

沙尘活动及其环境效应研究回顾、 进展与评述*

刘东伟¹, 姚顺予¹, 黄绍普¹, 郭宴宏¹, 徐立帅²

(1. 内蒙古大学生态与环境学院, 呼和浩特 010021; 2. 山西农业大学资源环境学院, 山西 晋中 030031)

摘要: 回顾和评述了沙尘活动及其环境效应, 深入探讨了沙尘的来源、释放机制、输送与沉降过程, 并系统分析了沙尘对气候和生态系统的影响。研究发现: 全球旱地, 尤其是北非、中东、东亚等地区是沙尘的主要来源。沙尘释放是一个复杂过程, 受风力、植被、土壤湿度、盐含量和结皮等多因素影响, 其中盐含量和结皮对起沙的影响尚缺少可靠的参数化方案。沙尘的输送与沉降过程受风速、湿度、湍流及颗粒理化特征等多因素影响。沙尘通过改变辐射强迫和地表反照率等方式影响气候系统, 同时沙尘活动中营养元素的输送对全球碳循环具有重要作用。研究强调长时间序列土壤风蚀对气候变化的响应及预测未来沙尘活动趋势的重要性, 这依赖于气候、生物和风尘过程的耦合研究。人工智能、大数据、4D同化等先进技术的应用, 有望提高沙尘模型的精确性和预测能力, 更好地理解沙尘活动及其在全球环境变化中的作用。

关键词: 沙尘活动; 气候变化; 环境效应; 沙尘模型; 碳循环

中图分类号: P434 **文献标志码:** A

沙尘对全球气候及生态系统具有深远影响。沙尘气溶胶通过散射和吸收太阳辐射以及改变云的光学特性, 影响地球系统的能量平衡^[1]。沙尘携带的养分(铁、磷等)对陆地和海洋生态系统的营养循环至关重要, 冰盛期冰芯样品 CO₂ 浓度的减少可能与沙尘向海洋供应的铁元素增加有关^[2]。沙尘模型在理解全球沙尘循环及其环境效应方面发挥着重要作用, 是模拟和预报沙尘事件、研究起尘、输送、沉积过程及其影响因素的重要工具, 模型结合遥感和野外观测在沙尘气溶胶扩散过程研究中取得了很大进展。但是现有模型仍存在问题, 例如在小尺度上获得的经验和物理机制推演到大尺度时, 存在较大不确定性, 模型中很多经验参数的取值缺少明确的物理意义, 限制模型的普适化和推广。针对以上问题, 模型的改进和验证需要更多的观测数据和先进的同化技术, 尤其是在沙尘源的辨识和参数化方面。气候、风沙、生物具有紧密耦合和反馈关系, 这种互馈对于表征地球表面气候、地貌过程和生物演化至关重要。建立长时间序列土壤风蚀对气候变化的响应及预测未来沙尘活动趋势依赖于气候、生物和风尘过程的耦合。本研究结合上述问题, 针对沙尘的来源及释放机制、沙尘的输送与沉降、沙尘活动的环境效应做了研究回顾和评述, 指出通过开展跨学科合作并结合人工智能和大数据等先进技术的应用, 可更好地理解沙尘活动及其在全球环境变化中的作用, 并为应对沙尘活动带来的挑战提供新的技术支撑。

1 沙尘来源及释放机制

大气中的沙尘气溶胶主要来自全球旱地。北半球尘源主要位于北非、中东、东亚和西南亚, 南半

* 收稿日期: 2024-10-22; 修回日期: 2025-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(42067013); 中国沙漠气象科学研究基金项目(Sqj2020011)

作者简介: 刘东伟(1982—), 男, 山东菏泽人, 教授, 博士。主要从事沙尘模拟与预报研究。E-mail: liudw@imu.

edu.cn

球尘源主要分布在南非、南美洲和澳大利亚^[3-4]。撒哈拉沙漠是全球最大尘源,贡献率约50%;其次是亚洲中东部地区,贡献率约20%;再次为阿拉伯半岛和澳大利亚;非洲南部和美洲的贡献率不足5%^[5-6]。沙尘释放过程复杂,与环境因子呈非线性关系,导致不同时空尺度上沙尘释放量差异巨大。风力侵蚀下,地表向大气释放粉尘的机制有3种:沙粒跃移轰击,聚合粒子的崩解和湍流动力抬升^[7-9]。目前,国际上普遍认可的沙尘释放机制主要建立在沙粒轰击理论上,认为对流湍流空气应力抬升直接产生的沙尘释放量可基本忽略不计^[10-12]。Marticorena等^[13]认为 $F \propto Q$,沙尘释放通量表示为:

$$F = a_1 \exp(a_2 \eta_c - a_3) \times Q。$$

式中: a_1, a_2 和 a_3 是通过逐步调整内部边界层与地面粗糙度后得到的经验参数; η_c 是土壤的黏土含量; Q 为沙粒的水平跃移通量。Shao^[8,14]开发了一种基于物理机制的起尘方案,认为沙尘垂直通量与沙粒水平跃移通量成比例,给出了由粒径为 d_i 的沙粒运动产生的粒径为 d_s 的粉尘通量的表达式:

$$\tilde{F}(d_i, d_s) = c_y \eta_i \left[(1 - \gamma \sigma_p) \right] \times (1 + \sigma_m) \times \frac{Q_s g}{u_*^2}。$$

式中: c_y 为系数; η_i 是粒径为 d_i 尘粒的比值; g 是重力加速度; Q_s 是粒径为 d_s 沙粒的水平通量。总的沙尘通量表示为:

$$F = \int_{d_1}^{d_2} \int_0^{d_1} \tilde{F}(d_i, d_s) p(d_i) p(d_s) dd_i dd_s。$$

式中: $[0, d_1]$ 是粉尘颗粒的粒度范围; $[d_1, d_2]$ 是跃移沙粒的颗粒范围。其他起尘模型,如Kok等^[12,15]的模型,在基本原理上与上述类似。

