



沙漠演变及沙漠化研究的新趋向

鹿化煜*

南京大学地理与海洋科学学院, 南京大学关键地球物质循环前沿科学中心, 南京 210023

* 通讯作者, E-mail: huayulu@nju.edu.cn

收稿日期: 2024-12-31; 收修改稿日期: 2025-04-19; 接受日期: 2025-04-24; 网络版发表日期: 2025-05-20

国家自然科学基金项目(41920104005、42494914)资助

1 引言

干旱气候、充足的砂粒物质和平坦地形(或盆地), 是形成沙漠的基本条件. 地球表面有 $\sim 20 \times 10^6 \text{ km}^2$ 被沙漠覆盖(吴会娟等, 2022; 陈瑶等, 2023)(图1), 其中, 亚洲和非洲沙漠面积最大, 占全球沙漠70%以上. 作为风扬砂质和粉砂质颗粒物的源区, 沙漠排放的粉尘影响天气和气候; 粉尘还提供海洋和陆地贫营养区的养分, 促进植物生长, 调节大气 CO_2 含量, 进而影响全球气候. 因此, 沙漠的形成、演变以及沙漠化, 在地球系统演变和社会经济可持续发展过程中, 扮演着重要角色. 沙漠演变指沙漠的发生、发展和变化过程, 包括沙漠的扩张、收缩、移动以及内部结构和物质组成的变化; 沙漠化指非沙漠地区向沙漠的转化, 即土地退化导致的沙漠扩张, 包括自然变化和人类活动的影响, 与人类社会经济活动密切相关, 是荒漠化的重要组成部分. 作为交叉学科的沙漠科学和沙漠工程学, 是揭示沙漠变化规律、机制和防治沙漠化的基础学科. 近年来, 国内外对沙漠的形成、变化规律和驱动机制, 以及防沙治沙、沙漠化等研究不断深入, 实现了部分沙区人地和谐发展(Wang等, 2022; 傅伯杰等, 2024; Zheng等, 2025). 总结沙漠演变和沙漠化研究成果, 提出沙漠科学进一步研究的问题, 是新阶段沙漠研究的新需求.

2 全球沙漠的形成

随着气候和地质环境的变化, 沙漠不断演变. 沙漠中沙丘和沙物质受风力吹蚀、搬运和沉积, 快速变化. 比如, 经过百年或者几百年, 一个中小型沙丘可能完全移位、顶底反转. 风沙沉积物因其运动速度快, 在沙漠内部难以保存稳定且连续的沉积序列, 因此, 通过沙漠内部的沉积记录难以揭示沙漠的起源和演化. 科学家发现, 沙漠作为粉砂和砂质颗粒沉积物的中转站和源区, 不断向外排放粉砂(粉尘)颗粒物, 并在下风向堆积. 沙漠排放的粉尘物质通过全球和区域尺度大气传输, 可以堆积到远近不同的地方. 亚洲内陆粉尘被传输到黄土高原和北太平洋(Lu等, 2010, 2019; 罗凯等, 2025)、非洲大陆的粉尘被传输到北大西洋和印度洋北部(deMenocal, 1995; Taylor等, 2017). 在沙漠外围堆积的黄土和深海大洋风尘沉积, 成为揭示沙漠形成和演化过程的关键证据.

基于上述科学认识, 研究发现, 亚洲内陆荒漠(类沙漠或沙漠雏形)在2000多万年以前, 甚至更早的时间已经形成, 并经过了长期的、阶段性演化过程(Guo等, 2002; Lu等, 2010, 2019), 在第四纪初期现代亚洲沙漠景观建立(Lu等, 2019). 以前认为, 非洲撒哈拉沙漠在上新世末-第四纪初期形成(deMenocal, 1995); 但是, 这一结论受到了新发现的沉积证据的质疑(Schuster等, 2006). 研究显示, 撒哈拉沙漠在中新世晚期~700万年

中文引用格式: 鹿化煜. 2025. 沙漠演变及沙漠化研究的新趋向. 中国科学: 地球科学, 55(6): 2089–2093, doi: 10.1360/SSTe-2024-0362

英文引用格式: Lu H. 2025. New trend of studying desert evolution and desertification. Science China Earth Sciences, 68(6): 2038–2043, <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1571-9>

