

高丽,程建军,王玉山,等. 新疆农作物风沙危害理论及防治研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(5): 64-71.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.05.008

## 新疆农作物风沙危害理论及防治研究进展

高丽,程建军,王玉山,王勇,吴晓,雷佳

石河子大学水利建筑工程学院,石河子 832003

**摘要** 新疆沙漠边缘的绿洲农区是我国风沙危害最严重的地区之一,特别是棉花苗期和果树花果期,风沙造成幼苗死亡、茎倒枝折、落花落果,经济损失巨大,因此,开展新疆农作物风沙危害及防治研究具有重要的现实意义和区域经济价值。本文通过回顾农田的风沙流结构特征,梳理了风沙对农作物的2种危害形式,概述了农作物风沙防护机制及防治措施研究现状;最后,指出了农作物风沙危害研究中存在的问题,基于新疆的农作物类型及风沙环境特征,提出了未来新疆农作物风沙危害及防治研究重点并对未来研究进行了展望。

**关键词** 农作物; 风沙流; 风沙危害; 风致响应; 风沙防治

**中图分类号** S46; X43 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)05-0064-08

新疆南部地区(以下简称“南疆”)的广袤农田多位于世界最大流动沙漠——塔克拉玛干沙漠周边,特殊的地理位置使该地区具有气候干燥、日照充足、昼夜温差大、无霜期长等得天独厚的光热条件,因此,南疆成为我国农作物(棉花、玉米、小麦)和特色林果(苹果、香梨、杏、红枣、核桃、石榴)的生产基地。与此同时,强劲的风力、丰富的沙源和干旱的气候条件也使南疆沙漠边缘的绿洲农区成为受风沙危害最严重的地区之一,每年受灾耕地面积达66.7万 $\text{hm}^2$ ,造成棉花、林果等农作物经济损失达10多亿元<sup>[1-2]</sup>。每年4—5月,大风及沙尘暴天气频繁出现,突发性强,成灾面广,时常伴有大风和降尘等现象<sup>[3]</sup>。在春末及夏秋(4—9月),是塔里木河流域林果的关键生长期,大风日数占整个生长期的89%<sup>[4]</sup>。对于农作物而言,大风和沙尘形成的恶劣天气使它们暴露于极端风沙环境中,携沙气流产生的风沙荷载对农作物及幼苗造成严重损伤,常有“见风沙子跑,沙跑打死苗”的现象发生。2003年4月8日,阿拉尔垦区遭遇9级大风、沙尘暴天气,造成3.7万 $\text{hm}^2$ 的棉花受灾,经济损失5 149万元<sup>[5]</sup>。2009年4月16日,阿克苏市出现大风和沙尘天气,瞬间风速达到24.6 m/s,持续近3 h,农作物受灾面积达1.26万 $\text{hm}^2$ 。由此可见,风沙灾害严重影响了农作物生长,已成为南疆农

业生产中的主要自然灾害。

学者们针对南疆风沙引起的农作物受损及风沙灾害防治开展了大量研究,涉及到的农作物类型、地域范围也较广,但各地自然条件和经济发展状况的差异导致这些研究各有侧重。胡云喜等<sup>[5]</sup>、罗玻军<sup>[6]</sup>总结了阿拉尔垦区棉花苗期的风灾类型,提出了灾前预防及灾后补救措施。徐宇等<sup>[7]</sup>通过大田调查研究将棉田受风沙危害的程度划分为5级,发现随风沙灾害危害程度加重,棉株生育进程推迟,生产能力和纤维品质均会不同程度地降低。张礼春等<sup>[8]</sup>通过对南疆枣园风沙流的实地观测,探明了风沙对果园枣树授粉受精及果实发育的危害特征。此外,大风和风沙天气对南疆地区果树(苹果、香梨、杏、核桃)的花期、幼果期及成熟采摘期都会造成一定的危害<sup>[4]</sup>。

综上,开展新疆农作物风沙危害及防治研究具有重要的现实意义和区域经济价值。目前相关研究涉及以下4个方面:①农田近地面风沙流研究;②风沙作用下农作物的危害研究;③农作物风荷载及风致响应研究;④农作物风沙防治研究。

### 1 农田近地面风沙流研究

农田近地表的风沙运动规律是开展农作物风沙防治研究的理论基础,其中,风沙流结构又是研究农

收稿日期: 2022-12-01

基金项目:新疆生产建设兵团中青年科技创新领军人才计划项目(2019CB023);国家自然科学基金项目(12362035);石河子大学创新发展专项(CXFZ202214)

高丽, E-mail: gaoli03122@163.com

通信作者: 程建军, E-mail: chengdesign@126.com

田风沙运动的核心<sup>[9]</sup>,风沙流结构特征既是研究风沙运动机制的关键,也是风沙危害防治的重点<sup>[10]</sup>。风沙流结构是指在风力搬运作用下沙粒随高度的分布特性。由于风速、含沙量、下垫面性质、沙粒粒径及运动方式的不同,造成风沙流结构中输沙量沿垂直高度的分布差异。