近年来,人们也关注到在缺乏沙粒跃移轰击或静风时,直接的空气湍流对粉尘释放的重要性^[16-17]。Klose等^[18]考虑了对流起尘的随机性,开发了新的对流湍流起尘模型。它由土壤颗粒大小,颗粒间内聚力和瞬时表面剪切应力组成,根据空气动力提升和颗粒间内聚力的概率密度函数的重叠来估计起尘通量,粒径为 d_i 的粉尘的释放率可以表示为:

$$F(d_i) = \eta_i \cdot \int_0^f \left(\int_0^f \alpha_N \frac{T_p}{2\delta} \left(f - f_i \frac{d}{\delta} \right) p(f_i) df_i \right) p(f) df。$$

式中; T_p 是粒子响应时间; δ 是黏性子层的厚度; α_N 是调整系数; $p(f)$ 和 $p(f_i)$ 分别是空气抬升力 f 和土粒凝聚力 f_i 的概率密度函数。Klose等^[19]针对对流湍流如何产生表面剪切应力以及剪切应力的概率分布如何进行统计量化,开发了一个大涡模型研究对流湍流起尘的机理,从大涡尺度阐明对流湍流如何产生粉尘释放以及不同粒径的沙尘排放如何依赖于宏观大气条件。Klose等^[16]基于科尔沁沙地和日本-加拿大粉尘实验的观测数据,进一步发展了对流湍流粉尘释放参数,增加了新的瞬时动量和冲量的统计描述,参数化了颗粒凝聚力的影响函数以说明土壤湿度的影响,同时增加了空气提升力的校正函数,并考虑了植被粗糙度元素对对流湍流起尘的影响。Li等^[20]和Ju等^[21]基于科尔沁沙地的实际观测数据,给对流湍流起尘模型的参数进一步率定,使其更加趋向实际应用。

跃移轰击和聚合物崩解引起的起尘对强尘事件(沙尘暴天气)期间的粉尘释放比较有效。然而,它们不适用于弱风条件下的粉尘释放,弱风条件是由间歇性湍流而不是平均风切变和沙粒跃移产生的。正如之前的研究所指出的那样,直接空气动力学提升导致的粉尘释放强度远低于由跃移轰击和团聚体分解导致的粉尘释放强度,因此可以在模拟强尘事件(例如沙尘暴)中忽略不计。然而,虽然湍流动力抬升粉尘释放的强度通常很弱,但它可能高频率经常性发生。相比之下,强烈的尘暴事件发生的频率要低得多,可能在尘暴季节的高峰期每月发生几次。因此,湍流动力抬升粉尘释放可能在年度或更长的时间尺度上以及区域和全球的空间尺度上是粉尘的重要贡献因素。

2 沙尘的输送与沉降

2.1 沙尘产生的气象条件

沙尘大多是由强有力的天气系统促成,如季风、气旋、锋面、飏线和雷暴等。近地面风将沙尘颗粒从地表带走,湍流或对流将颗粒分散到高空,强风将尘粒长距离输送。在北非、东南亚和中东地区,沙尘暴通常是由季风或与季风相关的对流扰动产生^[22-23]。中东地区夏季的沙尘天气主要受沙特阿拉伯和巴基斯坦的热低压及副热带高压影响。非洲北部至欧洲东部的反气旋以及中东地区和印度次大陆南部的季风槽被认为是影响该地区夏季强沙尘暴形成的主要低压系统。戈壁沙漠地区产生严重沙尘暴的天气系统多是与低压系统相关的冷空气暴发导致。东北亚地区向东和东南移动的气旋经常将大量沙尘输送到中国 and 韩国的广大地区,以及日本的东部地区^[11]。Filonchik等^[24]认为气压显著下降的气旋引发了2021年3月发生在中国北部和蒙古东南部的强沙尘暴。2001—2015年出现在内蒙古的124次大范围沙尘暴天气分为冷锋型、蒙古气旋型和其他型3种类型。从形成沙尘暴的天气条件来看,高空环流背景以发展强盛的乌拉尔山高压脊与贝加尔湖低槽(或低涡)最为典型,地面系统则主要是与强冷高压相伴随的斜压冷锋和强劲的蒙古气旋^[25]。

2.2 沙尘的输送与沉降过程

全球尘循环是全球变化过程中的重要影响因素之一。每年约有2000 Mt的沙尘被释放到大气中,大部分沙尘可以进入对流层大气进行远程输送甚至参与全球循环,其中75%沙尘沉降到陆地,仅有25%沉降到海洋中^[4,26]。大气沙尘的全球监测结果显示沙尘在对流层的远程输送是不稳定的,风速、温度、湿度及湍流等均可影响其输送和沉降^[27-31]。大量粉尘堆积在半干旱区形成巨厚层的黄土,不只是颗粒物重力促成的沉降结果,天山、昆仑山等特定高度分布的黄土以及黄土高原地区的黄土,其分布与温度和湿度的梯度变化也有密切联系。

2.2.1 沙尘的干沉降

干沉降作用时间长、范围广,是干燥天气期间和尘源区气溶胶中沙尘的主要去除机制。干沉降速度受粒径影响:粒径大于 $2\ \mu\text{m}$ 的颗粒因重力作用沉降速度随粒径的增大而急剧增加;粒径小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的粒子受静电沉降作用影响,随着粒径的减小干沉降速度反而增加^[32-33]。除颗粒物的粒径外,颗粒物的理化性质、大气湍流、下垫面特征和气象因素等诸多不确定因素也会影响沉降速度。数值模型对降尘量的预测结果存在较大不确定性,往往会低估降尘量,野外观测结果甚至会比模拟结果大几个数量级^[34-35]。现有沙尘输送模型参数化方案一般不包含大于 $20\ \mu\text{m}$ 的沙尘颗粒,而尘源区及近源区大气降尘主要集中在粒径为 $20\sim 200\ \mu\text{m}$ 的沙尘颗粒,甚至远离尘源的下风区也有相当大一部分降尘粒径大于 $20\ \mu\text{m}$ ^[36]。沉降方案中颗粒粒径范围的微小变化就可能对模拟的降尘量显著增加。因此,沙尘干沉降过程的野外观测和影响因素分析,对进一步优化干沉降方案、提高降尘预测精度具有重要意义。此外,沙尘颗粒的不规则度和吸湿特征也会影响其输送和沉降。沙尘在高空大气输送过程中,不仅颗粒形态会发生变化,沙尘吸湿也会导致沙尘的质量和体积增加,均会影响干沉降过程^[37-38]。但是,这些过程在高空大气中难以直接观测,室内控制实验又不能代表真实的沉降过程。当前,亟待通过严密的野外实验,观测自然状态下沙尘干沉降的真实状态和过程,探讨外界环境尤其是温度和湿度变化对干沉降过程的影响,并揭示其作用机制。

