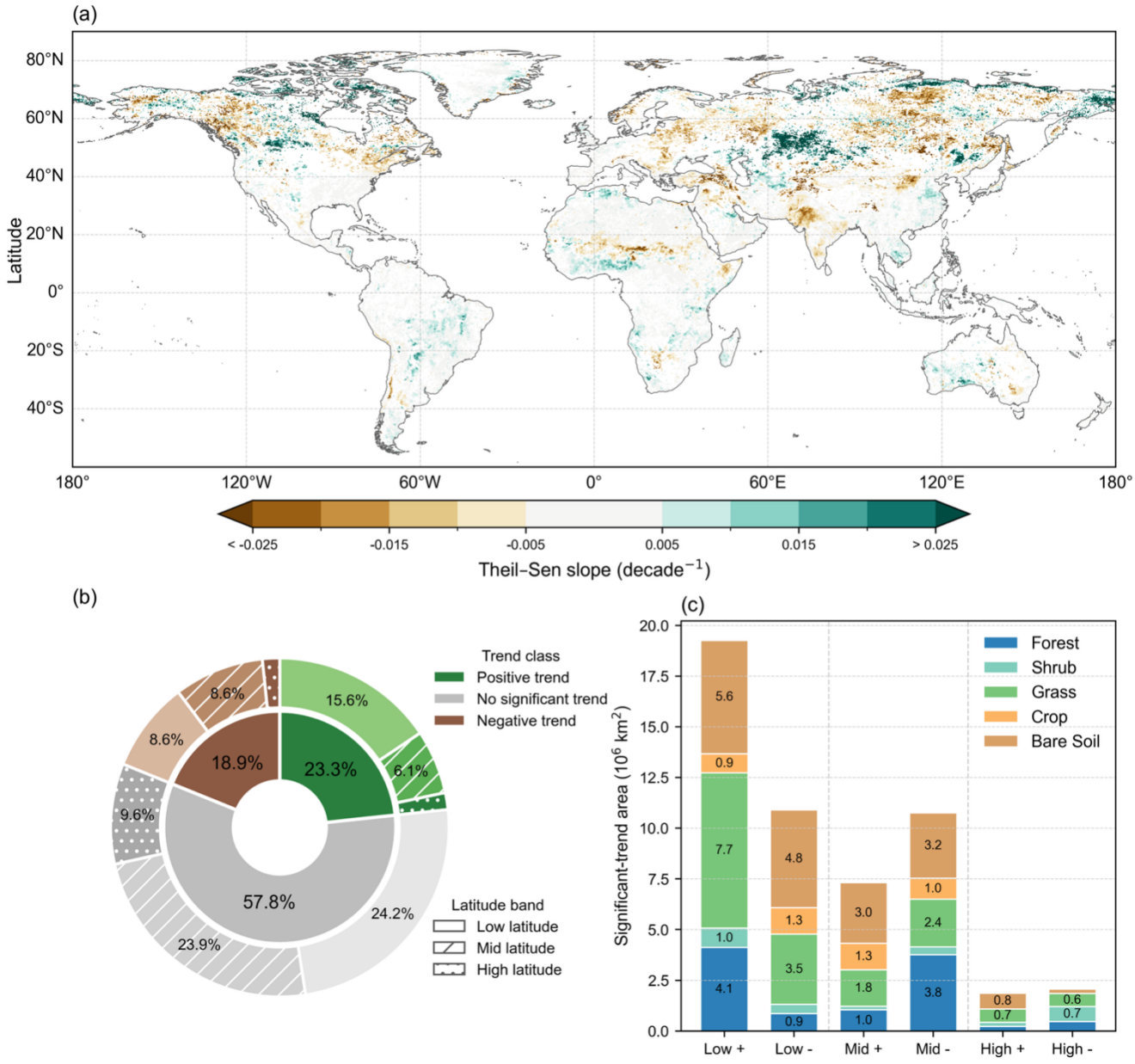

图2. 全球陆地地表反照率的长期趋势及其纬度和植物功能型组成。 **(a)** 采用 Theil–Sen 中位斜率（每十年$^{-1}$）估算的南极洲以外陆地表面长期反照率趋势空间分布。仅对基于 Mann–Kendall 检验（$p < 0.05$）具有统计显著趋势的像元进行着色；所有其他像元，包括具有不显著趋势的像元以及回归所需有效数据不足的像元，均显示为白色。**(b)** 环形图显示南极洲以外陆地像元中正趋势、负趋势和无显著趋势像元的面积加权比例，外环表示低、中、高纬度区域的贡献。**(c)** 堆叠条形图