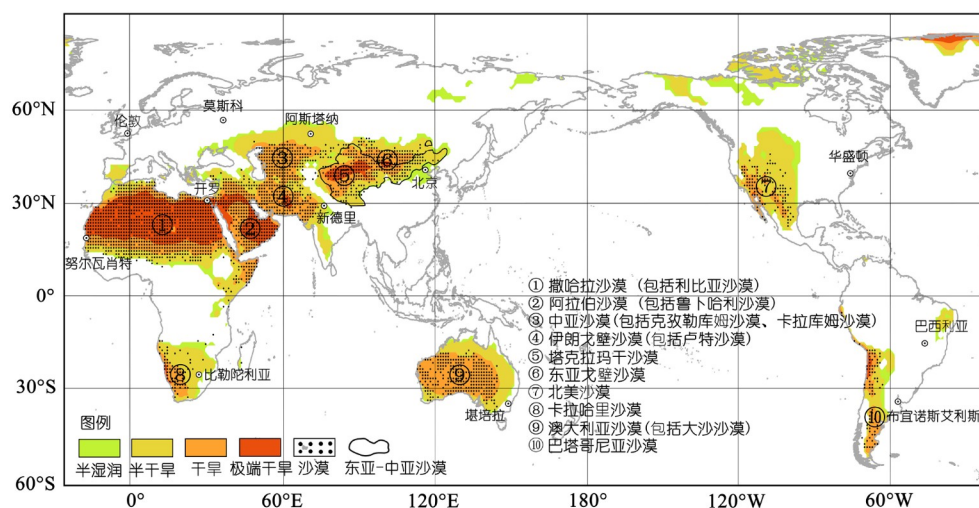


图1 全球沙漠和干旱气候分布

黑色实线勾画出正在研究的东亚和中亚的部分沙漠. 该图的制图说明见网络版附件1(<http://earthcn.scichina.com>)

前形成. 为了检验这个结论, 研究人员利用古气候数值模拟技术(Zhang等, 2014), 结合太阳辐射量、大气 CO_2 、地形和下垫面等变化, 分析撒哈拉沙漠的形成过程. 结果表明, 在距今~700万年, 古特提斯海退缩, 改变了下垫面条件, 造就了非洲北部的干旱气候, 撒哈拉沙漠形成. 澳大利亚干旱气候至少在上新世已经形成, 干旱气候随着冰期气候发展而变化 (Dodson和Lu, 2005). 澳大利亚地形平坦、物源供应不足, 高大沙丘少见. 由于大冰盖的影响, 北美洲沙漠形成时间相对较晚; 南美洲沙漠形成于晚上新世但分布面积有限(Le Houérou, 1996). 新生代亚洲沙漠形成年代相对最为久远, 其雏形应该是新生代早期的产物(Lu等, 2019).

已有沉积证据和古气候数值模拟显示, 全球沙漠演化具有区域差异性、演变阶段性和环境决定性. 比如, 类似现代的全球沙漠景观, 在亚洲起源最早, 可能在始新世就存在; 非洲现代沙漠景观始于晚中新世; 美洲在晚上新世就有沙漠发育. 沙漠演化区域性差异受到地质、气候和环境控制, 并存在不同幅度变化. 在中国北方和美国大平原地区, 沙地(dune fields)受冰期-间冰期气候影响, 变幅最大, 从裸露的流沙沙丘变为植被茂密的草地. 第四纪冰期气候大发展, 是全球沙漠形成的一个关键时间点. 冰期气候总体上减弱了水汽循环、使陆地更加干燥; 同时, 冰川和冰盖研磨和侵蚀作用, 可以产生大量砂质和粉砂质颗粒物, 加速沙漠形成(Lu等, 2010, 2019). 在地貌格局相对稳定的

条件下, 气候变干和砂颗粒物增多, 是形成沙漠的决定性因素. 在全球尺度, 现代沙漠景观在第四纪初, 400~200万年前后, 开始显现, 并伴随着北半球冰期气候大发展、全球变冷、海平面下降和气候变干、昼夜温差加大而产生. 可以说, 第四纪冰期气候建立是决定现代全球沙漠景观的关键因素.

