

王仁德,李庆,常春平,等.土壤风蚀中粉尘释放问题的研究进展[J].中国沙漠,2023,43(2):85-103.

# 土壤风蚀中粉尘释放问题的研究进展

王仁德<sup>1</sup>,李庆<sup>1</sup>,常春平<sup>2</sup>,郭中领<sup>2</sup>,李继峰<sup>2</sup>,邹学勇<sup>3</sup>,  
张春来<sup>3</sup>,苑依笑<sup>3</sup>,刘颖<sup>3</sup>,周娜<sup>4</sup>

(1.河北省科学院地理科学研究所/河北省地理信息开发应用工程技术研究中心,河北石家庄 050011; 2.河北师范大学资源与环境科学学院/河北省环境演变与生态建设省级重点实验室,河北石家庄 050024; 3.北京师范大学地理科学学部/地表过程与资源生态国家重点实验室/防沙治沙教育部工程研究中心,北京 100875; 4.河北经贸大学管理科学与工程学院,河北石家庄 050000)

**摘要:**土壤风蚀中的粉尘释放问题是国际风沙研究的核心课题之一,近年来研究进展很快,但对研究进展的介绍还不够系统和全面。基于此,对国内外土壤风蚀中粉尘释放问题的研究历史进行了较为全面的梳理,首次进行了阶段划分,提炼了各阶段的主要研究成果,介绍了当前对粉尘释放机制的一些新认识;在对粉尘释放模型重新分类的基础上,介绍了各类模型的建模过程、优缺点及其在全球粉尘模型和区域粉尘模型中的应用。本文还提出了当前粉尘释放研究的一些热点和难点问题,希望能为相关学者开展该领域研究工作提供一定的参考。

**关键词:**土壤风蚀;粉尘释放;研究历史;释尘机制;粉尘模型

**文章编号:** 1000-694X(2023)02-085-19

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00094

**中图分类号:** P931.3

**文献标志码:** A

## 0 绪论

土壤风蚀过程中产生的风蚀物按运动方式,可分为蠕移、跃移和悬移3种颗粒物类型<sup>[1]</sup>。其中,粒径较小、可在空中远距离搬运的悬移颗粒被称为粉尘<sup>[2]</sup>。目前学术界对于粉尘粒径并没有明确的界定。不同学者根据各自研究目的,分别将进入大气的粒径<10、<15、<20、<30、<50、<63、<70  $\mu\text{m}$ 的颗粒物定义为粉尘<sup>[3-9]</sup>。粒径20~70  $\mu\text{m}$ 的颗粒可在空中停留数小时,粒径<20  $\mu\text{m}$ 的极细颗粒可在空中停留数天甚至数周<sup>[10]</sup>,因此,沙尘暴研究中将粉尘粒径确定为<70  $\mu\text{m}$ ,全球粉尘循环研究中将粉尘粒径确定为<20  $\mu\text{m}$ 是较为合适的。但在实际工作中,由于现有的粉尘测量仪器主要是从大气环境监测工作发展而来,而释放粉尘对大气环境的影响又是大家关注的重点,因此,用于反映大气颗粒物污染程度的指标,粒径<10  $\mu\text{m}$ 的颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )成为当前国内外粉尘研究的主要对象。

与只在近地表运动的跃移颗粒不同,粉尘颗粒

搬运距离大,环境影响范围广。粉尘的环境影响主要反映在3个空间尺度上。在局地尺度,由于土壤养分主要存在于细颗粒中,干旱、半干旱地区风蚀造成的大量粉尘流失使得土壤更加贫瘠,加剧土地荒漠化<sup>[11-12]</sup>。在区域尺度,风蚀事件中粉尘的集中排放造成沙尘暴的发生,污染大气环境,危害人体健康<sup>[13-15]</sup>。在全球尺度,自然地表现释放的粉尘是大气气溶胶的主要来源之一,占全部大气气溶胶的20%~50%<sup>[16]</sup>。这些粉尘气溶胶通过吸收和散射长波及短波辐射,直接改变大气辐射收支平衡,进而引起全球气候系统的调整与变化<sup>[17-18]</sup>;通过吸收太阳辐射,改变大气稳定性,从而影响云的形成<sup>[19]</sup>;作为云的凝结核和冰核,间接改变云的性质和降水量<sup>[20-21]</sup>(图1);长距离输送注入海洋的粉尘则影响海洋生物量和海洋生物地球化学过程<sup>[22]</sup>。总之,土壤风蚀中释放的粉尘在大气物理和大气化学过程以及全球生态系统中扮演着重要角色,是当今国际社会认识地球-气候系统变化规律的核心课题之一<sup>[23-24]</sup>。

为了定量评价粉尘的气候与生态环境效应,提

收稿日期:2022-07-18; 改回日期:2022-08-10

资助项目:国家自然科学基金项目(42077069)

作者简介:王仁德(1980—),男,河北黄骅人,博士,研究员,主要从事土壤风蚀与粉尘释放方面的研究。E-mail: wangrende10@163.com

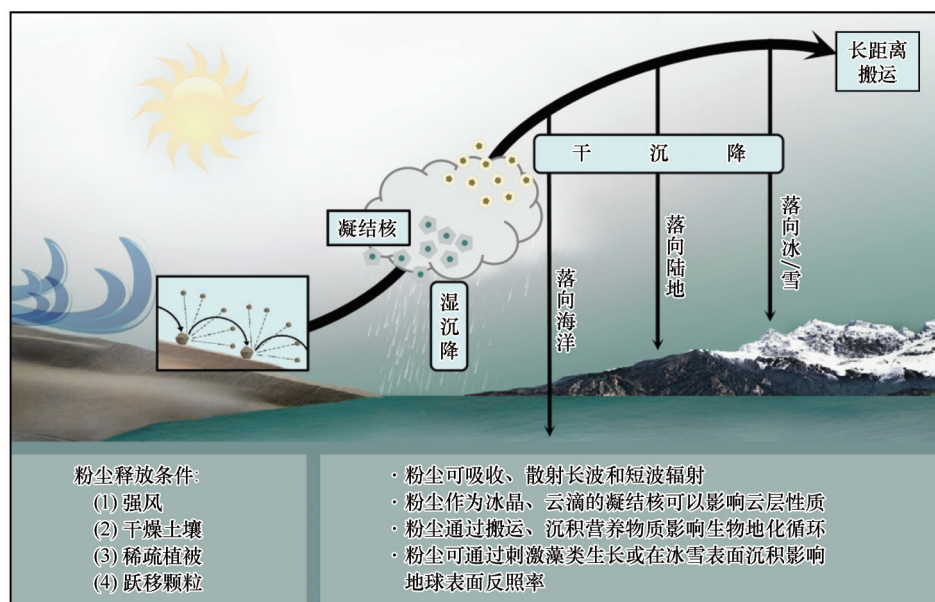


图1 粉尘与气候和生物地球化学之间相互作用示意图<sup>[21]</sup>

Fig.1 Schematic of interactions between dust and climate and biogeochemistry<sup>[21]</sup>

高风沙灾害的预测预报水平,迫切需要加强对地表粉尘释放、传输和沉降规律的认识。其中粉尘释放研究是粉尘传输和沉降研究的重要基础,近年来非常受关注。国内已有文章就粉尘释放问题的某些方面,如粉尘释放机制<sup>[24]</sup>、粉尘释放模型<sup>[25]</sup>、粉尘释放野外观测<sup>[26]</sup>等进行介绍,但还不够系统和全面。另外,近年来国际上该问题的研究发展较快,一些新理论和新成果需要跟进和总结。基于此,本文对国内外土壤风蚀中粉尘释放问题的研究进展进行梳理,归纳粉尘释放问题的研究历史,介绍当前对粉尘释放机制的新认识,比较各类粉尘释放模型的优缺点,指出目前粉尘释放研究中的一些热点和难点问题,以期为中国土壤风蚀中粉尘释放问题研究的进步提供参考。

## 1 粉尘释放问题的研究历史

尽管早在2000年前就有粉尘事件的历史记录<sup>[27]</sup>,但对粉尘的科学研究大约只有200多年的历史<sup>[25]</sup>,对粉尘释放问题的研究则是在土壤风蚀研究基础上逐步发展起来的,只有不到百年的时间。目前,粉尘释放已成为土壤风蚀研究的一个重要分支,并逐步建立起自己的理论和方法体系。为了更好地把握粉尘释放问题研究的历史发展脉络,综合考虑研究目的、研究内容和研究方法等因素,本文对其研究历史进行了阶段划分,认为大体可分为3个阶段。

20世纪30—60年代为与风蚀混合研究阶段。这一时期尽管尚未将粉尘释放作为一个独立的地表过程进行专门研究,但Bagnold等<sup>[1]</sup>在风沙物理领域所做的开创性工作和Chepil<sup>[28-29]</sup>对农田风蚀进行的系统研究,为粉尘释放问题研究奠定了基础和理论框架。这一时期取得与粉尘释放相关的重要研究成果包括:①通过对风蚀颗粒运动方式的划分,明确了粉尘释放物理机制和环境影响的特殊性<sup>[1]</sup>;②在土壤风蚀可蚀性研究中,发现由于颗粒间的黏结力较大,粉尘的临界起沙风速高于部分跃移颗粒<sup>[1,28-29]</sup>;③这一时期建立的一些输沙通量方程<sup>[1,30]</sup>,成为当前若干粉尘释放模型的重要组成模块;④确定土壤养分主要富集于细颗粒中,粉尘释放造成的土壤细颗粒损失是土壤结构变坏、肥力下降的主因<sup>[31]</sup>;⑤对影响土壤风蚀的一系列因素展开了全面研究<sup>[32]</sup>,取得的一些认识和建立的部分定量关系同样适用于粉尘释放过程。

20世纪70—80年代为单独实验研究阶段。这一时期随着粉尘测量技术的进步和对沙尘造成大气污染问题的日益重视,开展了较多专门针对自然地表粉尘释放过程的实验研究,推动了粉尘释放研究的独立发展,其中的代表人物是美国学者Gillette。这一时期取得的主要研究成果包括:①通过野外观测和室内风洞实验,较系统地分析了粉尘释放通量与风速及土壤质地的关系,确定粉尘释放通量与风速的 $n$ 次方成正比,其中的 $n$ 为2~5<sup>[33-37]</sup>;②通

过野外实验研究,提出粉尘释放的可能机制是跃移颗粒的冲击作用,这是最早关于粉尘释放机制的认识<sup>[38-39]</sup>;③为了表征跃移颗粒冲击作用强度与粉尘释放强度的关系,提出跃移冲击效率的概念,并认为其与土壤质地、矿物组成、风速和土壤湿度等因素有关<sup>[33]</sup>。④利用湍流动量输送原理,提出根据观测粉尘浓度梯度和湍流通量计算粉尘释放通量的方法,该方法是迄今粉尘释放野外观测最主要的手段<sup>[40]</sup>;⑤Gillette等<sup>[41]</sup>在实验的基础上,结合他人的观测数据,提出了第一个经验性的粉尘释放模型。

20世纪90年代至今为物理机制与模型研究阶段。这一时期随着风洞实验手段的日臻成熟,通过控制性实验深入探究粉尘释放物理机制成为可能,而对生物地球化学循环及全球气候变化问题的关注,则极大地促进了粉尘释放模型的开发与应用。这一时期是粉尘释放问题研究的高速发展期,以Shao为代表的一批科学家做出了重要贡献,取得的主要研究成果包括:①通过一系列风洞实验和理论推导,逐步发展和完善了粉尘释放的跃移冲击理论<sup>[10,42-43]</sup>;②在对粉尘释放物理机制认识的基础上,开发出若干理论性或半经验性的粉尘释放模型<sup>[44-48]</sup>;③应用已建立的粉尘释放模型,结合气象、遥感及实测数据,广泛开展了大区域尺度的粉尘释放量估算工作<sup>[49-52]</sup>;④将粉尘释放模型与大气循环模型、大气污染模型相结合,发展出一系列的全球粉尘循环模型及沙尘预报模型,成为研究粉尘环境影响的重要手段<sup>[53-56]</sup>;⑤重视对不同地类粉尘释放特征差异性的认识,开展了较多针对沙漠、戈壁、农田、干湖盆等重要尘源的相关研究工作<sup>[9,57-61]</sup>。