显示低、中、高纬度地区显著正负趋势像元绝对面积的图表，并按合并后的植物功能型组区分。

3.2 陆地表面反照率的时空异常

2001–2025年，陆地表面反照率异常呈现显著的年际和空间变异（图3）。纬度—时间分布显示，南半球亚热带和中纬度地区存在若干一致的异常簇，尤其集中在南纬20–40°附近，包括2001年前后的强负异常、2011–2012年的另一段负异常，以及2019–2020年前后显著的正异常。相比之下，北半球异常总体较弱，空间分布也更零散。年度半球异常序列进一步表明，南半球主导了全球年际信号，其年度异常最负值和最正值分别出现在2001年（−0.0062）和2019年（0.0052）；而北半球异常幅度小得多，介于2004年的−0.0016和2011年的0.0016之间。南半球异常簇与区域内一致的空间模式相关，而非均匀分布于整个半球的变化。2011–2012年前后的负异常阶段在澳大利亚和非洲南部部分地区最为明显，而南半球其他地区的信号则弱得多或呈混合状态。相比之下，2019–2020年前后的正异常阶段在空间上更为一致，澳大利亚、非洲南部以及南美洲南部部分地区均普遍出现正异常。这种差异表明，南半球正、负异常阶段不仅符号不同，其在南部主要陆地区域的空间一致性也存在差异。

2025年年度异常呈现空间异质性，而非全球一致的变化（图 S2）。负异常主要集中在南亚和澳大利亚，正异常则在北半球热带外欧亚大陆和北美洲更为明显[29][30]，，包括欧洲—欧亚大陆西部、中亚、欧亚大陆北部以及北美洲北方带的部分地区。其他地区，包括非洲南部、南美洲南部和亚马孙地区，年度异常相对较弱。总体而言，这些格局表明，2025年的特征是显著的区域对比，而非一致的全球尺度变化。

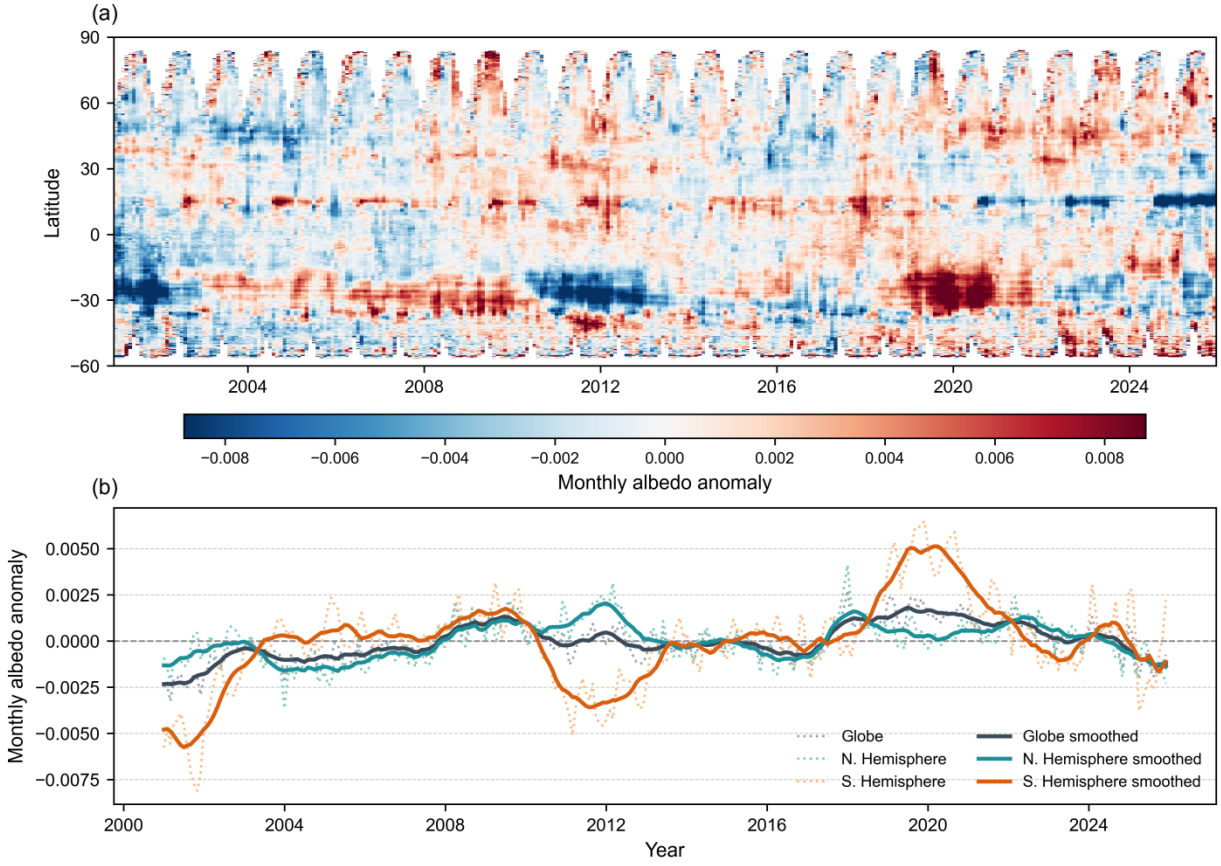

图3. 2001–2025年陆地表面反照率异常的时空变异。 (a) 纬度–时间

相对于气候平均值的月度陆地表面反照率异常分布。**(b)**全球、北半球和南半球的月度反照率平均异常。虚线表示原始月度序列，实线表示平滑序列。

3.3 陆地表面反照率与环境驱动因子的关系

逐像元标准化多元回归揭示了月度陆地表面反照率与环境驱动因子之间主导关系的显著区域对比（图4a）。在主要主导因子分布图中，仅显示$R^2 \geq 0.30$的像元。在这些像元中，积雪是北部中高纬度陆地区域大部分地区的主导相关因子，在北美洲北方林区和欧亚大陆北部形成了广泛且空间上连贯的区域，占分类陆地面积的46.9%。归一化植被指数主导了低纬度植被覆盖陆地表面的大部分区域，包括非洲、南美洲、南亚和东亚以及澳大利亚的大部分地区，占分类陆地面积的41.0%。土壤水分占剩余的12.1%，主要集中在水分受限过渡带，包括北美洲西部、

