



2000~2023年东亚中部大规模沙尘事件源区贡献率变化研究

邢瑜^{1,2}, 柳本立^{1,3*}, Larry E. WAGNER⁴, 屈建军⁵

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室/敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站, 兰州 730000

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国科学院中蒙俄旱区环境与工程国际研究中心, 兰州 730000

4. USDA-ARS Rangeland Resources and Systems Research Unit, Fort Collins, Colorado 80526, USA

5. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127

* 通讯作者, E-mail: liubenli@lzb.ac.cn

收稿日期: 2024-12-08; 收修改稿日期: 2025-08-22; 接受日期: 2025-09-17; 网络版发表日期: 2025-10-24

水利部科技重大专项项目(SKR-2022053)和中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(Y202085)资助

摘要 东亚中部是全球主要沙尘源区之一, 其沙尘事件对亚太地区气候与生态环境产生显著影响。然而, 针对沙尘事件尺度的起尘量及贡献率定量研究仍相对不足。本研究基于风蚀预测系统(Wind Erosion Prediction System, WEPS)的核心算法, 估算了2000~2023年东亚中部地区136次大规模沙尘事件的逐小时起尘量, 分析了沙尘事件级源区贡献率变化趋势及其驱动因素。结果表明: 自21世纪初以来, 大规模沙尘事件年际频次由每年9次降至每年3次, 起尘量年均减少 $0.173 \times 10^6 \text{t}$, 区域整体沙尘活动减弱。但2020年后起尘量出现回升, 由2020年的 $5.70 \times 10^6 \text{t}$ 增至2023年的 $40.3 \times 10^6 \text{t}$ 。同时, 蒙古国源区起尘量贡献率由43%升至53%, 并在2022年达到62%, 2023年单次大规模沙尘事件中达到64%的峰值。影响起尘量变化的主要因素为地表风速增强、植被覆盖减少与土壤湿度降低, 其相对贡献分别为46%、19%和9%。蒙古国沙尘源区对东亚中部大规模沙尘的相对贡献持续上升, 反映出蒙古国逐渐成为东亚中部主要起尘源区, 亟需深入评估其对区域气候系统与生态稳定性的潜在影响。

关键词 东亚中部, 起尘量, 沙尘源区贡献, 主导因素, WEPS

1 引言

沙尘暴是大量地面细颗粒物, 如粉粒、黏粒与沙粒卷扬进入大气所致的自然灾害事件, 会显著降低能见度并危害人类健康(李亚云等, 2023; Jones, 2023; Chang和Bodnar, 2024)。强沙尘暴具备跨越数千公里的

长距离输送能力, 对区域乃至全球环境与经济产生影响(Qian等, 2004)。东亚中部(CEA)沙尘活动不仅影响蒙古国、中国、朝鲜和日本(Gao等, 2009), 在特殊天气条件下, 沙尘颗粒最远可传播至美国、欧洲、北极乃至赤道地区(Duce等, 1980; Husar等, 2001; Fang等, 2002; Lin等, 2007)。近年来, 针对东亚中部沙尘事件的

中文引用格式: 邢瑜, 柳本立, Wagner L E, 屈建军. 2025. 2000~2023年东亚中部大规模沙尘事件源区贡献率变化研究. 中国科学: 地球科学, 55(11): 3947~3960, doi: 10.1360/N072024-0359

英文引用格式: Xing Y, Liu B, Wagner L E, Qu J. 2025. Source shifting and contributions to Central East Asia dust events during 2000~2023. Science China Earth Sciences, 68(11): 3804~3816, <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1706-5>

成因、过程与影响的研究不断增加(Zhang等, 2018; Chen Y等, 2023; Mu和Fiedler, 2025), 相关因素包括矿产开发、农牧业扩张、生态工程的有效性、气候变化以及蒙古国环境退化等(Shao和Wang, 2003; 宿兴涛等, 2016). 与此同时, 以防风固沙与生态改善为目标的大规模生态建设在近四十年间持续推进(Feng等, 2021; Zhai等, 2023). 其间, 区域性大规模沙尘事件频率一度呈下降趋势(Gui等, 2023). 然而, 自2021年春季以来, 沙尘事件的频率与强度明显上升, 造成了广泛影响(杨晓军等, 2021; Gao等, 2024). 这一剧烈变化引发了公众对大规模沙尘天气的尘源贡献及变化成因的密切关注. 尽管已有研究证明中国北方与蒙古国南部的戈壁沙漠为主要起尘源区(Zong等, 2021; Bao等, 2023; Ma等, 2024), 但针对单次沙尘事件不同沙尘源区贡献率的定量归因仍然有限.

定量分析起尘量对于科学判定主要沙尘源区的贡献率具有重要意义. 部分沙尘排放模型可用于估算起尘量、分析其长期变化趋势及年际波动(Zhang等, 2003; Zakey等, 2006; Kuzu和Yavuz, 2021), 但定量单次沙尘事件中源区贡献率的研究仍相对有限(Ginoux等, 2001; Shao, 2004). 随着卫星观测资料的不断丰富, 利用气溶胶光学厚度反演可有效监测沙尘云的输送过程(Gui等, 2021; Yao等, 2021), 然而, 受低云量区域反演误判的影响, 准确定位并定量地面起尘区域仍存在挑战, 其原因在于沙尘与云层具有相似反照率, 同时在如沙漠等高反照率下垫面上难以进行气溶胶反演. 此外, 现有的沙尘判别指数通常需要针对不同区域调整阈值, 限制了其普适性(Alghamdi等, 2024). 基于地面沉降样品与气象观测数据可提供沙尘暴来源等重要信息(Zhang等, 2022), 但受观测点分布稀疏且与源区距离较远的限制, 结果易出现偏差. 而利用粒子轨迹模型或耦合沙尘过程的数值模式, 通过反向轨迹分析结合气候模式等方法, 可较好追踪沙尘传输路径并识别潜在源区(Stein等, 2015; Zeng等, 2020). 但此类方法主要用于估算源区对大气沙尘浓度的相对贡献, 难以直接量化不同沙尘源区的实际沙尘释放量. 同时, 天气系统与地形的复杂相互作用会造成较大的不确定性, 增加了沙尘传输模拟及历史变化重建的难度(Wang等, 2011; Kok等, 2023; Zhang Y等, 2024). 风蚀模型(Lu和Shao, 2001; Wagner, 2013; Wagner等, 2022)可用于计算不同时段风蚀事件中易侵蚀颗粒物

的物质含量(Buschiazzo和Zobeck, 2008; Song等, 2016; Lyu等, 2021). 然而, 包括基于经验的风蚀方程(Wind Erosion Equation, WEQ)(Woodruff和Siddoway, 1965)及其改进的修正风蚀模型(Revised Wind Erosion Equation, RWEQ)(Hagen, 1991; Fryrear等, 1999)、环境政策综合气候模型(Environmental Policy Integrated Climate, EPIC; 其前身为“侵蚀-生产力影响计算器”, Erosion Productivity Impact Calculator)(Williams等, 1984)和德克萨斯侵蚀分析模型(Texas Erosion Analysis Model, TEAM)(Gregory等, 1999)等, 多用于估算土壤总流失量, 而未区分可进行长距离传输的细颗粒物(Pi和Sharratt, 2017; Yang等, 2022). 同时, 受限于数据可获取性, 这些模型通常提供月或季节尺度的风蚀结果输出, 难以刻画相对短时尺度的单次沙尘事件起尘过程.

本研究基于物理过程驱动的风蚀预测系统(Wind Erosion Prediction System, WEPS)的核心算法(Hagen等, 1995), 结合长序列、高分辨率的气象与地表数据, 估算了东亚中部地区2000~2023年136场大规模沙尘事件中粒径小于 $10\mu\text{m}$ 颗粒物(PM_{10})的逐小时起尘量. 据此计算了21世纪以来蒙古国与中国北方主要沙尘源区的贡献率及其时序变化, 并定量分析了风速、降水、植被覆盖度和土壤湿度等关键环境因子的作用. 研究结果不仅有助于揭示沙尘事件的起源机制, 也为东亚中部沙尘源区的管理及针对性防控措施提供了科学依据.

2 材料与方法

2.1 东亚中部大规模沙尘事件

依据中国气象局(CMA)发布的气象监测资料(<https://www.cma.gov.cn/zfxzgk/gknr/qxbg/>), 2000~2023年东亚中部地区共识别出136次大规模沙尘事件(网络版附表S1)(Li等, 2022; Zhang X T等, 2024). 这些事件涵盖沙尘暴、强沙尘暴和特强沙尘暴三个等级, 其划分标准为: 当水平能见度小于1km时定义为沙尘暴, 小于500m为强沙尘暴, 小于50m为特强沙尘暴.