## 2 对粉尘释放机制的认识

土壤风蚀及粉尘释放是近地表气流与土壤界面相互作用的连续动力学过程,受到风力侵蚀力、粗糙干扰力和土壤抗蚀力的共同作用<sup>[62]</sup>。其中,土壤抗蚀力主要由土壤颗粒的重力和相互间的内聚力决定<sup>[63-64]</sup>。粒径70~100  $\mu\text{m}$ 的土壤颗粒具有最小的重力与内聚力组合,临界起沙风速最低。随着土壤粒径的进一步增加,临界起沙风速因土壤颗粒重力的增加而增大;随着土壤粒径的进一步减小,临界起沙风速因土壤颗粒间内聚力的增加而增大<sup>[1,65-67]</sup>。因此,当风速增大到一定程度后,粒径70~100  $\mu\text{m}$ 的土壤颗粒首先被搬运,并在近地表做跃移运动。这些跃移颗粒回落地面,以一定的角度撞击

地表,产生较强的冲击作用<sup>[68-71]</sup>。这种冲击作用一方面使数量更大、粒径范围更广的土壤颗粒脱离地表而开始运移,另一方面使部分团聚体破碎而释放粉尘。这一过程中产生的粉尘一部分来源于跃移颗粒撞击地表导致的土壤表面粉尘的释放,另一部分来源于跃移团聚体自身的破碎和粉尘释放,分别被称为粉尘释放的跃移冲击机制和团聚体破碎机制,二者共同构成了粉尘释放的跃移冲击理论(Saltation bombardment theory)<sup>[42,47,72]</sup>。跃移颗粒占全部土壤风蚀物的50%~90%<sup>[1,73]</sup>。目前普遍认为,跃移颗粒对地表的冲击作用是粉尘释放的主要机制,这得到大量验证<sup>[3,10,34,39,42-43,68,74-78]</sup>。

粉尘可直接通过空气动力学抬升而从地表扬起,但由于尘粒间的内聚力较大,通常情况下,土壤表面的粉尘或者形成团聚体,或者附着在大颗粒表面,自由存在的数量较少,因此,通过空气动力学抬升机制释放的粉尘占比较小<sup>[42,74,79]</sup>。Shao<sup>[10]</sup>总结已有研究成果,认为粉尘释放机制包括空气动力学抬升、跃移颗粒冲击和团聚体破碎3种形式,以后两种为主(图2)。但近年来的一些研究表明,空气动力学抬升是无结皮细土<sup>[80]</sup>、黏质农田土<sup>[81]</sup>、沉积黄土<sup>[82]</sup>等土壤表面粉尘释放的主要机制。Kok<sup>[48]</sup>通过对比团聚体破碎机制与脆性材料破碎过程,提出粉尘释放的脆性破碎理论(brittle fragmentation theory),认为对于团聚体发育的土壤,粉尘释放主要产生于团聚体的脆性破碎过程。可见,不同性质土壤表面的主导粉尘释放机制可能是不同的<sup>[9]</sup>。对于松散沙质土壤,粉尘释放机制主要是沙粒冲击引起的土壤表面粉尘的分离和释放<sup>[83-84]</sup>;对于团聚体发育

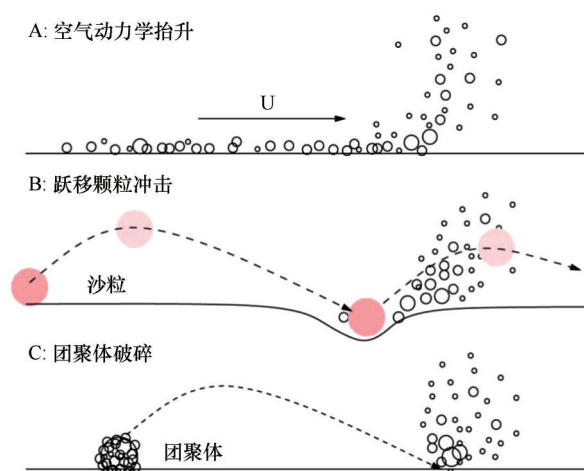


图2 土壤风蚀中的粉尘释放机制<sup>[10]</sup>

Fig.2 Mechanisms for dust emission<sup>[10]</sup>



的土壤,粉尘释放机制主要是跃移颗粒冲击导致的团聚体破碎<sup>[48,85]</sup>;对于跃移颗粒供应受限的土壤,粉尘释放机制主要是空气动力学抬升<sup>[8,78,86-87]</sup>。自然界的大多数土壤,既包含引发冲击机制的沙粒,也包含引发破碎机制的团聚体和空气动力学抬升机制的尘粒,因此,上述3种粉尘释放机制都在不同程度地发挥作用。对不同性质土壤表面粉尘释放机制的认识仍是目前国内外同行关注的重点。

3 粉尘释放模型

3.1 粉尘释放模型的分类

粉尘环境影响的广泛性使得大区域尺度的粉尘释放预测预报成为迫切需求,而模型模拟则是解决这一问题最有效手段。因此,国内外学者根据各自研究目的、工作基础及建模思路的不同,开发出多种形式的粉尘释放模型。通过对这些模型的梳理,借鉴已有的模型分类成果<sup>[88]</sup>,本文认为可将现

有的粉尘释放模型分为基于直接观测的模型、基于物理机制的模型和基于风蚀模型的模型3类。

3.1.1 基于直接观测的粉尘释放模型

这类模型是基于对粉尘释放通量及其影响因素直接观测得出的模型,其中的代表是Gillette等<sup>[41]</sup>建立的模型(简称G-P模型)。20世纪70年代,Gillette<sup>[3,89]</sup>开展了迄今为止最为全面和综合的粉尘释放野外观测工作,检验了一系列农田土壤表面粉尘释放通量与摩阻风速的关系,发现尽管粉尘释放通量与摩阻风速呈幂函数关系,但结果的离散性较大,幂指数在2~5变化。基于实验数据<sup>[89-91]</sup>和Owen的理论<sup>[41]</sup>,将粉尘释放通量表达为摩阻风速的4次幂函数,并建立了关系方程(表1)。G-P模型由风洞实验和外场观测结果证实,输入参数少,形式简单,应用方便,至今仍被应用在许多全球粉尘循环模型的粉尘释放模块中<sup>[25]</sup>。但该模型缺乏明确的物理含义,经验系数需根据土壤和地表性质的现有知识来经验确定,因此属于经验模型<sup>[25-26]</sup>。

表 1 粉尘释放模型汇总

Table 1 Summary of dust emission models

模型类型	模型简称	模型表达式	参数含义
经验模型	G-P模型	$F_d = C \cdot u_*^4 (1 - u_{*t}/u_*) \quad u_* \geq u_{*t}$	$F_d$ , 粉尘释放通量; $u_*$ , 摩阻风速; $u_{*t}$ , 临界摩阻风速; $C$ , 跃移冲击作用强度
物理机制模型	M-B模型	$F_d = 0.01 Q_s \exp(0.308 \eta_c - 13.82)$	$Q_s$ , 土壤中黏粒含量; $F_{d,i}$ , 粒径为 $d_i$ 的粉尘释放通量; $d_i$ , 3 个对数正态分布群体粉尘粒子的中值粒径; $e_i$ , 3 个对数正态分布群体粉尘粒子结合能; $\rho_p$ , 土壤颗粒密度; $\beta$ , 动能通量与水平跃移通量的转化系数; $P_i(D_p)$ , 跃移颗粒动能在 3 个对数正态分布群体间的分配比例; $N_i$ , 粒径为 $d_i$ 的粉尘个数通量; $\alpha$ , 跃移冲击效率对粉尘粒径和跃移颗粒粒径依赖性的经验方程; $f$ , 从凹坑移除颗粒中粉尘所占的比例; $\rho_b$ 土壤体积密度; $p$ , 土壤塑性压力的水平分量; $\eta_b$ , 最大分散状况下粒径为 $d_i$ 的粉尘在土壤中占比; $\gamma$ , 风蚀物粒径分布中最小分散土壤粒径分布所占的权重; $\sigma_m$ , 跃移颗粒撞击地表产生凹坑中土壤质量与跃移撞击颗粒质量之比; $d_1$ 和 $d_2$ 分别为跃移风蚀物粒度分布的下限和上限; $C$ 、 $C_\alpha$ 、 $C_\beta$ 、 $C_\gamma$ , 经验系数; $f_{bare}$ , 地表裸露土壤的占比; $f_{clay}$ , 土壤中黏粒的含量; $u_{*st}$ , 标准临界摩阻风速; $\theta$ , 团聚体破碎指数; $DR$ , 粉尘在悬移颗粒物中的占比; $SR$ , 风蚀物中悬移与跃移颗粒物含量之比; $CS$ , 跃移颗粒搬运参数。
	DPM模型	$F_{d,i} = (\pi \rho_p d_i^3 / 6) N_i$	
		$N_i = \frac{\beta}{e_i} / \int_{D_p=0}^{\infty} P_i(D_p) dQ_s(D_p)$	
	WEAM模型	$F_d = \alpha Q_s u_{*t,d}^2$	
	L-S模型	$F_d = C_\alpha g f (\rho_b / 2p) \left( 0.24 + C_\beta u_* \sqrt{\rho_p / p} \right) Q_s$	
	Shao04模型	$F_{d,i}(d_s) = C_\gamma \eta_b (1 - \gamma) (1 + \sigma_m) g Q_s / u_*^2$ ; $F_{d,i} = \int_{d_1}^{d_2} F_{d,i}(d_s) p_s(d) \delta_d$ ; $F_d = \sum_{i=1}^I F(d_i)$	
	Kok模型	$F_d = C_d f_{bare} f_{clay} \frac{\rho_a (u_*^2 - u_{*t}^2)}{u_{*st}} \left( \frac{u_*}{u_{*t}} \right)^\theta$	
基于风蚀模型的模型	WEPS模型	$F_d = DR \cdot SR \cdot CS \cdot u_*^2 (u_* - u_{*t})$	

3.1.2 基于物理机制的粉尘释放模型

1993年,Shao等<sup>[42]</sup>通过经典的风洞实验印证了粉尘释放的跃移颗粒冲击观点,并提出一定土壤表面的粉尘释放通量与水平跃移通量呈正比,比值与风速无关。在此基础上,结合后续实验,一些基于物理机制的粉尘释放模型被先后建立<sup>[44-48]</sup>。这些模

型为了反映跃移颗粒冲击这一粉尘释放的中间机制,均由跃移冲击强度模块和跃移冲击效率模块两部分构成。因此,在构建基于物理机制的粉尘释放模型时,如何准确表达跃移冲击效率和水平跃移通量就成为学者们努力的主要方向。

1995年,Marticorena等<sup>[44,92]</sup>提出的模型M-B模

型是第一个具有物理意义的粉尘释放模型,其跃移冲击强度模块是在 White<sup>[93]</sup>提出的跃移通量方程基础上,考虑沙质土壤表面土壤粒度组成及地表覆盖对临界起沙风速的影响,加入土壤粒级参数和地表粗糙度参数建立的。M-B模型的跃移冲击效率模块借鉴了 Shao 等<sup>[42]</sup>通过风洞实验得出的一定土壤表面粉尘释放通量与水平跃移通量之比为只与土壤性质有关的定值这一结论。根据 Gillette<sup>[38]</sup>野外观测得到的不同质地土壤表面的粉尘通量与跃移通量数据,拟合得出跃移冲击效率(粉尘通量与跃移通量之比)与土壤中黏粒含量呈指数函数关系,并建立经验性的关系表达(表1)。M-B模型初步反映了粉尘释放的跃移冲击机制,其跃移冲击强度模块考虑了土壤粒度组成、地表粗糙度等因素对临界起沙风速的影响,提高了模型预测精度。该模型适用于疏松、沙尘供给充足的土壤,不能准确模拟沙粒供给有限的情况,不能反映地表土壤变化的影响,亦不能得到释放粉尘的粒度分布特征。另外,该模型的跃移冲击效率模块是根据野外实测结果建立的经验函数,未考虑实际的物理过程,因此,该模型本质上是一个半物理机制的粉尘释放模型。