地中海—西亚地带、南美洲南部、非洲南部以及澳大利亚的部分地区。这些格局表明，月度陆地反照率的主导环境关系在不同区域之间存在显著差异。

主导相关因子的面积加权纬度组成进一步凸显了清晰的纬向过渡（图 4b）。积雪在北部高纬带占主导，在 45–60°N 和 60–75°N 分别占分类陆地面积的 87.6% 和 70.0%。相比之下，热带带区主要以归一化植被指数占主导为特征：归一化植被指数在 0–15°N 和 15°S–0°的分类陆地面积中分别占 77.9% 和 79.3%。在南半球中纬度地区，主导因子转为土壤水分与归一化植被指数的组合：在 30–45°S，土壤水分和归一化植被指数分别占分类陆地面积的 57.2% 和 37.5%，而积雪仅占 5.3%。然而，赤道带区满足显示标准的陆地面积比例远低于热带外地区，在 0–15°N 和 15°S–0°分别仅为 42.7% 和 23.1%；相比之下，45–60°N、60–75°N 和 30–45°S 分别达到 96.9%、93.4 % 和 81.2%。这种差异表明，选定预测因子对热带外地区月度反照率变异的捕捉效果远优于对湿润热带地区的捕捉效果。

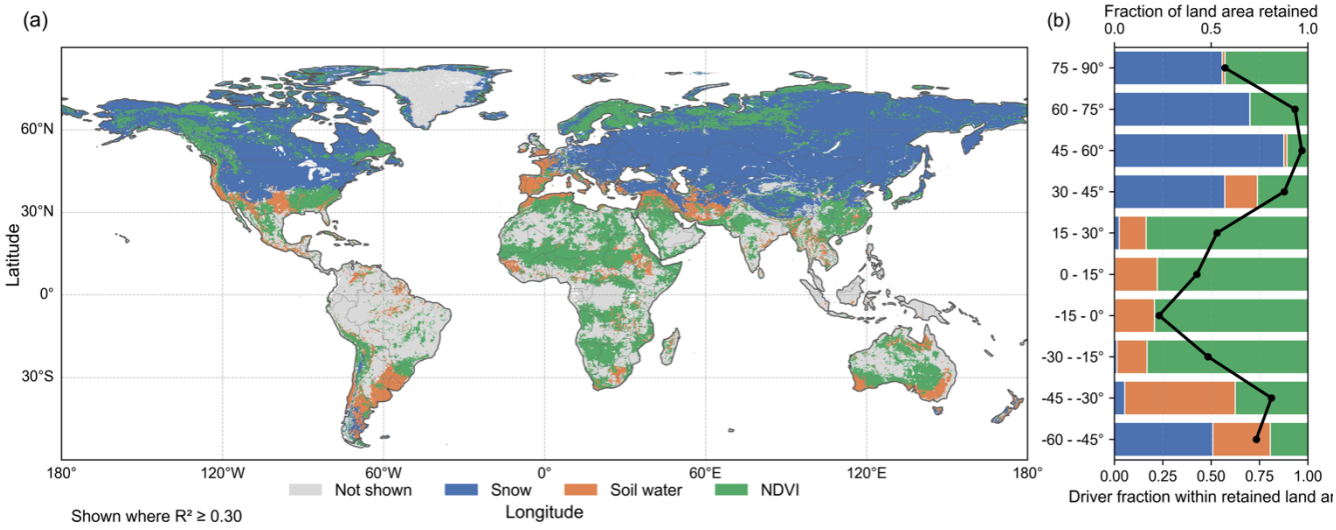

图4。月度陆地表面反照率主要环境相关因子的空间主导性和纬度组成。 **(a)** 原始月度陆地表面反照率主导环境相关因子的全球分布。**(b)** 主导环境相关因子的面积加权纬度组成。

系数图进一步揭示了这些关系的方向及其空间结构（图 S2a–d）。在北部中纬度和高纬度地区，积雪覆盖总体呈现正的标准化系数，其中 90.1% 的显著的积雪系数为正[31]，这与积雪覆盖增加对陆地表面反射率产生的强烈增亮效应一致。土壤水分系数总体为负，只有 18.8% 的显著像元显示出正相关，这与许多水分受限地区在地表条件较湿时出现的土壤变暗现象一致[32]。归一化植被指数系数的空间异质性更强，40.5% 的显著像元显示出正相关[33]，这表明