### 1.1 风沙流结构理论及试验研究

国内外学者对风沙流结构特征指标、含沙量的垂直分布、影响因素进行了大量研究,取得了积极进展。马世威<sup>[9]</sup>、吴正等<sup>[11]</sup>、丁国栋<sup>[12]</sup>通过野外观测和风洞试验定量考察了0~20 cm高度范围内风沙流结构特征及分布规律,得出输沙量沿垂直高度遵循指数递减的规律,且输沙率随风速呈对数规律变化。从顺等<sup>[10]</sup>通过风洞试验模拟风扬沙环境,发现沙床面在0.3 m高度范围内的风速小于净风风速,跃移层内的沙粒会削弱风速、增强湍流强度。张克存等<sup>[13]</sup>通过对沙漠、戈壁、流沙地表风沙流结构特征的对比研究,发现戈壁地表输沙量沿高度表现出“象鼻”效应,并不是完全呈现对数规律变化。陈智等<sup>[14]</sup>、赵永来等<sup>[15]</sup>通过风洞试验发现保护性耕作农田地表的风沙流结构与戈壁地表近似,也呈现出“象鼻效应”,即由低到高呈现“递增-饱和-衰减”的分布特点。徐霆等<sup>[16]</sup>从农业大田生产的角度指出沙尘主要集中在20 cm高度内,且沙尘量随高度呈幂函数递减,风速与沙尘量符合幂函数关系。除了关注输沙量的垂直分布之外,也有学者分别研究了沙床面、沙漠-绿洲过渡区风沙流沙粒粒径的垂直分布特征,结果显示,沙粒平均粒径沿高度符合指数递减变化,极细沙和细沙含量从下至上呈幂函数规律递减<sup>[17-18]</sup>。冯哲等<sup>[19]</sup>采用自动连续称重式集沙仪,研究分析了农田近地表风沙流风程效应变化特征,得出近地表输沙通量随风程距离的增大而增大、风沙流的风速与饱和输沙率呈幂函数关系的结果。Abbas等<sup>[20]</sup>通过风洞试验研究了不同风速和植物密度下活植物对风沙通量的影响,结果表明在植株高度以下,风沙通量随植株密度的增大而减小。牛艳频<sup>[21]</sup>采用野外观测和风洞模拟阐明不同农田耕作模式下风沙流结构在垂直方向及水平方向的分布规律,输沙量在垂直方向上随高度的增加而减少;风沙流饱和路径长度与风速、农田地表粗糙度以及地块长度有关,风速越小、地表粗糙度越大,风沙流饱和路径越短,反之则越长。

### 1.2 风沙流数值模拟研究

计算机应用技术的普及和提高拓宽了数值计算方法的应用领域,计算流体力学方法成为研究风沙两相流的重要工具。目前采用流体的连续介质模型模拟风沙两相流的运动,求解基于连续介质假定下的Navier-Stokes方程,数值模拟方法主要采用欧拉-欧拉方法和欧拉-拉格朗日方法<sup>[22]</sup>。

欧拉-欧拉方法是将气体与沙颗粒看作相互贯穿的连续介质,气体相和固体相均满足守恒方程。针对风沙运动的复杂性,武生智等<sup>[23]</sup>利用欧拉双流体模型,分析不同摩擦风速、沙粒粒径下风沙流场随时间的变化,得出风沙流达到平衡状态需要的时间及指定位置处沙粒相的体积分数。

欧拉-拉格朗日方法是将流体作为连续相,而将固体颗粒相作为离散相,气体相与固体相之间存在动量、质量和能量的交换。赵健等<sup>[24]</sup>基于欧拉-拉格朗日方法,利用离散动力学和计算流体力学进行风场和沙粒的耦合迭代计算,建立了能呈现风沙流二维特征的跃移数值模型。

## 2 风沙对农作物的危害研究

新疆频发的大风、风沙流和降尘等气候现象贯穿于风沙灾害天气的全过程。其中,大风及风沙流对农作物的危害最为严重。风沙流是运动气流与其所携带的沙组成的气固两相流,是贴近地表的风沙运动,比净气流具有更大的动能。农作物幼苗生长高度基本在地表30 cm范围内,因此,风沙流对农作物幼苗造成的风沙灾损最严重。由于风沙流在行进过程中携带固体颗粒物,对农作物主要造成直接的物理危害和间接的生理危害<sup>[25]</sup>。

### 2.1 风沙流对农作物的物理危害

风沙流对农作物及幼苗的物理危害主要表现在以下3个方面:一是在风的吹蚀作用下幼苗根部表层土壤土质结构遭到严重破坏,造成地膜被掀,种子或幼苗根系裸露在地表,干燥脱水死亡,俗称“吊死”,即风蚀作用;二是作物茎秆在强风胁迫下发生受迫振动,损伤累积到一定程度后发生过大塑性变形而死亡,即振动作用;三是大风时随风运动的沙粒打割农作物的叶子和茎表皮,特别是沙粒与幼苗、嫩芽和花等发生直接碰撞造成机械性损伤,使农作物枯焦或死亡<sup>[26-27]</sup>,即沙割、磨蚀作用。其中,沙割是干旱、半干旱地区风沙对农作物的一种典型灾害(图1)。宗望远等<sup>[28]</sup>通过自制简易试验装置模拟风沙流对棉

