

张越,陈思宇,毕鸿儒,等.干旱半干旱区农田土壤风蚀特征及参数化研究进展[J].中国沙漠,2022,42(3):105-117.

# 干旱半干旱区农田土壤风蚀特征及参数化研究进展

张越<sup>1</sup>,陈思宇<sup>1</sup>,毕鸿儒<sup>1</sup>,曹佳慧<sup>1</sup>,罗源<sup>2</sup>,龚咏琪<sup>1</sup>,陈渔<sup>1</sup>

(1.兰州大学 大气科学学院/半干旱气候变化教育部重点实验室,甘肃 兰州 730000; 2.湖南省气象台/湖南省气象局,湖南 长沙 410118)

**摘要:** 干旱半干旱地区是中国的农业后备战略基地,然而近年来该地区农田土壤风蚀现象严重,沙/尘释放量显著增大,威胁农业的可持续发展和生态系统平衡。目前绝大部分的天气和气候模式仅考虑了沙漠地表起沙,忽视退化农田的土壤风蚀起沙,导致起沙通量模拟存在很大的不确定性。对20世纪50年代以来干旱半干旱区农田土壤风蚀起沙特征及参数化做了详细的分析总结,回顾并梳理了干旱半干旱区农田土壤风蚀观测和数值模拟的研究脉络以及存在的问题,为提高农田起沙的模拟精度提供了有效参考,对中国干旱半干旱区农田土壤风蚀防治、土地荒漠化治理以及理解未来土地利用改变对大气污染的影响具有重要意义。

**关键词:** 干旱半干旱区; 农田; 土壤风蚀; 风洞试验; 起沙参数化

**文章编号:** 1000-694X(2022)03-105-13

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00160

**中图分类号:** S157

**文献标志码:** A

## 0 引言

中国是人口众多的农业大国,农业是国民经济的基础。中国干旱半干旱区农田面积占全国总农田面积的11.57%,呈树枝状或带状分布于黄土高原、内蒙古、甘肃、新疆及青海的山前冲积平原和绿洲<sup>[1]</sup>,是中国正在形成的重要农业发展基地<sup>[2-3]</sup>。此外,中国干旱半干旱区还蕴藏着丰富的宜农荒地资源,约0.25亿hm<sup>2</sup>,占中国宜农荒地的71%,有巨大的粮食生产潜力<sup>[4-6]</sup>。近年来土地荒漠化问题十分严重,中国受土壤风蚀及土地荒漠化影响的面积占国土总面积的1/2以上,尤以半干旱地区农田最为严重<sup>[7-9]</sup>。

土壤风蚀指地表土壤颗粒被风吹起、搬运和堆积的风蚀过程,以及地表物质受风吹跃迁颗粒的磨蚀过程,是干旱、半干旱地区土地退化和土地荒漠化的最重要最直接的作用<sup>[10-12]</sup>。IPCC评估报告指出,农田土壤风蚀起沙占全球总沙尘释放量的10%

—20%<sup>[13]</sup>。农田土壤风蚀过程是受自然、人为因素综合影响的风沙物理过程<sup>[14-17]</sup>。气候变化、生产活动、土地类型和土壤质地等多个因素的共同作用决定了农田土壤风蚀起沙的多样性和复杂性<sup>[18]</sup>。

中国干旱半干旱区农田以砂性土壤为主,处于脆弱生态带,社会经济基础较为薄弱、耕作粗放、广种薄收。土壤风蚀会使中国干旱半干旱区农田土壤中富含营养物质的粉尘微粒大量流失,导致农田土壤进一步粗化和贫瘠化,造成土壤生产力的部分甚至完全破坏,导致泥石流、沙尘暴等自然灾害频发,同时造成严重的空气污染问题<sup>[19-21]</sup>,危害农业生产和生态系统平衡<sup>[22]</sup>。因此,目前中国国民经济建设、环境治理亟需以中国干旱半干旱区农田为重点开展土壤风蚀研究。本文从多尺度农田土壤风蚀模型角度出发,针对中国干旱半干旱区的农田土壤风蚀起沙领域,总结国内外20世纪50年代以来农田土壤风蚀起沙参数化研究进展和成果。为将风沙物理学中的起沙/尘机制应用到农田土壤风蚀中

收稿日期:2021-08-15; 改回日期:2021-11-10

资助项目:国家自然科学基金项目(42175106,91837103);中国博士后科学基金项目(2020M681156);中央高校基本科研业务费专项资金科研创新团队建设(1zujbky-2020-ct03)

作者简介:张越(1997—),男,四川眉山人,硕士研究生,主要从事农田沙尘起沙研究。E-mail: zhangyue19@lzu.edu.cn

通信作者:陈思宇(E-mail: chensiyu@lzu.edu.cn)

提供科学的思考,为在不同时空尺度上构建农田土壤风蚀模型提供有效的支撑。

## 1 农田土壤风蚀的野外观测和风洞试验研究

近年来,基础理论的完善与观测仪器的成熟为土壤风蚀的研究提供了多种手段。考虑到野外观测条件的限制,风洞试验因其条件的可控性和易操作性成为研究土壤风蚀成因、过程和定量分析的有力工具,深化了对土壤风蚀的探索能力<sup>[23-26]</sup>。多年来,国内外学者利用风洞试验对农田土壤风蚀的特征、形成机制以及影响因子等进行了系统深入的研究。

20世纪30年代以来,研究者对土壤风蚀问题进行了系统研究,建立了土壤风蚀的动力机制并初步揭示了影响风蚀的主要因素。Chepil<sup>[27]</sup>指出,农田不同于沙漠起沙的原因在于农田植被增加了地表粗糙度,翻耕等人为活动也增加了农田风蚀起沙机制的复杂性,农田土壤风蚀量与风速平方呈正比,与土壤结皮的破裂系数呈反比<sup>[28]</sup>。Gillette<sup>[29]</sup>通过小型野外风洞获取了美国干旱、干旱半干旱区农田起沙的临界风速,发现砂质土的临界起动风速最低,且受降水的影响最小,而壤质土相反;降水过后,黏土的临界起沙摩阻速度由 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 提高至 $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此外,地形也会影响农田土壤风蚀量。风洞试验结果表明,在适当的山脊高度、垂直于盛行风的情况下进行山脊耕作可以大大降低风蚀率<sup>[30-31]</sup>。值得注意的是,翻耕等人为因素对农田土壤风蚀的影响十分显著。Lopez等<sup>[32]</sup>在阿拉贡中部干旱农田开展风洞试验,发现翻耕后的农田土壤风蚀起沙通量与原来相比增加数十倍;Fister等<sup>[33]</sup>通过埃布罗盆地的便携式风洞试验,发现牲畜践踏后土壤产生的风蚀量比未扰动的硬皮土壤高10倍,翻耕土壤的风蚀量则高出40多倍;Basaran等<sup>[34]</sup>发现土耳其中部干旱地区的农田翻耕会引起严重的土壤风蚀,干季、湿季土壤风蚀量分别为 $11.38$ 、 $11.40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。此外,作物的生长周期中植被覆盖率改变,进而影响土壤风蚀量。Hagen<sup>[35]</sup>发现作物残茬覆盖程度对土壤风蚀有重要的屏障作用,直立的作物残茬对风蚀量的抑制作用远大于平卧的秸秆。

中国土壤风蚀研究较国外稍晚,中国的研究者主要对内蒙古农牧区,新疆、东北、陕甘宁北部以及黄河中下游等地的农田下垫面开展了大量的野外观测和风洞试验,系统地探讨了气象条件(风速、

风向和降水)、土壤物理和化学性质(粒径分布、含水量、有机质和碳酸钙等)、地形、地表粗糙度、植被覆盖度和农业耕作管理方式等因素影响下农田土壤风蚀的发生机理(表1)<sup>[36-40]</sup>。