2001年 Alfaro 等<sup>[46]</sup>提出的 Dust Production Model 模型(简称 DPM 模型)是在 M-B 模型基础上加以改进形成的,其跃移冲击强度模块与 M-B 模型完全相同。同时,为了克服 M-B 模型跃移冲击效率模块为经验函数的不足,Alfaro 等<sup>[43,68]</sup>通过两次风洞吹沙实验对粉尘释放的物理机制做进一步研究,发现粉尘粒径分布可用中值粒径分别为 1.5、6.7、14.2  $\mu\text{m}$  的 3 个对数正态群体表示。粉尘粒径越细,相互之间的结合能越大。随着摩阻风速增加,跃移颗粒动能增加,克服粉尘之间结合能的能力增强,从而使更多细粉尘被释放出来,中值粒径较小的粉尘群体比例增加。由此得出,粉尘粒径分布和跃移冲击效率主要取决于粉尘颗粒之间的结合能和跃移颗粒动能<sup>[25]</sup>。在假定跃移颗粒动能全部用来克服粉尘颗粒之间结合能的情况下,模拟 3 个对数正态群体结合能的大小,并根据粉尘粒径分布和克服结合能所消耗的跃移颗粒动能大小,建立 DPM 模型主要关系方程(表1)。DPM 模型是一个基于能量分布的粉尘释放模型,具有明确的物理机制,较好地描述了表土微团粒粒度分布、空气动力学粗糙度、粉尘颗粒结合能和跃移过程对粉尘释放的影响,而且模型输出结果中包含了粉尘粒径分布的内容,这是相

较于 M-B 模型的一个重要进步<sup>[24,26]</sup>。但是,该模型跃移冲击效率确定所依赖的粉尘颗粒间的结合能,目前还不能完全从理论上推导或者实验中直接测定,获取比较困难,这是影响该模型推广应用的一个主要问题。

Shao 等<sup>[42]</sup>在通过风洞实验证实粉尘释放的主要机制是跃移颗粒的冲击、磨蚀和溅射而非湍流抬升的基础上,开始着手建立具有物理意义的粉尘释放模型。1996 年,考虑跃移颗粒在与地面碰撞时,跃移颗粒动能与粉尘颗粒结合能之间的平衡,Shao 等<sup>[45]</sup>建立了基于能量过程的粉尘释放模型(Wind Erosion Assessment Model,简称 WEAM 模型,表1)。WEAM 模型早于 DPM 模型考虑了跃移颗粒动能与粉尘颗粒结合能之间的平衡关系,是第一个具有完全物理意义的粉尘释放模型。该模型的跃移冲击强度模块采用了 Owen 跃移通量方程<sup>[94]</sup>,各粒级跃移颗粒的冲击作用假定为线性的组合,不考虑相互间的影响。该模型的问题,一是反映跃移冲击效率的比例系数方程是基于一小部分理想化的风洞实验得出的;二是不具备对粉尘粒径分布的模拟能力。

与基于能量的粉尘释放模型相对应,结合 Rice 等<sup>[95-96]</sup>的风洞实验,Lu 等<sup>[97]</sup>于 1999 年提出基于跃移颗粒冲击地表产生凹坑体积的粉尘释放模型(简称 L-S 模型)。该模型的跃移冲击强度模块同样采用了 Owen 跃移通量方程。粉尘释放机制被认为主要是跃移颗粒的冲击作用,根据跃移颗粒冲击地面时所产生凹坑体积的大小来估算粉尘释放量,并建立表达方程(表1)。该模型最大的特色是跳出了从能量平衡角度对粉尘释放机制进行表达的思路,通过跃移颗粒撞击地表所产生凹坑体积的大小来反映粉尘释放强度,更加直观。另一特色是该模型反映了土壤性质对粉尘释放通量( $F_d$ )与摩阻风速( $u_*$ )关系的影响,当土壤坚硬时, $F_d \propto u_*^3$ ;当土壤柔软时, $F_d \propto u_*^4$ 。该模型的不足:一是没有考虑空气动力学抬升和团聚体破碎机制的作用;二是模型中的  $p$  值小尺度可测量,大尺度则难以获取;三是没有考虑地表弹力的影响,不适用于结皮发育的土壤表面;四是该模型亦不具备对粉尘粒径分布的模拟能力。

2001 年,Shao<sup>[72]</sup>对其基于能量过程和跃移冲击凹坑体积的模型进行整合,充分考虑 3 种尘粒释放机制和风蚀起沙过程中地表土壤粒子尺度分布,提出了一个新的模型,并于 2004 年对模型进行了简化



(简称 Shao04 模型)<sup>[47]</sup>。Shao04 模型较为全面地分析了粉尘释放的力学机制,描述了跃移颗粒冲击中粉尘颗粒结合能、跃移产生的弹坑体积和土壤粒度变化与粉尘释放的关系,很好地把风动力条件和土壤性质与粉尘释放联系起来(表1)。该模型考虑了土壤微团粒粒度在粉尘释放前后的变化,具有对粉尘粒径分布的模拟能力,因此是一个比较详细和全面的模型。但涉及的参数较多,某些参数的获取又比较困难,给模型应用带来了一定的不确定性<sup>[25]</sup>。

2011年,Kok<sup>[48]</sup>基于土壤团聚体破碎过程与脆性材料破碎过程的相似性,提出了粉尘释放的脆性破碎理论,认为对于团聚体发育的土壤,粉尘释放主要产生于跃移冲击过程中团聚体的脆性破碎过程。该理论认为脆性破碎产生的粉尘粒径分布遵循幂函数规律,具有“尺度不变性(scale invariant)”,这得到部分野外实测数据的证实<sup>[33,40,77,98]</sup>。以此为基础,Kok等<sup>[99]</sup>于2014年提出了基于脆性破碎理论的粉尘释放模型(简称Kok模型)。该模型在构建时充分考虑了已有模型的优缺点。与经验性的G-P模型和半经验性的M-B模型相比,Kok模型不仅具有明确的理论基础,而且定量描述了团聚体破碎指数和粉尘排放系数与土壤可蚀性变化之间的关系,因此具有更高的模拟精度(表1)。与其他基于物理机制的粉尘释放模型(如DPM模型、WEAM模型、L-S模型、Shao04模型等)相比,该模型的主要输入参数只有摩阻风速和临界摩阻风速,从而极大地降低了模型参数输入的难度。该模型主要适用于团聚体发育的土壤表面,在其他性质土壤表面的适用性还需进一步验证。另外,该模型将粉尘粒径分布表示为不随风速变化的固定值,受到一些研究者的质疑<sup>[100-101]</sup>。

### 3.1.3 基于风蚀模型的粉尘释放模型

粉尘是风蚀物中粒径较细的那一部分。粉尘释放模型构建的另一思路是在目前较成熟的风蚀模型基础上,加入粉尘在风蚀物中的占比参数,估算粉尘释放量。基于在美国西部大平原扎实的野外工作,美国农业部先后开发出Wind Erosion Equation (WEQ)<sup>[102]</sup>、Revised Wind Erosion Equation (RWEQ)<sup>[103]</sup>和Wind Erosion Prediction System (WEPS)<sup>[104]</sup>等风蚀模型。1991年,美国加州空气资源委员会在WEQ模型中加入 $PM_{10}$ 在风蚀量中的占比参数,使其具有对农田地表 $PM_{10}$ 释放量的估算能

力<sup>[105]</sup>。中国学者在京津风沙源治理工程效益评估中<sup>[106]</sup>,以张春来<sup>[107]</sup>提出的农田、草地、沙地风蚀模型为基础,以土壤中粉尘含量作为反映粉尘在风蚀物中含量的指标,计算了京津风沙源区的粉尘释放量。目前应用较多的WEPS模型,是一个基于过程、以天为步长的风蚀模型(表1),包括土壤、农作物、水文、残茬分解、管理、天气和侵蚀7个子模块,其中最关键的侵蚀子模块已经具有对 $PM_{10}$ 释放的预报能力<sup>[104]</sup>。基于风蚀模型构建粉尘释放模型的优点是对风蚀因子考虑较全面,并且各种因子都有标准化的测量方法。问题是现有的风蚀模型多数是基于农田环境构建的<sup>[102-104]</sup>,主要参数的测定也是基于农田环境设计的,因此在推广应用到其他地类时存在一定的局限性。另外,为了应用方便,WEPS模型将 $PM_{10}$ 在悬移颗粒物中的占比和 $PM_{2.5}$ 与 $PM_{10}$ 的比率均设为固定值<sup>[108]</sup>,没有考虑土壤性质和风速等因素对粉尘释放效率及粉尘粒度组成的影响,使其对粉尘释放的预测精度大打折扣。总之,尽管一些风蚀模型通过增加粉尘在风蚀物中的占比参数,具备了对粉尘释放的预报能力,但与专门粉尘释放模型相比,其对粉尘释放机制、粉尘释放效率以及粉尘粒度组成等关键问题的刻画还存在一定的差距。

### 3.1.4 其他粉尘释放模型

在以上介绍的各种原创性粉尘释放模型基础上,一些学者结合自身工作需要,将不同模型的跃移冲击强度模块和跃移冲击效率模块重新组合,构建了新的粉尘释放模型。如Zender等<sup>[109]</sup>提出的DEAD模型使用了White跃移通量方程与M-B模型中跃移冲击效率模块的组合;Du等<sup>[110]</sup>在估算中国北方粉尘释放量时使用的模型,采用了Shao综合风蚀模拟系统(IWEMS)中的跃移冲击强度模块与M-B模型中跃移冲击效率模块的搭配。美国最新开发的用于草地粉尘释放评估的AERO模型(Aeolian EROsion model),采用了Kawamura输沙模型、Okin剪应力分解模型与Shao04粉尘释放模型的组合<sup>[47,111-113]</sup>。这些模型严格意义上来讲是对已有模型研究成果的应用。还有一些基于特殊环境构建的粉尘释放模型,如美国环保局的EPA粉尘释放模型,主要用于估算地面易散性粉尘的释放强度<sup>[114]</sup>;Loosmore等<sup>[115]</sup>以及Klose等<sup>[116]</sup>建立的粉尘释放模型,主要用于描述湍流抬升机制下的粉尘释放规律。这些模型的适用范围较窄,未见广泛应用。

### 3.2 粉尘释放模型的应用

粉尘释放模型作为土壤风蚀与粉尘释放研究成果的集成,被广泛应用于沙尘源确定、粉尘释放量评估、沙尘暴预警和大尺度粉尘循环模拟等领域。根据应用方式的不同,可将粉尘释放模型的应用分为直接应用、在全球粉尘模型中的应用和在区域粉尘模型中的应用3类。

#### 3.2.1 粉尘释放模型的直接应用

这类应用指直接应用已建立的粉尘释放模型,结合模型输入参数数据,广泛开展的不同区域尺度粉尘释放量评估工作,主要目的是确定沙尘源,并通过与遥感监测或野外观测结果的比较,不断优化模型,提高模型预测精度。1989年,Gillette等<sup>[49]</sup>最早应用建立的G-P模型,结合气象和土壤数据,估算了美国1948—1978年的粉尘释放量时空变化。Marticorena等在建立M-B模型之后,多次利用该模型对撒哈拉沙漠地区的粉尘释放量进行估算,并对模型参数不断优化<sup>[50,117]</sup>。DPM模型建立后被较多地应用于中东和北非地区的粉尘释放量评估<sup>[46,51,118]</sup>。Shao等<sup>[45,52]</sup>建立的系列粉尘释放模型早期主要在澳大利亚进行了应用和验证,后被较多地应用于东亚和北美地区的粉尘释放量评估<sup>[119-120]</sup>。国际上粉尘释放模型直接应用具有两方面的特点:一是主要由模型开发者及其合作团队开展,目的是不断地验证和优化模型;二是具有地域性,各类模型在开发区域应用较多,其他区域则相对较少。如何从大区域尺度准确获取模型输入参数则一直是粉尘释放模型直接应用关心的焦点。

包括中国在内的东亚地区被认为是全球第二大粉尘排放源<sup>[121]</sup>。有关学者尝试采用各种粉尘释放模型对中国的粉尘释放量进行评估。2000年,Xuan等<sup>[7]</sup>使用美国环保局的两个公式计算了中国北方地面起尘速率的分布;2005年,车慧正等<sup>[122]</sup>使用DPM模型计算了中国北方沙漠地区的粉尘释放通量;2006年,Laurent等<sup>[123]</sup>使用M-B模型对中国和蒙古国沙漠地区的粉尘释放量进行评估。近几年,陈莉等<sup>[124]</sup>利用二次开发的WEPS模型模拟了天津郊区和南疆地区<sup>[125]</sup>的风蚀起尘量;Du等<sup>[110]</sup>采用重新组合的粉尘释放模型估算了中国北方地区的PM<sub>10</sub>损失量。这些模型的直接应用成果为正确认识中国主要的粉尘释放源做出了贡献,但由于中国北方风蚀区自然环境复杂<sup>[121]</sup>,粉尘释放的野外观测数据又极为缺乏,对这些模型应用结果的验证很不