花幼苗的破坏作用,初步构建了棉花幼苗寿命与风沙流相关特征参数。郭燕云等<sup>[29]</sup>通过不同风速和持续时间下的风沙模拟试验,研究风沙灾害对棉花生

长的危害程度,将棉花苗期的受损形态指标作为其风沙危害指标,同时按照风沙对棉花苗期的危害程度定量划分为增长阶段、严重阶段和损毁阶段。

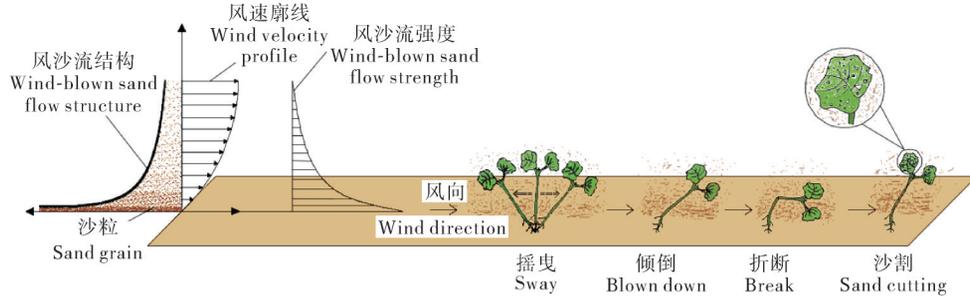


图1 风沙流对农作物的物理危害

Fig.1 Physical hazards of wind-blown sand flow to crops

## 2.2 风沙流对农作物的生理危害

目前,国内外开展的风沙流对农作物生理危害的研究,主要集中在风沙流对农作物的生态生理特征、营养代谢的影响以及作物对风沙流的适应性两个方面。

国外较早开展了风沙流对作物生理危害的研究。Lyles<sup>[30]</sup>发现,蚕豆、小麦和牧草产量的减少与受风沙损伤的程度成正比,沙割对植株的危害包括叶面积缩小、生长高度受阻碍,生长期延迟和产量降低。Fryrear等<sup>[31]</sup>试验得出,沙割危害与风沙流强度、持续时间、苗期、株高、作物种类等因素有关。Armbrust等<sup>[32]</sup>认为,随风移动的颗粒通过撞击、埋没和暴露植物的根部而损害植物。风沙灾害的影响包括植株干物质质量、叶面积、株高、存活率、光合作用、果实品质和产量降低。Baker等<sup>[33-34]</sup>通过风洞试验研究了风速、风沙流密度、持续时间不同情况下对棉花幼苗的叶、茎、根生物量的影响及对棉花幼苗生长的危害。

关于风沙流对农作物生理危害的研究,国内学者主要关注固沙植物和树木在风沙环境下的生理响应。王秋香等<sup>[4]</sup>认为风沙天气在果树的不同生长阶段会产生不同危害:4月是果树(香梨、苹果、杏)的花期,主要影响授粉和开花坐果;5-6月是果实膨大期,主要危害果实品质;8-9月是果实成熟期,果树的产量和果实的品质受到影响。赵哈林等<sup>[27]</sup>通过野外风洞试验研究了风速、风沙流强度及吹袭时间对樟子松、玉米幼苗生理响应(生长、光合特性、叶片膜透性)机制的影响。于云江等<sup>[26]</sup>在野外风洞条件下研究了不同风速和吹袭时间间隔下几种固沙植物的净光合速率等光合生理生态指标的变化,结果表明,风沙流胁迫下的沙生植物具有一定的适应响应,灌

木的抗风性强于草本植物。陈晓娜等<sup>[35]</sup>总结了风速、含沙流量、吹袭时间、吹袭频率及吹袭时间间隔对植物光合特性、生理特性的影响。邹陈等<sup>[36]</sup>在新疆绿洲农区棉田,开展有无风沙防护措施条件下棉花生物量及产量的对比试验发现,在不同生长阶段,随着棉花抗逆性的增强,风沙危害减弱。

## 3 农作物风荷载及风致响应研究

目前,农作物风荷载及风致响应的相关研究已取得了一定的进展,但风沙作用下农作物的力学响应研究较少,农作物风沙荷载的计算方法目前尚处于探索阶段。

### 3.1 风荷载研究

风荷载的确定是研究风沙荷载作用的前提和基础。农作物风荷载( $P_0$ )的确定可由贝努利公式计算,即由其顶部风速( $v$ )通过计算得到风压( $\omega$ )乘以其迎风面积( $S$ )得到<sup>[37-39]</sup>:

$$P_0 = \frac{Sv^2}{1630} \quad (1)$$

式(1)中, $P_0$ 为风荷载,kN; $S$ 为迎风面积, $m^2$ ; $v$ 为风速, $m/s$ ; $\omega = \frac{v^2}{1630}$ ,为风压, $kN/m^2$ 。

目前,国内外学者主要从数学模型推导和有限元模型计算方面开展农作物风荷载的研究<sup>[40]</sup>。由于农作物具有刚度小、变形大的特点,因此,直接测量风荷载有较大难度,农作物风荷载的确定主要围绕倒伏的临界风荷载和临界风速。当风速超过临界起沙风速时,农作物表面所承受的压力以沙颗粒与农作物茎秆、叶片的碰撞冲击力为主,与净风条件下的风荷载不同,风沙荷载的作用大于净风荷载<sup>[41]</sup>。袁志华等<sup>[42]</sup>、张丽华等<sup>[37]</sup>通过建立小麦茎秆的简化力