2.2.2 沙尘的湿沉降

沙尘湿沉降是指沙尘颗粒与空气中的水蒸气相结合,形成水滴或冰晶,并最终沉降到地面的过程。这一过程对于沙尘的传输、扩散和沉降都有重要的影响。早期对沙尘湿沉降的研究主要集中在物理机制上。沙尘颗粒的大小、形状和密度,以及空气中的水蒸气含量,都是决定沙尘湿沉降速率的重要因素。湿沉降发生在云内(称为云内清除)和云底(称为云下清除)。云内清除主要去除亚微米粒子,而云下清除则主要去除颗粒较大的粒子。云下清除的速率通常使用清除系数来表示,该系数取决于雨滴的大小分布以及粒子与雨滴之间的捕集效率。捕集过程涉及多种机制,包括布朗扩散、

湍流扩散、截留、惯性撞击、热扩散、扩散电泳和静电吸引等^[39]。布朗扩散对于粒径小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的粒子很重要,而对于粒径大于 $1\ \mu\text{m}$ 的粒子,碰撞作用则更为关键^[40]。Apsimon等^[41]使用了一个经验关系来计算清除系数,将其作为降水率的函数。Pudykiewicz^[42]则建议使用一个关系式,将清除系数作为相对湿度的函数来计算。这些方案高度依赖大气模型在预测降水率或相对湿度方面的性能以及这些关系的准确性。另一种方法是用“清除比率”来描述湿沉降的效果。在沙尘分布的模拟中,Tegen等^[43]定义了清除比率 Z 为雨水中的沙尘质量浓度与空气中的沙尘质量浓度之比,并且其值是基于长期平均值来确定的,这种方法已经被多个研究所采用。近年来,对沙尘湿沉降的研究不仅局限于物理机制,还涉及沙尘的化学成分。研究发现,沙尘中的一些有机和无机物质,如硫酸盐、硝酸盐和有机碳,会与水蒸气发生化学反应,形成新的颗粒物。这些新的颗粒物具有较高的水溶性,能够更容易地与空气中的水蒸气结合,从而促进沙尘湿沉降。沙尘湿沉降是一个复杂的自然现象,涉及气候、环境和生态等多个领域,对沙尘湿沉降开展深入的研究,可以为未来的环境保护和气候调控提供重要的科学依据。

2.3 沙尘活动趋势变化及未来情景预测

北非、澳大利亚、中亚及东亚的干旱与半干旱区为全球沙尘的主要活动区。近年来,受近地面风速降低的影响^[44],全球沙尘暴事件的发生频率呈下降趋势。相关研究表明,全球沙尘活动具有季节性特点,以北半球季节为依据,主要沙尘活动区随着季节转换:春季在东亚沙漠,夏季在中东和北非沙漠,秋冬季在澳大利亚^[45]。东亚沙尘暴灾害的频次与强度,整体呈现“波动减少”的趋势;跨境沙尘暴,特别是中蒙交界区域沙尘暴灾害仍有所增加。在中国生态环境工程建设成效与蒙古国沙化土地面积增加的共同作用下,沙尘暴源地逐渐向中国内蒙古西北方向与蒙古国戈壁区域转移。中东和北非地区作为世界上最大的风沙尘源之一,1998—2018年受异常干旱与植被覆盖减少的影响,该地区沙尘排放呈显著上升趋势^[46-47]。研究表明,在SSP 2-4.5和SSP 5-8.5排放情景下,未来30年北非和澳大利亚沙漠的沙尘排放将继续减少,中亚和东亚沙漠的沙尘排放可能会出现局部增加^[48]。这些改变会加剧全球沙尘灾害的风险。

3 沙尘活动的环境效应

3.1 气候效应

悬浮在大气中的沙尘气溶胶对气候系统的辐射影响类似于温室气体,通过散射和吸收辐射成分以及改变云的光学特性和寿命来影响地球系统的能量平衡^[49-50]。近年来,与沙尘沉积引起的地表反照率变化有关的辐射效应越来越引起人们的关注。Aoki等^[51]研究表明沙尘暴经过后,雪表面对可见光的反照率从 0.9 下降到 0.4 。青藏高原的雪样本分析结果表明,沙尘导致积雪的反照率下降了 34% ^[52]。Shi等^[53]评估了末次冰盛期沙尘辐射对东亚冬季风的影响,并称高纬度欧亚大陆的雪反照率反馈放大了沙尘辐射强迫,导致西风带扰动,削弱了亚洲北部的季风南风。Skiles等^[54]概述了包括沙尘和黑碳在内的吸光颗粒对雪的变暗影响,这些颗粒可以引起反照率反馈并加速雪的融化。Di Mauro等^[55]研究称撒哈拉沙漠的沙尘有助于减少阿尔卑斯山的积雪,Sarangi等^[56]对喜马拉雅山脉的积雪进行了模拟,认为吸光颗粒导致的雪反照率降低了 $4\%\sim 8\%$,并指出高达 $30\sim 50\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的辐射强迫。