充分,导致至今没有被广泛认可的粉尘释放模型。基于广泛的实测数据,验证和修订粉尘释放模型是比单纯的应用模型更加紧迫的一项任务。

#### 3.2.2 在全球粉尘模型中的应用

全球粉尘模型主要用于研究沙尘在气候系统中的作用。近年来,世界范围内开发的以大气环流模式驱动的全球尺度粉尘循环模型多达十几种<sup>[53]</sup>。这些模型都包括了全球粉尘的释放、输送、清除和沉降子模块。其中,粉尘释放子模块是一系列模型的第一个环节,其对沙尘源位置、源强度以及粉尘气溶胶初始特征(如粉尘粒度组成和成分)等描述的准确程度,直接影响到整个链条最终输出的精度。受全球粉尘源区地表资料详细程度和计算量等因素的影响,目前全球粉尘模型中的粉尘释放子模块普遍采用了经验性方案或基于简化物理过程方案<sup>[25]</sup>。应用最广泛的是Ginoux等<sup>[54]</sup>2001年在QOCART模型中提出的方案(简称Ginoux方案)和Zender等<sup>[109]</sup>2003年在DEAD模型中提出的方案(简称Zender方案)。其中,Ginoux方案采用了经验性的G-P模型,主要考虑风速和临界起沙风速对粉尘释放的影响;Zender方案主要基于M-B模型构建,但经过了相当程度的简化和调整,以方便大尺度遥感数据的使用。总体来看,全球粉尘模型中的粉尘释放模块尽管在计算粉尘释放通量时尽量考虑了粉尘源区地表的异质性,但其对地表特征的模拟仍显得过于简单,给模拟结果带来了很多的不确定性,造成不同模型间模拟结果的差异很大<sup>[53]</sup>。随着全球风蚀地区地表特征资料的积累和粉尘释放模型的不断改进,相信这些不确定性会逐步减小<sup>[25]</sup>。

#### 3.2.3 在区域粉尘模型中的应用

区域粉尘模型主要是为了沙尘预报而开发的,适合于模拟沙尘暴事件的起尘、搬运和沉降过程<sup>[75]</sup>。地中海周边、澳大利亚和东亚地区是受沙尘暴影响最多的区域,同时也是区域粉尘模型开发和应用的主要区域<sup>[55]</sup>。早期的区域粉尘模型与全球粉尘模型类似,多采用经验性的或基于简化物理过程的粉尘释放方案<sup>[75,121,126]</sup>。后期随着粉尘释放模型的发展,以及区域尺度地表资料的不断积累和遥感技术的进步,基于详细物理机制的粉尘释放模型在部分区域粉尘模型中得到采用。例如:中国香港大学开发的CEMSYS5模型<sup>[45,72]</sup>和日本的MASINGAR模型<sup>[127]</sup>采用了Shao模型的粉尘释放方案;DPM模型的粉尘释放方案被应用于加拿大的NAR-



CM 模型<sup>[128]</sup>和欧洲的 CHIMERE<sup>[129]</sup>、RegCM4/dust<sup>[130]</sup>模型中。中国国家气象局开发的 CUACE/Dust 粉尘模型也采用 DPM 模型的粉尘释放方案<sup>[131]</sup>。近几年应用较多的 WRF-Chem 模式中则嵌入了包括 G-P 模型、M-B 模型和 Shao04 模型在内的多种粉尘释放方案<sup>[56]</sup>。从实际应用效果来看,基于物理机制的粉尘释放方案比经验性的方案具有更高的模拟精度,这与其对粉尘释放过程的描述更加详细有关<sup>[132-133]</sup>。尽管现阶段的粉尘释放模型研究成果还存在或过于简单、或过于繁琐的不足,但也基本支撑起了区域粉尘模型模拟沙尘天气过程的需要,是粉尘释放模型应用最多,也是最成功的一个领域。

## 4 粉尘释放研究的几个热点问题

### 4.1 粉尘释放效率问题

粉尘释放效率的概念由 Gillette<sup>[3]</sup>在 20 世纪 70 年代提出,指土壤风蚀中释放的粉尘量占风蚀物总量的比率,通常用粉尘释放通量与水平输沙通量或跃移通量之比进行表征,是反映土壤粉尘释放潜力的主要指标,也是粉尘释放模型的重要输入参数<sup>[86,134]</sup>。粉尘释放效率的准确表达是完善粉尘释放模型的关键<sup>[10]</sup>,因此针对粉尘释放效率及其影响因素的研究很多。

1993 年,Shao 等<sup>[42]</sup>通过风洞实验证实粉尘释放量与跃移颗粒流量呈正比,据此提出一定土壤表面的粉尘释放效率为定值而与风速无关的结论。这一研究结论极大地促进了粉尘释放效率与土壤性质关系研究的发展。1995 年,Marticorena 等<sup>[44]</sup>在对 Gillette<sup>[3,38]</sup>的野外数据拟合后发现,对于黏粒含量少于 20% 的土壤,粉尘释放效率具有随着土壤中黏粒含量增加而呈指数规律增大的趋势,据此建立了 M-B 模型中的粉尘释放效率模块。另外一些研究表明,即使土壤质地相同的地表,粉尘释放效率可能也相差甚远,原因是受到干团聚体粒度组成、土壤有机质含量、土壤含水率、结皮厚度等土壤属性差异的影响<sup>[74,135]</sup>。基于粉尘释放机制构建的模型,通过尘粒间的结合能<sup>[46]</sup>或土壤的可塑性压力<sup>[47,72,97]</sup>等指标来表征各种土壤性质对粉尘释放效率的综合影响,但这类指标的准确确定非常困难,也缺少足够的数据验证。土壤性质指标众多,对粉尘释放效率的影响复杂,同时,粉尘释放效率的实测数据很少,涉及的土壤类型有限,导致粉尘释放效率与

各种土壤性质关系的研究不足,哪种性质的土壤具有更大的粉尘释放效率并无定论。优选可综合表征各种土壤性质对粉尘释放效率影响的可操作性指标是目前粉尘释放问题研究的热点之一。

近年来,越来越多的实验证据表明,某些土壤表面的粉尘释放效率不仅与土壤性质有关,还受到风速的影响<sup>[8-9,136-137]</sup>。梳理相关文献发现,粉尘释放效率与风速无关的研究结论,基本在松散的沙质土壤表面取得的<sup>[42-43,138-140]</sup>。对于农田、干湖盆这类土壤中细颗粒含量较高、团聚体发育的地表,风速对粉尘释放效率的影响较为复杂。多数情况下粉尘释放效率呈现随风速增大而增大的趋势<sup>[9,136-137,141-142]</sup>,但也有随风速增大而减小的情况<sup>[8]</sup>。目前,关于粉尘释放效率与风速关系的定量化研究成果较少,两者的内在联系仍不清楚。在一些粉尘释放经验方程中<sup>[25-26,41,115]</sup>,粉尘释放通量被表达为风速的 3 次或 4 次幂函数,由于水平输沙通量一般表达为风速的 3 次幂函数,其结果间接反映了粉尘释放效率与风速的无关或线性相关。研究者在粉尘释放效率与风速关系问题上尚未达成共识,但都强调了土壤理化性质在其中所发挥的重要作用。实际上,作为粉尘释放效率与风速无关观点的提出者,Shao<sup>[72]</sup>在与其合作者后期的研究中,已经认识到某些土壤表面的粉尘释放效率会受到风速的影响,并认为这种影响与土壤性质有关。Lu 等<sup>[97]</sup>考虑了土壤性质和风速对粉尘释放效率的综合影响,认为松散土壤表面的粉尘释放效率与风速线性相关,紧实土壤表面与风速无关。有研究者分别从地表粉尘供应限制<sup>[86]</sup>、地表更新速度<sup>[8]</sup>等角度,就土壤性质对粉尘释放效率与风速关系的影响进行分析,但缺乏相应的定量表述。粉尘释放效率随土壤性质与风速的综合变化规律仍需进行研究。

地表粗糙元通过增加地表覆盖而增大空气动力学粗糙度,造成湍流动量在可蚀性颗粒与粗糙元之间重新分配,提高跃移起动摩阻风速,从而在土壤风蚀与粉尘释放过程中发挥作用。目前所有的粉尘释放模型均假定地表粗糙元对风蚀与粉尘释放的影响是一致的,即不会对粉尘释放效率产生影响。但 Burri 等<sup>[143]</sup>的风洞实验表明,植被冠层密度的增加导致输沙通量和粉尘浓度均呈指数规律递减,其中输沙通量减少的幅度明显高于粉尘浓度;Scott 等<sup>[144]</sup>的野外风洞实验则表明,地表植被移除导致的风蚀量增加程度明显高于粉尘释放量;Singh



等<sup>[145]</sup>在农田区进行的风洞实验显示,耕作方式的不同导致了粉尘释放速率与风蚀速率比率的变化。以上关于地表粗糙元对风蚀与粉尘释放同步影响的有限研究成果表明,粉尘释放效率可能会因地表粗糙元的变化而变化。但迄今为止,地表粗糙元对粉尘释放效率的影响并未引起太多关注,相关的研究成果很少。

总之,越来越多的研究表明,粉尘释放效率不仅与土壤性质有关,还可能受到风力侵蚀因子和地表空气动力学粗糙度的影响。目前的粉尘释放模型将粉尘释放效率表达为某些土壤性质的函数,是在一定时期和一定技术条件下,利用有限数据取得的成果,具有较大的局限性。拓展和深化粉尘释放效率与其影响因素关系问题研究,优化粉尘释放模型,是目前粉尘释放问题研究的一个主要方向。

#### 4.2 地表释尘粒度组成问题

矿物粉尘对地球系统的影响不仅取决于粉尘浓度,还与空气中粉尘粒径分布密切相关,因为不同粒径粉尘的搬运距离不同,对云、辐射、生态系统和人类健康的影响也不相同<sup>[74]</sup>。详细掌握粉尘粒径分布对于理解矿物粉尘和地球系统之间复杂的相互作用至关重要。空气中粉尘粒度组成的准确表达始于对地表释放粉尘粒径分布的准确参数化<sup>[24]</sup>,因此,所有粉尘模型的粉尘释放模块都包括了粉尘粒度组成的预报功能,相关研究也较多。

粉尘粒度组成通常呈对数正态分布。早期的观点认为,地表释尘的粒度组成取决于风速和土壤性质<sup>[98]</sup>。根据 Shao<sup>[47,72]</sup>的跃移冲击理论,粉尘粒度组成由跃移轰击强度和土壤团聚体结合能强度共同决定,风速的增加使跃移轰击作用增强,从而导致团聚体更大程度地破碎并伴随着更细粉尘含量的增加,即风速的增加会使释放粉尘的粒度组成变细,这得到风洞实验的证实<sup>[43,146]</sup>。然而,根据 Kok<sup>[48]</sup>提出的脆性破碎理论,团聚体破碎过程中产生粉尘的粒度分布具有尺度不变性,即粉尘粒度组成与风速无关,这得到野外测量的许多粉尘粒径分布具有高度相似性的支持<sup>[33,76,98,147]</sup>。Shao 等<sup>[100]</sup>在 2020 年重新检查了日本-澳大利亚粉尘实验(JADE)现场数据后,支持了地表释尘粒度组成依赖于摩擦风速的观点,并将 Kok 研究中粉尘粒径分布的高度相似性归因于在空气中采样,而非在近表面采样;Wang 等<sup>[101]</sup>的风洞实验也证实,各种性质土壤表面的粉尘

粒度组成均受到风速的影响,具有随风速增加粉尘含量增加的趋势。但与空气中粉尘粒度组成的丰富数据相比,地表释尘粒度组成的可用数据很少,关于地表释尘粒度组成是否受到风速影响的争议尚未平息。