植被—反照率关系并不呈现空间一致的符号。模型拟合的空间差异进一步支持了这一模式：45–60°N 和 60–75°N 的平均 R^2 值分别为 0.75 和 0.76，但在 0–15°N 和 15°S–0°分别仅为 0.31 和 0.20，而 30–45°S 的中间值为 0.47。总体而言，这些结果表明，月度陆地表面反照率反映了不同的冰冻圈、水文和生物物理状态，其相对重要性随纬度和环境背景呈系统性变化。

4. 讨论

2001–2025年期间，陆地表面反照率变化主要表现为显著的空间异质性，而非全球一致趋势。各主要气候带中同时出现了增亮和变暗现象，表明反照率变化反映了具有区域差异的陆地表面过程。这说明，大尺度反照率趋势应结合其环境背景进行解读，而不应视为单一且一致的信号。将长期趋势与近期异常相结合，能够更清晰地呈现陆地表面变化。长期趋势描述表面反射率的背景演变，而异常则反映相对于该背景的短期偏离[34]。2025年的格局呈现空间混合特征，而非全球一致性，表明近期变异主要由区域性水文气候和生态扰动主导，而不是由同步的全球变化所致。

驱动因素分析进一步显示，月度反照率变异具有清晰的地理分异特征。积雪是北部中高纬度地区的主导因素[35], 归一化植被指数主导了低纬度植被覆盖陆地表面的大部分区域，而土壤水分在水分受限过渡带中影响最为显著。这些结果表明，全球反照率变异受不同的冰冻圈、生物物理和水文状态共同制约。湿润热带地区的解释力较低，说明该地区的反照率变异受更为复杂的相互作用过程控制，而这些过程并未被选定预测因子充分表征。总体而言，本研究表明，陆地反照率是反映陆地表面变化的有用指标，但其解读必须考虑不同区域在格局和控制因素方面的显著空间异质性。

5. 结论

利用卫星观测和辅助环境数据集，本研究从长期趋势、近期异常和环境控制因素三个方面，考察了2001–2025年陆地表面反照率动态。结果表明，陆地表面反照率呈现出显著的空间异质性，而非全球一致的格局。在非南极陆地上，23.3%的像元表现出显著正趋势，18.9%的像元表现出显著负趋势，57.8%的像元未呈现显著长期变化，这表明近期反照率变化主要由区域差异化的地表过程所主导。

近期异常分析表明，2025年的反照率状况同样具有空间异质性。负异常主要集中在南亚和澳大利亚，而正异常在北半球热带外欧亚大陆和北美洲更为明显。这些格局表明，近期反照率变异主要通过区域对比表现出来，而非形成一致的全球尺度变化。

反照率与环境驱动因子之间的关系也呈现出明显的地理结构。在 $R2 \geq 0.30$ 的像元中，积雪、归一化植被指数和土壤水分分别占分类陆地面积的 46.9%、41.0% 和 12.1%。积雪是北部高纬度地区的主导控制因素，归一化植被指数在热带植被区占主导地位，而土壤水分在水分受限过渡带最为重要。综合来看，这些结果表明，陆地反照率与冰冻圈、生物物理和水文过程密切相关，且在解读时必须明确考虑区域环境背景。