沙尘模式的不确定性问题,是导致IPCC评估报告中气溶胶辐射强迫误差条较大的原因之一。基本的挑战是,在对各种沙尘过程进行参数化时,模型使用的参数本身就不准确。学者们使用集合模拟(一种广泛用于数值天气预报的技术)对与情况相关的不确定性进行了分析。一些学者研究了由随机扰动的气象和初始沙尘浓度场产生的沙尘变量的协方差矩阵^[57-59],还有学者研究了随机扰动的沙尘排放率^[60-61]。然而,这些研究受限于所使用的集合小,且对误差源项扰动受限。理想情况下,对于这种粉尘不确定性分析,应同时扰动多个误差源项,但这受限于其对大尺度集成和计算成本的要求。很明显,需要开发用于有效集成和沙尘不确定性分析的算法。

3.2 生态效应

全球干旱区土地退化与风蚀所引起的土壤养分流失密切相关。在我国干旱半干旱地区,风蚀作用不仅造成土壤表层碳、氮的流失,而且还会引起土壤中其他营养元素流失。土壤营养元素组成和含量的变化可能促进和加速了这些地区植被的演替和退化。例如,磷是控制草甸草原植物生长的关键因素之一^[62]。风蚀作用引起这些营养物质在地球表层的再分配。

Du等^[63-64]依据风蚀模型估算了中国北方PM₁₀携带的土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)和总磷(TP)的风蚀流失量,研究认为2001—2014年风蚀造成中国北方土壤有机碳(SOC)损失约为0.9 Tg·a⁻¹,其中32.5%和7.5%的SOC损失分别来自草原和农田。Song等^[65]估算了1982—2011年中国北方春季SOC和养分(总氮和总磷)损失的空间格局和时间动态,认为SOC和养分流失的空间格局与整个研究区域沙尘排放格局及沙尘释放率一致,春季风蚀造成的SOC、TN和TP年损失为0.985±0.149 Tg·a⁻¹,0.094±0.014 Tg·a⁻¹和0.089±0.013 Tg·a⁻¹,并认为沙尘排放、SOC和养分流失在1982—1997年呈下降趋势,之后开始增加,这一变化很大程度上归因为气候变化引起的植被生长变化。

北非是全球沙尘的重要源区,冬春季节的沙尘被输送到亚马逊和热带大西洋西部^[66]。北非沙尘向南美的运输缓解了热带大西洋和亚马逊盆地的营养限制,提高了净初级生产力,并将CO₂封存到生物圈中。由于沙尘的来源情况决定着磷和铁等相关营养物质的数量、矿物学特征和溶解度,识别全球各地生态脆弱地区沙尘的潜在来源很重要。在气候变化和人类活动影响下,主要沙尘源地的年际变化反过来可以调节生态系统中营养物质的沉积和生物地球化学循环效应^[67]。

3.3 沙尘与碳循环

据估计,全球每年约有500 Mt的沙尘沉积到海洋中,沙尘携带来的铁、铝、磷供应可能在海洋表层生物量和全球碳收支中起重要作用^[26, 68]。铁、铝、磷是生物生长必不可少的营养元素,一定程度上决定着海洋表层浮游植物的数量,并通过光合作用影响海-气界面的碳交换过程,进而影响海洋对大气中碳的吸收。海洋是地球上最大的碳库,海洋浮游植物占当前年度CO₂交换量的四分之一(IPCC 4AR)。深海碳库的形成主要归功于“生物泵”,即在表层海洋中,浮游植物通过光合作用吸收大气中的CO₂将其转化为有机碳,这些有机碳通过食物链被逐级传递至浮游动物、鱼类等生物,通过摄食、排泄和浮游动植物死亡后的分解,会产生大量的碎屑等向海底沉降,最终的结果是碳不断地从大气层转移到深海,这是全球CO₂自然封存的重要过程^[69-70]。

Martin等^[2]提出了“铁假说”,即大气中铁元素供应的增加刺激了海洋中浮游植物的光合作用,进而导致冰川极大期期间大气中CO₂水平下降。世界范围内的冰芯记录显示,在过去的百万年中,长时间尺度(千年)的沙尘铁输送量增加了数次,这些时期与低CO₂的冰期密切相关^[71-72]。对海洋沉积物记录的分析证实,水华物种的生物生产力与沙尘沉积呈正相关关系。Marinov等^[73]得出结论,“生物泵”的作用在千年时间尺度上是大气中CO₂含量下降的主要作用。卫星图像和沙尘沉降观测通量表明,撒哈拉沙漠、东北亚和西南亚沙尘暴与北大西洋、北太平洋和阿拉伯海的生物生产力分别具有高度相关性^[74-76]。

虽然“铁假设”似乎得到了地质数据的有力支持,但目前对沙尘携带的铁、铝、磷与浮游植物生长、碳吸收和气候变化之间的反馈知之甚少。最近的研究表明,铁对海洋浮游植物活动的影响是有条件的,这取决于海水是低硝酸盐和低叶绿素的,还是高硝酸盐和低叶绿素的^[77]。为了解决这些问题,人们已经开发了海洋浮游植物生长模型,但这些模型仍然缺少可靠的营养元素供应作为输入的先决条件,无法产生可信的结果^[78]。发展新的沙尘-养分模型,依靠合理的模型来合理估算沙尘向海洋输送的养分沉积,并推断全球范围内无观测数据区域的营养元素沉积值,生成铁、铝、磷沉积的时空模式,对研究海洋生物群落对气候变化的响应,以及海洋碳汇对CO₂浓度升高的响应具有重要意义。