学模型,分析了风荷载下小麦茎秆的受迫振动,得出茎秆顶端的最大位移和应力变化规律。程建军等<sup>[43]</sup>确定了满足工程计算要求的戈壁强风区携沙风冲击荷载近似计算方法,认为风沙流产生的总压力 $p$ 由携沙风风压 $p_1$ 和沙粒的冲击压力 $p_2$ 组成:

$$p = p_1 + p_2 = \frac{1}{2} \gamma v^2 + 2\rho \bar{v}_p^2 \quad (2)$$

式(2)中, $\gamma$ 为空气容重, $\text{kN/m}^3$ ;  $v$ 为净风速, $\text{m/s}$ ;  $\bar{v}_p$ 为单位体积沙粒的平均飞跃速度, $\text{m/s}$ ;  $\rho$ 为风沙流密度, $\text{g/m}^3$ 。

### 3.2 风致响应研究

风沙荷载作用下农作物将产生相应的动力响应(位移、速度、加速度)。从生物力学的角度看,影响农作物动力响应的主要因素包括外部因素(风速、风向、输沙量、地面粗糙度、湍流度等)和农作物自身的气动特性和力学特性(农作物形状和高度、茎秆和弹性模量,迎风面积,根系性状等)两方面。

国内外学者开展了农作物周边流场特性和风致响应的研究。Finnigan等<sup>[44]</sup>通过对单株小麦运动影像的观察和分析,将其茎秆作为谐振悬臂梁,使用标准工程方法确定弹性特性,得出风洞中小麦的气动弹性建模准则。Maitani<sup>[45]</sup>通过实测得到单株小麦的穗部位移在小麦冠层高度30 cm处,风速为1.6 m/s时表现为自然振荡。

Liang等<sup>[39]</sup>将麦秆简化为具有顶部荷载的变刚度悬臂梁,风荷载作为压力施加在梁上,利用ANSYS软件建立有限元模型,计算得出小麦单株及群体的失稳临界风荷载、各单元的位移和应力云图。

刘旺玉等<sup>[46]</sup>利用APDL在ANSYS中建立植物叶片有限元模型,忽略风致共振效应,脉动风响应按静风荷载方法计算,考虑多方向风荷载,模拟植物叶片承受风荷载的应力应变情况。屠鹏等<sup>[47]</sup>基于流固耦合的数值计算方法,从生物力学角度模拟自由振动和风载作用,对比研究了弹性模量对小麦茎秆倒伏和位移响应的影响。

## 4 新疆农作物风沙防治研究

### 4.1 农作物风沙防护机制研究

风沙是新疆地区多年来农作物种植生产中危害最大的自然灾害之一,提高农作物的防风沙能力和风沙防治水平,减轻农作物风沙危害是新疆农业生产中亟需解决的问题。

风携带沙粒在贴近地表的农田中移动时,气流

搬运的沙粒绝大部分(90%以上)是在靠近地表30 cm的高度内,行进过程中的沙粒对农作物进行击打、沙割。因此,农作物风沙防治应从风沙防控的角度出发,通过改善农作物外部环境条件、增大地表粗糙度或减小地面风速,达到减轻或控制农作物风沙灾害的目的。方法一是通过设置风障来降低风速,利用地表生长的作物和作物残茬改变下垫面状况,削弱风携沙过程中的动能,抑制或阻止气流携沙粒运动;二是通过改变土壤表面状况,减小跃移沙粒对土壤表面的冲击和摩擦,提高土壤的抗风蚀能力,抑制风沙流与土壤界面之间的相互作用<sup>[48]</sup>。

### 4.2 风沙防治措施研究

新疆地区每年4—5月风沙灾害频发,风沙分布广、频率高、突发性强、破坏性大,是棉花苗期最主要的气象灾害<sup>[29]</sup>。目前,新疆农作物风沙防治主要有工程防沙和生物防沙2种方式。

工程防沙是指采用各种沙障(防风网、防风草把等)设施,当风沙流经过时,通过控制和改变风沙流方向、结构、速度等来降低地表风速、增大沙粒胶结力,从而减少沙粒搬运、达到减轻风沙灾害的目的。一些学者针对抗逆性最弱的棉花幼苗提出了防沙保苗措施。韩致文等<sup>[49]</sup>提出了格状沙障、阻沙栅栏等风沙防治的工程措施及物理防护机制。罗玻军<sup>[6]</sup>、刘建国等<sup>[48]</sup>、赵卫东<sup>[50]</sup>针对阿拉尔垦区棉田的风沙灾害,提出了在棉田架设防风网、摆放防风把、竖立防风沙障、铺压防风腰带等防风沙措施,该措施能起到防沙、护膜、保苗的作用。以上工程防沙措施为减轻棉花苗期的风沙危害提供了重要的实践指导,也为其他农作物的风沙防治提供了有价值的参考。

生物防沙是指通过种植各种植物,在农作物周围形成天然屏障,达到防风阻沙的目的。何忠盛等<sup>[51-52]</sup>总结提出了“麦棉同播间作”的种植模式,该模式中小麦作为棉苗的“天然防护林”,可以预防棉花苗期风沙灾害;在库尔勒尉犁县开展的示范试验表明,该技术能降低棉株死苗率、提高产量、增加经济效益,具有较好的防风阻沙能力,适宜在新疆风沙区的春季棉田推广应用。