无论跃移冲击理论,还是脆性破碎理论,都强调了释尘粒度组成对土壤粒度组成的依赖性。一些研究以  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  的比率( $R_{PM_{2.5}/10}$ )作为反映粉尘粒度组成特征的指标,研究了各种土壤表面释放粉尘的  $R_{PM_{2.5}/10}$  值,发现  $R_{PM_{2.5}/10}$  值因土壤性质的不同而在 0.03~0.55 剧烈变化<sup>[148]</sup>。Hagen<sup>[108]</sup>通过室内模拟实验就粉尘粒度组成与土壤粒度组成的关系进行研究,发现  $R_{PM_{2.5}/10}$  随土壤中跃移级沙粒含量与黏粒含量比值( $R_{\text{siltation-sized sand/clay}}$ )的增大呈线性规律增加。Wang 等<sup>[101]</sup>通过风洞实验证实, $R_{PM_{2.5}/10}$  与土壤中沙粒含量和粉沙含量具有更好的相关性,具有随土壤中沙粒含量增加呈对数规律增加,随土壤中粉沙含量增加呈线性规律降低的趋势。以上关于粉尘粒度组成与土壤性质关系的研究成果,基本都是通过室内实验取得的,野外实测的不同性质土壤表面释尘粒度组成数据极少,原因是野外测定粉尘粒径分布非常困难。近几年,随着多通道 DustTrak 粉尘仪(TSI,美国)的研发成功和在粉尘释放研究中的广泛应用<sup>[101,149]</sup>,这一难题有望得到解决。

目前,全部的全球粉尘模型和绝大多数的区域粉尘模型采用固定的粉尘粒径分布参数,不考虑风速和土壤性质对粉尘粒度组成的影响,这造成模型预测结果偏差较大。部分基于物理机制构建的粉尘释放模型考虑了土壤和风速对粉尘粒度组成的影响,如 Shao04 模型将粉尘粒径分布表达为最小分散土壤粒径分布、最大分散土壤粒径分布及二者权重的函数<sup>[47]</sup>;DPM 模型通过跃移颗粒动能和粉尘颗粒的结合能分别表达风速和土壤性质对粉尘粒径分布的影响<sup>[46]</sup>。但是,这类参数往往很难测量,也很难拓展到区域和全球尺度。总之,地表释尘粒度组成作为全球和区域粉尘模型中的一个重要参数,其参数化方案仍不够成熟,还需就其与风速和土壤性质的关系进行深入研究。

#### 4.3 主要尘源的粉尘释放问题

不同类型的沙尘源因土壤性质和地表状况的差异,表现出不同的风蚀与粉尘释放特征,难以用统一的模型进行表达。近年来,国内外学者重视了

对沙漠、戈壁、农田、干湖盆、草原等主要沙尘源粉尘释放特征差异性的认识,开展了较多针对性的研究工作。

沙漠地区的粉尘释放问题研究开展最早、最多,也最为成熟。一方面,广泛分布于干旱半干旱区的沙漠地表裸露疏松,沙物质含量高,是一类最重要的沙尘源;另一方面,沙漠物质组成较为单一,植被覆盖度和土壤含水率低,环境影响因素少,起沙起尘的力学机制相对简单。早期的粉尘释放机制研究基本都是从沙漠地表入手的,反映的主要是沙粒无限供应、跃移冲击机制下的粉尘释放过程<sup>[42-43,68]</sup>。目前已建立的大部分粉尘释放模型,如M-B模型<sup>[44]</sup>、WEAM模型<sup>[45]</sup>、DPM模型<sup>[46]</sup>和Shao04模型<sup>[47]</sup>等,也主要适用于松散的沙质土壤表面。使用粉尘释放模型估算的结果普遍显示沙漠地区是重要的粉尘贡献源<sup>[7,25,123,150]</sup>,但实地观测和风洞实验的一些结果则表明,尽管沙漠地表的输沙强度很大,但由于土壤中粉尘含量极低,粉尘释放强度并不大<sup>[57-58,151]</sup>。目前学术界在沙漠作为重要尘源问题上的疑问:一是沙漠地表能否在跃移冲击机制作用下持续地产生大量粉尘<sup>[151-152]</sup>;二是沙漠地区的粉尘主要来自于流沙区,还是周边其他地类<sup>[57,59]</sup>。

戈壁是一种以地表被砾石覆盖为显著特征的荒漠景观,在世界干旱半干旱区都有分布,其中以蒙古国南部和中国西北部分布最为广泛,被认为是东亚沙尘暴的主要策源地之一<sup>[153]</sup>。中国是戈壁风蚀与粉尘释放问题研究的主要阵地,取得一系列研究成果,张正偲等<sup>[60]</sup>对此进行了归纳和总结。戈壁粉尘释放问题研究主要围绕砾石覆盖特征及其对风蚀与粉尘释放的影响进行。目前已基本认清戈壁表层土壤和砾石覆盖状况的复杂性,并进行了类型划分<sup>[154-155]</sup>;阐明了砾石覆盖状况对风蚀的影响,确定砾石覆盖度是影响戈壁风蚀强弱的关键因子,且存在临界值<sup>[156-159]</sup>;根据实验结果,初步构建了经验性的、包括砾石覆盖因子的输沙率方程<sup>[157,160-161]</sup>。总体来看,戈壁地表的风沙研究以风蚀研究为主,涉及粉尘释放的研究较少。有限的研究结果多为局部的实验研究<sup>[58,162-163]</sup>,系统性和代表性不够,难以满足粉尘释放模型参数化方案的需要,导致目前几乎所有的粉尘释放模型都没有考虑砾石的影响。加强对戈壁地表粉尘释放机制的系统研究,构建包含砾石覆盖因子的粉尘释放模型应是中国风沙学者的一项重要使命。

农田地表的风蚀与粉尘释放问题一直备受关注,其作为粉尘释放源具有三方面的鲜明特征:一是土壤团聚体较发育,粉尘释放机制以团聚体破碎为主;二是土壤中细颗粒含量较高,可为粉尘释放提供丰富的物源;三是每年的人为翻耕,不断使新的粉尘暴露地表。从20世纪70年代开始,以Gillette为首的一批科学家较系统地分析了农田地表粉尘释放通量与风速及土壤质地的关系,并据此建立了经验性的粉尘释放模型或模块<sup>[37-38,41,44]</sup>。之后发展的一些物理机制模型,尽管以刻画跃移冲击机制为主,但重视了对团聚体破碎机制的描述,提高了其在农田地表的适用性<sup>[72,99]</sup>。一些农田风蚀模型也发展出了粉尘预报功能<sup>[104]</sup>。但由于农田地表土壤性质复杂,现有模型在描述农田地表粉释放机制方面仍面临不少问题。例如:农田地表跃移颗粒供应普遍受限,不符合现有物理机制模型对沙粒无限供应的假设<sup>[164]</sup>;农田地表粉尘释放效率普遍具有随风速变化而变化的趋势,不符合目前模型对粉尘释放效率与风速无关的假设<sup>[9,136-137]</sup>;对土壤结皮、土壤含水率、耕作管理措施等影响农田粉尘释放的重要因素考虑不足<sup>[74-75]</sup>。总之,围绕农田地表粉尘释放及其与风和土壤状况的关系仍有许多重要问题尚未解决,现有模型模拟团聚体发育土壤表面粉尘释放的能力仍需提高。

干湖盆在主要沙尘源中面积占比不大,但却是粉尘释放研究的热点,原因是干旱半干旱区的湖泊萎缩干涸后往往成为积盐中心,地表松散富盐沉积物被大风吹离地表,产生盐尘,严重时形成盐尘暴,对人体和环境造成远超普通沙尘的危害<sup>[165]</sup>。20世纪60年代的咸海危机揭开了干湖盆盐尘研究的帷幕<sup>[166]</sup>。美国的欧文湖、沙顿海,加拿大老妇湖,伊朗乌尔米亚湖等都是盐尘研究的重点地区<sup>[167-170]</sup>。中国以新疆艾比湖的相关研究最为系统<sup>[61]</sup>,现已拓展至新疆罗布泊,内蒙古查干诺尔湖、居延海,河北坝上安固里淖等区域<sup>[171-174]</sup>。早期盐尘释放研究以叙述干湖盆盐尘的形成、分布、特性和危害为主<sup>[165]</sup>。近年来随着对盐尘在大气物理和大气化学中所扮演角色认识的深入,盐尘释放机理及其迁移、转化成为研究热点<sup>[61,167,169]</sup>。已有研究表明,干湖盆沉积物以黏土、粉沙为主,沙粒含量很低,因此,湍流抬升机制在盐尘释放中发挥重要作用<sup>[165]</sup>。同时,干湖盆盐结晶会对土壤持水性、黏结性、团聚体结构、结皮发育等产生显著影响,因此其粉尘释放机制比普



通土壤表面更加复杂,研究难度也更大。当前,一些学者正致力于揭示富盐地表粉尘释放机制,量化土壤中盐分对粉尘释放的影响,建立适用于盐碱化土壤表面的粉尘释放模型<sup>[175-176]</sup>。

草原因为有植被的覆盖保护,风蚀与粉尘释放能力一般较弱,但一旦草原发生退化,植被覆盖度降低,则粉尘释放能力急剧增强,严重时甚至超过沙漠、戈壁、农田和干湖盆等其他主要沙尘源<sup>[57,144,177]</sup>。因此,植被覆盖的影响及其参数化一直是草原风蚀与粉尘释放研究的核心议题,并可分为微观和宏观两个层次:微观上,主要研究植被高度、盖度、分布和植株形态、结构、迎风面积、疏透度、柔韧性等对近地表气流及地表剪应力分布的影响,并建立表达式用于修订粉尘释放模型中的 $u$ 和 $u_c$ 等参数<sup>[111,113,178]</sup>;宏观上,主要研究大区域尺度下如何通过遥感技术准确提取植被盖度信息,并转化为模型中使用的地表可蚀性区域占比和 $z_0$ 等参数<sup>[109-110,123]</sup>。从已有的研究成果来看,草原风蚀研究相对较多,涉及粉尘释放的研究则较少。现有粉尘释放模型均假定植被覆盖对风蚀与粉尘释放的影响是一致的,植被覆盖的作用主要反映在跃移冲击强度模块中<sup>[44,46-47,111]</sup>。但最新的一些研究表明<sup>[143-144]</sup>,植被盖度的变化对风蚀与粉尘释放的影响并不一致,存在着粉尘释放效率随植被盖度的变化。当前的草原粉尘释放问题研究,除了继续在微观或宏观上做好植被覆盖因子参数化的研究外,急需加强植被覆盖对粉尘释放过程、强度及效率影响的研究<sup>[75]</sup>。

沙漠、戈壁、农田、干湖盆和草原5种地貌景观,基本涵盖了我国北方风蚀区主要的沙尘源。每种沙尘源都有自己特殊的粉尘释放影响因子,如沙漠的流沙、戈壁的砾石、草原的植被、干湖盆的盐结皮和农田的土块及留茬等。目前,学术界非常重视对各类沙尘源粉尘释放特殊性的研究,正努力将各种特殊影响因子对风蚀与粉尘释放的影响参数化,以修订已有的粉尘释放模型,提高模型在各种地表的适用性。

## 5 粉尘释放研究中的难点问题

过去50年,土壤风蚀中的粉尘释放问题研究取得很大进展。2006年发表的与风蚀相关的文章中,已有约50%涉及粉尘释放问题<sup>[10]</sup>。与只在近地表运动的跃移颗粒不同,粉尘搬运距离更远,收集难度更大,产生机制更加复杂,对模型模拟的要求也

更高,从而增加了研究的难度。粉尘释放研究面临着许多不同于风蚀研究的难题,需要加以重点解决。

### 5.1 野外观测研究中的问题

野外观测是土壤风蚀与粉尘释放研究的基本手段,具有客观、真实的优点。目前粉尘释放通量野外观测使用的主要方法仍是20世纪70年代Gillette等<sup>[40]</sup>根据湍流动量输送原理提出的浓度梯度法。该方法存在一些理论缺陷,在野外经常难以执行,导致获取的粉尘释放通量野外数据离散性较大,更难取得准确的释尘粒度组成数据<sup>[75]</sup>。另外,粉尘释放通常需要与输沙通量同步观测,但传统机械式集沙仪对风蚀物的收集频率很低,无法与粉尘仪进行时间上的匹配。尽管通过电子传感器(如Sensit)可以细化风蚀过程,但操作很麻烦,精度也不高<sup>[179]</sup>。总之,野外实测粉尘释放通量、粉尘粒度组成和粉尘释放效率等面临着不小的困难,这是造成野外实测数据缺乏的主要原因<sup>[10]</sup>。涡流协方差法(eddy-covariance method)被认为可提供比浓度梯度法更可靠的粉尘通量结果<sup>[180]</sup>;近几年使用较多的多通道DustTrak粉尘仪,实现了对16  $\mu\text{m}$ 以下不同粒径粉尘的快速、同步测量<sup>[101,149]</sup>;郭中领等研发的自动连续称重式集沙仪<sup>[58,181]</sup>与DustTrak粉尘仪配合使用,在实时测量粉尘释放效率方面表现出一定的应用潜力。这些新方法、新仪器的推广使用有望推动粉尘释放野外观测研究取得新突破。