3 沙漠演变及沙漠化对气候变化和人类活动的响应

气候以万年、百年、十年和年际多个时间尺度发生变化, 不同时间尺度气候变化的原因和变幅、变率有差异, 进而影响干旱区大气流场和降水分布, 决定着沙漠变化(图2). 如何准确认识不同干旱区和不同时间尺度气候变化及其对沙漠的作用, 是当今沙漠科学着力解决的理论问题. 其中, 对冰期-间冰期气候轮回影响沙漠的规律和机制的认识最为深入, 这与轨道时间尺度古气候变化研究程度高有关. 对中亚和西亚、北非、北美沙漠的研究认为, 间冰期温暖湿润气候使植被生长茂盛、沙丘固定、沙漠面积缩小; 反之, 沙丘活动性增强, 沙漠扩张(Lu等, 2019). 南美、南部非洲和极地地区的沙漠沉积记录碎片化严重, 研究程度低.

年际和年际尺度气候变化复杂、变率大; 尤其是人类活动对大气 CO_2 含量和地表覆盖的改变, 极大

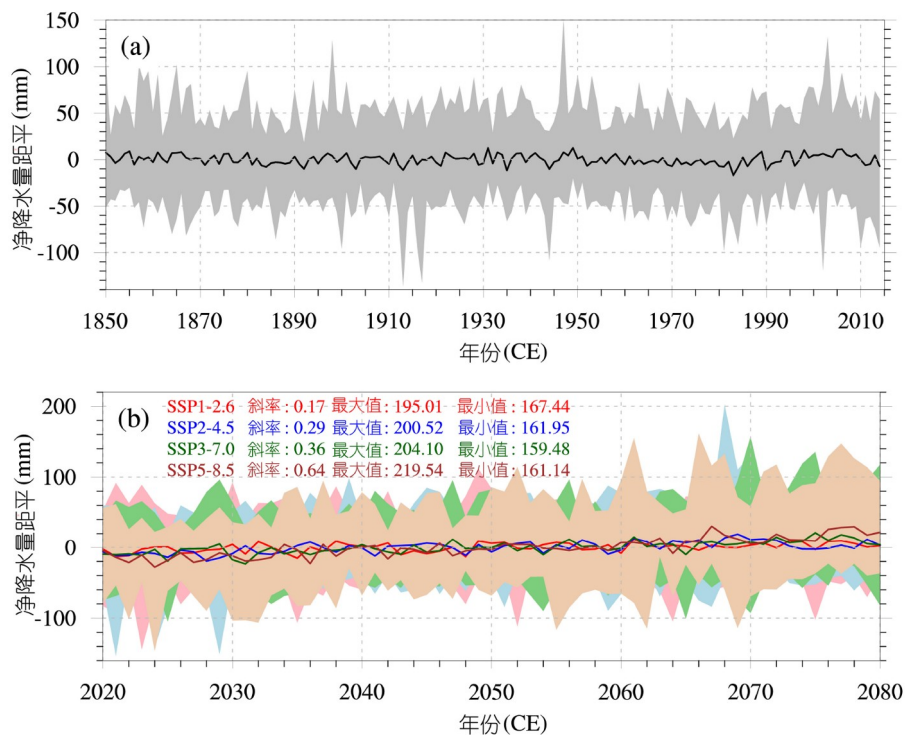


图2 数值模拟揭示东亚内陆干旱(沙漠)区过去150年和未来60年有效降水量变化

(a) 实线是Historical试验24个模式平均净降水量距平; 不确定区间(灰色)以24个模式的净降水量距平的最大值和最小值框定。(b) 不同增暖情景下24个模式平均净降水量距平; 左上数值为4条实线的斜率(slope)以及净降水量最大值和最小值(mm), 其中, 斜率单位为 mm a^{-1} 。第六次国际模式耦合比较计划(CMIP6)介绍见Eyring等(2016)。该图的原始数据见网络版附件2

地影响了气候变化过程, 使气候变化的不确定性增大。年代际和年际尺度的气候变化受太阳黑子活动、厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、北太平洋振荡(PDO)、大西洋振荡(AMO)、地表反馈和大气 CO_2 含量骤增等影响, 变化复杂, 区域气候变化差异大。现在对年代际和年际尺度气候变化规律难以掌握。因此, 难以揭示干旱区十年和年际尺度沙漠变化的特征(图2)。但是, 研究者不断努力, 通过卫星遥感、地理信息、生态分析、数值模拟等综合运用, 了解区域沙漠变化过程和原因(Lian等, 2021; Wang等, 2022)。人类活动加剧, 亦成为沙漠演变和沙漠化的直接因素, 至少在20世纪80年代后期的萨赫勒地区(Sahel)沙漠化, 被认为是人类活动的结果(Le Houérou, 1996; Taylor等, 2017)。