4 问题与展望

4.1 临界摩擦风速的校正

临界摩擦风速(u_{*t})是沙尘释放的核心参数,风蚀研究中,临界摩擦风速是否准确,直接关系到模型的精度,计算公式为:

$$u_{*t} = u_{*t0}(d) f_1(\lambda) f_2(\theta) f_3(s) f_4(c)。$$

式中: u_{*t0} 是理想地表(裸露、干燥、无盐等)的临界摩擦速度; f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 分别是植被、土壤水分、土壤盐分和土壤结壳的修正函数。这种方法目前在风蚀模型中被广泛采用。一个常用的估算 u_{*t0} 与土壤粒径 d 函数关系的模型是Shao与Lu方案^[79]。函数 f_1 、 f_2 分别遵循Raupach等^[80]和Fécan等^[81]提出的校正函数,函数 f_3 和函数 f_4 至今没有可行的方案,通常设置为1。目前学术界鲜有已发表的与盐相关的 u_{*t} 校正函数研究成果, f_3 通常设置为1,其结果可能低估了含盐土壤的 u_{*t} 。Nickling等^[82-83]提出了两种不同类型盐与风蚀的关系,表明 f_3 与盐类型相关。Nield等^[84]现场实验证明土壤盐尘排放具有强烈的日变化,这表明含盐土壤的临界摩擦风速也可能复杂地取决于土壤湿度和温度。如果不能很好地了解含盐土壤的临界摩擦风速,就不能对干旱区沙尘释放进行较精确的建模。

全球干旱区含盐土壤广泛分布,一个与沙尘输送密切相关但有待系统研究的问题是干旱区风蚀盐的输送,亚洲中西部地区的风蚀盐排放非常活跃,风蚀盐的研究是未来沙尘模型发展方向之一。在过去的几十年里,人类对咸海水系的干扰加剧了沙尘和盐排放,约50000 km²的前咸海海底现在是咸海东部的疏松盐漠^[85]。从伊朗、阿富汗和巴基斯坦一直延伸到印度西北部的沙漠,如伊朗的大盐漠荒漠和锡斯坦盆地主要由盐滩组成。然而,到目前为止,我们对全球干旱区的风蚀盐知之甚少,例如:全球盐的排放量、排放源、排放时间、输送途径、沉积区域以及生态环境影响等方面,尚缺乏系统性的认识。

4.2 尺度问题

目前关于土壤风蚀和沙尘释放的研究,一部分在点上做工作,另一部分在面上开展研究。点上的工作,侧重实地观测和探索风蚀及起尘的物理机制;面上的工作,依据在点上获得的基本参数和物理机制建模,估算区域粉尘的输出与长距离输送。研究工作,由点向面推移的时候,无法绕开尺度问题。

然而土壤风蚀和地面起尘是一个面源过程,地面条件空间异质性强,在点上获得的经验和物理模型推演到大尺度上时,存在较大不确定性。另外,物理模型的核心参数多是在风洞条件下测试完成,风洞难以完全还原大尺度下自然环境中的复杂条件和变化因素,实验结果可能受到人为控制和环境限制的影响,与自然情况存在一定的差异。

4.3 研究展望

4.3.1 气候-生物-风蚀过程的耦合

长时间尺度上的风成过程与气候变化和生物生态演化息息相关。荒漠戈壁等区域,虽然对河流/冰川过程影响较小,但是其风沙过程实际上支配着陆地表面的演化。一方面,陆地表面条件如土壤湿度、植被和地表结皮(物理和生物成因),强烈影响着风沙的输送强度;另一方面,风蚀或沉积可能会阻止并抑制生物成因的结皮和植被的生长。陆地表面的细菌和真菌,不仅将矿物质转化为土壤养分,还主导地表结皮/结壳的形成和演化,进而可以抑制风沙活动并保护土壤表面免于风蚀。沙粒跃移可能会对结皮表面产生机械破坏作用,植被也深刻影响着生物成因的结皮和风蚀空气动力学。因此,气候、生物、风蚀通过复杂的正负反馈环相互耦合,这一互馈网络对于表征地球表面气候、地貌过程和生物演化至关重要。建立长时间序列土壤风蚀对气候变化的响应与反馈,以及预测未来沙尘活动趋势,均依赖于气候、生物和风沙过程的耦合。

4.3.2 沙尘模式同化技术

长期以来,沙尘模式的不确定性问题一直困扰着学术界,不同沙尘模式估算的结果差别巨大,使

用数据同化技术大大提高了天气预测精度,但近几年才将这项技术应用于沙尘模式,例如Eltahan等^[86]发现4DVAR(四维变分同化)对AOD、PM₁₀和PM_{2.5}模拟有积极影响。目前,通过同化沙尘浓度数据来改进沙尘排放估算的工作还很有限。如何使用4DVAR实现沙尘输送全过程数据的时空同化(例如使用气溶胶光学厚度的遥感数据),仍然是一个亟待解决的问题。虽然数据同化可以用于优化沙尘沉积估算,但是同化过程中所需的沙尘模型协方差矩阵,目前仍然十分稀缺。实现数据的四维变分同化,沙尘模式将变得更加可靠。

4.3.3 基于人工智能、大数据的沙尘模拟与预报

基于大数据学习的人工智能技术为沙尘模拟与预报的改进提供了新的可能。星空地多源遥感平台收集地表特征、气象参数、空气质量等方面的数据,利用大数据技术对海量数据进行处理和分析,提取有价值的信息,为沙尘模拟和预报提供基础数据支持和同化资料。例如,Aardvark Weather系统能够在没有传统数值天气预报输入的情况下预测风速、气压、温度、湿度等沙尘暴驱动因子,并且可以通过端到端调优提升特定区域的预测结果^[87]。人工智能技术将为沙尘预报带来革命性的创新,它可以深入研究沙尘暴发生的物理机制和动力学过程,如风速、气压、温度、湿度等因素对沙尘暴形成和发展的影响。Mojtaba等^[88]使用Sentinel 2数据,基于人工神经网络、支持向量机和深度学习神经网络对伊朗贾兹穆里安(Jazmurian)盆地的起沙潜力进行建模,结果表明归一化植被指数(NDVI)、海拔、年降雨量和风速是影响该地区起沙潜力的4个最重要因素。依据以往沙尘数据,利用人工智能技术对影响沙尘释放和输送的因素进行学习和分析,有助于提高沙尘暴预测的准确性。Al Murayziq等^[89]使用沙尘暴台站历史数据,基于Weka(Waikato environment for knowledge analysis)数据挖掘框架确定风速、气压、温度、湿度和土地覆盖类型为沙尘暴主要影响因素后,又通过构建混合沙尘暴预报模型——贝叶斯网络与基于案例推理相结合的模型,有效预测了利雅得(Riyadh)北部区域的沙尘暴事件。利用机器学习、深度学习等人工智能技术,结合大气和沙尘的耦合模式,可以建立更加精准的沙尘暴预测模型,对未来一段时间内沙尘暴发生的可能性、范围和强度进行预测。同时,基于人工智能和大数据技术的沙尘暴预警系统,可以实时监测气象变化和地表特征变化,并根据实测数据对预测模型进行更新和优化。人工智能和大数据技术在沙尘模拟和预报中的应用具有广泛前景。