中国非沙区农田土壤的风蚀强度远低于干旱半干旱区的沙区农田,前者的释放以气流直接抬升为主,后者则多呈现直接抬升和砂粒跃移冲击的复合模式<sup>[41]</sup>。相比于未扰动地表,不合理的土地耕作和管理方式会改变土壤表层结构并破坏颗粒间的结合强度,进而释放更多的沙尘/扬尘颗粒。在其他条件不变的情况下,翻耕地的土壤风蚀量是未翻耕地的14.8倍<sup>[42]</sup>。王仁德等<sup>[43]</sup>对北京市农田土壤风蚀特征进行风洞试验发现,翻耕不耙平地风蚀强度最大,玉米留茬地次之,翻耕耙平地最弱。李玄姝等<sup>[18]</sup>对河北坝上地区农田的风蚀因子和输沙量进行长期野外观测发现,土壤含水率与输沙量相关性最大;退耕地的地表粗糙度、土壤含水率和土壤硬度最大,翻耕地最小;而翻耕地的输沙量最大,退耕地最小。王仁德等<sup>[44]</sup>在河北省坝上地区进行长期野外观测发现,在风蚀季,农田特别是翻耕农田土壤可蚀性呈下降的趋势。

中国北方地区的农田土壤风蚀量和植被覆盖度、地形等因素关系密切。张春来等<sup>[45]</sup>开展了中国干旱半干旱区土壤风蚀的风洞实验,给出了植被覆盖度和临界风速的关系,发现北方旱作农田、草原的临界风速分别为 $5$ 、 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。邱云霄等<sup>[46]</sup>指出,北京周边地区秸秆覆盖度达60%以上时,细颗粒物的释放量基本达到稳定值。Liu等<sup>[47]</sup>利用风洞模拟得到内蒙古中部农田的平耕风蚀量为 $129.9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ ,而山脊耕种的土壤风蚀量少20%—60%。以往研究已对中国农田土壤风蚀特征和机理做了系统的探讨,然而目前大部分风洞试验结果着重于理论研究和机制的揭示,将观测结果与区域模式有机结合的研究还比较有限;对中国不同地区农田土壤风蚀的研究相对较少,关于农田土壤风蚀起沙关键因子的认知还不够准确和全面。

## 2 风蚀起沙的数值模拟研究

### 2.1 风蚀参数化方案

沙尘释放与沙粒运移过程密切相关。在起沙过程中,不同粒径组颗粒存在不同的运移形式,基于野外观测和风洞实验研究,将沙粒运移形式归为

表 1  农田土壤风蚀起沙部分风洞试验的研究进展

Table 1  Progress of wind tunnel experiment on farmland soil wind erosion

地区	地表状况	实验处理	风速 /(m·s <sup>-1</sup> )	输沙量 /g	输沙率 /(g·cm <sup>-2</sup> ·min <sup>-1</sup> )	参考文献
中国西北半干旱区 青海省贵南县	草原植被,板栗土壤,含 36%的 砂粒、53%的粉粒和 11%的黏粒	最大土块直径 1.0 cm	15		0.098	Zhang 等 <sup>[23]</sup>
		最大土块直径增加至 5.0 cm	15		0.0046	
内蒙古自治区锡林 郭勒盟太仆寺旗头 支箭乡小河套村	原状栗钙土	自然风干处理,无残茬	8		0.000135	杨秀春等 <sup>[36]</sup>
			10		0.000354	
			15		0.004352	
			20		0.008811	
			24		0.021420	
内蒙古自治区武川 县旱作农业区	砂质栗钙土,砂粒含量 67%、粉 粒含量 31.5%、黏粒含量 1.5%	茬高 20 cm,平均植被覆盖 率 55%,带宽 3 m,距地表 0.6 m 处	5	0.023		赵彦军等 <sup>[37]</sup>
			6	0.051		
			9	0.063		
			12	0.081		
			15	0.117		
内蒙古自治区武川 县干旱区	栗钙土,多孔隙,沙性,有机质含 量低	带宽 8 m,距风洞出口 120 cm,收集高度 0— 70 cm	6	12.2		韩亚雄 <sup>[38]</sup>
			9	15.0		
			12	12.5		
			15	6.7		
			18	23.5		
青藏高原 干旱区	分级草地和草原收集的沙质土 壤	无植被覆盖,地面 0—10 cm, 完全粉碎用于模拟动物 践踏	8		0.00900	Wang 等 <sup>[26]</sup>
			10		0.04890	
			12		0.13632	
			14		0.26226	
			16		0.50638	
			18		0.68154	
			20		1.26318	
			22		2.12892	
北京市延庆区	土壤密度 1.2 g·cm <sup>-3</sup> ,含水比例 2.32%	地表裸露,有少量结皮,高 度 0—30 cm	8		0.00026	吴姗姗等 <sup>[39]</sup>
			12		0.00184	
			16		0.00824	
			20		0.06655	
			24		0.13435	
黑龙江省克山县厚 层黑土区	有机质含量最高可达 15%,孔隙 度可达 69.7%,黑土区土壤侵蚀 严重	集沙高度为 60 cm,无覆盖	9		0.00605	王一菲等 <sup>[40]</sup>
			12		0.02450	
			15		0.16127	

三大类,分别为蠕移、跃移和悬移<sup>[48]</sup>。蠕移是指粗  
粒径组颗粒(大于 1 000 μm)在风力以及其他跃移  
颗粒的作用下在地表发生滑动或者滚动的过程,蠕  
移过程观测存在误差较大等难题,因此对蠕移研究  
相对较少;跃移过程即沙粒在风场的作用下在地表  
发生跳跃运动,是沙粒运动的主要形式,被广泛认

为对土壤地表风蚀起着重要作用;悬移主要是粉尘颗粒在湍流等作用下直接释放到大气中。

最初,学者们认为沙尘释放主要与跃移运动相关<sup>[49-50]</sup>,并假设沙尘释放与沙粒水平跃移通量呈一定关系,提出了很多的经验或者半经验公式,其中有代表性的是 Gillette 等<sup>[51]</sup>和 Marticorena 等<sup>[52]</sup>的工作。目前,学术界普遍认为有3种导致沙尘的释放原因<sup>[53-55]</sup>,即气流直接挟带、跃移颗粒对地面撞击和聚合团粒被撞击后的碎裂与分离。我们通常认为沙尘释放的机制主要是跃移颗粒对地表的撞击作用而引起的轰击排放<sup>[50,52,56]</sup>和由于团粒破碎和分离而导致的粉尘释放<sup>[57-58]</sup>,一般认为气流直接挟带的沙尘释放量较小。

完善的风蚀起沙参数化方案是准确描述沙尘物理过程的核心和难点<sup>[59-68]</sup>。自20世纪90年代以来,基于不同的假设和物理过程简化,目前的风蚀起沙方案主要分为以下3类<sup>[69]</sup>。

经验性起沙方案。该方案主要考虑了垂直起沙通量与摩阻速度和临界起沙摩阻速度的统计关系。Gillette 等<sup>[51]</sup>通过野外试验发现沙尘释放速率在临界起沙摩阻速度在三次方到五次方之间,提出了垂直释放通量的经验公式,但该模型输入参数较少,不能完全反映沙尘释放的微观物理机制。Tegen 等<sup>[70]</sup>通过沙尘暴观测构建了一个三维沙尘输送模型,该模型包含土壤质地、表面粗糙度和土壤含水量等风蚀参数,并且该模型还适用于细粒子。Ginoux 等<sup>[71]</sup>在 Gillette 等<sup>[51]</sup>的研究基础上调整了沙尘粒径分布以及考虑了沙尘源函数,构建了 GOCART 经验起沙参数化方案。