2.2 数据来源

气象数据包括风速再分析资料, 来源于欧洲中期

天气预报中心(ECMWF)第五代再分析产品ERA5-Land(<https://www.ecmwf.int/en/era5-land>)(Hersbach等, 2020). 土壤数据用于分析土壤理化性质对起尘过程的影响, 来自全球统一土壤数据库(HWSD)(<https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en/>). 鉴于土壤质地与化学属性在短时间内变化较小, 研究中假设其在整个研究时段内保持不变. 植被数据中归一化植被指数与增强型植被指数均来自MOD13C1产品(<https://search.earthdata.nasa.gov/search>). 叶面积指数数据来源于Google Earth Engine平台的MODIS/061/MOD15A2H数据集, 植被冠层高度数据采用Global Canopy Height 2020数据集. 降水数据来源于全球降水气候项目(GPCP). 气温数据来自GLDAS Noah Land Surface Model L4月度数据集, 土壤湿度数据来源于GLDAS Catchment Land Surface Model L4每日数据集, 以上气象与水文数据均可通过<https://search.earthdata.nasa.gov/search>获取.

2.3 风蚀预测系统

WEPS由美国农业部(USDA)自20世纪80年代开始研发与持续更新, 并于2008年正式发布(Hagen, 1991; Wagner和Fox, 2013). 该系统由气象、水文、管理、土壤、作物、分解及侵蚀7个子模型组成, 构成了完整的风蚀过程模拟框架(Wagner, 1996). WEPS以大量实地观测与风洞实验为基础(van Donk和Skidmore, 2003; Hagen, 2004), 能够动态模拟二维地表上的风蚀过程, 是唯一具备估算PM₁₀排放量功能的风蚀模型(Hagen, 2008), 其模拟结果已在多个国家与区域得到验证(Hagen, 2001; Deumlich等, 2006; Riksen和Visser, 2008).

本研究基于地理信息系统(GIS)平台, 利用WEPS模型的核心计算方法, 估算了2000~2023年间东亚中部地区大规模沙尘事件期间的起尘量. 计算过程中引入了气象资料、土壤质地和地表类型等区域参数(附表S2), 时间分辨率为逐小时, 空间分辨率为5km. 模型对各栅格单元的起尘量逐一计算, 并在区域尺度上进行叠加以获得总释放量. 当10m高度风速超过8m s⁻¹时, 模型采用如下质量守恒方程组计算PM₁₀释放量, 该粒径颗粒物指长时间不发生沉降的悬浮颗粒物, 模型假设其在空气中迅速扩散且浓度不受限制:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\overline{CT10HT10})}{\partial t} &= -\frac{\partial(q10)_x}{\partial x} - \frac{\partial(q10)_y}{\partial y} + G10_{en} + G10_{an} + G10_{ss}, \\ G10_{en} &= SF10_{en} SF_{SSen} C_{en} q, \\ G10_{an} &= SF10_{an} SF_{SSan} \sum_{i=1}^m (F_{ani} C_{ani}) q, \\ G10_{ss} &= SF10_{bk} C_{bk} q,\end{aligned}\quad (1)$$

式中, $\overline{CT10}$ 为PM₁₀颗粒物平均浓度(mg m⁻³), $\overline{HT10}$ 为格网内PM₁₀能达到的高度(m). 变量 t 、 x 和 y 分别表示时间(s)和格网的长度和宽度, 即平行于边界垂直方向的水平距离(m). $q10$ 对应于单位时间和宽度内的PM₁₀排放量(kg m⁻¹ s⁻¹). $G10_{en}$ 为松散土壤释放的PM₁₀垂直方向净通量(kg m⁻² s⁻¹), $SF10_{en}$ 为从地表排放的悬移物质中PM₁₀的占比, SF_{SSen} 为可流失松散土壤中悬移颗粒比例, C_{en} 为排放系数(m⁻¹). $G10_{an}$ 为土块和地壳磨损而产生的PM₁₀垂直方向净通量(kg m⁻² s⁻¹), $SF10_{an}$ 和 SF_{SSan} 分别为地表释放的磨损悬移物质中PM₁₀的占比和悬移颗粒磨损土壤比例. 其中, F_{ani} 表示第 i 个产生跃移磨损的土壤占比, C_{ani} 表示第 i 个产生跃移磨损相应系数(m⁻¹). 跃移和蠕移破裂产生的PM₁₀垂直方向净通量用 $G10_{ss}$ (kg m⁻² s⁻¹)表示, 其中 $SF10_{bk}$ 为蠕移和跃移撞击破碎所产生的悬移物质中PM₁₀的占比, C_{bk} 为破坏系数(m⁻¹), 可蚀物质的排放与输运能力(kg m⁻¹ s⁻¹)以动态摩阻风速为基础进行计算:

$$q = 0.4u_*^2(u_* - 0.8u_{*l}), \quad (2)$$

式中, q 为单宽输沙量(kg m⁻¹), u_* 为摩阻风速(m s⁻¹), u_{*l} 为临界摩阻风速(m s⁻¹). 在存在直立植被生物量的情况下, 需考虑植被对摩阻风速的削减作用. 因此, 本研究在计算观测点摩阻风速(u_*)时, 综合了气象站摩阻风速(u_{*f})与有无植被条件下的摩阻风速(u_{*v} , u_{*b})的影响, 具体计算方法见附件文本S1.

2.4 统计分析

本研究采用Theil-Sen趋势分析与Mann-Kendall显著性检验相结合的方法(Burn和Elnur, 2002; Xu等, 2003), 用于分析影响起尘量的气象因子的年际变化趋势(附件文本S2). 该方法能够有效减弱测量误差与数据波动对趋势分析的干扰, 因而在地理与环境相关研究中得到广泛应用(de Beurs和Henebry, 2005; Gocic和Trajkovic, 2013). 为识别影响起尘量变化的主要驱动因素, 本研究在5km×5km分辨率下, 以每个栅格为计

算单元构建多元线性回归模型(MLR)(Yao等, 2021). 通过比较各因子的标准化回归系数, 选取绝对值最大的因子作为该栅格的主控因子(附件文本S3).

3 结果

3.1 大规模沙尘事件起尘量

本研究估算得到2000~2023年东亚中部地区大规模沙尘事件的逐小时起尘量(附表S1). 图1a展示了136次大规模沙尘事件在24年间的变化趋势, 图1b与1c分别显示了中国北方(CN)和蒙古国(MN)在大规模沙尘事件中的起尘量及其贡献率. 结果显示, 2001年为沙尘事件最为频发的年份, 共发生16次事件, 起尘量达 $91.9 \times 10^6 \text{ t}$, 占总起尘量的12%. 2002年、2006/2007年及2010年同样出现大规模沙尘事件频率和起尘量的显著峰值, 起尘量平均超过 $45 \times 10^6 \text{ t}$, 年均发生频率超过9次. 在随后的十年中, 未再出现超过上述峰值的大规模沙尘事件. 总体而言, 研究期内大规模沙尘事件年起尘量呈下降趋势, 起尘量减少约 $0.173 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$, 年均发生频率降至约3次, 表明东亚中部沙尘活动整体趋缓.

然而, 这一下降趋势在近年出现逆转. 2020年大规模沙尘事件频率与起尘量均降至最低值后, 两者逐渐呈回升态势. 具体表现为, 2020~2021年, 大规模沙尘事件发生频率由3次增至5次, 起尘量由 $5.70 \times 10^6 \text{ t}$ 增至 $27.2 \times 10^6 \text{ t}$, 增长了约3.77倍. 2022年单次大规模沙尘事件起尘量达 $4.59 \times 10^6 \text{ t}$. 2023年共发生5次大规模沙尘事件, 总起尘量为 $40.3 \times 10^6 \text{ t}$, 是2020年的7.07倍, 对应年均增幅约 $11.5 \times 10^6 \text{ t}$. 值得注意的是, 2020年后起尘量的增加主要源于事件数量与强度的同步提升, 并非高估. 与此前的下降趋势相比, 近年来大规模沙尘事件频率与起尘量的持续上升, 对中国北方数百万人口的生产生活造成了广泛影响, 凸显了加强沙尘事件监测与防控的紧迫性.

近年来大规模沙尘事件起尘量呈上升趋势的另一显著特征是蒙古国源区贡献率的持续提高. 总体来看, 蒙古国对大规模沙尘事件的年均贡献率由21世纪初的43%提升至近年的53%, 呈现出约每十年增加5%的趋势. 高强度沙尘事件往往伴随更高的蒙古国贡献率, 2021~2023年, 东亚中部区域共发生11次大规模沙尘事件, 其中7次蒙古国贡献率占主导地位, 单次事件贡献率均超过52%. 尤其在2023-04-09的大规模沙尘事件

中, 总起尘量达 $4.85 \times 10^6 \text{ t}$, 其中蒙古国贡献率高达64%(图1c). 这些结果进一步表明, 蒙古国在东亚中部沙尘事件中的相对贡献持续增强.