参考文献:

- [1] AOKI T, HACHIKUBO A, HORI M. Effects of snow physical parameters on shortwave broadband albedos[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(19): ACL 13-1-13-12.
- [2] MARTIN J H, FITZWATER S E. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic [J]. *Nature*, 1988, 331(6154): 341-343.
- [3] PROSPERO J M, GINOUX P, TORRES O, et al. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer(TOMS)absorbing aerosol product[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(1): 2-1-2-31.
- [4] CHOOBARI O A, ZAWAR R P, STURMAN A. The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review[J]. *Atmospheric Research*, 2014, 138: 152-165.
- [5] GINOUX P, PROSPERO J M, TORRES O, et al. Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: Correlation with north Atlantic Oscillation[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19(2): 113-128.
- [6] MIDDLETON N, KANG U. Sand and dust storms: Impact mitigation[J]. *Sustainability*, 2017, 9(6): 1053.
- [7] SHAO Y, RAUPACH M, FINDLATER P. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, 98(D7): 12719-12726.

- [8] SHAO Y. A model for mineral dust emission[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D17): 20239-20254.
- [9] 梅凡民, 张小曳, 鹿化煜, 等. 若干风蚀粉尘释放模型述评[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(6): 791-797.
- [10] LU H, SHAO Y. A new model for dust emission by saltation bombardment[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D14): 16827-16842.
- [11] SHAO Y, DONG C. A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 52(1/4): 1-22.
- [12] KOK J F. Does the size distribution of mineral dust aerosols depend on the wind speed at emission?[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(19): 10149-10156.
- [13] MARTICORENA B, BERGAMETTI G. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100(D8): 16415-16430.
- [14] SHAO Y. Simplification of a dust emission scheme and comparison with data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109(D10): 004372.
- [15] KOK J, MAHOWALD N, FRATINI G, et al. An improved dust emission model-Part 1: Model description and comparison against measurements[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(23): 13023-13041.
- [16] KLOSE M, SHAO Y, LI X L, et al. Further development of a parameterization for convective turbulent dust emission and evaluation based on field observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(17): 10441-10457.
- [17] ZHANG J, TENG Z, HUANG N, et al. Surface renewal as a significant mechanism for dust emission[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(24): 15517-15528.
- [18] KLOSE M, SHAO Y. Stochastic parameterization of dust emission and application to convective atmospheric conditions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(16): 7309-7320.
- [19] KLOSE M, SHAO Y P. Large-eddy simulation of turbulent dust emission[J]. *Aeolian Research*, 2013, 8: 49-58.
- [20] LI X L, KLOSE M, SHAO Y, et al. Convective turbulent dust emission(CTDE)observed over Horqin Sandy Land area and validation of a CTDE scheme[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(16): 9980-9992.
- [21] JU T T, LI X L, ZHANG H S, et al. Comparison of two different dust emission mechanisms over the Horqin Sandy Land area: Aerosols contribution and size distributions[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 176: 82-90.
- [22] WANG T J, ZHUANG B L, LI S, et al. The interactions between anthropogenic aerosols and the East Asian summer monsoon using RegCCMS[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(11): 5602-5621.
- [23] NAMDARI S, KARIMI N, SOROOSHIAN A, et al. Impacts of climate and synoptic fluctuations on dust storm activity over the Middle East[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 173: 265-276.
- [24] FILONCHYK M, PETERSON M. Development, progression, and impact on urban air quality of the dust storm in Asia in March 15-18, 2021[J]. *Urban Climate*, 2022, 41: 101080.
- [25] 袁国波. 21世纪以来内蒙古沙尘暴特征及成因[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(6): 1204-1209.
- [26] SHAO Y, WYRWOLL K H, CHAPPELL A, et al. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science[J]. *Aeolian Research*, 2011, 2(4): 181-204.
- [27] MAHOWALD N M, BAKER A R, BERGAMETTI G, et al. Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(4): 002402.
- [28] UNO I, EGUCHI K T, YUMIMOTO K, et al. Asian dust transported one full circuit around the globe[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(8): 557-560.
- [29] UNO I, EGUCHI K, YUMIMOTO K, et al. Large Asian dust layers continuously reached North America in April 2010[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(14): 7333-7341.