## 5 存在的问题及研究展望

### 5.1 存在的问题

目前,有关农作物风沙危害及防治在农田近地面风场及风沙流结构、风沙流对农作物的危害、风荷载、农作物风致响应、农作物风沙灾害防治等方面研

究已取得一定进展。但上述研究仍存在以下不足之处:

1) 农田近地面风场及风沙流结构的研究方法。大多采用现场测试和风洞试验方法,现场观测有利于获得最真实的资料,但会受到自然条件(风速和风向变化的随机性)的制约;采用风洞试验存在农作物模型制作困难,模型与实际农作物的相似度会影响试验的精度。

2) 农作物的气动性能和体型系数的确定。计算风荷载的关键是要确定农作物的气动性能和体型系数,由于农作物种类繁多、个体差异大,且属于大变形非线性材料,因此,确定难度较大。农作物风沙荷载及风沙荷载作用下农作物的力学响应尚不明确。

3) 农作物受到风沙作用的数值模拟研究工作尚不足。研究中建立的力学模型未考虑土-农作物间的相互作用,也无法分析风沙流与农作物间的耦合效应,数值模拟结果的准确性和可靠性有待验证。

4) 农作物风沙危害程度的定量研究及受损伤机制研究较少。在农作物风沙危害方面,由于风沙作用的复杂性,多数研究仅考虑强风对农作物的影响,较少涉及风沙作用。

5) 农作物风沙防治的定量研究存在不足。文中提及的工程防沙措施都属于个别区域在生产实践中摸索出的经验做法,缺乏相应的理论基础,且属于临时性防护,防护措施的尺寸、间距等相关参数设置也未具体量化,随意性大,防治效果也参差不齐,缺乏普适性和持久性。

## 5.2 研究展望

针对上述研究中存在的问题,根据南疆沙漠绿洲农区的农作物类型及风沙环境特征,今后可以采用现场实测、风洞试验以及数值模拟等方法开展深入研究。具体包括以下几方面的工作:

1) 现场测试与风洞试验相结合。采用野外移动式风洞原位测试方法,将现场测试与风洞试验相结合,研究确定农作物风沙流场的方法,保证观测数据更真实可靠。

2) 确定农作物风沙荷载的简化计算方法。由于农作物整体刚度小,且影响体型系数的内、外因素较多,通过直接测量茎秆及叶片上风压计算风荷载较难实现,可通过统计学方法,总结不同农作物茎秆和叶片的几何及物理参数特征,分别确定茎秆和叶片风沙荷载的简化计算方法。

3) 建立风沙流-农作物相互作用的力学计算模

型。正确认识风沙流-农作物-土体的相互作用机制和规律,建立风沙流与农作物相互作用的耦合模型,尝试在试验结果基础上进行风沙作用简化建模并开展数值模拟研究。

4) 开展风沙作用下农作物受荷损伤机制研究。从农作物力学性质指标(弹性模量、抗弯强度、抗弯刚度、惯性矩)入手,深入开展农作物动力特性的理论分析和试验研究(具有较高相似度、模拟实际风沙流与农作物之间相互作用的风沙吹打实验),全面分析风沙作用下农作物的动力响应,掌握风沙荷载作用下农作物破坏的力学过程,为其风沙防护设计提供理论及数据支撑。

5) 建立农作物风沙危害综合指标及抗风性能评价标准。深入研究农作物的受荷损伤机制及损伤程度量化方法,建立农作物风沙危害综合指标及抗风沙性能评价标准,为农作物风沙灾害的灾前防护及灾后损伤评估提供基础数据。

## 参考文献 References

- [1] 李志忠,武胜利,李万娟,等.最近10年来新疆风沙地貌研究进展[J].干旱区研究,2008,25(2):295-303.LI Z Z, WU S L, LI W J, et al. Progress in aeolian geomorphology study in Xinjiang since recent 10 years[J]. Arid zone research, 2008, 25(2):295-303 (in Chinese with English abstract).
- [2] 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.
- [3] WANG X, HUANG J P, JI M X, et al. Variability of East Asia dust events and their long-term trend[J]. Atmospheric environment, 2008, 42(13):3156-3165.
- [4] 王秋香,胡义成,周昊楠.近50 a塔里木河流域生长季大风日数变化特征及对特色林果业的影响[J].冰川冻土,2012,34(5):1067-1075.WANG Q X, HU Y C, ZHOU H N. Variation characteristics of the gale days during the growth season in recent 50 years and its impact on the local special forest fruits in the Tarim River Basin[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2012, 34(5):1067-1075 (in Chinese with English abstract).
- [5] 胡云喜,李茂春.阿拉尔垦区棉花播种出苗期风灾类型及抗灾措施研究[J].沙漠与绿洲气象,2008,2(3):48-51.HU Y X, LI M C. The windstorm disaster styles and the resisting disaster measures during the period of cotton sowing and sprouting in Alar reclamation area[J]. Desert and oasis meteorology, 2008, 2(3):48-51 (in Chinese with English abstract).