补充材料

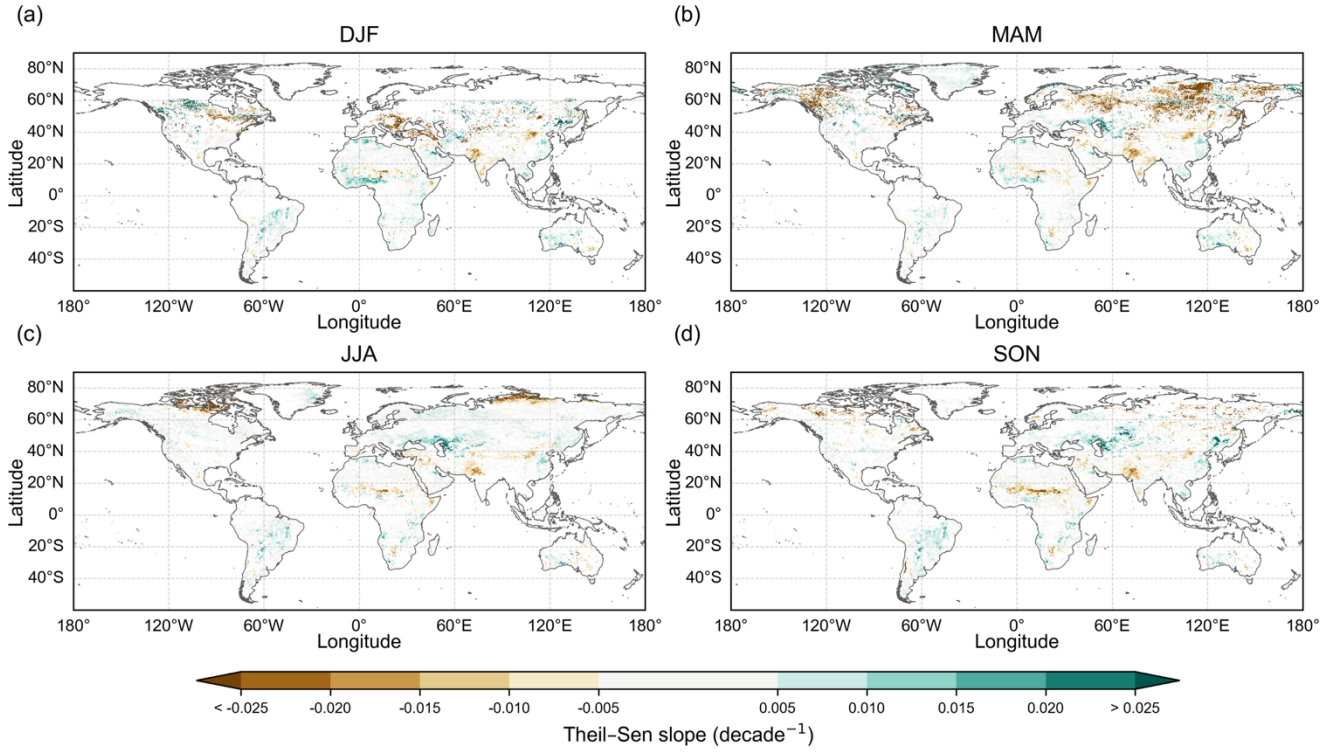

图 S1. 陆地表面反照率长期趋势的季节格局。(a–d) 采用 Theil–Sen斜率（每十年$^{-1}$）估算的 DJF、MAM、JJA 和 SON 像元反照率趋势空间分布。仅显示具有统计学

基于 Mann–Kendall 检验得出的显著趋势以彩色显示。所有其他像元，包括具有不显著趋势的像元以及有效数据不足、无法进行回归的像元，均以白色显示。

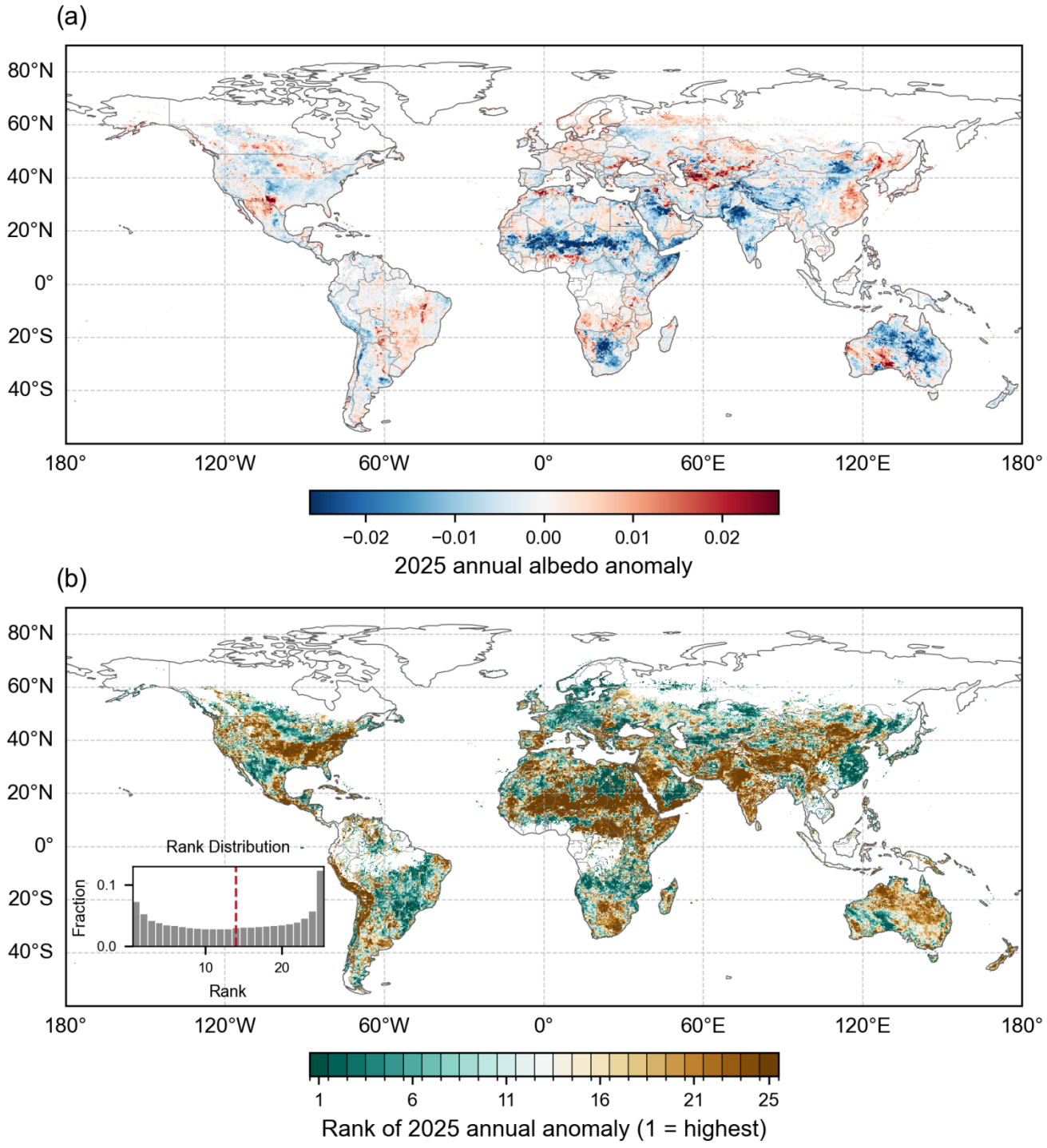

图 S2. 2025年陆地表面反照率异常的空间分布和历史排名。 **（a）** 2025年年度陆地表面反照率异常，相对于2001–2025年气候态。 **（b）** 2001–2025年记录中各网格单元2025年年度反照率异常的历史排名。插图显示了网格单元排名的频率分布。