粉尘环境影响的广泛性要求掌握大尺度范围的地表粉尘释放现状。但是目前世界范围内的粉尘释放野外观测工作基本都是零星进行的,并且各自采用的方法不同,测量的指标也不同,没有形成统一的粉尘释放野外观测网络,导致至今缺少高质量、可供模型充分验证的粉尘释放数据库,这是阻碍粉尘释放模型发展,造成全球或区域粉尘模型模拟结果存在巨大不确定的重要原因<sup>[10]</sup>。近年来实施的日本-澳大利亚粉尘实验为区域粉尘释放野外观测工作做了良好示范<sup>[182]</sup>。美国政府牵头、多家单位合作开展的土壤风蚀野外监测网络建设项目<sup>[183]</sup>,为验证和修订其新构建的草地粉尘释放模型(AERO模型)提供了重要的基础数据支撑<sup>[113]</sup>。作为世界主要的沙尘源区,中国也应该尽快建立自己的土壤风蚀与粉尘释放野外监测网络,并规范数据采集和分析方法。

## 5.2 机制机理研究中的问题

自然地表的粉尘释放问题研究是在土壤风蚀研究的基础上发展起来的,跃移颗粒冲击被认为是粉尘释放的主要机制,因此,一些用于描述跃移颗粒搬运规律的输沙方程,被直接或经过改造后应用于粉尘释放模型的构建<sup>[93-94]</sup>。但是,风蚀研究中的输沙方程基本都是基于松散的沙质土壤表面建立的,并假定沙源无限供应,这对于除沙漠以外的几乎所有沙尘源都无法满足。有限沙源供应条件下的土壤风蚀与粉尘释放问题受到越来越多的关注<sup>[10,86,164,184-185]</sup>,但由于影响沙源供给的因素众多,沙源供给影响粉尘释放的机制复杂,至今缺少突破性的研究成果。

粉尘释放机制研究中的另一难题是确定粉尘释放通量对风与土壤条件的依赖性。到目前为止,我们对土壤湿度、不可蚀物质、生物/物理结皮以及其他土壤条件对粉尘释放通量影响的理解仍很缺乏,难以满足粉尘释放模型参数化方案的需要<sup>[60]</sup>。例如:土壤含水率、土壤粒度组成和土壤矿物组成等如何决定土壤团聚体中粉尘颗粒之间内聚力的强度与变化<sup>[74]</sup>;3类粉尘释放机制所产生粉尘的平衡关系是什么<sup>[84]</sup>;植被特征(如孔隙度和空间分布)如何影响粉尘释放通量<sup>[113]</sup>;近地表气流的湍流特性如何影响粉尘释放等等<sup>[74]</sup>。更好地理解这些和其他相关问题,有助于更准确地将粉尘释放通量参数化为风和土壤条件的函数。

## 5.3 大尺度模型应用中的问题

粉尘释放模型主要应用于全球或区域尺度下的粉尘模拟。要模拟大区域尺度下的粉尘释放过程,就需要掌握土壤质地、植被、土壤水力特性和表面空气动力学特性等地表参数的空间数据<sup>[10]</sup>。这些数据库正在逐渐变得可用,但总体上分辨率仍较为粗糙。利用卫星观测的优势,可建立高分辨率的土壤湿度、植被覆盖、地表粗糙度和雪盖分布等资料,改进沙尘释放模式输入数据的精确度,这是近年来大尺度粉尘释放模型优化研究的一项重要内容,取得很大进展<sup>[26]</sup>。但由于地面条件的复杂性,以及受地面反照率、地表温度、云和空中水汽时空变异性的影响,遥感产品的数据精度仍有待提高,依靠遥感手段获取高分辨率地表参数数据仍面临着不少技术难题<sup>[118,186]</sup>。

大尺度粉尘释放模型应用的另一难题是模型

模拟结果的验证。当前的验证主要依靠两种手段:一种是利用遍布全球的气象或大气环境监测网,收集地面实时沙尘气溶胶数据(浓度和能见度),并在较长时间段内将模型模拟结果与观测数据进行对比,验证和修订粉尘释放模型<sup>[125,187]</sup>;另一种是利用卫星激光雷达和遥感仪器获得气溶胶垂直廓线资料,并与全球或区域粉尘模型的模拟结果进行比较<sup>[118]</sup>。无论是地面监测网,还是卫星遥感技术,实际上监测的都是粉尘搬运一定距离后在空气中的浓度,而非原地表粉尘释放强度(或浓度),因此在验证粉尘释放模型模拟结果时存在一定的偏差,这是造成当前粉尘释放模型验证不充分,模拟结果不够理想的一个重要原因。

## 6 结论

土壤风蚀中释放的粉尘在大气物理和大气化学过程以及全球生态系统中扮演着重要角色,是当今国际风沙研究的核心课题之一,近年来发展很快。已有文章就粉尘释放问题的某些方面进行了介绍,但不系统 and 全面。基于此,本文对国内外土壤风蚀中粉尘释放问题的研究历史进行了较为全面的梳理,将其划分为与风蚀混合研究、单独实验研究和物理机制与模型研究3个阶段,并总结归纳了各阶段的代表性研究成果,介绍了当前对粉尘释放机制的一些新认识;在对粉尘释放模型类型进行重新划分的基础上,按照时间脉络分别介绍了各类模型的建模过程及其优缺点,并根据应用方式的不同,将粉尘释放模型的应用分为直接应用、在全球粉尘模型中的应用和在区域粉尘模型中的应用3类。本文提出了目前粉尘释放问题研究的几个热点,如粉尘释放效率、释尘粒度组成和主要尘源的粉尘释放问题等,也指出了目前研究存在的一些难点,如野外观测、机制机理和大尺度模拟等,并分别进行了一定程度的研究展望。本文试图对土壤风蚀中粉尘释放问题的研究进展进行一次较全面阐述,但由于该问题涉及的领域很广,研究成果很多,造成论文篇幅过长,并且受作者研究领域的局限,对许多问题的认识不够深入。

## 参考文献:

- [1] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M]. London, UK: Chapman and Hall, 1941.
- [2] Field J P, Belnap J, Breshears D D, et al. The ecology of dust [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2010, 8 (8):



- 423–430.
- [3] Gillette D A. Fine particulate emissions due to wind erosion[J]. *Transactions of ASAE*, 1977, 20: 890–897.
- [4] Pye K. *Aeolian Dust and Dust Deposits*[M]. London, UK: Academic Press, 1987.
- [5] Lancaster N, Nickling W G. *Aeolian Sediment Transport*, in *Geomorphology of Desert Environments* [M]. London, UK: Chapman & Hall, 1994.
- [6] Gillette D A, Chen W N. Size distributions of saltating grains: an important variable in the production of suspended particles [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24: 449–462.
- [7] Xuan J, Liu G L, Du K. Dust emission inventory in Northern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34: 4565–4570.
- [8] Zhang J, Teng Z J, Huang N, et al. Surface renewal as a significant mechanism for dust emission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16: 15517–15528.
- [9] Wang R D, Li Q, Zhou N, et al. Effect of wind speed on aggregate size distribution of windblown sediment [J]. *Aeolian Research*, 2019, 36: 1–8.
- [10] Shao Y P. *Physics and Modelling of Wind Erosion*[M]. Heidelberg, Germany: Springer, 2008.
- [11] 王涛, 吴薇, 薛炯, 等. 中国北方沙漠化土地时空演变分析[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(3): 230–235.
- [12] Webb N P, Chappell A, Strong C L, et al. The significance of carbon enriched dust for global carbon accounting [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(11): 3275–3278.
- [13] Hashizume M, Ueda K, Nishiwaki Y, et al. Health effects of Asian dust events: a review of the literature [J]. *Japanese Journal of Hygiene*, 2010, 65(3): 413–421.
- [14] Morman S A, Plumlee G S. The role of airborne mineral dusts in human disease [J]. *Aeolian Research*, 2013, 9: 203–212.
- [15] Hofer J, Althausen D, Abdullaev S F, et al. Long-term profiling of mineral dust and pollution aerosol with multiwavelength polarization Raman lidar at the Central Asian site of Dushanbe, Tajikistan: case studies [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 17: 14559–14577.
- [16] Tegen I, Lacis A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101 (D14): 19237–19244.
- [17] Sokolik I N, Winker D M, Bergametti G, et al. Introduction to special section: outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D16): 18015–18027.
- [18] Kok J F, Ridley D A, Zhou Q, et al. Smaller desert dust cooling effect estimated from analysis of dust size and abundance [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3: 274–278.
- [19] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 1997, 102: 6831–6864.
- [20] Creamean J M, Suski K J, Rosenfeld D, et al. Dust and biological aerosols from the Sahara and Asia influence precipitation in the Western U.S. [J]. *Science*, 2013, 339: 1572–1578.
- [21] 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.
- [22] Duce R A, Liss P S, Merrill J T, et al. The atmospheric input of trace species to the world ocean [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, 5(3): 193–259.
- [23] Harrison S P, Kohfeld K E, Roelandt C, et al. The role of dust in climate changes today, the last glacial maximum and in the future [J]. *Earth Science Reviews*, 2001, 54: 43–80.
- [24] 黄宁, 辜艳丹. 粉尘释放和沉积机制的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2009, 24(11): 1175–1184.
- [25] 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.
- [26] 朱好, 张宏升. 沙尘释放通量外场观测和参数化研究进展 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(4): 768–776.
- [27] Zhang D. Synoptic-climatic studies of dust fall in China since historic times [J]. *Science in China (Series B)*, 1984, 27: 825–836.
- [28] Chepil W S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: IV. sand, silt and clay [J]. *Soil Science*, 1955, 80: 155–162.
- [29] Chepil W S. Sedimentary characteristics of dust storms: I. sorting of wind-eroded soil material [J]. *American Journal of Science*, 1957, 255: 12–22.
- [30] 黄亚鹏, 郭中领, 常春平, 等. 不同时间尺度农田风沙流模拟 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(5): 81–88.
- [31] Chepil W S. *Soil Erosion by Wind* [R]. Ottawa, Canada: Canadian Department of Agriculture, 1949.
- [32] Chepil W S, Woodruff N P. The physics of wind erosion and its control [J]. *Advances in Agronomy*, 1963, 15: 211–302.
- [33] Gillette D A, Blifford H I J, Fryrear D W. The influence of wind velocity on size distributions of soil wind erosion aerosols [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79: 4068–4075.
- [34] Gillette D A, Walker T R. Characteristics of airborne particles produced by wind erosion of sandy soil, high plains of west Texas [J]. *Soil Science*, 1977, 123: 97–103.
- [35] Gillette D A. A wind tunnel simulation of the erosion of soil: effect of soil texture, sandblasting, wind speed, and soil consolidation on dust production [J]. *Atmospheric Environment*, 1978, 12: 1735–1743.
- [36] Nickling W G, Gilles J A. Emission of fine grain particulates from desert soils [M] // Leinen M, Sarnthein M. *Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989: 133–165.
- [37] Nickling W G, Gilles J A. Dust emission and transport in Mali, West Africa [J]. *Sedimentology*, 1993, 40: 859–868.
- [38] Gillette D A. *Environmental Factors Affecting Dust Emission by Wind Erosion in Saharan Dust* [M]. New York, USA: John