- [6] 罗玻军. 阿拉尔垦区棉花播种出苗期风灾类型及抗灾措施[J]. 新疆农垦科技, 2001, 24(6): 6-7. LUO B J. Types of wind disasters at seedling stage of cotton sowing in Alarl reclamation area and disaster prevention measures[J]. Xinjiang farm research of science and technology, 2001, 24(6): 6-7 (in Chinese).
- [7] 徐宇, 程小林. 棉花风沙灾害后的管理措施[J]. 新疆农业科学, 2002, 39(4): 251-252. XU Y, CHENG X L. Management measures of cotton after sandstorm disaster[J]. Xinjiang agricultural sciences, 2002, 39(4): 251-252 (in Chinese).
- [8] 张礼春, 刘彤, 郝晓冉, 等. 南疆枣园风沙特征及对枣树花粉活力、柱头可授性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 121-123. ZHANG L C, LIU T, HAO X R, et al. Characteristics of sandstorm in jujube orchard in Southern Xinjiang and its effects on pollen vigor and stigma acceptability of jujube trees[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2019, 47(2): 121-123 (in Chinese).
- [9] 马世威. 风沙流结构的研究[J]. 中国沙漠, 1988, 8(3): 8-21. MA S W. Study on structure of wind-sand flow[J]. Journal of desert research, 1988, 8(3): 8-21 (in Chinese with English abstract).
- [10] 丛顺, 李正农, 宫博, 等. 风扬沙环境下风沙流场风洞试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(9): 205-214. CONG S, LI Z N, GONG B, et al. Wind tunnel test on wind-sand flow under blowing sand environment[J]. Journal of building structures, 2019, 40(9): 205-214 (in Chinese with English abstract).
- [11] 吴正, 凌裕泉. 风沙运动的若干规律及防止风沙危害问题的初步研究[J]. 治沙研究, 1965(7): 7-14. A preliminary study on some laws of aeolian sand movement and the prevention of aeolian sand hazards[J]. Research on sand control, 1965(7): 7-14 (in Chinese).
- [12] 丁国栋. 野外风沙流结构的定量研究[J]. 内蒙古林业科技, 1994, 20(4): 38-40. DING G D. Quantitative study on wind-sand flow structure in the field[J]. Journal of Inner Mongolia forestry science and technology, 1994, 20(4): 38-40 (in Chinese).
- [13] 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 等. 戈壁、流沙地表风沙流特性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 55-59. ZHANG K C, QU J J, ZU R P, et al. Research on the characteristics of sand-driving wind over Gobi/mobile sand surface[J]. Journal of arid land resources and environment, 2008, 22(10): 55-59 (in Chinese with English abstract).
- [14] 陈智, 麻硕士, 赵永来, 等. 保护性耕作农田地表风沙流特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 118-122. CHEN Z, MA S S, ZHAO Y L, et al. Characteristics of drifting sand flux over conservation tillage field[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 118-122 (in Chinese with English abstract).
- [15] 赵永来, 陈智, 孙悦超, 等. 作物残茬覆盖农田地表风沙流分布规律[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(2): 38-44. ZHAO Y L, CHEN Z, SUN Y C, et al. Research on distribution rule of wind-sand flow over farmland covered by crop residuals[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(2): 38-44 (in Chinese with English abstract).
- [16] 徐霆, 郑德明. 风沙对棉花生长发育及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(2): 91-92. XU T, ZHENG D M. Effect of sandstorm on cotton growth and yield[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2015, 43(2): 91-92 (in Chinese).
- [17] 冯大军, 倪晋仁, 李振山. 风沙流中不同粒径组沙粒的输沙量垂向分布实验研究[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1194-1203. FENG D J, NI J R, LI Z S. Vertical mass flux profiles of different grain size groups in aeolian sand transport[J]. Acta geographica sinica, 2007, 62(11): 1194-1203 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王翠, 雷加强, 李生字, 等. 策勒绿洲-沙漠过渡带风沙流挟沙粒度的垂直分异[J]. 干旱区地理, 2014, 37(2): 230-238. WANG C, LEI J Q, LI S Y, et al. Vertical distribution of grain size in aeolian flow in Cele oasis-desert ecotone[J]. Arid land geography, 2014, 37(2): 230-238 (in Chinese with English abstract).
- [19] 冯哲, 刘瑞娟, 白宇晨, 等. 农田近地表风沙流风程效应变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1500-1512. FENG Z, LIU R J, BAI Y C, et al. Study on variation characteristics of wind path effect of near-surface wind-blown sand flow in farmland[J]. Arid land geography, 2022, 45(5): 1500-1512 (in Chinese with English abstract).
- [20] ABBAS M, DEIRDRE D, DONG Z B. Wind-borne sand mass flux in vegetated surfaces: wind tunnel experiments with live plants[J]. Catena, 2019, 172: 421-434.
- [21] 牛艳频. 河北坝上农田风沙流结构特征研究: 以康保县为例[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2011. NIU Y P. Study on structural characteristics of wind-blown sand flow in Bashang farmland, Hebei Province: a case study of Kangbao County[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王萍, 郑晓静. 风沙两相流数值模拟研究进展[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 49-70. WANG P, ZHENG X J. Advances in numerical simulation of wind-blown sand[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2021, 42(9): 49-70 (in Chinese with English abstract).
- [23] 武生智, 任春勇. 基于欧拉双流体模型的风沙运动模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 104-107, 112. WU S Z, REN C Y. Numerical simulation of wind blown sand based on the Eulerian model[J]. Journal of Lanzhou University (natural sciences edition), 2012, 48(1): 104-107, 112 (in Chinese with English abstract).
- [24] 赵健, 富宝锋, 司高华, 等. 基于欧拉-拉格朗日模式的风沙跃移数值模拟方法[J]. 气象与减灾研究, 2018, 41(4): 293-297. ZHAO J, FU B F, SI G H, et al. An Euler-Lagrangian numerical model of saltation[J]. Meteorology and disaster reduction research, 2018, 41(4): 293-297 (in Chinese with English ab-