基于简化物理过程的起沙方案。该方案的复杂程度介于第一类和第三类方案。比如, Marticorena-Bergametti 方案<sup>[52]</sup>(简称为 MB 方案)认为沙尘释放通量取决于地表颗粒的水平跃移强度,并与土壤黏土含量相关。黄美元等<sup>[72]</sup>在国内外起沙机制模型的基础上考虑起沙的谱分布、粒子沉降及沙尘粒子与云碰并的微物理过程,提出一个适合中国北方的新的起沙机制模型。Alfaro 等<sup>[73]</sup>通过风洞试验确定沙尘垂直通量和摩阻速度之间的关系,进而建立了中尺度大气模型(DPM),该模型包含土壤质量密度、表面粗糙度等土壤特征和摩阻速度等风蚀参数,但由于不能准确获取粒子结合能,模式结果仍有较大的不确定性。Zender 等<sup>[74]</sup>在 MB 方案的基础

上考虑了土壤风蚀度的影响,提高了起沙的模拟精度。

基于详细微物理过程的起沙方案。该方案考虑的物理过程最为详细,认为沙尘释放是由沙粒轰击作用克服土壤粒子间的黏合力而产生<sup>[75]</sup>。最初的微物理起沙机制方案只考虑了碰撞时动能与黏合能量之间的关系,如 Shao<sup>[76]</sup>方案,之后的方案中逐渐增加了沙尘粒径分布、沙尘质量分数和释放阈值等因素。Shao<sup>[53]</sup>方案提出沙尘释放是由跳跃轰击产生的聚集体解体产生,能够计算所有粒径分布的起沙通量;Shao<sup>[57]</sup>方案进一步考虑到土壤中单个存在的自由沙尘质量分数应远小于以聚合沙尘团形式存在的沙尘质量分数;Shao 等<sup>[77-78]</sup>发现土壤母质的粒径分布决定了大气中沙尘颗粒的粒子谱分布,进而减少了 Shao<sup>[57]</sup>方案的不确定性。雷航等<sup>[79]</sup>改进了临界摩擦速度的模拟并与中尺度气象预报模式 MM5(Mesoscale Meteorological Model 5)耦合,以中国区域的 GIS(Geographic Information System)数据为基础,建立和发展了中国科学院大气物理研究所沙尘天气数值预测系统。Kok 等<sup>[58]</sup>考虑了沙尘释放过程中聚合粒子的破碎机制,构建了一个基于微物理机制的起沙方案。然而,此类起沙方案很难准确获得土壤湿度和粗糙度等起沙相关的关键地表参数。

## 2.2 沙尘模拟的不确定性分析

沙尘气溶胶的研究对全面完善整个地球的能量收支体系以及生态循环、水循环有重要意义,对提高中尺度模式的预报精度和沙尘天气的准确预警、预测也有积极影响<sup>[80-84]</sup>。由于沙尘本身较为复杂的作用机制,其在不同时空尺度上数量和属性存在的巨大差异, Huneus 等<sup>[85]</sup>对 AeroCom 计划(<http://nansen.ipsl.jussieu.fr/AEROCOM/>)中15个全球气溶胶模式的模拟差异进行了系统比较。他们认为不同的全球模式对模拟沙尘生命史以及其对气候的影响都有很大差异。总体来说,不同模式对沙尘垂直积分参数(如 AOD 和柱含量等)的模拟差异较小(约2倍,其中模拟全球平均沙尘气溶胶的光学厚度为0.01—0.053,80%的模式集中在0.02—0.035);但对沙尘释放通量、总沉降和地表浓度的模拟差异则高达10倍之多,其中模拟的年平均沙尘释放通量在500—4 400 Tg,大大超过了 Zender 等<sup>[86]</sup>对

当时发布的气候沙尘模式的估计范围(1 000—2 150 Tg)。此外,对于亚洲地区沙尘释放通量的模拟,在15个模式中GOCART的模拟结果最大为873

Tg,LSCE的模拟结果最小为27 Tg,两者的差异高达32倍(图1),远高于模式对全球尤其是北非和中亚地区的模拟差异。

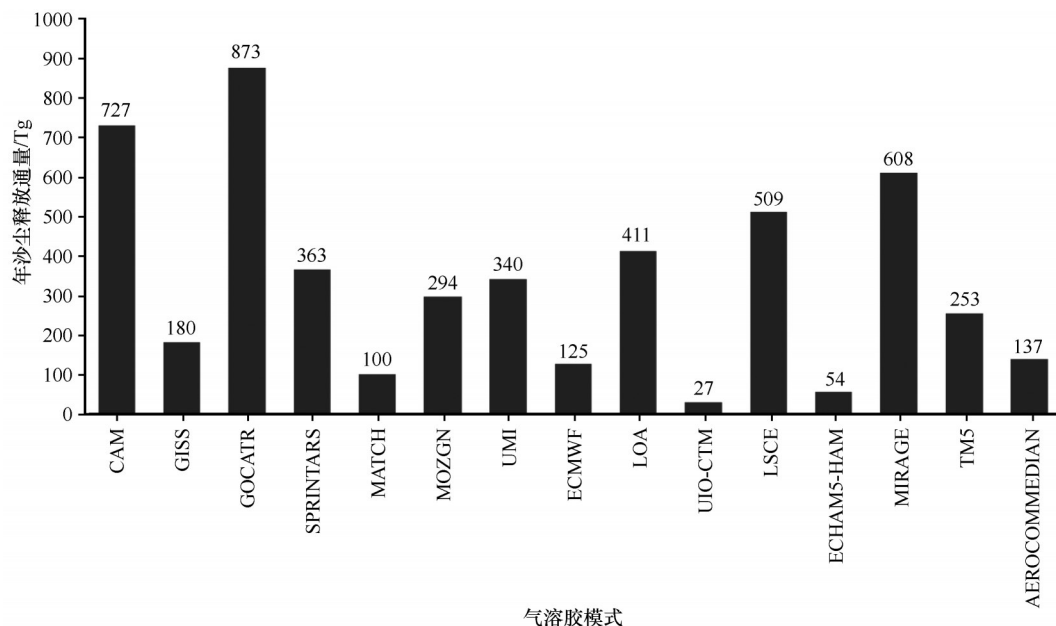


图1 15个全球气溶胶模式模拟的亚洲地区年沙尘释放通量比较(数据来自于Huneeus等<sup>[85]</sup>)

Fig.1 Comparison of annual dust emission flux in Asia based on 15 global schemes<sup>[85]</sup>

中国学者也对沙尘模拟做出了相当大的贡献,张宏升等<sup>[87]</sup>利用浑善达克沙地春季沙尘暴资料,计算了不同沙尘天气条件下的湍流交换系数、湍流动量通量和感热通量、沙尘浓度通量,发现该地区沙尘通量与摩擦速度的三次方存在正比关系,临界起沙风速和临界摩擦速度分别约为 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Zhao等<sup>[60,88]</sup>采用两种起沙方案GOCART和DUSTRAN,以及两种气溶胶方案MADE/SORGAM和MOSAIC,量化了北非地区沙尘对短波辐射强迫的反馈,发现DUSTRAN方案高估了北非西海岸的沙尘释放。Han等<sup>[62-63]</sup>将气相化学机制CB-IV耦合到区域集成环境模式系统RIEMS(Regional Integrated Environmental Model System),指出耦合后的模式可以较好地模拟东亚沙尘的季节变化和空间分布特征。段佳鹏<sup>[89]</sup>利用塔克拉玛干沙漠及周边地区观测资料,依据尘卷风热力学理论和方法,构建了大气边界层起沙过程参数化方案,计算出塔克拉玛干沙漠地区尘卷风对沙尘气溶胶贡献的年平均量为 $4.0\times 10^6\text{ t}$ ,年最大量为 $5.0\times 10^6\text{ t}$ 。

总体来说,不同数值模式对沙尘垂直积分参数的模拟误差约2倍;沙尘释放通量的模拟误差可达10倍以上,模拟的平均年沙尘释放通量500—4 400 Tg。

研究表明,目前天气和气候模式中的起沙模型仅考虑了沙漠地表性态情况下的风蚀物理过程,忽视或严重低估了农田下垫面的风蚀起沙,这可能是导致起沙通量模拟误差以及气候模式中东亚细粒子低估的重要原因<sup>[84,90-91]</sup>。