- Wiley, 1979: 71–94.
- [39] Gomes L G, Bergametti G, Coude'-Gaussen, et al. Submicron desert dust: 1. a sandblasting process[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 13927–13935.
- [40] Gillette D A, Blifford I H, Fenster C R. Measurements of aerosol size distributions and vertical fluxes of aerosols on land subject to wind erosion[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1972, 11(6): 977–987.
- [41] Gillette D A, Passi R. Modeling dust emission caused by wind erosion[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(D11): 14233–14242.
- [42] Shao Y P, Raupach M R, Findlater P A. The effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(D7): 12719–12726.
- [43] Alfaro S C, Gaudichet A, Gomes L, et al. Modeling the size distribution of a soil aerosol produced by sandblasting[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 11239–11249.
- [44] Marticorena B, Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. design of a soil-derived dust emission scheme[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(D8): 16415–16430.
- [45] Shao Y P, Raupach M R, Leys J F. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1996, 34: 309–342.
- [46] Alfaro S C, Gomes L. Modeling mineral aerosol production by wind erosion: emission intensities and aerosol size distributions in source areas[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 18075–18084.
- [47] Shao Y P. Simplification of a dust emission scheme and comparison with data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: D10202.
- [48] Kok J F. A scaling theory for the size distribution of emitted dust aerosols suggests climate models underestimate the size of the global dust cycle[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108: 1016–1021.
- [49] Gillette D A, Hanson K J. Spatial and temporal variability of dust production caused by wind erosion in the United States[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94D: 2197–2206.
- [50] Marticorena B, Bergametti G. Two-years simulations of seasonal and interannual changes of the Saharan dust emissions[J]. *Geophysical Research Letter*, 1996, 23: 1921–1924.
- [51] Gherboudj I, Beegum S N, Marticorena B, et al. Dust emission parameterization scheme over the MENA region: sensitivity analysis to soil moisture and soil texture[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 2015, 120: 10915–10938.
- [52] Shao Y P, Leslie L M. Wind erosion prediction over the Australian continent[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 30091–30105.
- [53] Huneeus N, Schulz M Y, Balkanski J, et al. Global dust model intercomparison in AeroCom phase I[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11: 7781–7816.
- [54] Ginoux P, Chin M, Tegen I, et al. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(17): 20255–20273.
- [55] Mesbahzadeh T, Salajeghe A, Farshad S S, et al. Spatial-temporal variation characteristics of vertical dust flux simulated by WRF-Chem Model with GOCART and AFWA Dust Emission Schemes (case study: Central Plateau of Iran)[J]. *Applied Science*, 2020, 10: 4536.
- [56] Yuan T G, Chen S Y, Huang J P, et al. Sensitivity of simulating a dust storm over Central Asia to different dust schemes using the WRF-Chem model[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 207: 16–29.
- [57] Wang G X, Tuo W Q, Du M Y. Flux and composition of wind-eroded dust from different landscapes of an arid inland river basin in north-western China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58: 373–385.
- [58] Wang R D, Li Q, Zhang C L, et al. Comparison of dust emission ability of sand desert, gravel desert (gobi), and farmland in northern China[J]. *Catena*, 2021, 201: 105215.
- [59] Wang H, Jia X. Field observations of windblown sand and dust in the Taklimakan desert, NW China, and insights into modern dust sources[J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24: 323–333.
- [60] 张正偲, 潘凯佳, 梁爱民, 等. 戈壁沙尘释放过程与机理研究进展[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(9): 891–900.
- [61] 吉力力·阿不都外力. 干旱区湖泊与盐尘暴[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [62] 邹学勇, 张春来, 程宏, 等. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(8): 875–889.
- [63] Greeley R, Iversen J D. *Wind as A Geological Process* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1985: 333.
- [64] Shao Y P. *Physics and Modeling of Wind Erosion* [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer, 2001: 393.
- [65] Iversen J D, Pollack J B, Greeley R, et al. Saltation threshold on Mars: the effect on interparticle force, surface roughness, and low atmospheric density[J]. *Icarus*, 1976, 29: 381–393.
- [66] Iversen J D, White B R. Saltation threshold on Earth, Mars and Venus[J]. *Sedimentology*, 1982, 29: 111–119.
- [67] Shao Y P, Lu H. A simplified expression for threshold friction velocity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 22437–22443.
- [68] Alfaro S C, Gaudichet A, Gomes L, et al. Mineral aerosol production by wind erosion: aerosol particle sizes and binding energies[J]. *Geophysical Research Letter*, 1998, 25: 991–994.
- [69] 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]. *Annals of Geophysics*, 1999, 17: 149–157.
- [70] O'Brien P, Neuman C M. PTV measurement of the spanwise component of aeolian transport in steady state[J]. *Aeolian Research*, 2016, 20: 126–138.
- [71] Zhang H S, Li X L. Review of the field measurements and pa-



- rameterization for dust emission during sand-dust events [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28(5): 903–922.
- [72] Shao Y P. A model for mineral dust emission [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D17): 20239–20254.
- [73] Balba M. Management of problem soils in arid ecosystems [J]. Boca Raton, USA: CRC Press, 1995.
- [74] Kok J F, Parteli E J R, Michaels T I, et al. The physics of wind-blown sand and dust [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2012, 75(10): 106901.
- [75] Knippertz P, Stuut J W. Mineral Dust: A Key Player in the Earth System [M]. Heidelberg, Germany: Springer, 2014.
- [76] Gillette D A, Fryrear D W, Xiao J B, et al. Large-scale variability of wind erosion mass flux rates at Owens Lake 1. vertical profiles of horizontal mass fluxes of wind-eroded particles with diameter greater than 50  $\mu\text{m}$  [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D22): 25977–25987.
- [77] Sow M, Alfaro S C, Rajot J L, et al. Size resolved dust emission fluxes measured in Niger during 3 dust storms of the AMMA experiment [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(12): 3881–3891.
- [78] Ishizuka M, Mikami M, Leys J F, et al. Power law relation between size-resolved vertical dust flux and friction velocity measured in a fallow wheat field [J]. *Aeolian Research*, 2014, 12: 87–99.
- [79] Gelbart G, Katra I. Dependence of the dust emission on the aggregate sizes in loess soils [J]. *Applied Science*, 2020, 10: 5410.
- [80] Loosmore G A, Hunt J R. Dust resuspension without saltation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(D16): 20663–20671.
- [81] Kjelgaard J, Sharratt B, Sundram I, et al.  $\text{PM}_{10}$  emission from agricultural soils on the Columbia Plateau: comparison of dynamic and time-integrated field-scale measurements and entrainment mechanisms [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 125(3/4): 259–277.
- [82] Sweeney M R, Mason J A. Mechanisms of dust emission from Pleistocene loess deposits, Nebraska, USA [J]. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2013, 118: 1460–1471.
- [83] Lee J A, Zobeck T M. Proceedings of ICAR5/GCTE-SEN Joint Conference [C]. Lubbock, Texas, USA: International Center for Arid and Semiarid Lands Studies, Texas Tech University, 2002: 16.
- [84] Bullard J E, McTainsh G H, Pudmenzky C. Aeolian abrasion and modes of fine particle production from natural red dune sands: an experimental study [J]. *Sedimentology*, 2004, 51: 1103–1125.
- [85] Avecilla F, Panebianco J E, Buschiazzi D E. A wind-tunnel study on saltation and  $\text{PM}_{10}$  emission from agricultural soils [J]. *Aeolian Research*, 2016, 22: 73–83.
- [86] Macpherson T, Nickling W G, Gillies J A, et al. Dust emissions from undisturbed and disturbed supply-limited desert surfaces [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: F02S04.
- [87] Parajuli S P, Zobeck T M, Kocurek G, et al. New insights into the wind-dust relationship in sandblasting and direct aerodynamic entrainment from wind tunnel experiments [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 121.
- [88] Shao Y P, Dong C H. A review on east Asian dust storm climate, modeling and monitoring [J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 52: 1–22.
- [89] Gillette D A. Production of dust that may be carried great distances [M]. // *Desert Dust: Origin, Characteristics, and Effect on Man*. Washington, USA: Geological Society of America, 1981: 11–26.
- [90] Fairchild C I, Tillery M I. Wind tunnel measurements of the resuspension of ideal particles [J]. *Atmospheric Environment*, 1982, 16: 229–238.
- [91] Bornnan S, Jaenicke R. Wind tunnel experiments on the resuspension of sub-micrometer particles from a sand surface [J]. *Atmospheric Environment*, 1987, 21: 1891–1898.
- [92] Marticorena B, Bergametti G, Aumont B. Modeling the atmospheric dust cycle: 2. simulation of Saharan dust sources [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 4387–4404.
- [93] White B R. Soil transport by winds on Mars [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84: 4643–4651.
- [94] Owen P R. Saltation of uniform grains in air [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1964, 20: 225–242.
- [95] Rice M A, Willetts B B, McEwan I K. Observations of collisions of saltating grains with a granular bed from high-speed cine-film [J]. *Sedimentology*, 1996, 43: 21–31.
- [96] Rice M A, Willetts B B, McEwan I K. Wind erosion of crusted soil sediments [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21: 279–293.
- [97] Lu H, Shao Y. A new model for dust emission by saltation bombardment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 16827–16842.
- [98] Gillette D A. On the production of soil wind erosion having the potential for long range transport [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 1974, 8: 734–744.
- [99] Kok J F, Mahowald N M, Fratini G, et al. An improved dust emission model-Part 1: Model description and comparison against measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14: 13023–13041.
- [100] Shao Y P, Zhang J, Ishizuka M, et al. Dependency of particle size distribution at dust emission on friction velocity and atmospheric boundary-layer stability [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(21): 12939–12953.
- [101] Wang R D, Li Q, Wang R, et al. Influence of wind velocity and soil size distribution on emitted dust size distribution: a wind tunnel study [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2021, 126: D033768.
- [102] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1965, 29(5): 602–608.
- [103] Fryrear D W, Saleh A, Bilbro J D, et al. Revised Wind Erosion

- Equation (RWEQ) [R]. Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDA-ARS, Southern Plains Area Cropping Systems Research Laborator, 1998: 1.
- [104] Hagen L J, Wagner L E, Tatarko J, et al. Wind erosion prediction system: technical description [C]//Proceedings of WEPP/WEPS Symposium. Ankeny, USA: Soil and Water Conservation Society, 1995.
- [105] California Air Resources Board. Methods for assessing area source emission in California [R]. Sacramento, USA: California Environmental Protection Agency Emissions Inventory Branch, 1991.
- [106] 高尚玉, 张春来, 邹学勇, 等. 京津风沙源治理工程效益 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [107] 张春来. 现代沙质荒漠化(沙漠化)动力机制若干问题研究 [D]. 北京: 中国科学院, 2002.
- [108] Hagen L J. Fine particulates ( $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ ) generated by breakage of mobile aggregates during simulated wind erosion [J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(1): 107–112.
- [109] Zender C S, Bian H, Newman D. Mineral dust entrainment and deposition (DEAD) model: description and 1990s dust climatology [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108: 4416.
- [110] 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.
- [111] Edwards B L, Webb N P, Galloza M S, et al. Parameterizing an aeolian erosion model for rangelands [J]. Aeolian Research, 2022, 54: 100769.
- [112] Kawamura R. Study on Sand Movement by Wind [R]. Tokyo, Japan: Physical Sciences Research Institute of Tokyo University, 1951: 95–112.
- [113] Okin G S. A new model of wind erosion in the presence of vegetation [J]. Journal of Geophysical Research-Earth Surface, 2008, 113(F2): F000758.
- [114] 宣捷. 中国北方地面起尘总量分布 [J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 426–430.
- [115] Loosmore G A, Hunt J R. Below-threshold, non-abraded dust resuspension [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105: 20663–20671.
- [116] Klose M, Shao Y P. Stochastic parameterization of dust emission and application to convective atmospheric conditions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 16(12): 3263–3293.
- [117] Laurent B, Marticorena B, Bergametti G, et al. Modeling mineral dust emissions from the Sahara desert using new surface properties and soil database [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: D14218.
- [118] Gherboudj I, Beegum S N, GhediraImenj H. Identifying natural dust source regions over the middle-east and North-Africa: estimation of dust emission potential [J]. Earth-Science Reviews, 2017, 165: 342–355.
- [119] Taichu Y, Tanaka M C. A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget [J]. Global and Planetary Change, 2006, 52: 88–104.
- [120] Carmona J, Vanoye A, Lozano F, et al. Dust emission modeling for the western border region of Mexico and the USA [J]. Environmental Earth Science, 2015, 74(2): 1–11.
- [121] Chen S Y, Huang J P, Qian Y, et al. An overview of mineral dust modeling over East Asia [J]. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(4): 633–653.
- [122] 车慧正, 张小曳, 李杨, 等. DPM模型计算我国北方沙漠地区粉尘释放通量 [J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(5): 49–55.
- [123] Laurent B, Marticorena B, Bergametti G, et al. Modeling mineral dust emissions from Chinese and Mongolian deserts [J]. Global and Planetary Change, 2006, 52(1): 121–141.
- [124] 陈莉, 韩婷婷, 李涛, 等. 基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算 [J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2197–2203.
- [125] Liu Y X, Teng Y, Liang S, et al. Establishment of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  emission inventories from wind erosion source and simulation of its environmental impact based on WEPS-Models3 in southern Xinjiang, China [J]. Atmospheric Environment, 2021, 248: 118222.
- [126] Uno Z, Wang M, Chiba Y S, et al. Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia: overview [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: D12213.
- [127] Tanaka T Y, Chiba M. Global simulation of dust aerosol with a chemical transport model, MASINGAR [J]. Journal of Meteorological Society of Japan, 2005, 83A: 255–278.
- [128] Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia: 2. model simulation and validation [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D9): 4262.
- [129] Menut L, Forêt G, Bergametti G. Sensitivity of mineral dust concentrations to the model size distribution accuracy [J]. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, 2007, 112: D10210.
- [130] Sun H, Pan Z T, Liu X. DNumerical simulation of spatial-temporal distribution of dust aerosol and its direct radiative effects on East Asian climate [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: D13206.
- [131] Zhou C H, Gong S L, Zhang X Y, et al. Development and evaluation of an operational SDS forecasting system for East Asia: CUACE/dust [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8: 787–798.
- [132] Wu C L, Lin Z H. Uncertainty in dust budget over East Asia simulated by WRF/Chem with six different dust emission schemes [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2013, 6: 428–433.
- [133] Su L, Fung J C H. Sensitivities of WRF-Chem to dust emission schemes and land surface properties in simulating dust cycles during springtime over East Asia [J]. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, 2015, 120: 11215–11230.
- [134] Alfaro S C, Rajot J L, Nickling W G. Estimation of  $PM_{20}$  emis-