- stract).
- [25] 王家强,郑德明,柳维扬,等.风沙灾害对南疆棉花光合特性的影响[J].环境科学与技术,2014,37(8):47-53.WANG J Q,ZHENG D M,LIU W Y,et al.Effects of wind-blown sand disaster on the cotton photosynthetic character in South Xinjiang[J].Environmental science & technology,2014,37(8):47-53 (in Chinese with English abstract).
- [26] 于云江,史培军,鲁春霞,等.不同风沙条件对几种植物生态生理特征的影响[J].植物生态学报,2003,27(1):53-58.YU Y J,SHI P J,LU C X,et al.Response of the eco-physiological characteristics of some plants under blown sand[J].Acta phytocologica sinica,2003,27(1):53-58 (in Chinese with English abstract).
- [27] 赵哈林,李瑾,周瑞莲,等.玉米幼苗对风沙流强度变化的生理响应[J].应用生态学报,2015,26(1):61-66.ZHAO H L,LI J,ZHOU R L,et al.Physiological response of corn seedlings to changes of wind-sand flow strength[J].Chinese journal of applied ecology,2015,26(1):61-66 (in Chinese with English abstract).
- [28] 宗望远,杨漫,黄丹.风沙流体对棉花幼苗破坏作用试验研究[J].塔里木大学学报,2017,29(1):91-99.ZONG W Y,YANG M,HUANG D.The experimental study on the damage to cotton seedlings by windy and dusty[J].Journal of Tarim University,2017,29(1):91-99 (in Chinese with English abstract).
- [29] 郭燕云,李新建,李战超,等.棉花苗期风沙危害指标试验[J].农业工程,2022,12(7):56-60.GUO Y Y,LI X J,LI Z C,et al.Experiment on sand-blown sand hazard index of cotton seedling stage[J].Agricultural engineering,2022,12(7):56-60 (in Chinese with English abstract).
- [30] LYLES L. Possible effects of wind erosion on soil productivity[J].Journal of soil and water conservation,1975,30(6):273-283.
- [31] FRYREAR D W,LYLES L. Wind erosion research accomplishments and needs[J].Transactions of the ASAE,1977,20(5):916-918.
- [32] ARMBRUST D V,RETTA A. Wind and sandblast damage to growing vegetation[J].Annals of arid zone,2000,39(3):273-284.
- [33] BAKER J T. Cotton seedling abrasion and recovery from wind blown sand[J].Agronomy journal,2007,99(2):556-561.
- [34] BAKER J T,MCMICHAEL B,BURKE J J,et al. Sand abrasion injury and biomass partitioning in cotton seedlings[J].Agronomy journal,2009,101(6):1297-1303.
- [35] 陈晓娜,赵纳祺,高君亮,等.风和风沙流对植物的影响研究综述[J].世界林业研究,2020,33(5):37-41.CHEN X N,ZHAO N Q,GAO J L,et al. Research on the effects of wind and sand flow on plants[J].World forestry research,2020,33(5):37-41 (in Chinese with English abstract).
- [36] 邹陈,吉春容,曾凡江,等.风沙灾害对策勒绿洲棉花生物量的影响[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(4):90-94.ZOU C,JI C R,ZENG F J,et al. The influence of wind-sand disaster on cotton biomass in Cele oasis[J].Desert and oasis meteorology,2017,11(4):90-94 (in Chinese with English abstract).
- [37] 张丽华,武捷春,包玉海,等.基于力学模型的小麦腊熟期倒伏的风速研究[J].广东农业科学,2014,41(15):158-161.ZHANG L H,WU J C,BAO Y H,et al. Study on lodging resistance wind speed of wheat based on mechanics model[J].Guangdong agricultural sciences,2014,41(15):158-161 (in Chinese with English abstract).
- [38] 乔世昌,张清山,张万琴.小麦茎秆抗倒伏数学模型设计[J].河南科技学院学报(自然科学版),2017,45(2):50-53.QIAO S C,ZHANG Q S,ZHANG W Q. The mathematical model for lodging resistance of wheat stem[J].Journal of Henan Institute of Science and Technology (natural science edition),2017,45(2):50-53 (in Chinese with English abstract).
- [39] LIANG L, GUO Y M. Analysis and finite element simulation for mechanical response of wheat under wind and rain loads[J].International journal of agricultural and biological engineering,2008,1(1):82-88.
- [40] 李正农,郝艳峰.农作物抗风研究综述[J].自然灾害学报,2020,29(3):54-62.LI Z N,HAO Y F. Research review about wind effects on crops[J].Journal of natural disasters,2020,29(3):54-62 (in Chinese with English abstract).
- [41] 黄斌,李正农,丛顺,等.风沙流及建筑物风沙荷载的研究进展与展望[J].自然灾害学报,2016,25(5):9-19.HUANG B,LI Z N,CONG S,et al. State of the progress and prospect of research on wind-sand flow and wind-sand load of buildings[J].Journal of natural disasters,2016,25(5):9-19 (in Chinese with English abstract).
- [42] 袁志华,苏宗伟,李祥付.水稻倒伏的临界力分析[J].河南科学,2008,26(8):910-911.YUAN Z H,SU Z W,LI X F. The critical force analysis for rice lodging[J].Henan science,2008,26(8):910-911 (in Chinese with English abstract).
- [43] 程建军,蒋富强,薛春晓,等.强风区铁路风沙防治工程最大输沙量与携沙风荷载计算方法[J].中国铁道科学,2012,33(1):1-5.CHENG J J,JIANG F Q,XUE C X,et al. Computational method for maximum sediment discharge and sand-carrying wind load in the prevention and treatment of wind drift sand for railway in strong wind area[J].China railway science,2012,33(1):1-5 (in Chinese with English abstract).
- [44] FINNIGAN J J, MULHEARN P J. Modelling waving crops in a wind tunnel[J].Boundary-layer meteorology,1978,14(2):253-277.
- [45] MAITANI T. An observational study of wind-induced waving of plants[J].Boundary-layer meteorology,1979,16(1):49-65.
- [46] 刘旺玉,李静.风荷载下植物叶片自适应特性研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2011,34(6):920-923,940.LIU W Y,LI J. Research on self-adaptive characteristics of plant leaves under wind load[J].Journal of Hefei University of Tech-