### 3 农田土壤风蚀起沙的数值模拟研究

#### 3.1 农田土壤风蚀模型的发展

农田土壤风蚀起沙参数化是土壤荒漠化、风蚀防治的研究基础,也是近年来土壤风蚀研究的重点和难点问题<sup>[92]</sup>。农田土壤风蚀起沙受自然和人为因素的综合影响,具有排放规模小、时空变率大、临界起沙摩擦速度复杂多样等特征。因此,揭示多种农田土壤风蚀起沙因子的综合影响及其与农田土壤风蚀过程的定量关系更为复杂。

19世纪50年代后期,美国大平原地区出现了严重的风蚀现象,美国农业部土壤保护局(SCS)由此成立。Chepil等<sup>[28]</sup>于1947年在美国农业部实验室开始风蚀研究,并在风洞试验基础上建立了土壤流失模型,该模型包含了5个关键因素——土壤、垄粗、气候、田长、营养物质。随后,Woodruff等<sup>[93]</sup>在

Chepil等研究的基础上构建了历史上第一个土壤风蚀通用方程(WEQ),可用来估算农田年风蚀量,影响因子包括气候因子、土壤可蚀性、田垄长度、作物残茬量以及土壤表面粗糙度等。但WEQ模型存在与微观风蚀机制脱节、只适用于农田尺度、地区适应性差和经验性估算为主等缺陷。后来经过不断修改和提升,美国农业部(USDA)根据用户要求开发修正风蚀方程(RWEQ),用以进行每日土壤风蚀估算。RWEQ模型以WEQ为基础,将现场数据集与计算机模型相结合进行模拟,能够描述物理风蚀过程。该模型包含了天气因子、土壤结皮因子、可蚀性因子、粗糙度、地面植被等田间参数。土壤可蚀性与土壤中团聚结构、地表不易风蚀凸起土块的体积和不同粒径组沙粒百分含量有关,其值代表克服土壤风蚀的难易度;气候因子包含10 m处风速、降水量和蒸发量等因素;田垄长度是指沿盛行风方向穿过田垄的总长度;土壤表面粗糙度主要集中在农田土垄和土块,当土垄高度和间距比发生变化时,防风蚀效率会发生显著变化;作物残茬主要包括了留茬种类、留茬高度、留茬密度和单位面积残茬质量等因素。RWEQ与WEQ在模型结构上没有本质差别,但是包含了土壤结皮因子,其由土壤CaCO<sub>3</sub>含量、有机质含量、粉粒含量、砂粒含量和黏粒含量5个要素表达。仍然该模型充分考虑了大量的风蚀因子,但未摆脱WEQ的思想束缚,仍然保留了其不足之处。由于其经验性和复杂性,WEQ和RWEQ模型不容易适应不同于美国中部大平原的条件或气候<sup>[94]</sup>,风蚀预测系统(WEPS模型)由美国农业部(USDA)于1985年开始开发,该模型能够计算蠕移、跃移和悬移损失的颗粒,还能预估PM<sub>10</sub>排放<sup>[95]</sup>;相比较于WEQ模型只能计算季度或者年的土壤风蚀,该模型可以计算日的土壤损失<sup>[96]</sup>。WEPS模型可以通过5个子模型模拟土壤和植被的地表状态,5个子模块分别为水文、土壤、管理、作物生长和残渣分解。WEPS模型目前不能适应起伏的地形,其次详细输入数据不易获取。单事件风蚀评估模型(SWEEP)是WEPS子模型的一个独立版本,该模型在提供输入的地面和风力条件下,可以估计24小时内的潜在土壤风蚀<sup>[97]</sup>。

为了了解风蚀过程,保护宝贵的自然资源、人类健康和环境等需要,Gregory等<sup>[98]</sup>从理论分析出发,结合实地观测资料建立了德克萨斯风蚀模型(Team),开辟了理论和经验相结合的思路。

TEAM模型包括其他风蚀模型没有的因素,如相对湿度、阵风因素和动态长度系数等,能够模拟土壤风蚀速率和沙尘对环境的影响。TEAM模型可以模拟风蚀过程,并通过输入环境条件和人类活动作条件来评估其对风蚀过程的影响。但该模型考虑的因子仍然不够全面,缺乏根据降雨和干湿循环调节土壤可蚀性的能力,不能全面反映风蚀过程。20世纪90年代以后,Shao<sup>[76]</sup>建立了基于物理过程的风蚀预报模型(WEAM),但该模型中仅有摩擦速度、土壤粒径分布、土壤水分含量和土壤表面覆盖4类变量,模拟结果还需要大量研究检验。21世纪初,欧盟开发了仅适用于欧洲的土壤风蚀模型(WEELS),目的是评估风蚀空间分布,是欧洲第一个面向风蚀过程的评估模型。WEELS模型由两组不同的模块组成,第一组考虑气候的时间变化,第二组考虑可蚀性土壤和作物变量,但是WEELS模型仅考虑跃移过程中的水平起沙率,没有对悬浮粒子进行量化评估。沙尘释放模型(DPM)是为研究西班牙和尼日尔的农田土壤起沙开发的<sup>[73]</sup>,它不仅能对风蚀过程中粒径小于20 μm的垂直通量进行估算,还能对粒径分布进行估算。空气动力学因子和土壤质地是该模型的两类重要参数,但是缺乏相关的野外观测数据集,因此需要更多的研究来评估验证该模型。

中国农田土壤风蚀模型的研究比国外略晚,董治宝<sup>[99]</sup>基于大量的风洞试验和野外观测试验,提出国内首个风蚀量统计模型,该模型包含风速、空气相对湿度、颗粒平均粒径、植被覆盖、地表破碎率和地表坡度等风蚀因子。Xuan<sup>[100]</sup>利用中国北方土壤数据集和EPA模型初步分析了中国北方沙尘排放通量的时空分布特征。黄富祥等<sup>[101]</sup>通过野外观测,揭示了毛乌素沙地植被覆盖率与土壤风蚀输沙之间的关系,并在此基础上建立了纯经验模型,并利用实测数据与风沙动力学中的经典输沙率公式相结合建立了半经验型回归模型。Tong等<sup>[102]</sup>在区域空气质量模型(CMAQ)的基础上构建了风蚀模块FENGSHA,修订了Owen沙尘计算公式,适用于荒地、灌木草地、灌木和农田等潜在可侵蚀性沙尘源分析。王仁德等<sup>[9]</sup>利用多年野外风沙观测和风洞模拟试验结果,建立了一种基于河北坝上地区自然环境的农田土壤风蚀经验模型。该模型涵盖风力侵蚀因子,粗糙干扰因子和土壤抗蚀因子三大风蚀影响因子,可对多种农田下垫面(比如苜蓿留茬地、小

麦留茬地、油菜留茬地、弃耕地和退耕地等)的土壤风蚀量进行定量计算和预测。第一次全国水利普查风蚀模型<sup>[103]</sup>是基于风洞试验而提出的经验模型,主要适用于中国半干旱草原栗钙土和风沙土等下垫面。该模型考虑了风速、风速累积时间、植被覆盖、表土湿度等因子,可以模拟农田、林草地和沙地等尺度的土壤风蚀,在京津风沙源治理工程得到广泛应用。由于该模型是基于风洞试验结果进行修订应用到区域尺度,修订系数为经验值,使得该模型地区适应性低。