年代际和年际尺度干旱气候变化研究难度大、规律不明, 因此, 受其影响的沙漠化过程难以掌握。以东亚内陆为例, 基于树轮气候代用指标重建了1500~2005年期间6~8月scPDSI干旱指数(Cook等, 2010)、1500~2000年期间5~9月降水量变化(Shi等, 2017), 显

示当前东亚干旱区干旱指数相较过去500年变化不显著, 即观测时段干旱指数线性拟合曲线均处于过去500年变化 ± 2 倍标准偏差内。然而, 极端性分析表明, 东亚干旱区干旱指数年际变化值超过 ± 2 倍标准偏差的频率在1950年后明显增多, 特别是极端干旱年份增多。该结果揭示, 东亚内陆干旱区近几十年发生极端干湿事件, 特别是干旱事件的频率有所增加(Zhang等, 2020)。1975年以来, 干旱区降水相较于过去500年出现显著增加趋势(1975~2022年, $p < 0.05$); 特别在2000年之后, 年降水量大于过去500年平均值的2倍标准偏差, 显示了在2000年后5~9月降水总量可能常年处于极端高值水平。上述分析表明, 干旱气候变化不确定性, 直接影响对沙漠变化认识的不确定性以及人类利用沙漠的程度。

降水变化对全球沙漠变化有直接影响。潜在蒸发、温度和湿度变化与沙漠变化呈显著相关(陈瑶等, 2023)(图2)。基于卫星数据估算, 中国新疆地区沙漠面积在过去110年间减小了22.3%, 由裸露沙漠转变为有

植被覆盖的土地类型；增加的冬季降水和升高的春季温度是沙漠转变的原因(Lv等, 2022)。可以推断, 当前我国西北“暖湿化”带来的温度升高和降水增加(丁一汇等, 2023)、极端降水事件频次增多(侯承志等, 2023)以及近地面风速下降(Xu等, 2015), 可能是沙漠植被增多、沙尘暴减少的原因之一。中国北方极端气候事件对沙漠化的影响, 缺乏定量研究。在全球尺度, 沙漠化变率和定量沙漠化研究基本是空白, 并且, 全球干旱气候变化还存在认识上的分歧(Held和Soden, 2006; 陈瑶等, 2023), 缺乏对全球沙漠年代际和年际尺度变化规律的认识。

人类通过制定和实施土地利用管理政策, 对干旱区植被变化产生直接影响。例如, 清代中叶人口向中国西北垦殖迁徙达到高峰, 在此期间, 西北地区大量草原被垦耕为农田, 沙漠化加剧(Lv等, 2022)。20世纪80年代改革开放以来, 通过实施“三北防护林工程”、“天然林保护工程”、“退耕还林还草工程”等, 加快了植被覆盖的增加(傅伯杰等, 2024; Zheng等, 2025), 沙漠化危害程度降低。通过制定有效的土地利用管理政策, 过去20年, 中国用全球6.6%植被覆盖面积贡献了全球25%植被叶面积净增长(卢琦等, 2023; 尉善凯等, 2025)。科学研究和政策管理双管齐下, 是防治沙漠化和实现沙漠区人地高质量持续发展的基础。

4 全球沙漠治理与生态系统临界点

2024年12月, 《联合国防治荒漠化公约》第十六次缔约方大会(COP16)在沙特阿拉伯举行, 主题为“我们的土地, 我们的未来”。这次大会在解决荒漠化(包括沙漠化)、土地退化和干旱等重要问题上取得了进展。大会将土地和干旱议题提升到更广泛层面进行讨论, 并将其确立为全球努力应对气候变化、生物多样性和粮食安全等相互关联挑战的基石。经过40多年不懈努力, 中国成功走出了一条具有特色的防沙治沙道路, 保护生态与改善民生步入良性循环, 成为国际上防沙治沙典范(卢琦等, 2023; Zheng等, 2025; 尉善凯等, 2025)。中国是沙漠大国, 受荒漠化影响严重。在未来治沙防沙工作中, 如何依据科学规律、提高效率、实现科学防治的精确化、高效化和长效化, 实现可持续发展, 有诸多科学问题需要解决(傅伯杰等, 2024)。