- sions by wind erosion; main sources of uncertainties [J]. *Geomorphology*, 2004, 59: 63–74.
- [135] Aimar S F, Mendez M J, Funk R, et al. Soil properties related to potential particulate matter emissions ( $PM_{10}$ ) of sandy soils [J]. *Aeolian Research*, 2012, 2: 437–443.
- [136] Gomes L, Arrúe J L, López M V, et al. Wind erosion in a semi-arid agricultural area of Spain: the WELSONS project [J]. *Catena*, 2003, 52(3/4): 250–256.
- [137] Stetler L D, Saxton K E. Wind erosion and  $PM_{10}$  emission from agricultural fields on the Columbia Plateau [J]. *Earth Surface Process and Landform*, 1996, 21(7): 673–685.
- [138] Houser C A, Nickling W G. The emission and vertical flux of particulate matter  $<10\ \mu m$  from a disturbed clay-crust surface [J]. *Sedimentology*, 2001, 48: 255–267.
- [139] Gomes L, Rajot J L, Alfaro S C, et al. Validation of a dust production model from measurements performed in semi-arid agricultural areas of Spain and Niger [J]. *Catena*, 2003, 52: 257–271.
- [140] 邢茂, 郭烈锦. 土壤风蚀中粉尘释放规律研究 [J]. *中国科学 G 辑*, 2008, 38(8): 984–998.
- [141] Niemeyer T C, Gillette D A, Deluisi J J, et al. Optical depth and flux of dust from Owens Lake, California [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24: 463–479.
- [142] Jason A R, Bruce R W. Estimating fugitive dust emission rates using an environment boundary layer wind tunnel [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 7668–7685.
- [143] Burri K, Gromke C, Lehning M, et al. Aeolian sediment transport over vegetation canopies: a wind tunnel study with live plants [J]. *Aeolian Research*, 2011, 3: 205–213.
- [144] Scott Van Pelt R, Baddock M C, Zobeck T, et al. Total vertical sediment flux and  $PM_{10}$  emissions from disturbed Chihuahuan Desert surfaces [J]. *Geoderma*, 2017, 293: 19–25.
- [145] Singh P, Sharratt B, Schillinger W F. Wind erosion and  $PM_{10}$  emission affected by tillage system in the world's driest rainfed wheat region [J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124: 219–225.
- [146] Alfaro S C. Influence of soil texture on the binding energies of fine mineral dust particles potentially released by wind erosion [J]. *Geomorphology*, 2008, 93(3/4): 157–167.
- [147] 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.
- [148] Feng G, Sharratt B, Wendling L. Fine particle emission potential from loam soils in a Semiarid Region [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(6): 2262–2270.
- [149] Goossens D, Buck B J. Can BSNE (Big Spring Number Eight) samplers be used to measure  $PM_{10}$ , respirable dust,  $PM_{2.5}$  and  $PM_{1.0}$ ? [J]. *Aeolian Research*, 2012, 5: 43–49.
- [150] Sweeney M R, Lu H, Cui M, et al. Sand dunes as potential sources of dust in northern China [J]. *Science China-Earth Sciences*, 2016, 59(4): 760–769.
- [151] Aviv R, Meni B, Itzhak K. Dust emission thresholds in loess soil under different saltation fluxes [J]. *Applied Science*, 2020, 10: 5949.
- [152] 梅凡民, 张小曳, 鹿化煜, 等. 中国北方表土微团粒粒度分布及其对粉尘释放通量的影响 [J]. *科学通报*, 2004, 49(17): 1776–1784.
- [153] Wang X, Lang L, Huaa T, et al. Characteristics of the Gobi desert and their significance for dust emissions in the Ala Shan Plateau (Central Asia): an experimental study [J]. *Journal of Arid Environments*, 2012, 81: 35e46.
- [154] 冯益明, 吴波, 姚爱冬, 等. 戈壁分类体系与编目研究 [J]. *地理学报*, 2014, 69(3): 391–398.
- [155] 申元村, 王秀红, 程维明, 等. 中国戈壁综合自然区划研究 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35(1): 57–66.
- [156] 刘连友, 刘玉璋, 李小雁, 等. 砾石覆盖对土壤吹蚀的抑制效应 [J]. *中国沙漠*, 1999, 19(1): 60–62.
- [157] Tan L, Zhang W, An Z, et al. The effect of roughness density of gobi beds on the entrainment of sediment by wind; a wind tunnel study [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 190: 183–189.
- [158] Li H, Zou X, Zhang C, et al. Effects of gravel cover on the near-surface airflow field and soil wind erosion [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 214: 105133.
- [159] Wang X M, Zhou Z J, Dong Z B. Control of dust emissions by geomorphic conditions, wind environments and land use in northern China: an examination based on dust storm frequency from 1960 to 2003 [J]. *Geomorphology*, 2006, 81(3/4): 292–308.
- [160] 屈建军, 张克存, 张伟民, 等. 几种典型戈壁床面风沙流特性比较 [J]. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 285–290.
- [161] Van Rijn L C. A fully predictive model for aeolian sand transport, part 2: description and calibration of models and effect of moisture and coarse materials [J]. *Coastal Engineering*, 2022, 171: 104052.
- [162] Wang X, Zhang C. Field observations of sand flux and dust emission above a gobi desert surface [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(4): 1815–1825.
- [163] Liang L H, Zhang W M, Tan L H. Dust emission from gobi under different dust content conditions: a wind tunnel study atop the Mogao Grottoes [J]. *Atmosphere*, 2021, 12: 1498.
- [164] 王仁德, 肖登攀, 常春平, 等. 农田风蚀量随风速的变化 [J]. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1120–1127.
- [165] 刘东伟, 吉力力·阿不都外力, 雷加强, 等. 盐尘暴及其生态效应 [J]. *中国沙漠*, 2011, 31(1): 168–173.
- [166] Micklin P. The Aral Sea dsaster [J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 2007, 43: 472–479.
- [167] Gillette D A, Hardebeck E, Parker J. Large-scale variability of wind erosion mass flux rates at Owens Lake: 2. role of roughness change, particle limitation, change of threshold friction velocity, and the Owen effect [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D22): 25989–25998.
- [168] Frie A L, Dingle J H, Ying S C, et al. The effect of a receding sa-



- line lake (the Salton Sea) on airborne particulate matter composition [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51 (15): 8283–8292.
- [169] Akbar G. Characterization of saline dust emission resulted from Urmia Lake drying [J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2015, 13(1): 366–372.
- [170] Stone R. Saving Iran's great salt lake [J]. *Science*, 2015, 349 (6252): 51044–51047.
- [171] 李保国, 马黎春, 蒋平安, 等. 罗布泊“大耳朵”干盐湖区地形特征与干涸时间讨论[J]. *科学通报*, 2008(3): 327–334.
- [172] 刘美萍, 哈斯, 春喜. 近50年来内蒙古查干淖尔湖水量变化及其成因分析[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(1): 141–149.
- [173] 岳乐平, 杨利荣, 李智佩, 等. 阿拉善高原干涸湖床沉积物与华北地区沙尘暴[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(3): 311–317.
- [174] 赵望龙, 郭中领, 王仁德, 等. 安固里淖干湖区土壤理化因子空间分布特征[J]. *湿地科学*, 2016, 14(4): 553–560.
- [175] Li C, Dong Z B, Chen G, et al. Influence of salinity and moisture on the threshold shear velocity of saline sand in the Qarhan Desert, Qaudam Basin of China: a wind tunnel experiment[J]. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(5): 674–684.
- [176] Han L, Liu D, Cheng G, et al. Spatial distribution and genesis of salt on the saline playa at Qehan Lake, Inner Mongolia China [J]. *Catena*, 2019, 1177: 22–30.
- [177] Cui M C, Lu H Y, Giles F S, et al. Quantifying the effect of geomorphology on aeolian dust emission potential in northern China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44 (14): 2872–2884.
- [178] Lal R. *Soil Erosion Research Methods* [M]. Delray Beach, USA: St. Lucie Press, 1994.
- [179] 王仁德, 李庆, 常春平, 等. 土壤风蚀野外测量技术研究进展 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39(4): 113–128.
- [180] Fratini G, Ciccioli P, Febo A, et al. Size-segregated fluxes of mineral dust from a desert area of northern China by eddy covariance [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7: 2839–2854.
- [181] Guo Z L, Wang R D, Van Pelt R S, et al. Construction and field use of a cyclone type instantaneous weighing aeolian sand trap [J]. *Aeolian Research*, 2020, 43: 100564.
- [182] Ishizuka M, Mikami M, Leys J F, et al. Effects of soil moisture and dried rain droplet crust on saltation and dust emission [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2014, 113: D24212.
- [183] Webb N P, Herrick J E, Van Zee J W, et al. The National Wind Erosion Research Network: building a standardized long-term data resource for aeolian research, modeling and land management [J]. *Aeolian Research*, 2016, 22: 23–36.
- [184] Gillette D A, Ono D. Expressing sand supply limitation using a modified Owen saltation equation [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 31: 1806–1813.
- [185] Webb N P, Sandra L L, Cooper B F, et al. Size distribution of mineral dust emissions from sparsely vegetated and supply-limited dryland soils [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2016, 126: D035478.
- [186] Kaufman Y J, Tanri D, Remer L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 17051–17067.
- [187] Cao H, Liu J, Wang G, et al. Identification of sand and dust storm source areas in Iran [J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7: 567–578.

## Review of dust emission in soil wind erosion

Wang Rende<sup>1</sup>, Li Qing<sup>1</sup>, Chang Chunping<sup>2</sup>, Guo Zhongling<sup>2</sup>, Li Jifeng<sup>2</sup>, Zou Xueyong<sup>3</sup>,  
Zhang Chunlai<sup>3</sup>, Yuan Yixiao<sup>3</sup>, Liu Ying<sup>3</sup>, Zhou Na<sup>4</sup>

(1. *Institute of Geographical Sciences / Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China*; 2. *College of Resource and Environment Sciences / Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China*; 3. *Faculty of Geographical Science / State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology / MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-Sand Control, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 4. *College of Management Science and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050000, China*)

**Abstract:** Dust emission in soil wind erosion is one of the core topics in international aeolian research, which develops rapidly in recent years, but the introduction of its research progress is not systematic and comprehensive. This paper combs the research history of dust emission in soil wind erosion at home and abroad, divides the research stages for the first time, refines the main research results of each stage, and introduces some new understandings of the dust emission mechanism. Based on the reclassification of dust emission models, the model establishing process, advantages and disadvantages of various models and their applications in global and regional dust models are introduced. This paper puts forward some hot and difficult issues in the current dust emission research, hoping to provide some reference for relevant scholars to carry out research work in this field.

**Key words:** soil wind erosion; dust emission; research history; mechanism; dust model