### 3.2 农田土壤风蚀模拟验证与应用

农田土壤风蚀模型的可靠性需要准确的实测数据与不同地区、不同时段、不同农田下垫面等不同条件的模拟结果进行对比验证。20世纪50年代以来,国内外学者发展了多种农田土壤风蚀模型,由简单到复杂不等。每个模型都有它自己的必要性和局限性,对于特定的应用条件应在以后的研究工作中予以考虑。比如,WEQ是最古老的风蚀模型之一,对该模型的验证研究较少。Fryrear等<sup>[104]</sup>针对15种土壤类型的风蚀事件进行了观测和WEQ模拟,发现两者相关性很低(0.01)。van Pelt等<sup>[105]</sup>在美国6个州7个地点进行了多年的风蚀观测,并将观测结果与风蚀模拟结果进行了对比,发现多年平均的模拟结果仅为观测平均值的53%。随着WEQ模型进一步发展为RWEQ模型,许多研究基于RWEQ模拟和观测做了验证和有效性分析,发现观测结果与模拟结果具有较大差异<sup>[105-107]</sup>。这些研究是在不同含量可悬浮成分的不同土壤类型上进行的,表明RWEQ在可悬浮成分含量高的土壤上还存在较大的不确定性。而该模型的开发者Fryrear等<sup>[104,108]</sup>对两次风蚀事件进行了模拟,发现观测结果与模拟结果具有非常好的一致性。

WEPS模型在美国、欧洲、非洲、中国和南美洲进行了广泛的使用和评估验证, van Donk等<sup>[109]</sup>将现场实测的表面粗糙度、残差参数与WEPS模拟结果进行了比较,发现模型的模拟结果较好。然而,在一些研究中也发现WEPS模型对覆盖植物、残留物或具有高表面粗糙度的土壤风蚀事件模拟效果欠佳或者无法模拟<sup>[110-113]</sup>。Hagen<sup>[114]</sup>指出WEPS在模拟小尺度风蚀区域的局限性,将其归因于研究地点的空间变化,特别是地形起伏带来的模拟误差。van Donk等<sup>[109]</sup>以及Visser等<sup>[115-116]</sup>也针对空间变化

对WEPS风蚀模拟的影响进行了验证,同样发现该模型不适用于地形起伏较大的区域。

TEAM模型主要是与Fryrear数据集和Big Spring数据集进行了对比验证<sup>[117-119]</sup>。大量研究表明,数据集中田间长度、土壤覆盖、植被覆盖、尘埃含量和输沙量等因子与TEAM模型模拟结果具有非常好的一致性,但与不可悬浮组分存在差异。WEELS模型的发展是基于沙质土壤上的风洞试验,只有Böhner等<sup>[120]</sup>的研究使用测量数据验证了该模型,Böhner等<sup>[120]</sup>在英国和德国的两个地点分别进行了29年和13年的长期观测,发现这两个地点的观测结果和模拟结果存在良好相关性。

鉴于农田土壤风蚀模拟存在很大的地区适应问题,中国的研究学者对国际上常用的几种农田土壤风蚀模型做出了相当大的改进并实现本土化,模拟区域主要集中在东北和河北等地区。周勤迁<sup>[121]</sup>基于野外观测结果将FENGSHA模型的参数进行本土化,并对东北地区农田土壤风蚀状况进行数值模拟。结果表明,内蒙古农牧区的沙尘释放量为 $3.45\text{—}27.58\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ ,辽宁和吉林地区的农田起沙释放量为 $0.79\text{—}6.33\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ 。李胜龙等<sup>[122]</sup>考虑了东北地区不同的耕作模式,修正了农田土壤风蚀方程(RWEQ),计算出耕作、无植被覆盖的农田土壤风蚀量为 $181.7\text{—}86\,582.9\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,而免耕、有植被覆盖的农田土壤风蚀量仅为 $9.89\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。王仁德等<sup>[9]</sup>利用多年的野外风沙观测和风洞模拟结果,发展了适用于河北地区的农田土壤风蚀经验模型,指出翻耕耙平地的平均风蚀量为 $39.45\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。曹馨元<sup>[123]</sup>进一步通过优化农田土壤风蚀参数(土壤含水量、植被盖度和积雪盖度等),对FENGSHA排放模块进行改进,进而估算出全球农田土壤风蚀沙尘释放年总量为 $1.40\times 10^9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

为了更好地刻画农田土壤风蚀起沙的动力机制,解决农田土壤风蚀起沙的尺度转换问题,一些研究初步修正了大尺度气候模型中经典起沙参数化方案中的临界起沙摩阻速度等关键因子,尝试将农田土壤风蚀因子应用到区域和全球模式中的起沙参数化方案中。Tegen等<sup>[124]</sup>通过沙尘暴观测中获得的释放指数订正了起沙模型,并估算出农田沙尘释放对全球沙尘的贡献小于10%。Sokolik等<sup>[125]</sup>通过假设起沙量与沙尘源区面积呈线性相关,将土地利用改变的面积转化为沙源面积,估算由农田土壤风蚀等产生的人为沙尘含量约占总沙尘含量的20%—

30%。Xi等<sup>[17]</sup>通过卫星数据和地面观测数据相结合,修正了MB起沙方案和Shao04起沙参数化方案中的土壤含水量和地表粗糙度等风蚀因子,模拟了中亚地区的农田土壤风蚀起沙,发现农田释放量占总沙尘的18.3%—32.8%。Chen等<sup>[126]</sup>通过构建动态潜在沙源、并改进农田起沙参数化方案,模拟了全球不同下垫面(农田、牧场和稀疏草地等)的起沙通量,发现农田等人为沙源地区释放的沙尘占总沙尘的19%。

整体而言,目前已有的农田土壤风蚀模型存在的问题如下:①大部分模型没有考虑风蚀起沙

的动力机制;②模型中局地尺度的影响因子过多,难以实现从局地到区域空间尺度的转换;③没有实现大尺度气象场与风蚀过程在时间和空间上的完全在线耦合。目前区域和全球模式中农田起沙方案非常有限(表2),大多数研究还完全基于沙漠性态下的起沙参数化方案并没有考虑复杂多变的农田下垫面起沙参数的变化(如扰动土壤的粒径、土壤湿度、地表粗糙度和临界起沙摩擦速度等),没有很好刻画农田土壤风蚀起沙过程,导致模式对中国干旱半干旱区农田起沙量的估算存在严重偏差。

表 2 农田土壤风蚀起沙参数化的部分研究进展  
Table 2 Progress of parameterization of farmland soil wind erosion

区域	时间	起沙通量	临界起沙摩阻速度 /风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	参考文献
阿拉贡中部旱地农田	1995年夏	$1.45\text{—}11.66\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	临界起沙摩阻速度:0.37—0.72	Lopez等 <sup>[32]</sup>
东北农田	2001年和2013年	$3.45\text{—}27.58\ \mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ (2001年) $0.79\text{—}6.33\ \mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ (2013年)	临界起沙摩阻速度:0.09—0.71	周勤迁 <sup>[121]</sup>
河北农田	2005—2011年	平地: $0\text{—}6\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 留茬5 cm: $0\text{—}3\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 留茬10 cm: $0\text{—}0.9\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	风速:5—17	Zhang等 <sup>[127]</sup>
河北农田	2012年10月至 2013年5月	翻耕耙平地: $26.75\text{—}59.61\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 莠麦留茬地: $10.73\text{—}21.33\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	风速:5.5—17.5	王仁德等 <sup>[9]</sup>
全球农田	2012年	$1.40\times10^9\ \mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$		曹馨元 <sup>[123]</sup>
东北农田	2016年和2017年	耕作,无植被覆盖: $181.7\text{—}86\ 582.9\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 免耕,有植被覆盖: $9.89\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$	2 m高度风速:2—8	李胜龙等 <sup>[122]</sup>