3.2 大规模沙尘事件主要沙尘源区起尘量的时空分布

图2展示了2000~2023年间共136次大规模沙尘事件起尘量空间分布特征. 主要沙尘源区集中于蒙古国南部戈壁沙漠, 中国北方的浑善达克沙地、中西部的阿拉善盟中蒙边境地区(包括巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠)、河西走廊以及塔克拉玛干沙漠和古尔班通古特沙漠. 结合主要沙尘源地分布与沙尘事件发生范围, 本研究将东亚中部划分为三个核心起尘区域, 西部区域(WCEA, $38^\circ \sim 45^\circ \text{N}$, $85^\circ \sim 93^\circ \text{E}$)、中部区域(CCEA, $39^\circ \sim 47^\circ \text{N}$, $93^\circ \sim 111^\circ \text{E}$)和东部区域(ECEA, $41^\circ \sim 46^\circ \text{N}$, $111^\circ \sim 120^\circ \text{E}$).

在136次大规模沙尘事件中, WCEA、CCEA和ECEA的平均沙尘排放贡献率分别为13%(204.27 t km^{-2})、66%(441.86 t km^{-2})和7%(159.81 t km^{-2}). 在CCEA内部, 蒙古国南部戈壁沙漠(CCEA-MN)贡献率为55%(438.55 t km^{-2}), 中国北方(CCEA-CN)为45%(407.53 t km^{-2})(图2a).

自2020年以来, 随着大规模沙尘事件频率的上升, 核心起尘区域的沙尘排放格局发生相应变化. 2000~2020年间共发生125次大规模沙尘事件, 期间WCEA、CCEA和ECEA区域的起尘贡献率分别为13%(188.44 t km^{-2})、67%(401.03 t km^{-2})和6%(135.46 t km^{-2}). 其中CCEA-MN贡献率为54%(391.80 t km^{-2}), CCEA-CN区域贡献率为46%(376.92 t km^{-2})(图2b). 2021~2023年间共发生11次大规模沙尘事件, 上述源区起尘贡献率分别为11%(WCEA, 15.78 t km^{-2})、62%(CCEA, 37.07 t km^{-2})、9%(ECEA, 20.02 t km^{-2}). 其中CCEA-MN的贡献率升至62%(41.75 t km^{-2}), 而CCEA-CN降至38%(28.54 t km^{-2})(图2c), 在所有时间段内CCEA-MN均表现出较高的单位面积沙尘释放量和起尘贡献率.

3.3 大规模沙尘事件影响因素变化分析

已有研究表明, 植被覆盖度、土壤湿度、降水量和风速是影响大规模沙尘事件的关键因素(Prospero等, 1987; Cowie等, 2013; Lee等, 2019; 徐冉等, 2023). 本研究采用Theil-Sen估计量与Mann-Kendall趋势检验

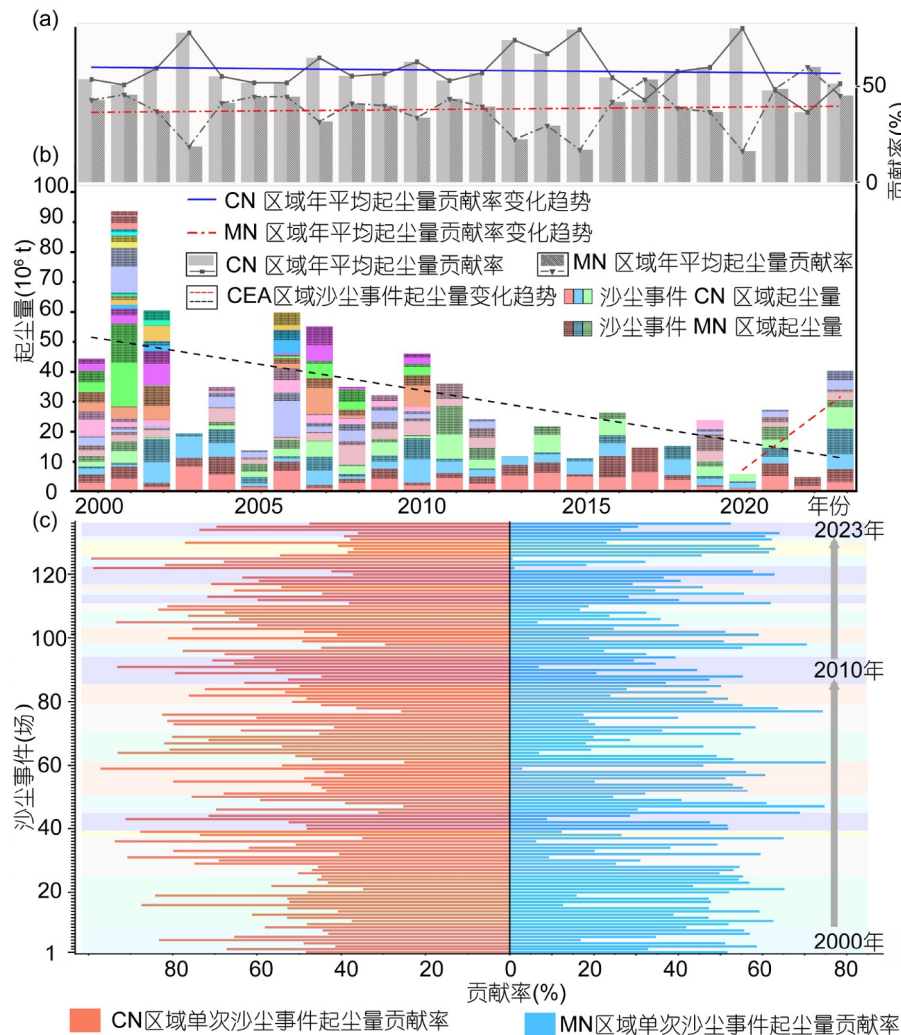


图1 2000~2023年东亚中部地区中国北方与蒙古国大规模沙尘事件起尘量及贡献率变化

(a) 2000~2023年中国北方(灰色柱状)和蒙古国(条纹柱状)的年均贡献率变化, 中国北方贡献率呈下降趋势($R^2=0.11$), 蒙古国贡献率呈上升趋势($R^2=0.11$); (b) 2000~2023年136次大规模沙尘事件起尘量(彩色柱状), 其整体呈下降趋势($R^2=0.33$), 但2020~2023年间起尘量转为上升趋势($R^2=0.36$). 纯色与条纹柱状分别表示中国北方与蒙古国在对应大规模沙尘事件中的起尘量, 同一事件采用相同背景色标识; (c) 单次大规模沙尘事件贡献率变化图, 中国北方为红色柱状, 蒙古国为蓝色柱状. 年份按右侧箭头顺序排列, 同一年内事件以相同背景色区分

方法, 对各关键因子的年际变化趋势进行分析, 并将研究时段划分为2000~2020年与2020~2023年, 以对应大规模沙尘事件的阶段性变化特征. 此外, 为定量评估风速(WS)、植被(NDVI)与土壤湿度(SM)三类关键参数对WEPS模型估算结果的影响, 本研究进一步开展了多元线性回归(MLR)分析.

图3a展示了三个主要沙尘源区的风速变化趋势. 2000~2020年期间, WCEA区域80%的面积呈下降趋势($Trend_{00\sim20}$, -80%), 而2020~2023年则有71%的面积转为上升趋势($Trend_{20\sim23}$, 71%). ECEA区域的风速变化

表现为先上升后下降($Trend_{00\sim20}$, 96% ; $Trend_{20\sim23}$, -59%). CCEA-CN区域则由下降($Trend_{00\sim20}$, -86%)转为上升趋势($Trend_{20\sim23}$, 71%). 值得关注的是, CCEA-MN区域风速在两个阶段均保持上升趋势($Trend_{00\sim20}$, 58% ; $Trend_{20\sim23}$, 68%), 表明其可能是近期沙尘事件增加的关键驱动因素. 标准化回归系数结果(附表S5)进一步确认, 风速是起尘量变化的主导因子, 平均贡献率为46%, 且在2020~2023年CCEA-MN区域风速贡献率高达70%, 凸显蒙古国强风对起尘量增加的主导作用.