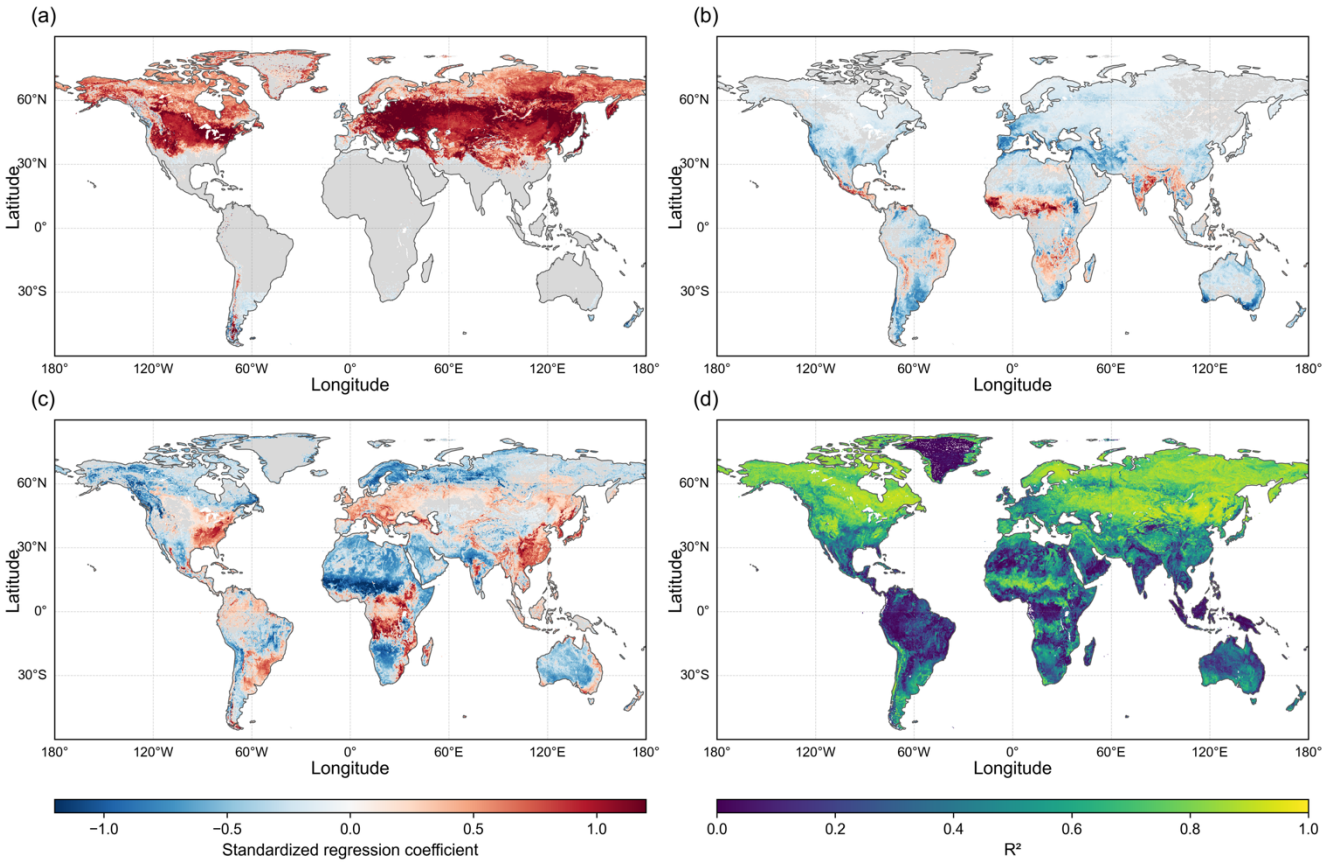

图 S3. 月度反照率显著标准化回归系数和模型拟合的空间分布关系。 **（a–c）** 分别展示了通过陆地表面反照率逐像元原始月度回归获得的积雪覆盖 、土壤水分、和 归一化植被指数的显著标准化系数，。仅显示在 $p < 0.05$ 时显著的系数，不显著的系数以浅灰色显示。 **（d）** 显示相应的 R。

作者贡献

X.H. 构思了本研究，完成了数据处理和正式分析，制作了图表，并撰写了原始稿件。Z.L. 负责监督本研究，提供概念指导，获得研究经费，并修订了稿件。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