4 结论与展望

作为一个全球性环境问题,土地荒漠化正威胁着数亿人的生存,半干旱地区的风沙跃移运动是农田沙化的直接原因。农田土壤风蚀起沙不仅攸关农业可持续发展,同时也向大气排放大量的气溶胶,对空气质量、气候以及人体健康产生影响。以往的天气和气候模式仅考虑了沙漠地表性态情况下的风蚀起沙过程,忽视或严重低估了农田下垫面的风蚀起沙。与自然沙尘相比,干旱半干旱区农田起沙的研究存在更大的不确定性。主要因为农田沙源规模小,但类型多样,时空动态变率大;裸露地表的沙尘颗粒较细,且不断受到人为活动的干扰;此外,干旱半干旱区农田地区土壤的含水量、地表粗糙度和临界起沙摩擦速度等土壤特性也与自然沙源相比差异巨大。目前,并没有适合中国半干旱

地区农田下垫面的起沙参数化方案,中国干旱半干旱区农田起沙的时空演变特征及其对总沙尘浓度的贡献也尚不清晰。

中国半干旱地区农田起沙对全球沙尘含量的贡献不容忽视,但大部分服务于区域(洲际或者全球)尺度的气候模型没有考虑风蚀起沙的动力机制,农田下垫面特征起沙通量、临界摩阻风速和粒径之间的关系尚不明确。已有不少研究利用风洞试验对三者的关系做出探讨,但是不同农田下垫面的起沙通量、临界摩阻风速和粒径差异很大,并且分布过于散乱,并不适用于区域性系统研究。没有适合中国半干旱地区的农田下垫面的起沙参数化方案,目前的大多数研究还沿用经典的自然起沙参数化研究,然而农田起沙排放规模小、时空变率大、临界起沙摩擦速度复杂多样,导致农田起沙的模拟结果具有极大的不确定性,中国干旱半干旱区农田

起沙的时空演变特征及其对总沙尘浓度的贡献尚不清晰。

中国干旱半干旱区农田下垫面生态环境非常复杂,不同的农田下垫面起沙差异显著,具有明显局地特征。已有的研究多关注局地风蚀带来的影响,忽略区域性起沙的整体概况及其带来的危害。构建一套中国西北干旱半干旱区农田地表可风蚀度的高分辨率动态数据集,将农田起沙参数化方案耦合到区域甚至是全球地球系统模式是迫切需要的,但这是一个困难点。因此,基于这个目标我们认为以下几方面的发展是必不可少的:①加强野外观测和监测网络,获取大尺度上农田各个起沙因子详细数值;②针对农田起沙的特点(粗糙因子、土壤特性和人为活动),开展农田土壤风蚀起沙风洞试验,探讨农田土壤风蚀因子对临界起沙摩擦速度、粒子谱分布和起沙通量的影响;结合干旱半干旱区农田作物种类、生长周期及耕作制度,厘清自然和人为因素对农田土壤风蚀的影响和贡献,确定对农田土壤风蚀发生时间和风蚀量变化最敏感的关键因子,并初步揭示农田土壤风蚀的启动机制和粉尘释放特征;③利用野外观测数据和卫星数据相结合构建一套中国西北半干旱区农田地表可风蚀度的高分辨率动态数据集;并结合风洞试验结果,考虑农作物覆盖率、土壤质地、土壤湿度和翻耕程度等自然和人为因素,计算西北半干旱区农田下垫面临界起沙摩擦速度的时空分布,进而发展基于经验和物理机制的大尺度农田起沙参数化方案。这将有效提高农田起沙的模拟精度,为中国干旱半干旱区农田土壤风蚀防治、土地荒漠化治理提供科学指导。

#### 参考文献:

- [1] 王凤娇,杨延征,上官周平.西北五省(区)耕地质量等别差异性比较[J].干旱地区农业研究,2015,33(2):230-236.
- [2] 李生秀.旱地:农业发展的寄托[J].自然杂志,2008,30(6):344-349.
- [3] 山仑.中国旱区农业持续发展的技术途径[J].科技导报,2014,32(23):1.
- [4] 朱鹤健.土壤地理学[M].北京:高等教育出版社,2010.
- [5] 王静,孙兆军.西北地区荒漠化宜农荒地植被快速恢复技术[J].安徽农业科学,2011,39(27):16950-16954.
- [6] 张百平,张雪芹,郑度.关于严格限制西北干旱区荒地开垦的若干对策与建议[J].干旱区研究,2013,30(1):1-4.
- [7] 董治宝,陈渭南.植被对风沙土风蚀作用的影响[J].环境科学学报,1996,16(4):7.
- [8] 韩永翔,张强,董光荣,等.沙尘暴的气候环境效应研究进展[J].中国沙漠,2006,26(2):307-311.
- [9] 王仁德,常春平,郭中领,等.适用于河北坝上地区的农田风蚀经验模型[J].中国沙漠,2017,37(6):23-30.
- [10] 董治宝,陈渭南,董光荣,等.关于人为地表结构破损与土壤风蚀关系的定量研究[J].科学通报,1995,40(1):4.
- [11] 张强,王胜.论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应[J].中国沙漠,2005,25(5):675-681.
- [12] 曾庆存,程雪玲,胡非.大气边界层非常定下沉急流和阵风的起沙机理[J].气候与环境研究,2007,12(3):244-250.
- [13] Howarth C, Viner D, Dessai S, et al. Enhancing the contribution and role of practitioner knowledge in the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Working Group (WG) II process: insights from UK workshops [J]. Climate Services, 2017, 5:3-10.
- [14] Moulin C, Chiapello I. Impact of human-induced desertification on the intensification of Sahel dust emission and export over the last decades [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33: L18808.
- [15] Hoffmann C, Funk R, Wieland R, et al. Effects of grazing and topography on dust flux and deposition in the Xilingele grassland, Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72(5):792-807.
- [16] Ginoux P, Prospero J M, Gill T E, et al. Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products [J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(3):3005.
- [17] Xi X, Sokolik I N. Quantifying the anthropogenic dust emission from agricultural land use and desiccation of the Aral Sea in Central Asia [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(20):12270-12281.
- [18] 李玄姝,常春平,王仁德.河北坝上土地利用方式对农田土壤风蚀的影响[J].中国沙漠,2014,34(1):23-28.
- [19] 臧英,高焕文.国外农田风蚀发生机理与防治技术的研究[J].农业工程学报,2002,18(3):4.
- [20] 张楚莹,王书肖,邢佳,等.中国能源相关的氮氧化物排放现状与发展趋势分析[J].环境科学学报,2008,28(12):2470-2479.
- [21] 胡敏,唐倩,彭剑飞,等.我国大气颗粒物来源及特征分析[J].环境与可持续发展,2011(5):5.
- [22] 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.
- [23] Zhang C L, Zou X Y, Gong J R, et al. Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influences on soil erosion by wind in a wind tunnel [J]. Soil and Tillage Research, 2004, 75:53-59.
- [24] He J, Cai Q, Cao W. Wind tunnel study of multiple factors affecting wind erosion from cropland in agro-pastoral area of Inner Mongolia, China [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(1):68-74.
- [25] Avecilla F, Panebianco J E, Buschiazzi D E. A wind-tunnel study on saltation and PM<sub>10</sub> emission from agricultural soils [J].