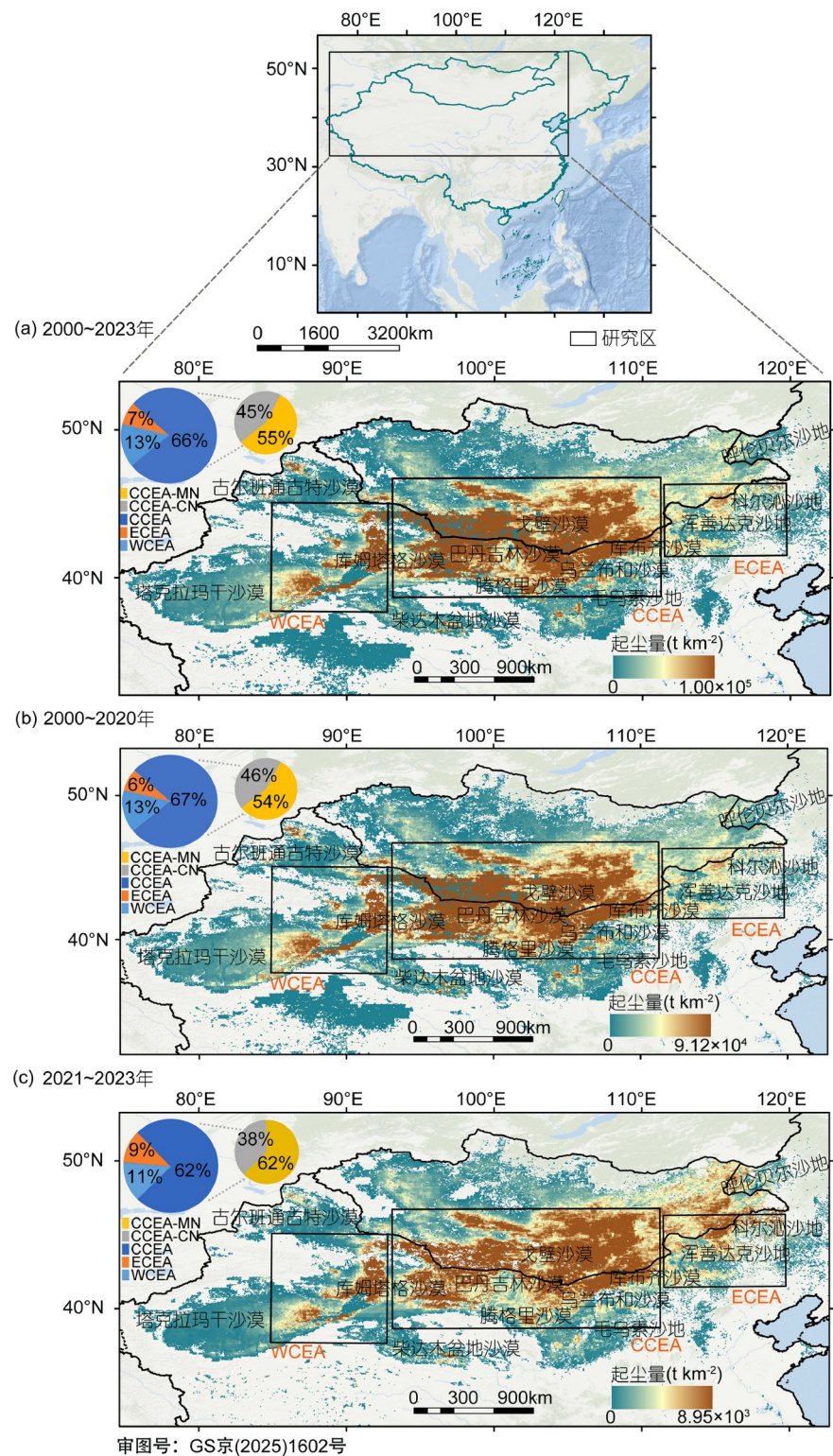
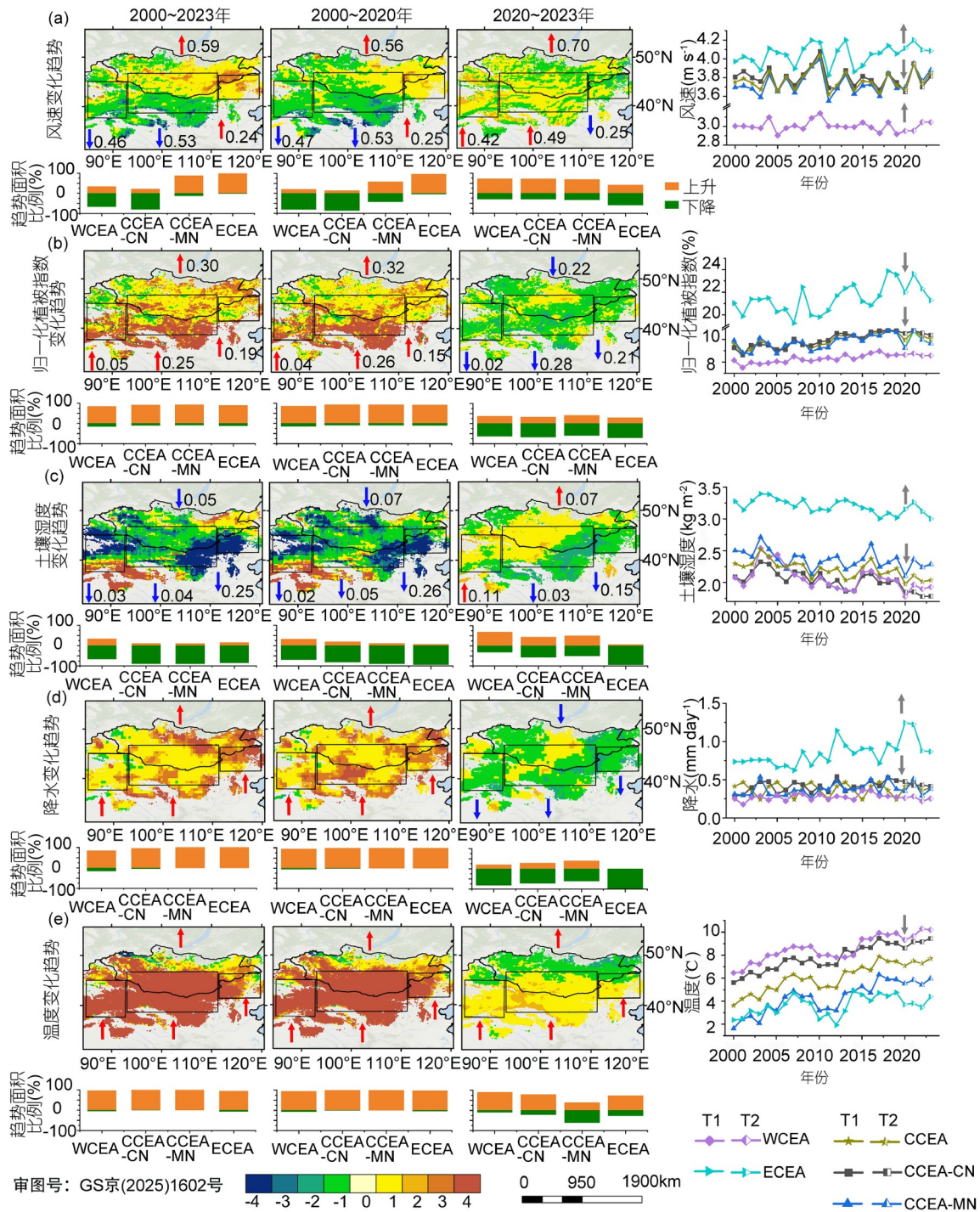


图 2 不同时间段三个核心起尘源区在大规模沙尘事件内起尘贡献率分布图

(a) 2000~2023年; (b) 2000~2020年; (c) 2021~2023年. 三个主要起尘源区以黑框标示, 分别为西部区域(WCEA)、中部区域(CCEA, 包括中国北方CCEA-CN和蒙古国南部CCEA-MN)以及东部区域(ECEA). 饼图数字表示各区域在相应时段内的大规模沙尘事件起尘贡献率



(a) 风速; (b) 归一化植被指数; (c) 土壤湿度; (d) 降水; (e) 温度。正负值分别表示上升和下降趋势, 其绝对值大小反映变化幅度, 分为极显著 (± 4)、显著 (± 3)、轻微 (± 2) 和不显著 (± 1)。数字为各时间段多元线性回归的标准化系数, 表示各因子对沙尘事件的影响程度 (0~1)。箭头表示该地区的主导趋势, 红色表示上升, 蓝色表示下降。每张地图下方的柱状图显示不同子区域内上升 (橙色) 与下降 (绿色) 面积比例 (%), 右侧折线图 为各因子的多年平均值变化趋势 (T1: 2000~2019 年; T2: 2020~2023 年), 灰色箭头显示了各因子相对于 2020 年的显著变化趋势, 对应于大规模 沙尘事件变化节点

干旱气候、地表疏松及植被减少均会增强起尘过程。以归一化植被指数(NDVI)表征的植被因素,是仅次于风速的重要驱动因子,各时段平均贡献率为19%。在CCEA与ECEA沙尘源区,植被的影响占比常超过25%,而在WCEA区域则约为5%。图3b展示了2000~2023年间主要沙尘源区NDVI整体呈上升趋势(WCEA, $Trend_{00-23}$, 85%; CCEA-CN, $Trend_{00-23}$, 91%; CCEA-MN, $Trend_{00-23}$, 92%; ECEA, $Trend_{00-23}$, 89%),该上升趋势判断与已有研究结果一致(An等, 2018; Guo等, 2022; 尉善凯等, 2025)。然而,2020~2023年期间,主要沙尘源区NDVI出现不同程度的下降趋势,其中CCEA-CN下降面积占比67%,CCEA-MN占比59%。需要指出的是,该下降趋势是发生在NDVI整体上升背景下的局部退化现象。年际变化显示,2020~2023年CCEA-CN地区年均NDVI较2000~2019年提高7%,但2020年相较2019年下降2%。同期CCEA-MN年均NDVI下降2%,而2020年较2019年降幅达14%,这表明蒙古国地区植被减少在一定程度上促进了近期大规模沙尘事件的起尘量增加。