- [30] MAHOWALD N, ALBANI S, KOK J F, et al. The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system[J]. *Aeolian Research*, 2014, 15: 53-71.
- [31] YUMIMOTO K, TAKEMURA T. Long-term inverse modeling of Asian dust: Interannual variations of its emission, transport, deposition, and radiative forcing[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(4): 1582-1607.
- [32] ZHANG X Y, GONG S L, SHEN Z X, et al. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia; 1. Network observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D9): 4261.
- [33] ZHANG J, SHAO Y, HUANG N. Measurements of dust deposition velocity in a wind-tunnel experiment[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(17): 8869-8882.
- [34] LAWRENCE C R, NEFF J C. The contemporary physical and chemical flux of aeolian dust: A synthesis of direct measurements of dust deposition[J]. *Chemical Geology*, 2009, 267(1/2): 46-63.
- [35] ZHENG Y, ZHAO T A, CHE H Z, et al. A 20-year simulated climatology of global dust aerosol deposition[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557-558: 861-868.
- [36] XU L S, MU G J, HE J X, et al. Variability of dust mass concentrations and deposition rates under different weather conditions in Cele Oasis, southern Tarim Basin[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(8): 639.
- [37] TIAN Y, PAN X, WANG Z, et al. Transport patterns, size distributions, and depolarization characteristics of dust particles in East Asia in spring 2018[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(16): JD031752.
- [38] TIAN Y, WANG Z, PAN X L, et al. Influence of the morphological change in natural Asian dust during transport: A modeling study for a typical dust event over northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 139791.
- [39] PRUPPACHER H R, KLETT J D, WANG P K. *Microphysics of clouds and precipitation* [M]. Dordrecht: Springer, 1998.
- [40] VOLKEN M, SCHUMANN T. A critical review of below-cloud aerosol scavenging results on Mt. Rigi[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, 68(1): 15-28.
- [41] APSIMON H, SIMMS K, COLLIER C. The use of weather radar in assessing deposition of radioactivity from chernobyl across England and Wales[J]. *Atmospheric Environment*, 1988, 22(9): 1895-1900.
- [42] PUDYKIEWICZ J. Simulation of the Chernobyl dispersion with a 3-D hemispheric tracer model[J]. *Tellus B*, 1989, 41B(4): 391-412.
- [43] TEGEN I, FUNG I. Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100(D9): 18707-18726.
- [44] WU C Y, WANG J, CIAIS P, et al. Widespread decline in winds delayed autumn foliar senescence over high latitudes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(16): e2015821118.
- [45] CHAPPELL A, WEBB N P, HENNEN M, et al. Satellites reveal Earth's seasonally shifting dust emission sources[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 883: 163452.
- [46] SHAHEEN A, WU R, ALDABASH M. Long-term AOD trend assessment over the Eastern Mediterranean region: A comparative study including a new merged aerosol product[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, 238: 117736.
- [47] BERHANE S A, ALTHAF P, KUMAR K R, et al. A comprehensive analysis of AOD and its species from reanalysis data over the Middle East and North Africa regions: Evaluation of model performance using machine learning techniques[J]. *Earth Systems and Environment*, 2024, 2024: 1-26.
- [48] ZHANG T, LIU L Y, SHI P S, et al. The decline in desert drift potential weakens aeolian dust emission[J]. *Global*

- and Planetary Change, 2025, 252: 104844.
- [49] SOKOLIK I N, WINKER D, BERGAMETTI G, et al. Introduction to special section: Outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106 (D16): 18015-18027.
- [50] DEMOTT P J, SASSEN K, POELLOT M R, et al. African dust aerosols as atmospheric ice nuclei [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(14): 1-4.
- [51] AOKI T, MOTOYOSHI H, KODAMA Y, et al. Atmospheric aerosol deposition on snow surfaces and its effect on albedo [J]. *Sola*, 2006, 2: 13-16.
- [52] DONG Z W, KANG S C, QIN D H, et al. Variability in individual particle structure and mixing states between the glacier-snowpack and atmosphere in the northeastern Tibetan Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(12): 3877-3890.
- [53] SHI Z G, XIE X N, REN X, et al. Radiative effect of mineral dust on East Asian summer monsoon during the last glacial maximum: Role of snow-albedo feedback [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(19): 10901-10909.
- [54] SKILES S M, PAINTER T H. Assessment of radiative forcing by light-absorbing particles in snow from in situ observations with radiative transfer modeling [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2018, 19(8): 1397-1409.
- [55] DI MAURO B, GARZONIO R, ROSSINI M, et al. Saharan dust events in the European alps: Role in snowmelt and geochemical characterization [J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(4): 1147-1165.
- [56] SARANGI C, QIAN Y, RITTGER K, et al. Impact of light-absorbing particles on snow albedo darkening and associated radiative forcing over high-mountain Asia: High-resolution WRF-Chem modeling and new satellite observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(10): 7105-7128.
- [57] LIN C, WANG Z, ZHU J. An ensemble kalman filter for severe dust storm data assimilation over China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(11): 2975-2983.
- [58] KHADE V M, HANSEN J A, REID J S, et al. Ensemble filter based estimation of spatially distributed parameters in a mesoscale dust model: Experiments with simulated and real data [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(6): 3481-3500.
- [59] RUBIN J I, REID J S, HANSEN J A, et al. Development of the ensemble navy aerosol analysis prediction system (ENAAAPS) and its application of the data assimilation research testbed (DART) in support of aerosol forecasting [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(6): 3927-3951.
- [60] DI TOMASO E, SCHUTGENS N A, JORBA O, et al. Assimilation of MODIS dark target and deep blue observations in the dust aerosol component of NMMB-MONARCH version 1.0 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(3): 1107-1129.
- [61] DAI T, CHENG Y M, GOTO D, et al. Inverting the east Asian dust emission fluxes using the ensemble Kalman smoother and himawari-8 AODs: A case study with WRF-Chem v3. 5. 1 [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(9): 543.
- [62] 何敏, 许秋月, 夏允, 等. 植物磷获取机制及其对全球变化的响应 [J]. *植物生态学报*, 2023, 47(3): 291-305.
- [63] DU H Q, WANG T, XUE X, et al. Modelling of sand/dust emission in Northern China from 2001 to 2014 [J]. *Geoderma*, 2018, 330: 162-176.
- [64] DU H Q, LI S, WEBB N P, et al. Soil Organic Carbon (SOC) enrichment in aeolian sediments and SOC loss by dust emission in the desert steppe, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 798: 149189.
- [65] SONG H Q, ZHANG K S, PIAO S L, et al. Soil organic carbon and nutrient losses resulted from spring dust emissions in Northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 213: 585-596.
- [66] PROSPERO J M, GLACCUM R A, NEES R T. Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America [J]. *Nature*, 1981, 289(5798): 570-572.
- [67] BARKLEY A E, POURMAND A, LONGMAN J, et al. Interannual variability in the source location of North Afri-