- Aeolian Research, 2016, 22: 73–83.
- [26] Wang X, Lang L, Yan P, et al. Aeolian processes and their effect on sandy desertification of the Qinghai-Tibet Plateau: a wind tunnel experiment [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 158: 67–75.
- [27] Chepil W S. Dynamics of wind erosion: I. nature of movement of soil by wind [J]. *Soil Science*, 1945, 60(4): 305–320.
- [28] Chepil W S, Woodruff N P, Siddoway F H, et al. Vegetative and nonvegetative materials to control wind and water erosion [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1963, 27(1): 86–89.
- [29] Gillette D A. Threshold friction velocities for dust production for agricultural soils [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(D10): 12645–12662.
- [30] Saleh A. Measuring and predicting ridge-orientation effect on soil surface roughness [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 1228–1230.
- [31] Armbrust D V, Chepil W S, Siddoway F H. Effects of ridges on erosion of soil by wind [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1964, 28(4): 557–560.
- [32] Lopez M V, Sabre M, Gracia R. Tillage effects on soil surface conditions and dust emission by wind erosion in semiarid Aragon (NE Spain) [J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 45: 91–105.
- [33] Fister W, Ries J B. Wind erosion in the central Ebro Basin under changing land use management. Field experiments with a portable wind tunnel [J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(11): 996–1004.
- [34] Basaran M, Uzun O, Kaplan S, et al. Tillage-induced wind erosion in semi-arid fallow lands of Central Anatolia, Turkey [J]. *Soil and Water Research*, 2017, 12(3): 17221.
- [35] Hagen L J. Crop residue effects on aerodynamic processes and wind erosion [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1996, 54(1): 39–46.
- [36] 杨秀春, 严平, 刘连友, 等. 农牧交错带不同农田耕作模式土壤风蚀的风洞实验研究 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(5): 737–743.
- [37] 赵彦军, 赵士杰, 董立江, 等. 不同垄向带状留茬间作农田防风蚀能力的风洞试验 [J]. *农机化研究*, 2009, 31(10): 137–139.
- [38] 韩亚雄. 带状间作农田抗风蚀机理试验研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [39] 吴姗姗, 牛健植, 蒯星娜. 京郊延庆农田保护性耕作措施对土壤风蚀的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(1): 60–70.
- [40] 王一菲, 郑粉莉, 张加琼, 等. 冻融作用对典型黑土土壤风蚀的影响 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 34–41.
- [41] 南岭, 董治宝, 肖锋军. 农牧交错带农田土壤风蚀  $PM_{10}$  释放特征 [J]. *中国沙漠*, 2017, 37(6): 1079–1084.
- [42] 刘玉璋, 董光荣, 李长治. 影响土壤风蚀主要因素的风洞实验研究 [J]. *中国沙漠*, 1992, 12(4): 44–52.
- [43] 王仁德, 邹学勇, 赵婧妍. 半湿润区农田土壤风蚀的风洞模拟研究 [J]. *中国沙漠*, 2012(3): 640–646.
- [44] 王仁德, 安晨宇, 苑依笑, 等. 不同时间尺度下农田土壤风蚀可蚀性的变化 [J]. *中国沙漠*, 2021, 41(5): 202–209.
- [45] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 31–33.
- [46] 邱云霄, 黎燕武, 余新晓, 等. 秸秆覆盖对农田土壤风蚀及细颗粒物释放的影响 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 131–144.
- [47] Liu M X, Wang J A, Yan P. Wind tunnel simulation of ridge-tillage effects on soil erosion from cropland [J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 90: 242–249.
- [48] Bagnold R A. *The Physics of Wind Blown Sand and Desert Dunes* [M]. London, UK: Methuen, 1941: 265.
- [49] Gillette D A. On the production of soil wind erosion aerosols having the potential for long range transport [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1974, 8(3/4): 735–744.
- [50] Shao Y, Raupach M R, Findlater P A. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, 98(D7): 12719–12726.
- [51] Gillette D A, Passi R. Modeling dust emission caused by wind erosion [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1988, 93(D11): 14233–14242.
- [52] Marticorena B, Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle: I. design of a soil-derived dust emission scheme [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100.
- [53] Shao Y. A model for mineral dust emission [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106: 20239–20254.
- [54] Shao Y. *Physics and Modeling of Wind Erosion* [M]. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media, 2008.
- [55] 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.
- [56] 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: Atmospheres*, 1997, 102(D10): 11239–11249.
- [57] Shao Y. Simplification of a dust emission scheme and comparison with data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: D10202.
- [58] Kok J F, Mahowald N M, Albani S, et al. An improved dust emission model with insights into the global dust cycle's climate sensitivity [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2014, 14(5): 6361–6425.
- [59] 朱好, 张宏升. 沙尘天气过程临界起沙因子的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2001, 26(1): 30–38.
- [60] Zhao C, Liu X H, Leung L R. The spatial distribution of mineral dust and its shortwave radiative forcing over North Africa: modeling sensitivities to dust emissions and aerosol size treatments [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(18): 8821–8838.
- [61] Han Z W. Model study on particle size segregation and deposition during Asian dust events in March 2002 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, 109: D19205.
- [62] Han Z, Zhe X, Jia W L. Direct climatic effect of aerosols and in-

- terdecadal variations over East Asia investigated by a regional coupled climate-chemistry/aerosol model[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2011, 4(6): 299–303.
- [63] Han Z, Li J, Guo W. A study of dust radiative feedback on dust cycle and meteorology over East Asia by a coupled regional climate-chemistry-aerosol model[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 68: 54–63.
- [64] Han Y, Wang K, Liu F. The contribution of dust devils and dusty plumes to the aerosol budget in western China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 126: 21–27.
- [65] Zhang X Y, Han Y M, Sun Y B, et al. Asian dust, eolian iron and black carbon-connections to climate changes[M]//Late Cenozoic Climate Change in Asia. 2014: 339–433.
- [66] 张小曳, 龚山陵. 中国的人为沙漠化因素对亚洲沙尘暴的贡献[J]. *气候变化研究进展*, 2005, 1(4): 147–150.
- [67] 张小曳, 车慧正. 国际沙尘暴研究计划进展显著[R]//中国气象科学研究院年报, 2006: 59.
- [68] Che H, Qi B, Zhao H. Aerosol optical properties and direct radiative forcing based on measurements from the China Aerosol Remote Sensing Network(CARSNET) in eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(1): 405–425.
- [69] Shao Y, Dong C H. A review on East Asian dust storm climate, modeling and monitoring[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 52(1/4): 1–22.
- [70] Tegen I, Fung I. Modeling of mineral dust in the atmosphere: sources, transport, and optical thickness[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1994, 99(D11): 22897–22914.
- [71] Ginoux P, Chin M, Tegen I, et al. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, 106: 20255–20273.
- [72] 黄美元, 王自发. 东亚地区黄沙长距离输送模式设计[J]. *大气科学*, 1998, 22(4): 625–637.
- [73] Alfaro S C, Gomes L, Rajot J L, et al. Modeling mineral aerosol production by wind erosion: emission intensities and aerosol size distributions in source areas[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, 31(S1): 426–427.
- [74] 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(D14): 4416.
- [75] 吴成来. CESM地球系统模式中沙尘起沙过程的改进及其应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [76] Shao Y. 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.
- [77] 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.
- [78] Shao Y, Ishizuka M, Mikami M, et al. Parameterization of size-resolved dust emission and validation with measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D8): D08203.
- [79] 雷航, 林朝晖, 孙建华. 一个改进的沙尘天气数值预测系统及其模拟试验[J]. *气候与环境研究*, 10(3): 669–684.
- [80] Tegen I, Fung I. Modeling of mineral dust in the atmosphere: sources, transport, and optical thickness[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1994, 99(D11): 22897–22914.
- [81] Claquin T, Schulz M, Balkanski Y, et al. Uncertainties in assessing radiative forcing by mineral dust[J]. *Tellus B*, 1998, 50(5): 491–505.
- [82] 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]. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(D9).
- [83] Uno I, Yumimoto K, Shimizu A, et al. 3D structure of Asian dust transport revealed by CALIPSO lidar and a 4DVAR dust model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(6): 341–356.
- [84] Huang Z, Huang J, Bi J, et al. Dust aerosol vertical structure measurements using three MPL lidars during 2008 China-U.S. joint dust field experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115: D00K15.
- [85] Huneeus N, Schulz M, Balkanski Y, et al. Global dust model intercomparison in AeroCom phase I[J]. *Atmospheric Chemistry Physics*, 2011, 11(15): 7781–7816.
- [86] Zender C S, Miller R L R L, Tegen I. Quantifying mineral dust mass budgets: terminology, constraints, and current estimates[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2013, 85(48): 509–512.
- [87] 张宏升, 朱好, 彭艳, 等. 沙尘天气过程沙地下垫面沙尘通量的获取与分析研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(5): 744–752.
- [88] Zhao C, Liu X, Ruby Leung L, et al. Radiative impact of mineral dust on monsoon precipitation variability over West Africa[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 11(5): 91–103.
- [89] 段佳鹏. 尘卷风热力学效率初探及其对沙尘气溶胶的贡献[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [90] Chen S, Huang J, Qian Y, et al. Effects of aerosols on autumn precipitation over mid-eastern China[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 20(3): 242–250.
- [91] Philip S, Martin R V, Snider G, et al. Anthropogenic fugitive, combustion and industrial dust is a significant, underrepresented fine particulate matter source in global atmospheric models[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(4): 44018.
- [92] 董治宝. 土壤风蚀预报简述[J]. *中国水土保持*, 1999(6): 17–19.
- [93] Woodruff N, Siddoway F. A wind erosion equation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1965, 29: 602–608.
- [94] Hagen L J. A wind erosion prediction system to meet user needs[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(2): 106–111.
- [95] Wagner L E. A history of wind erosion prediction models in the United States Department of Agriculture: The Wind Erosion