在WEPS模型中,降水(PPT)主要通过改变SM间接影响风蚀,其作用程度低于风速和植被。SM在各时段平均贡献率为9%,其中在ECEA区域贡献率接近20%,而在CCEA与WCEA区域均低于10%。图3c显示了2000~2020年期间,CEA主要沙尘源区的SM呈一致性下降趋势(WCEA, -69%; CCEA-CN, -81%; CCEA-MN, -89%; ECEA, -93%)。尽管2020~2023年WCEA与CCEA-MN区域出现了土壤湿度回升(WCEA, $Trend_{20-23}$, 69%; CCEA-MN, $Trend_{20-23}$, 50%),但2019~2020年的降幅最为显著(-12%),下降的土壤湿度导致地表裸露且疏松(Guan等, 2017; Liang L等, 2022),在2020年后加剧了起尘风险。

PPT趋势进一步验证了水分条件的变化特征。图3d显示,2000~2020年间PPT呈上升趋势(WCEA, 95%; CCEA-CN, 99%; CCEA-MN, 100%; ECEA, 100%)。而在2020~2023年期间,则转为下降趋势(WCEA, -81%; CCEA-CN, -72%; CCEA-MN, -61%; ECEA, -100%)。降水减少与土壤干燥为沙尘事件频发创造了条件,这也部分解释了植被下降的原因。此外,温度升高亦加剧了表面蒸发与干燥(Qian等, 2002; Fan和Wang, 2004; 张强等, 2020)。图3e显示,2020年以来CEA地区地表温度(TEM)快速升高,为沙

尘事件频发提供了干热气候背景(Zhang等, 2020; 李亚云等, 2023; 赵宗慈等, 2023; Cai等, 2024)。综上,2020年以来蒙古气旋的持续增强导致风速显著升高,同时植被覆盖下降与干旱土壤条件持续存在,共同驱动了蒙古国南部沙尘释放量的显著增加,使得蒙古国面临更为严峻的沙尘天气挑战,并对整个东亚中部生态环境产生深远影响。

4 讨论

4.1 模型估算验证

本研究基于WEPS模型估算了21世纪以来东亚中部地区136次大规模沙尘事件逐小时起尘量。鉴于针对沙尘事件尺度的时间序列定量研究仍相对有限,且既有研究多集中于特定沙尘事件或长期观测,为验证结果的可靠性,本研究从年际、季节及事件三个尺度,与不同模型和观测方法的既有成果进行了对比分析。

结果表明,本研究的模拟结果在多时空尺度上均与已有研究保持良好一致性。在年际尺度,东亚中部地区粒径小于 $20\mu\text{m}$ 的年均起尘量估算为 $2.02\times 10^8\text{t}$ (2010~2017, DuEM v1模型)至 $1.67\times 10^8\sim 2.94\times 10^8\text{t}$ (1998~2010年,基于Shao04方案并耦合全球模式),研究对象为能见度小于1km的沙尘暴事件(Wu等, 2021, 2022)。2010~2017年内,本研究分析大规模沙尘事件(约75天、29次事件)内总起尘量达 $1.92\times 10^8\text{t}$,差异主要源于粒径范围与沙尘事件的定义不同,但总体结果的一致性支持了本研究估算结果的可靠性。在季节尺度上,Zhang等(2003)利用北方气溶胶区域气候模型(NARCM)模拟了1960~2002年春季(3~5月)亚洲区域粒径小于 $40\mu\text{m}$ 的起尘量,结果显示蒙古国贡献率约为41%。近期基于2023年3~4月10次沙尘事件的WRF-Chem模拟结果表明,蒙古国对中国北方沙尘事件的贡献率约为42%(Chen S Y等, 2023)。在相同时间段,本研究估算蒙古国贡献率约为45%,上述近似结果凸显了蒙古国在东亚沙尘释放中的持续重要作用。在事件尺度上,以2021年典型大规模沙尘事件为例,本研究估算出2021-03-14沙尘事件中,约70%的起尘量源于蒙古国,而2021-03-16之后,中国北方贡献率升至81%。这一结果与遥感及地球化学分析的结论一致,即上述同一场沙尘暴事件内,细颗粒物中超过70%源于蒙古国沙尘源区(Liang P等, 2022)。

综上,多尺度、多方法的对比验证表明,WEPS模型在起尘量估算中具有较高精度.这主要得益于其对高时间分辨率风速数据的敏感性,相较于依赖较保守风速估算的模型,能够提供更精细的模拟结果(Wu等, 2021).同时,土壤湿度、叶面积指数和茎面积指数等参数的日尺度至小时尺度动态更新,也进一步提升了模拟精度.未来仍需结合更多观测与模拟手段进行交叉验证,以进一步巩固结论并持续优化起尘过程模拟的可靠性.

4.2 蒙古国对大规模沙尘事件贡献率上升的驱动因素

研究结果表明,与21世纪初相比,东亚中部近年来大规模沙尘事件的总体起尘量下降了63%,其中中国北方下降67%,蒙古国南部下降59%.然而,自2020年后,大规模沙尘事件的发生频率和起尘量均出现逆转性上升,蒙古国南部戈壁沙漠逐渐成为主要起尘源区.尽管趋势拟合的稳定性受限于时间序列较短,但这一正在显现的上升趋势不容忽视.蒙古国在大规模沙尘事件中的贡献率已由2000~2002年的43%提升至2021~2023年的53%,其中2022年达到年际峰值62%,2023年单次事件中则高达64%.基于气象模式模拟的结果亦显示,蒙古国对沙尘排放的贡献约为51%(Bao等, 2021; Chen S Y等, 2023).近年来的大规模沙尘事件往往伴随蒙古国更高的贡献率,这加剧了沙尘向中国北方的跨境输送风险,导致在更大区域范围内产生不利影响.

进一步分析表明,2020年后东亚中部大规模沙尘事件的频率与沙尘排放量增加,主要受到地表风速增强(图3a)、植被覆盖度下降(图3b)以及土壤湿度降低(图3c)多种因素的共同驱动,且这些变化在蒙古国南部尤为突出.其中,风速增强受气候年际变化与全球气候变暖的双重影响.近期区域性风速升高与2000年拉尼娜年的增强背景相似(Ye等, 2000).在全球变暖背景下,沙漠地区温度梯度加剧,促使冷锋活动频率上升、阵风强度增强、蒙古气旋活跃度增加,以及大气热力不稳定性上升(Roe, 2009; Fan等, 2018).基于2001~2022年的多源再分析与观测资料的定量分析表明,蒙古气旋可贡献戈壁沙漠地区34%~47%的沙尘排放,是引发强沙尘暴的重要气象动力过程(Mu和Fiedler, 2025).此外,降水减少(图3d)与地表气温升高(图

3e)加速了植被退化,扩大了裸露地表与潜在沙源面积.除自然因素外,人类活动同样是关键驱动因素,尤其是蒙古国牲畜数量的快速增长在过去二十年间显著加剧了土地退化.数据显示,2001~2020年间,蒙古国牲畜总量年均增加约240万头(Guo等, 2022; Xu等, 2024).随着牲畜数量持续增长,荒漠地区放牧压力显著加大,导致植被覆盖不断下降,地表逐渐呈现干燥、疏松的特征,从而促进了大量沙尘的释放.综上,气候变化与人类活动的交互作用显著增强了大规模沙尘事件的频率与强度,而蒙古国南部已成为这一变化趋势最为集中的区域.

4.3 生态工程建设的影响

当前的防风固沙措施仍以人工植被恢复为主,近年来中国北方沙尘排放量明显下降,表明生态工程有效提升了区域植被覆盖度(图3b).基于RWEQ模型对中国北方植被防风固沙效益的评估结果显示,2020年中国北方荒漠地区减少了约 8.98×10^9 t的地表风蚀量,若无任何植被覆盖,当年起尘量会达到现有水平的10倍以上(柳本立等, 2022).这一成效得益于一系列重大生态工程的持续实施,包括“三北防护林体系工程”、“退耕还林工程”、“京津风沙源治理工程”和“退耕还林还草工程”等(Chen等, 2019; Du等, 2022).