最近几十年全球变暖, 干旱气候做出一系列的响

应, 进而影响沙漠变化和沙漠化(Huang等, 2017; Wang等, 2021; Lian等, 2021)。但是, 全球变暖可能不是“干的地区更干、湿的地区更湿”(Held和Soden, 2006)简单模式, 而是表现为区域气候差异变化、大气流场改变、干旱区有效降水不均衡等(图2)。现在, 人们还缺乏对全球沙漠区未来气候变化的准确预测, 对沙漠区气候变化和生物地球循环过程认识严重不足。以前的治沙防沙, 有的是科学规划的成功、有的是基于经验的成功、有的是局地的成功、有的是高投入的成功(近40年, 中国三北防护林建设投入超过10000亿元人民币, 投入劳动力更是不计其数)。现在, 急需提高荒漠化防治中科学和技术支持的力度, 尤其是精确认识气候变化、人类行为、植被生态和沙漠过程的关系, 揭示不同尺度气候变化(包括灾害极端降水和风力事件等)和人类行为对沙漠变化的影响, 制订科学策略防治沙漠化。当今, 地球行星尺度边界的9个要素中, 6个已经超过了临界点(Richardson等, 2023)。全球沙漠生态系统变化是否到达了不可逆转的程度, 或者说, 沙漠化对气候变化和人类活动的响应, 是否已经达到了临界点, 没有明确的答案。加强沙漠科学的基础理论研究, 解决沙漠演变和沙漠化过程的重大基础科学问题, 依然是沙漠科学面临的挑战。

5 小结

在全球变暖背景下, 干旱气候会有一系列的响应, 进而影响沙漠演变和沙漠化过程; 加上人类活动加剧, 沙漠化成为世界性问题, 影响社会经济高质量和可持续发展。如何科学认识长时间尺度和短时间尺度沙漠变化的联系、不同时间和空间尺度沙漠变化的规律和机制是什么、未来干旱气候变化如何影响沙漠、如何实现沙漠地区人地和谐高质量发展, 是沙漠科学和沙漠工程学的新问题。联合攻关解决这些问题, 是人类进军沙漠的基础, 是沙漠科学发展的必由之路。

参考文献

- 陈瑶, 鹿化煜, 吴会娟, 王菁菁, 吕娜娜. 2023. 全球沙漠变化的气候影响. 中国科学: 地球科学, 53: 1057–1066
- 丁一汇, 柳艳菊, 徐影, 吴萍, 薛童, 汪靖, 石英, 张颖娴, 宋亚芳, 王朋岭. 2023. 全球气候变化的区域响应: 中国西北地区气候“暖湿化”趋势, 成因及预估研究进展与展望. 地球科学进展, 38: 551–562
- 傅伯杰, 刘焯序, 王帅, 宋俊峰, 李泽江. 2024. 科学改善荒漠化地区