- Prediction System (WEPS) [J]. *Aeolian Research*, 2013, 10: 9–24.
- [96] Tatarko J, Sporcic M A, Skidmore E L. A history of wind erosion prediction models in the United States Department of Agriculture prior to the Wind Erosion Prediction System [J]. *Aeolian Research*, 2013, 10: 3–8.
- [97] Tatarko J, van donk S J, Ascough J C, et al. Application of the WEPS and SWEEP models to non-agricultural disturbed lands [J]. *Heliyon*, 2016, 2(12): e00215.
- [98] Gregory J M, Vining R, Peck L, et al. TEAM: The Texas Tech Wind Erosion Analysis Model [R]. 1999.
- [99] 董治宝. 建立小流域风蚀量统计模型初探 [J]. *水土保持通报*, 1998, 18(5): 55–62.
- [100] Xuan J. Dust emission factors for environment of Northern China [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(11): 1767–1776.
- [101] 黄富祥, 高琼. 毛乌素沙地不同防风材料降低风速效应的比较 [J]. *水土保持学报*, 2001, 15(1): 27–30.
- [102] Tong D Q, Dan M, Wang T, et al. Long-term dust climatology in the western United States reconstructed from routine aerosol ground monitoring [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(11): 5189–5205.
- [103] 高尚玉. 京津风沙源治理工程效益 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [104] Fryrear D, Sutherland P, Davis G, et al. Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ [C]//Proceedings of Conference Sustaining the Global Farm: 10th International Soil Conservation Organization Meeting. West Lafayette, USA: Purdue University, 1999: 760–765.
- [105] van Pelt R S, Zobeck T M. Validation of the Wind Erosion Equation (WEQ) for discrete periods [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2004, 19: 199–203.
- [106] Youssef F, Visser S, Karssen D, et al. Calibration of RWEQ in a patchy landscape: a first step towards a regional scale wind erosion model [J]. *Aeolian Research*, 2012, 3: 467–476.
- [107] Pi H, Sharratt B. Evaluation of the RWEQ and SWEEP in simulating soil and  $PM_{10}$  loss from a portable wind tunnel [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 170: 94–103.
- [108] Fryrear D W, Wassif M M, Tadrus S F, et al. Dust measurements in the Egyptian northwest coastal zone [J]. *Transactions of the Asabe*, 2008, 51(4): 1255–1262.
- [109] van Donk, Skidmore. Measurement and simulation of wind erosion, roughness degradation and residue decomposition on an agricultural field [J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2003, 28: 1243–1258.
- [110] Funk R, Skidmore E L, Hagen L J. Comparison of wind erosion measurements in Germany with simulated soil losses by WEPS [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2004, 19: 177–183.
- [111] Feng G, Sharratt B. Validation of WEPS for soil and  $PM_{10}$  loss from agricultural fields within the Columbia Plateau of the United States [J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2007, 32: 743–753.
- [112] Feng G, Sharratt B. Evaluation of the SWEEP model during high winds on the Columbia Plateau [J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2009, 34: 1461–1468.
- [113] Pi H, Feng G, Sharratt B S, et al. Validation of SWEEP for contrasting agricultural land use types in the Tarim Basin [J]. *Soil Science*, 2014, 179: 433–445.
- [114] Hagen L J. Evaluation of the Wind Erosion Prediction System (WEPS) erosion submodel on cropland fields [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2004, 19: 171–176.
- [115] Visser S M, Stroosnijder L, Chardon W J. Nutrient losses by wind and water, measurements and modeling [J]. *Catena*, 2005, 63: 1–22.
- [116] Visser S M, Sterk G, Karssen D. Wind erosion modelling in a Sahelian environment [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2005, 20: 69–84.
- [117] Fryrear D, Stout J, Hagen L, et al. Wind erosion: field measurement and analysis [J]. *Transactions of ASAE*, 1991, 34: 155–160.
- [118] Gregory J M, Wilson G R, Singh U B, et al. TEAM: integrated, process-based wind-erosion model [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2004, 19: 205–215.
- [119] Singh U B, Gregory J M, Wilson G R. Texas Erosion Analysis Model: Theory and Validation [C]//Proceedings of Wind Erosion: An International Symposium/Workshop. Manhattan, USA: USDA-ARS Wind Erosion Research Unit, 1997.
- [120] Böhner J, Schäfer W, Conrad O, et al. The WEELS model: methods, results and limitations [J]. *Catena*, 2003, 52: 289–308.
- [121] 周勤迁. 东北地区农田土壤风蚀的数值模拟研究 [D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2014.
- [122] 李胜龙, 李和平, 林艺, 等. 东北地区不同耕作方式农田土壤风蚀特征 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 110–118.
- [123] 曹馨元. 农田风蚀大气颗粒物( $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ )排放模式优化及全球尺度排放评估 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [124] Tegen I, Werner M, Harrison S P, et al. Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(5): 325–341.
- [125] Sokolik I N, Toon O B. Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols [J]. *Nature*, 1996, 381: 681–683.
- [126] Chen S, Jiang N, Huang J, et al. Quantifying contributions of natural and anthropogenic dust emission from different climatic regions. *Atmos [J]. Environ*, 2018, 191: 94–104.
- [127] Zhang J Q, Zhang C L, Chang C P, et al. Comparison of wind erosion based on measurements and SWEEP simulation: a case study in Kangbao County, Hebei Province, China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 165: 169–180.

## Characteristics and parameterization of farmland soil wind erosion in arid and semi-arid areas of China: progress and challenges

Zhang Yue<sup>1</sup>, Chen Siyu<sup>1</sup>, Bi Hongru<sup>1</sup>, Cao Jiahui<sup>1</sup>, Luo Yuan<sup>2</sup>, Gong Yongqi<sup>1</sup>, Chen Yu<sup>1</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences / Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Hunan Meteorological Observatory / Hunan Meteorological Bureau, Changsha 410118, China)

**Abstract:** The arid and semi-arid areas in China are the important agricultural development regions. There are serious wind-erosion and dust emission in these regions, which threaten the sustainable development of agriculture and the balance of ecosystem. At present, dust emission schemes in weather and climate models only consider wind erosion over desert, and those occurred in farmland are seriously ignored or underestimated. It leads to large uncertainty for estimating dust physical processes and its climate impacts. This review summarizes scientific findings that have been published regarding the characteristics and parameterization of wind erosion in arid and semi-arid areas of China since the 1950s. The research progress and existing problems of wind erosion observation and numerical simulation in arid and semi-arid areas of China are discussed. It is of great significance for preventing and controlling wind-erosion, land desertification and understanding the impact of land use change on air pollution in arid and semi-arid areas of China in future.

**Key words:** arid and semi-arid area; farmland; soil wind erosion; wind tunnel experiment; parameterization