然而,植被恢复(如人工造林)的有效实施依赖于充足的水分供给.在冬末和早春等干旱季节,植被可能加剧土壤水分消耗,从而加重地表干旱状况.多项研究表明,在干旱区实施的大规模生态修复工程叠加气候变化影响,可能导致区域土壤湿度下降(邵全琴等, 2022; Higgins等, 2023; Chen等, 2024; Wang Q M等, 2024).例如,黄土高原的人工造林区土壤水分贮量下降超过108%(Wang Y Q等, 2024).本研究亦发现,2000~2023年期间,土壤湿度与归一化植被指数之间存在显著负相关(-28%),其中82%的负相关区域集中在黄土高原和毛乌素沙地,这些区域正是中国北方大规模生态修复工程的重点实施区(图4).这种相关性提示,由于土壤水分减少,生态恢复项目在防治风沙危害方面可能存在一定局限性.然而,其形成机制较为复杂,可能同时受到气候变率、人为地下水开采等多重因素的影响(Eamus等, 2015; Rohde等, 2024).总体而言,近年来大规模沙尘事件起尘量的增加与风速升高(图3a)、植被下降(图3b)和土壤湿度降低(图3c)关系更为

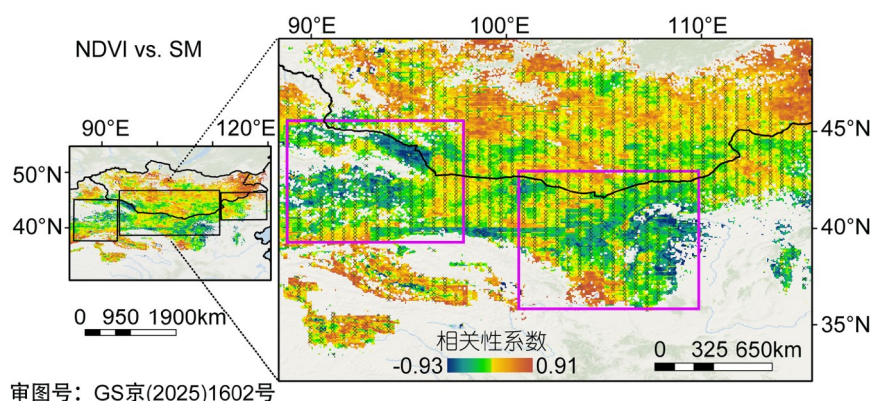


图 4 2000~2023年土壤湿度与归一化植被指数相关性空间分布

紫色方框表示植被恢复趋势显著且与土壤湿度呈负相关的区域, 黑色×表示通过Pearson相关显著性检验($p < 0.05$)

直接. 相比之下, 长期植被建设引发的土壤干燥对沙尘释放的作用较为缓慢且间接.

4.4 局限性与未来展望

本研究构建的MLR模型中, 气候因子可解释大规模沙尘事件影响因素贡献度的70%以上, 表明该模型在分析起尘量变化方面具有较好适用性. 然而, 该模型难以全面反映环境因子之间的复杂相互作用, 例如地形起伏与土壤质地等因素同样对起尘过程具有影响 (Engelstaedter等, 2003; Huo等, 2022; Wang和Zhang, 2024), 但尚未纳入本研究的分析框架. 未来需针对这些关键因子开展深入探讨. 此外, 蒙古国已逐渐成为影响下游区域的重要沙尘源区. 尽管本研究识别了大规模沙尘事件内的主要起尘源区及其贡献率, 但尚未系统分析沙尘的启动机制及其远距离输送过程, 限制了对沙尘暴演化及其对下风向地区影响机制的理解. 未来研究将引入高分辨率数值模拟与大气输送模式, 结合观测与再分析资料, 深入解析沙尘的输运路径与跨区域扩散特征, 以提升对全球沙尘过程的认识, 并增强对未来沙尘事件的预测能力.

5 结论

本研究定量分析了2000~2023年东亚中部地区共136次大规模沙尘事件的时空变化特征, 揭示了其发生频率、起尘量及源区贡献率的变化规律. 近20年来, 大规模沙尘事件发生频次与总起尘量均呈下降趋势, 事件次数由每年9次降至每年3次, 年均起尘量减少

0.173×10^6 t. 然而, 2020年之后起尘量出现回升趋势, 至2023年起尘量增至 40.3×10^6 t, 较2020年增幅超过7倍. 大规模沙尘事件内起尘量的回升与蒙古国贡献率的增加趋势一致, 蒙古国贡献率由21世纪初的43%提升至近年来的53%以上, 2022年达到年际峰值62%, 在2023年4月的单次事件中更达到64%, 凸显蒙古国沙尘源区在东亚中部大规模沙尘事件中日益增强的主导地位. 分析表明, 起尘量变化的主要驱动因素为地表风速增加、植被覆盖减少和土壤湿度下降, 其相对贡献率分别为46%、19%和9%. 其中, 风速为主导因子, 尤其是在蒙古国南部, 其贡献率接近70%. 虽然植被与土壤湿度对总体沙尘释放的贡献相对较小, 但在特定子区域中仍发挥显著作用, 反映了多种环境因子之间复杂的交互机制.

补充材料 本文的补充材料见网络版(<http://earthcn.sci-china.com>). 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

参考文献

- 李亚云, 成巍, 王宁, 李欣, 高睿. 2023. 塔克拉玛干沙漠和戈壁沙漠春季沙尘暴特征及其气象影响因素对比. 中国沙漠, 43: 1-9
- 柳本立, 彭婉月, 刘树林, 杨婷. 2022. 2021年3月中旬东亚中部沙尘天气地面起尘量及源区贡献率估算. 中国沙漠, 42: 79-86
- 邵全琴, 刘树超, 宁佳, 刘国波, 杨帆, 张雄一, 牛丽楠, 黄海波, 樊江文, 刘纪远. 2022. 2000~2019年中国重大生态工程生态效益遥感评估. 地理学报, 77: 2133-2153
- 宿兴涛, 许丽人, 魏强, 张志标, 王胜国, 吴洪星. 2016. 东亚地区沙尘气溶胶对降水的影响研究. 高原气象, 35: 211-219

- 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
- 徐冉, 张碧辉, 安林昌, 李雷, 迟茜元, 江琪. 2023. 2000~2021年中国沙尘传输路径特征及气象成因分析. *中国环境科学*, 43: 4450–4458
- 杨晓军, 张强, 叶培龙, 秦豪君, 徐丽丽, 马莉, 巩崇水. 2021. 中国北方2021年3月中旬持续性沙尘天气的特征及其成因. *中国沙漠*, 41: 245–255
- 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 黄建平, 马柱国, 王芝兰, 王素萍, 王莺, 张宇. 2020. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望. *气象学报*, 78: 500–521
- 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 2023. 全球变暖与沙尘暴. *气候变化研究进展*, 19: 667–671
- Alghamdi E M, Assiri M E, Butt M J. 2024. Application of global dust detection index (GDDI) for sand and dust storm monitoring over Kingdom of Saudi Arabia. *Nat Hazards*, 120: 13385–13405
- An L, Che H, Xue M, Zhang T, Wang H, Wang Y, Zhou C, Zhao H, Gui K, Zheng Y, Sun T, Liang Y, Sun E, Zhang H, Zhang X. 2018. Temporal and spatial variations in sand and dust storm events in East Asia from 2007 to 2016: Relationships with surface conditions and climate change. *Sci Total Environ*, 633: 452–462
- Bao T, Gao T, Nandintsetseg B, Yong M, Jin E. 2021. Variations in frequency and intensity of dust events crossing the Mongolia-China border. *SOLA*, 17: 145–150
- Bao T, Xi G L, Deng B L, Chang I S, Wu J, Jin E. 2023. Long-term variations in spatiotemporal clustering characteristics of dust events in potential dust sources in East Asia. *Catena*, 232: 107397
- Burn D H, Elnur M A H. 2002. Detection of hydrologic trends and variability. *J Hydrol*, 255: 107–122
- Buschiazzo D E, Zobeck T M. 2008. Validation of WEQ, RWEQ and WEPS wind erosion for different arable land management systems in the Argentinean Pampas. *Earth Surf Process Landf*, 33: 1839–1850
- Cai Q Y, Chen W, Chen S F, Xie S P, Piao J L, Ma T J, Lan X Q. 2024. Recent pronounced warming on the Mongolian Plateau boosted by internal climate variability. *Nat Geosci*, 17: 181–188
- Chang Z H, Bodnar S. 2024. The effects of dust storms on people living in Beijing: A qualitative study. *Int J Environ Res Public Health*, 21: 835–848
- Chen A J, Xiong J H, Wu S X, Yang Y T. 2024. Changes in terrestrial water storage in the Three-North region of China over 2003–2021: Assessing the roles of climate and vegetation restoration. *J Hydrol*, 637: 131303
- Chen C, Park T, Wang X, Piao S, Xu B, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z, Nemani R R, Myneni R B. 2019. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nat Sustain*, 2: 122–129
- Chen S Y, Zhao D, Huang J P, He J Q, Chen Y, Chen J Y, Bi H R, Lou G T, Du S K, Zhang Y, Yang F. 2023. Mongolia contributed more than 42% of the dust concentrations in Northern China in March and April 2023. *Adv Atmos Sci*, 40: 1549–1557
- Chen Y, Chen S Y, Zhou J, Zhao D, Bi H R, Zhang Y, Alam K, Yu H P, Yang Y X, Chen J Y. 2023. A super dust storm enhanced by radiative feedback. *npj Clim Atmos Sci*, 6: 90
- Cowie S M, Knippertz P, Marsham J H. 2013. Are vegetation-related roughness changes the cause of the recent decrease in dust emission from the Sahel? *Geophys Res Lett*, 40: 1868–1872
- de Beurs K M, Henebry G M. 2005. A statistical framework for the analysis of long image time series. *Int J Remote Sens*, 26: 1551–1573
- Deumlich D, Funk R, Frielinghaus M, Schmidt W, Nitzsche O. 2006. Basics of effective erosion control in German agriculture. *Z Pflanzenernähr Boden*, 169: 370–381
- Du H Q, Liu X F, Jia X P, Li S, Fan Y W. 2022. Assessment of the effects of ecological restoration projects on soil wind erosion in northern China in the past two decades. *Catena*, 215: 106360
- Duce R A, Unni C K, Ray B J, Prospero J M, Merrill J T. 1980. Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: Temporal variability. *Science*, 209: 1522–1524
- Eamus D, Zolfaghar S, Villalobos-Vega R, Cleverly J, Huete A. 2015. Groundwater-dependent ecosystems: Recent insights from satellite and field-based studies. *Hydrol Earth Syst Sci*, 19: 4229–4256
- Engelstaedter S, Kohfeld K E, Tegen I, Harrison S P. 2003. Controls of dust emissions by vegetation and topographic depressions: An evaluation using dust storm frequency data. *Geophys Res Lett*, 30: 1294
- Fan K, Wang H J. 2004. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China. *Geophys Res Lett*, 31: L10201
- Fan K, Xie Z M, Wang H J, Xu Z Q, Liu J P. 2018. Frequency of spring dust weather in North China linked to sea ice variability in the Barents Sea. *Clim Dyn*, 51: 4439–4450
- Fang G C, Chang C N, Wu Y S, Lu S C, Fu P P C, Chang S C, Cheng C D, Yuen W H. 2002. Concentration of atmospheric particulates during a dust storm period in central Taiwan, Taichung. *Sci Total Environ*, 287: 141–145
- Feng K, Wang T, Liu S L, Yan C Z, Kang W P, Chen X, Guo Z C. 2021. Path analysis model to identify and analyse the causes of aeolian desertification in Mu Us Sandy Land, China. *Ecol Indic*, 124: 107386
- Fryrear D W, Sutherland P L, Davis G, Hardee G, Dollar M. 1999. Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ. In: Stott D E, Mohtar R H, Steinhardt G C, eds. *Sustaining the Global Farm*.

- Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. 760–765
- Gao H W, Qi J H, Shi J H, Shi G Y, Feng S Z. 2009. Lang-range transport of Asian dust and its effects on ocean ecosystem. *Adv Earth Sci*, 24: 1–10
- Gao J, Ding T, Gao H. 2024. Dominant circulation pattern and moving path of the Mongolian Cyclone for the severe sand and dust storm in China. *Atmos Res*, 301: 107272
- Ginoux P, Chin M, Tegen I, Prospero J M, Holben B, Dubovik O, Lin S. 2001. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *J Geophys Res*, 106: 20255–20273
- Gocic M, Trajkovic S. 2013. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Glob Planet Change*, 100: 172–182
- Gregory J M, Vining R, Peck L, Wofford K. 1999. TEAM: The Texas tech wind erosion analysis model. In: Stott D E, Mohtar R H, Steinhardt G C, eds. *Sustaining the Global Farm*. Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. 24–29
- Guan Q Y, Sun X Z, Yang J, Pan B T, Zhao S, Wang L. 2017. Dust storms in Northern China: Long-term spatiotemporal characteristics and climate controls. *J Clim*, 30: 6683–6700
- Gui K, Che H Z, Zheng Y, Zhao H J, Yao W R, Li L, Zhang L, Wang H, Wang Y Q, Zhang X Y. 2021. Three-dimensional climatology, trends, and meteorological drivers of global and regional tropospheric type-dependent aerosols: Insights from 13 years (2007–2019) of CALIOP observations. *Atmos Chem Phys*, 21: 15309–15336
- Gui K, Che H Z, Yao W R, Zheng Y, Li L, An L C, Wang H, Wang Y Q, Wang Z L, Ren H L, Sun J Y, Li J, Zhang X Y. 2023. Quantifying the contribution of local drivers to observed weakening of spring dust storm frequency over northern China (1982–2017). *Sci Total Environ*, 894: 164923
- Guo Y, Lei J Q, Fan J L, Wang H F, Lyu Z T. 2022. Soil wind erosion characteristics and main influencing factors in Mongolia in recent 20 years. *Arid Zone Res*, 39: 1200–1211
- Hagen L J. 1991. A wind erosion prediction system to meet user needs. *J Soil Water Conservat*, 46: 106–111
- Hagen L J. 2001. Validation of the Wind Erosion Prediction System (WEPS) erosion submodel on small cropland fields. In: Ascough II J C, Flanagan D C, eds. *Soil Erosion Research for the 21st Century*. Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers. 479–482
- Hagen L J. 2004. Evaluation of the Wind Erosion Prediction System (WEPS) erosion submodel on cropland fields. *Environ Model Software*, 19: 171–176
- Hagen L J. 2008. Updating soil surface conditions during wind erosion events using the wind erosion prediction system (WEPS). *Trans ASABE*, 51: 129–137
- Hagen L J, Wagner L E, Tatarko J, Skidmore E L, Durar A A, Steiner J L, Schomberg H H, Retta A, Armbrust D V, Zobeck T M, Unger P W, Ding D, Elminyaw I. 1995. *Wind Erosion Prediction System: Technical Description*. U.S. Department of Agriculture
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, Simmons A, Soci C, Abdalla S, Abellan X, Balsamo G, Bechtold P, Biavati G, Bidlot J, Bonavita M, De Chiara G, Dahlgren P, Dee D, Diamantakis M, Dragani R, Flemming J, Forbes R, Fuentes M, Geer A, Haimberger L, Healy S, Hogan R J, Hólm E, Janisková M, Keeley S, Laloyaux P, Lopez P, Lupu C, Radnoti G, de Rosnay P, Rozum I, Vamborg F, Villaume S, Thépaut J. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteor Soc*, 146: 1999–2049
- Higgins S I, Conradi T, Muhoko E. 2023. Shifts in vegetation activity of terrestrial ecosystems attributable to climate trends. *Nat Geosci*, 16: 147–153
- Huo W, Yang F, Wu Y, Zhi X F, Song M Q, Zhou C L, Yang X H, MamtiMin A, He Q, Wen C, Gao J C, Meng L, Hu S. 2022. Influence of topographic relief on sand transport in the near-surface layer during dust storms in the Taklimakan Desert. *Front Environ Sci*, 10: 931529
- Husar R B, Tratt D M, Schichtel B A, Falke S R, Li F, Jaffe D, Gassó S, Gill T, Laulainen N S, Lu F, Reheis M C, Chun Y, Westphal D, Holben B N, Gueymard C, McKendry I, Kuring N, Feldman G C, McClain C, Frouin R J, Merrill J, DuBois D, Vignola F, Murayama T, Nickovic S, Wilson W E, Sassen K, Sugimoto N, Malm W C. 2001. Asian dust events of April 1998. *J Geophys Res*, 106: 18317–18330
- Jones B A. 2023. Dust storms and human well-being. *Resour Energy Econ*, 72: 101362
- Kok J F, Storelvmo T, Karydis V A, Adebisi A A, Mahowald N M, Evan A T, He C L, Leung D M. 2023. Mineral dust aerosol impacts on global climate and climate change. *Nat Rev Earth Environ*, 4: 71–86
- Kuzu S L, Yavuz E. 2021. Comparison of RegCM dust schemes by monitoring an aeolian dust transport episode. *Air Qual Atmos Health*, 14: 2047–2057
- Lee S S, Lim Y K, Cho J H, Lee H C, Ryoo S B. 2019. Improved dust emission reduction factor in the ADAM2 Model using real-time MODIS NDVI. *Atmosphere*, 10: 702
- Li J D, Hao X, Liao H, Yue X, Li H, Long X, Li N. 2022. Predominant type of dust storms that influences air quality over Northern China and future projections. *Earths Future*, 10: e2022EF002649