- can dust transported to the Amazon[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(10):e2021GL097344.
- [68] KLOSE M, SHAO Y. A numerical study on dust devils with implications to global dust budget estimates[J]. *Aeolian Research*, 2016, 22:47-58.
- [69] TORMENA C D, MARCHEAFAVE G G, PAULI E D, et al. Potential biomonitoring of atmospheric carbon dioxide in *Coffea arabica* leaves using near-infrared spectroscopy and partial least squares discriminant analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26:30356-30364.
- [70] MATTEI F, BUONOCORE E, FRANZESE P, et al. Global assessment of marine phytoplankton primary production: Integrating machine learning and environmental accounting models [J]. *Ecological Modelling*, 2021, 451:109578.
- [71] MARTÍNEZ-GARCIA A, ROSELL-MELÉ A, GEIBERT W, et al. Links between iron supply, marine productivity, sea surface temperature, and CO₂ over the last 1.1 Ma[J]. *Paleoceanography*, 2009, 24(1):PA001657.
- [72] VALLELONGA P, BARBANTE C, COZZI G, et al. Iron fluxes to Talos Dome, Antarctica, over the past 200 kyr [J]. *Climate of the Past*, 2013, 9(2):597-604.
- [73] MARINOV I, FOLLOWS M, GNANADESIKAN A, et al. How does ocean biology affect atmospheric pCO₂? Theory and models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C7):C07032.
- [74] KAYETHA V K, KUMAR J S, PRASAD A K, et al. Effect of dust storm on ocean color and snow parameters[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2007, 35:1-9.
- [75] RAMOS A G, CUEVAS E, PÉREZ C, et al. Saharan dust-induced chlorophyll blooms in the northwest African Upwelling[C]//*Proceedings of the Remote Sensing of Inland*. Noumea, New Caledonia: SPIE, 2008:804880.
- [76] YUAN W, ZHANG J. High correlations between Asian dust events and biological productivity in the western North Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(7):GL025174.
- [77] MACKIE D S, BOYD P W, MCTAINSH G H, et al. Biogeochemistry of iron in Australian dust: From eolian uplift to marine uptake[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2008, 9(3):GC001813.
- [78] O'DONNELL D R, BEERY S M, LITCHMAN E. Temperature-dependent evolution of cell morphology and carbon and nutrient content in a marine diatom[J]. *Limnology and Oceanography*, 2021, 66(12):4334-4346.
- [79] SHAO Y P, LU H. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D17):22437-22443.
- [80] RAUPACH M. Dry deposition of gases and particles to vegetation[J]. *Clean Air: Journal of the Clean Air Society of Australia and New Zealand*, 1993, 27(4):200-203.
- [81] FÉCAN F, MARTICORENA B, BERGAMETTI G. Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas[J]. *Annales Geophysicae*, 1999, 17(1):149-157.
- [82] NICKLING W G. The stabilizing role of bonding agents on the entrainment of sediment by wind[J]. *Sedimentology*, 1984, 31(1):111-117.
- [83] NICKLING W G, ECCLESTONE M. The effects of soluble salts on the threshold shear velocity of fine sand[J]. *Sedimentology*, 1981, 28(4):505-510.
- [84] NIELD J M, NEUMAN C M, O'BRIEN P, et al. Evaporative sodium salt crust development and its wind tunnel derived transport dynamics under variable climatic conditions[J]. *Aeolian Research*, 2016, 23:51-62.
- [85] SINGER A, ZOBECK T, POBEREZSKY L, et al. The PM₁₀ and PM_{2.5} dust generation potential of soils/sediments in the Southern Aral Sea Basin, Uzbekistan[J]. *Journal of Arid Environments*, 2003, 54(4):705-728.
- [86] ELTAHAN M, ALAHMADI S. Numerical dust storm simulation using modified geographical domain and data assimilation: 3DVAR and 4DVAR(WRF-Chem/WRFDA)[J]. *IEEE Access*, 2019, 7:128980-128989.
- [87] ALLEN A, MARKOU S, TEBBUTT W, et al. End-to-end data-driven weather prediction[J]. *Nature*, 2025, 641

(8065):1172-1179.

- [88] MOJTABA D, KAZEM N, SAEID M, et al. Identification of dust sources in a dust hot-spot area in Iran using multi-spectral sentinel 2 data and deep learning artificial intelligence machine [J]. *Geocarto International*, 2022, 37 (25):10950-10969.
- [89] AI MURAYZIQ T S, KAPETANAKIS S, PETRIDIS M. Intelligent signal processing for dust storm prediction using ensemble case-based reasoning [C]//IEEE 29th International Conference on Tools with Artificial Intelligence. Boston, MA, USA:IEEE, 2017:1267-1271. DOI:10.1109/ICTAI.2017.00191.

(责任编辑 张 庆)

Recent Progress and Review on Dust Activity and Its Environmental Effects

LIU Dongwei¹, YAO Shunyu¹, HUANG Shaopu¹, GUO Yanhong¹, XU Lishuai²

(1. *School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China;*

2. *College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030031, China*)

Abstract: This study provides a comprehensive review and assessment of dust activity and its environmental impacts, examining the sources, emission mechanisms, transport, and deposition processes of dust, as well as systematically analyzing the effects of dust on the climate and ecosystems. It is found that arid regions worldwide, particularly in North Africa, the Middle East, and East Asia are the primary sources of dust. The emission of dust is a complex process influenced by various factors, including wind strength, vegetation, soil moisture, salt content, and crust formation. However, the impact of salt content and crust on dust emission still lacks reliable parametrization schemes. Cold fronts and cyclones are identified as the main meteorological conditions for the occurrence of dust storms. Dust impacts the climate system by altering radiative forcing and surface albedo, among other factors. Additionally, the transport of nutrients during dust activity and their contribution to biological productivity are crucial components of the global carbon cycle. Furthermore, the study emphasizes the importance of long-term soil erosion responses to climate change and predicting future dust activity trends, which depend on the coupled research of climate, biological, and aeolian processes. The application of advanced technologies such as artificial intelligence, big data, and 4D assimilation is expected to enhance the accuracy and predictive capabilities of dust models, thereby improving our understanding of the role of dust activity in global environmental change.

Key words: dust activity; climate change; environmental effect; dust model; carbon cycle