数据可用性声明

MODIS MCD43C3产品（6.1版）可从NASA陆地过程分布式主动档案中心获取，网址为 https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD43C3.061（最后访问日期：2026年3月31日）。MOD10CM产品可从NASA国家冰雪数据中心分布式主动档案中心获取，网址为https://nsidc.org/data/mod10cm（最后访问日期：2026年3月31日）。ERA5-Land数据可从哥白尼气候数据存储库获取，网址为https://cds.climate.copernicus.eu/（最后访问日期：2026年3月31日）。

致谢

作者感谢Yuhan Yu博士在引言、稿件格式编排、语言编辑和参考文献准备方面提供的帮助。

参考文献

1. Bonan, G.B. (2008). 森林与气候变化：强迫、反馈与森林的气候效益。《科学》*320*, 1444–1449. https://doi.org/10.1126/science.1155121. 2. Stephens, G.L., O'Brien, D., Webster, P.J., Pilewski, P., Kato, S., and Li, J. (2015). 地球反照率。《地球物理学评论》*53*, 141–163. https://doi.org/10.1002/2014RG000449. 3. Dickinson, R.E. (1983). 陆面过程与气候——表面反照率与能量平衡。载于《地球物理学进展》（Elsevier），第305–353页。https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60176-4. 4. Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., and Kiehl, J. (2009). 地球全球能量收支。《美国气象学会公报》*90*, 311– 324. https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1. 5. Charney, J., Stone, P. H., & Quirk, W. J. (1975). 撒哈拉干旱：一种生物地球物理反馈机制。《科学》，187(4175), 434-435. 6. Dickinson, R.E. (1983). 陆面过程与气候——表面反照率与能量平衡。载于《地球物理学进展》（Elsevier），第305–353页。https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60176-4. 7. Forzieri, G., Alkama, R., Miralles, D.G., and Cescatti, A. (2017). 卫星揭示地球大范围变绿对区域气候的不同影响。《科学》*356*, 1180–1184. https://doi.org/10.1126/science.aal1727. 8. He, T., Liang, S., and Song, D. (2014). 基于多种卫星产品分析1981–2010年全球陆面反照率气候学及其时空变化。《地球物理研究杂志：大气》*119*. https://doi.org/10.1002/2014JD021667.

9. Hollinger, D.Y., Ollinger, S.V., Richardson, A.D., Meyers, T.P., Dail, D.B., Martin, M.E., Scott, N.A., Arkebauer, T.J., Baldocchi, D.D., Clark, K.L., et al. (2010). 用于陆地表面模型的反照率估算，以及基于叶片氮浓度的新范式支持。《全球变化生物学》*16*, 696–710. https://doi.org/10.1111/j.1365- 2486.2009.02028.x. 10. D'Odorico, P., Bhattachan, A., Davis, K.F., Ravi, S., and Runyan, C.W. (2013). 全球荒漠化：驱动因素与反馈。水资源进展*51*, 326–344. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.01.013. 11. Mariano, D.A., Santos, C.A.C.D., Wardlow, B.D., Anderson, M.C., Schiltmeyer, A.V., Tadesse, T., and Svoboda, M.D. (2018). 利用遥感指标评估干旱和人为土地退化对巴西东北部生态系统健康的影响。《环境遥感》*213*, 129–143. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.048. 12. Flanner, M.G., Shell, K.M., Barlage, M., Perovich, D.K., and Tschudi, M.A. (2011). 1979年至2008年间北半球冰冻圈的辐射强迫与反照率反馈。《自然·地球科学》*4*, 151–155. https://doi.org/10.1038/ngeo1062. 13. Bright, R.M., Davin, E., O'Halloran, T., Pongratz, J., Zhao, K., and Cescatti, A. (2017). 非辐射过程驱动的土地覆盖和管理变化对局地温度的响应。《自然·气候变化》*7*, 296–302. https://doi.org/10.1038/nclimate3250. 14. Loranty, M.M., Berner, L.T., Goetz, S.J., Jin, Y., and Randerson, J.T. (2014). 植被对北部高纬度地区积雪反照率反馈的调控：观测与CMIP 5模型模拟。《全球变化生物学》*20*, 594–606. https://doi.org/10.1111/gcb.12391. 15. Sturm, M., Racine, C., and Tape, K. (2001). 北极灌木丰度增加。《自然》*411*, 546–547. https://doi.org/10.1038/35079180. 16. Lobell, D.B., and Asner, G.P. (2002). 水分对土壤反射率的影响。《美国土壤科学学会会刊》*66*, 722–727. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.7220. 17. Schaaf, C.B., Gao, F., Strahler, A.H., Lucht, W., Li, X., Tsang, T., Strugnell, N.C., Zhang, X., Jin, Y., Muller, J.-P., et al. (2002). MODIS首批业务化双向反射分布函数、反照率和天底反射率产品。《环境遥感》*83*, 135–148. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00091-3. 18. Wang, Z., Schaaf, C.B., Chopping, M.J., Strahler, A.H., Wang, J., Román, M.O., Rocha, A.V., Woodcock, C.E., and Shuai, Y. (2012). 中分辨率成像光谱仪（MODIS）苔原积雪反照率产品（MCD43A）的评估。《环境遥感》*117*, 264–280. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.002. 19. Liu, Y., Wang, Z., Sun, Q., Erb, A.M., Li, Z., Schaaf, C.B., Zhang, X., Román, M.O., Scott, R.L., Zhang, Q., et al. (2017). 可见光红外成像辐射仪双向反射分布函数、反照率和归一化双向反射率分布函数调整反射率产品套件评估及其与长期MODIS记录连续性的评价。《环境遥感》*201*, 256–274. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.020. 20. 政府间气候变化专门委员会第一工作组对第六次评估报告的贡献（2021）。气候变化*2*, 2391.