- 人与自然关系. 中国科学院院刊, 39: 2027–2036
- 侯承志, 黄丹青, 桂东伟, 雷加强, 鹿化煜, 徐志伟. 2023. 中国北方沙漠沙地近60年极端气候变化特征及其影响因素. 地理科学, 43: 1495–1505
- 卢琦, 肖春蕾, 包英爽, 崔梦淳, 曹晓明, 却晓娥, 杨柳, 崔桂鹏. 2023. 打赢“三北”攻坚战, 再造一个“新三北”实现路径与战略规划. 中国科学院院刊, 38: 956–965
- 罗凯, 鹿化煜, 胡镭, 冯晗, 陈周昱. 2025. 北太平洋DSDP433钻孔沉积物粒度和扫描电镜观测揭示的沉积物源. 第四纪研究, 2025, 45: 456–467
- 尉善凯, 李湘怡, 王锴, 汪涛, 朴世龙. 2025. 2001–2023年中国植被持续变绿. 中国科学: 地球科学, 55: 1099–1108
- 吴会娟, 鹿化煜, 王菁菁, 陈瑶, 崔梦淳. 2022. 全球沙漠面积和粉尘排放量的新估算. 科学通报, 67: 860–871
- Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, D'Arrigo R D, Jacoby G C, Wright W E. 2010. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. *Science*, 328: 486–489
- deMenocal P B. 1995. Plio-Pleistocene African climate. *Science*, 270: 53–59
- Dodson J R, Lu H. 2005. Salinity episodes and their reversal in the late Pliocene of south-western Australia. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 228: 296–304
- Eyring V, Bony S, Meehl G A, Senior C A, Stevens B, Stouffer R J, Taylor K E. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev*, 9: 1937–1958
- Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, Wu H B, Qiao Y S, Zhu R X, Peng S Z, Wei J J, Yuan B Y, Liu T S. 2002. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 416: 159–163
- Held I M, Soden B J. 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *J Clim*, 19: 5686–5699
- Huang J, Li Y, Fu C, Chen F, Fu Q, Dai A, Shinoda M, Ma Z, Guo W, Li Z, Zhang L, Liu Y, Yu H, He Y, Xie Y, Guan X, Ji M, Lin L, Wang S, Yan H, Wang G. 2017. Dryland climate change: Recent progress and challenges. *Rev Geophys*, 55: 719–778
- Le Houérou H N. 1996. Climate change, drought and desertification. *J Arid Environ*, 34: 133–185
- Lian X, Piao S, Chen A, Huntingford C, Fu B, Li L Z X, Huang J, Sheffield J, Berg A M, Keenan T F, McVicar T R, Wada Y, Wang X, Wang T, Yang Y, Roderick M L. 2021. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world. *Nat Rev Earth Environ*, 2: 232–250
- Lu H, Wang X, Li L. 2010. Aeolian sediment evidence that global cooling has driven late Cenozoic stepwise aridification in central Asia. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 342: 29–44
- Lu H, Wang X, Wang X, Chang X, Zhang H, Xu Z, Zhang W, Wei H, Zhang X, Yi S, Zhang W, Feng H, Wang Y, Wang Y, Han Z. 2019. Formation and evolution of Gobi Desert in central and eastern Asia. *Earth-Sci Rev*, 194: 251–263
- Lv N, Lu H, Pan W, Meadows M E. 2022. Factors controlling spatio-temporal variations of sandy deserts during the past 110 years in Xinjiang, Northwestern China. *J Arid Environ*, 201: 104749
- Richardson K, Steffen W, Lucht W, Bendtsen J, Cornell S E, Donges J F, Drüke M, Fetzer I, Bala G, von Bloh W, Feulner G, Fiedler S, Gerten D, Gleeson T, Hofmann M, Huiskamp W, Kumm M, Mohan C, Nogués-Bravo D, Petri S, Porkka M, Rahmstorf S, Schaphoff S, Thonicke K, Tobian A, Virkki V, Wang-Erlandsson L, Weber L, Rockström J. 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci Adv*, 9: eadh2458
- Schuster M, Düringer P, Ghienne J F, Vignaud P, Mackaye H T, Likius A, Brunet M. 2006. The age of the Sahara Desert. *Science*, 311: 821
- Shi F, Zhao S, Guo Z, Goosse H, Yin Q. 2017. Multi-proxy reconstructions of May–September precipitation field in China over the past 500 years. *Clim Past*, 13: 1919–1938
- Taylor C M, Belušić D, Guichard F, Parker D J, Vischel T, Bock O, Harris P P, Janicot S, Klein C, Panthou G. 2017. Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature*, 544: 475–478
- Wang X, Geng X, Liu B, Cai D, Li D, Xiao F, Zhu B, Hua T, Lu R, Liu F. 2022. Desert ecosystems in China: Past, present, and future. *Earth-Sci Rev*, 234: 104206
- Wang S, Yu Y, Zhang X X, Lu H, Zhang X Y, Xu Z. 2021. Weakened dust activity over China and Mongolia from 2001 to 2020 associated with climate change and land-use management. *Environ Res Lett*, 16: 124056
- Xu Z, Mason J A, Lu H. 2015. Vegetated dune morphodynamics during recent stabilization of the Mu Us dune field, north-central China. *Geomorphology*, 228: 486–503
- Zhang P, Jeong J H, Yoon J H, Kim H, Wang S Y S, Linderholm H W, Fang K, Wu X, Chen D. 2020. Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point. *Science*, 370: 1095–1099
- Zhang Z, Ramstein G, Schuster M, Li C, Contoux C, Yan Q. 2014. Aridification of the Sahara desert caused by Tethys Sea shrinkage during the Late Miocene. *Nature*, 513: 401–404
- Zheng X, Zhu J, Wang G G, Yan Q, Sun T, Song L, Gao T, Sun Y, Li X, Yang K, Zhang J, Yu L, Qi K, Zhao L, Lu D, Lu Z. 2025. Assessing the ecological effects of the World's Largest Forestry Eco-engineering: Three-North Protective Forest Program within the initially scheduled range from 1978 to 2022. *Sci China Life Sci*, 68: 314–327

(责任编辑: 李小强)