- Liang L, Han Z W, Li J W, Xia X A, Sun Y L, Liao H, Liu R T, Liang M J, Gao Y, Zhang R J. 2022. Emission, transport, deposition, chemical and radiative impacts of mineral dust during severe dust storm periods in March 2021 over East Asia. *Sci Total Environ*, 852: 158459
- Liang P, Chen B, Yang X P, Liu Q Q, Li A R, Mackenzie L, Zhang D G. 2022. Revealing the dust transport processes of the 2021 mega dust storm event in northern China. *Sci Bull*, 67: 21–24
- Lin I I, Chen J P, Wong G T F, Huang C W, Lien C C. 2007. Aerosol input to the South China Sea: Results from the MODerate resolution Imaging Spectro-radiometer, the quick scatterometer, and the measurements of pollution in the troposphere sensor. *Deep-Sea Res Part II-Top Stud Oceanogr*, 54: 1589–1601
- Lu H, Shao Y P. 2001. Toward quantitative prediction of dust storms: An integrated wind erosion modelling system and its applications. *Environ Model Software*, 16: 233–249
- Lyu X, Li X B, Wang H, Gong J R, Li S K, Dou H S, Dang D L. 2021. Soil wind erosion evaluation and sustainable management of typical steppe in Inner Mongolia, China. *J Environ Manage*, 277: 111488
- Ma Y H, Mao R, Shi C C, Feng X Y, Ma L, Song X Y. 2024. Increasing cross-border dust storm from Mongolia to China during 1987–2022. *Glob Planet Change*, 242: 104578
- Mu F F, Fiedler S. 2025. How much do atmospheric depressions and Mongolian cyclones contribute to spring dust activities in East Asia? *npj Clim Atmos Sci*, 8: 51
- Pi H W, Sharratt B. 2017. Evaluation of the RWEQ and SWEEP in simulating soil and PM₁₀ loss from a portable wind tunnel. *Soil Tillage Res*, 170: 94–103
- Prospero J M, Nees R T, Uematsu M. 1987. Deposition rate of particulate and dissolved aluminum derived from Saharan dust in precipitation at Miami, Florida. *J Geophys Res*, 92: 14723–14731
- Qian W H, Quan L S, Shi S Y. 2002. Variations of the dust storm in China and its climatic control. *J Clim*, 15: 1216–1229
- Qian W H, Tang X, Quan L S. 2004. Regional characteristics of dust storms in China. *Atmos Environ*, 38: 4895–4907
- Riksen M J P M, Visser S M. 2008. Predicting the effect of tilling practices on wind erosion activity: Application of the Wind Erosion Prediction System in a sand drift area in The Netherlands. *Earth Surf Process Landf*, 33: 1864–1874
- Roe G. 2009. On the interpretation of Chinese loess as a paleoclimate indicator. *Quat Res*, 71: 150–161
- Rohde M M, Albano C M, Huggins X, Klausmeyer K R, Morton C, Sharman A, Zaveri E, Saito L, Freed Z, Howard J K, Job N, Richter H, Toderich K, Rodella A S, Gleeson T, Huntington J, Chandanpurkar H A, Purdy A J, Famiglietti J S, Singer M B, Roberts D A, Caylor K, Stella J C. 2024. Groundwater-dependent ecosystem map exposes global dryland protection needs. *Nature*, 632: 101–107
- Shao Y P. 2004. Simplification of a dust emission scheme and comparison with data. *J Geophys Res*, 109: D10202
- Shao Y P, Wang J J. 2003. A climatology of Northeast Asian dust events. *Meteorol Z*, 12: 187–196
- Song H Q, Zhang K S, Piao S L, Wan S Q. 2016. Spatial and temporal variations of spring dust emissions in northern China over the last 30 years. *Atmos Environ*, 126: 117–127
- Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, Stunder B J B, Cohen M D, Ngan F. 2015. NOAA'S HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull Am Meteorol Soc*, 96: 2059–2077
- van Donk S J, Skidmore E L. 2003. Measurement and simulation of wind erosion, roughness degradation and residue decomposition on an agricultural field. *Earth Surf Process Landf*, 28: 1243–1258
- Wagner L E. 1996. An overview of the wind erosion prediction system. In: Heber A, ed. *Proceedings of the International Conference on Air Pollution from Agricultural Operations*. Iowa: Midwest Plan Service. 73–78
- Wagner L E. 2013. A history of wind erosion prediction models in the United States Department of Agriculture: The Wind Erosion Prediction System (WEPS). *Aeolian Res*, 10: 9–24
- Wagner L E, Fox F A. 2013. The management submodel of the wind erosion prediction system. *Appl Eng Agric*, 29: 361–372
- Wagner L E, Haas M E, Fox F A. 2022. WebStart WEPS: WEPS with remote data access and cloud-computing functionality. *J ASABE*, 65: 427–436
- Wang N, Zhang Y Y. 2024. Long-term variations of global dust emissions and climate control. *Environ Pollut*, 340: 122847
- Wang Q M, Liu H Y, Liang B Y, Shi L, Wu L, Cao J. 2024. Will large-scale forestation lead to a soil water deficit crisis in China's drylands? *Sci Bull*, 69: 1506–1514
- Wang Y Q, Stein A F, Draxler R R, de la Rosa J D, Zhang X Y. 2011. Global sand and dust storms in 2008: Observation and HYSPLIT model verification. *Atmos Environ*, 45: 6368–6381
- Wang Y Q, Hu W, Sun H, Zhao Y, Zhang P P, Li Z M, Zhou Z X, Tong Y P, Liu S Z, Zhou J X, Huang M B, Jia X X, Clothier B, Shao M, Zhou W J, An Z S. 2024. Soil moisture decline in China's monsoon loess critical zone: More a result of land-use conversion than climate change. *Proc Natl Acad Sci USA*, 121: e2322127121
- Williams J R, Jones C A, Dyke P T. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans ASAE*, 27: 0129–0144
- Woodruff N P, Siddoway F H. 1965. A wind erosion equation. *Soil Sci Soc Amer J*, 29: 602–608
- Wu C L, Lin Z H, Liu X H, Ji D Y, Zhang H, Li C, Lin G X. 2021. Description of dust emission parameterization in CAS-ESM2 and Its

- simulation of global dust cycle and East Asian dust events. *J Adv Model Earth Syst*, 13: e2020MS002456
- Wu C L, Lin Z H, Shao Y P, Liu X H, Li Y. 2022. Drivers of recent decline in dust activity over East Asia. *Nat Commun*, 13: 7105
- Xu S X, Wang J L, Altansukh O, Chuluun T. 2024. Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of desertification on the Mongolian Plateau. *Sci Total Environ*, 941: 173566
- Xu X K, Lin Z H, Xue F, Zeng Q C. 2003. Correlation analysis between meteorological factors and the ratio of vegetation cover. *Acta Ecol Sin*, 23: 221–230
- Yang G, Sun R, Jing Y, Xiong M, Li J, Chen L. 2022. Global assessment of wind erosion based on a spatially distributed RWEQ model. *Prog Phys Geog*, 46: 28–42
- Yao W R, Gui K, Wang Y Q, Che H Z, Zhang X Y. 2021. Identifying the dominant local factors of 2000–2019 changes in dust loading over East Asia. *Sci Total Environ*, 777: 146064
- Ye D Z, Chou J F, Liu J Y, Wang Y M, Zhou Z J, Jv H B, Huang Q. 2000. Causes of sand-stormy weather in Northern China and contral measures. *Acta Geogr Sin*, 15: 513–521
- Zakey A S, Solmon F, Giorgi F. 2006. Implementation and testing of a desert dust module in a regional climate model. *Atmos Chem Phys*, 6: 4687–4704
- Zeng Y, Wang M H, Zhao C, Chen S Y, Liu Z K, Huang X, Gao Y. 2020. WRF-Chem v3.9 simulations of the East Asian dust storm in May 2017: Modeling sensitivities to dust emission and dry deposition schemes. *Geosci Model Dev*, 13: 2125–2147
- Zhai J J, Wang L, Liu Y, Wang C Y, Mao X G. 2023. Assessing the effects of China's Three-North Shelter Forest Program over 40 years. *Sci Total Environ*, 857: 159354
- 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 X T, Gui K, Zeng Z L, Fei Y, Li L, Zheng Y, Peng Y, Liu Y R, Shang N X, Zhao H H, Yao W R, Wang H, Wang Z L, Wang Y Q, Che H Z, Zhang X Y. 2024. Mapping the seamless hourly surface visibility in China: A real-time retrieval framework using a machine-learning-based stacked ensemble model. *npj Clim Atmos Sci*, 7: 68
- Zhang X X, Sharratt B, Liu L Y, Wang Z F, Pan X L, Lei J Q, Wu S X, Huang S Y, Guo Y H, Li J, Tang X, Yang T, Tian Y, Chen X S, Hao J Q, Zheng H T, Yang Y Y, Lyu Y L. 2018. East Asian dust storm in May 2017: Observations, modelling, and its influence on the Asia-Pacific region. *Atmos Chem Phys*, 18: 8353–8371
- Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, Arimoto R, Wang Y Q, Zhou Z J. 2003. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission. *Geophys Res Lett*, 30: 2272
- Zhang Y, Chen Y, Chen S Y, Alam K, Chen J Y. 2024. Mongolia dust transport across borders under the background of global warming. *Glob Planet Change*, 239: 104509
- Zhang Z C, Bird A, Zhang C X, Dong Z B. 2022. Not all gravel deserts in northern China are sources of regionally deposited dust. *Atmos Environ*, 273: 118984
- Zong Q, Mao R, Gong D Y, Wu C L, Pu B, Feng X Y, Sun Y J. 2021. Changes in dust activity in spring over East Asia under a global warming scenario. *Asia-Pac J Atmos Sci*, 57: 839–850

(责任编辑: 鹿化煜)