- nology (natural science), 2011, 34(6): 920-923, 940 (in Chinese with English abstract).
- [47] 屠鹏, 边红霞, 张锋伟, 等. 弹性模量对小麦茎秆倒伏的影响[J]. 生物数学学报, 2017, 32(4): 475-482. TU P, BIAN H X, ZHANG F W, et al. Influence of young's modulus on lodging of wheat stem [J]. Journal of biomathematics, 2017, 32(4): 475-482 (in Chinese with English abstract).
- [48] 刘建国, 吕新, 李振河, 等. 新疆沙漠边缘绿洲棉田抵御风沙措施研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(6): 151-153, 186. LIU J G, LÜ X, LI Z H, et al. The measures of resisting sand-storm damage and protecting seedlings of oasis cotton in edge of desert [J]. Agricultural research in the arid areas, 2005, 23(6): 151-153, 186 (in Chinese with English abstract).
- [49] 韩致文, 王涛, 董治宝, 等. 风沙危害防治的主要工程措施及其机制[J]. 地理科学进展, 2004, 23(1): 13-21. HAN Z W, WANG T, DONG Z B, et al. Main engineering measurements and mechanism of blown sand hazard control [J]. Progress in geography, 2004, 23(1): 13-21 (in Chinese with English abstract).
- [50] 赵卫东. 新疆阿拉尔垦区棉花气象灾害的防御及抗灾减灾措施[J]. 农业灾害研究, 2013, 3(1): 45-47, 50. ZHAO W D. Study on prevention measures to the meteorological disasters on cotton in alal reclamation area [J]. Journal of agricultural catastrophology, 2013, 3(1): 45-47, 50 (in Chinese with English abstract).
- [51] 何忠盛, 孙绘健, 罗静, 等. 麦棉同播间作预防棉花苗期风灾技术[J]. 中国棉花, 2021, 48(1): 39-41. HE Z S, SUN H J, LUO J, et al. Techniques of preventing wind disaster in cotton seedling stage by wheat-cotton intercropping [J]. China cotton, 2021, 48(1): 39-41 (in Chinese).
- [52] 何忠盛, 王伟, 孙绘健, 等. 新疆麦棉间作对棉花苗期风灾防范效果研究[J]. 中国棉花, 2022, 49(1): 26-29. HE Z S, WANG W, SUN H J, et al. Study on the effect of wheat-cotton intercropping in Southern Xinjiang on preventing wind disaster in cotton seedling stage [J]. China cotton, 2022, 49(1): 26-29 (in Chinese).

## Research progress on theory, prevention and control of wind-blown sand hazard of crops in Southern Xinjiang

GAO Li, CHENG Jianjun, WANG Yushan, WANG Yong, WU Xiao, LEI Jia

College of Water Resources and Architectural Engineering, Shihezi University,  
Shihezi 832003, China

**Abstract** The oasis farming areas on the edge of the Southern Xinjiang desert are one of the most severely affected areas by wind-blown sand hazard in China, resulting in huge economic losses *via* causing seedling death, stem collapse, branch breakage, flower and fruit falling especially at the stage of cotton seedling and at the stage of flowering and fruiting of fruit trees. Therefore, conducting studies on the hazard and prevention and control of wind-blown sand in Southern Xinjiang has important practical significance and regional economic value. This article reviewed the structural characteristics of wind-sand flow in farmland, sorted out two forms of hazard caused by wind-blown sand to crops, and summarized the mechanisms of crops protecting wind-blown sand and the status of studies on prevention and control measures of wind-blown sand. Finally, the problems existing in studying wind-blown sand hazards of crop were pointed out. The focus of study and the development prospects of hazards and control of wind-blown sand of crops in Southern Xinjiang in the future are proposed based on the types of crops and the environmental characteristics of wind-blown sand in Southern Xinjiang,

**Keywords** crops; wind-sand flow; wind-blown sand hazard; wind-induced response; prevention and control of wind-blown sand

(责任编辑: 张志钰)