21. Zhang, G., Xie, H., Fernandez, A., Kinnard, C. 和 Lhermitte, S.（2026年）。全球冰冻圈遥感：现状、过程与趋势。《环境遥感》*334*，115220。https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115220。 22. Hou, Z., Zhang, L., Peng, J., Forzieri, G., Jia, A., Xiao, Z., Qu, Y., Lin, J., Ji, D., Zhu, Z. 等（2025年）。21世纪初陆地反照率增加所降低的辐射强迫。《自然》*641*，1162–1171。https://doi.org/10.1038/s41586- 025-08987-z。 23. Schaaf, C. B., Gao, F., Strahler, A.H., Lucht, W., Li, X., Tsang, T., Strugnell, N.C., Zhang, X., Jin, Y., Muller, J.-P. 等（2002年）。首批业务化BRDF、反照率和天底反射率产品：来自MODIS。《环境遥感》*83*，135–148。https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00091-3。 24. Hall, D.K., Riggs, G.A. 和 Salomonson, V.V.（1995年）。利用中分辨率成像光谱辐射计数据绘制全球积雪覆盖图的方法开发。《环境遥感》*54*，127–140。https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P。 25. Pang, G., Chen, D., Wang, X. 和 Lai, H.-W.（2022年）。青藏高原地表反照率的时空变化及其相关影响因素。《整体环境科学》*804*，150100。https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150100。 26. Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H. 等（2021年）。ERA5-Land：用于陆地应用的先进全球再分析数据集。《地球系统科学数据》*13*，4349–4383。https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021。 27. De Beurs, K.M., Wright, C.K. 和 Henebry, G.M.（2009年）。用于评估气候和人为影响俄罗斯与哈萨克斯坦植被覆盖陆地表面的双尺度趋势分析。《环境研究快报》*4*，045012。https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045012。 28. Fernandes, R., Brown, L., Canisius, F., Dash, J., He, L., Hong, G., Huang, L., Le, N.Q., MacDougall, C., Meier, C. 等（2023年）。在北美森林中验证简化二级原型处理器Sentinel-2冠层覆盖度、吸收光合有效辐射比例和叶面积指数产品。《环境遥感》*293*，113600。https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113600。 29. Ripple, W.J., Wolf, C., Mann, M.E., Rockström, J., Gregg, J.W., Xu, C., Wunderling, N., Perkins-Kirkpatrick, S.E., Schaeffer, R., Broadgate, W.J. 等（2025年）。《2025年气候状况报告》：处于危急关头的地球。《生物科学》*75*，1016–1027。https://doi.org/10.1093/biosci/biaf149。 30. Malmros, J.K., Mernild, S.H., Wilson, R., Tagesson, T. 和 Fensholt, R.（2018年）。基于MODIS日观测的智利和阿根廷安第斯山脉中部积雪覆盖与积雪反照率变化（2000–2016年）。《环境遥感》*209*，240–252。https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.072。 31. Yuan, S., Liu, Y., Qin, Y. 和 Zhang, K.（2023年）。中国新疆北部地表反照率的时空变化及其影响因素。《干旱区科学》*15*，1315–1339。https://doi.org/10.1007/s40333-023-0069-5。

32. Seneviratne, S.I., Corti, T., Davin, E.L., Hirschi, M., Jaeger, E.B., Lehner, I., Orlowsky, B. 和 Teuling, A.J.（2010年）。变化气候中的土壤水分–气候相互作用研究：综述。《地球科学评论》*99*，125–161。https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004。 33. Ullah, W., Ahmad, K., Ullah, S., Tahir, A.A., Javed, M.F., Nazir, A., Abbasi, A.M., Aziz, M. 和 Mohamed, A.（2023年）。喜马拉雅山脉南部地区地表温度（LST）、土地利用/土地覆盖（LULC）和归一化差异植被指数（NDVI）与地形要素之间关系的分析。《Heliyon》*9*，e13322。https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13322。 34. Hou, Z., Zhang, L., Peng, J., Forzieri, G., Jia, A., Xiao, Z., Qu, Y., Lin, J., Ji, D., Zhu, Z. 等（2025年）。21世纪初陆地反照率增加所降低的辐射强迫。《自然》*641*，1162–1171。https://doi.org/10.1038/s41586- 025-08987-z。 35. Yuan, S., Liu, Y., Liu, Y., Zhang, K., Li, Y., Enwer, R., Li, Y. 和 Hu, Q.（2024年）。21世纪中亚地表反照率的时空变化及其影响因素与验证性路径分析。《国际应用地球观测与地理信息杂志》*134*，104233。https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104233。