

Doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.146

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 基于风洞试验的风沙两相流耦合流场特性

丛顺<sup>1</sup>, 李正农<sup>1</sup>, 宫博<sup>2</sup>, 黄斌<sup>1</sup>, 赵爱国<sup>3</sup>

(1. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 长沙 410082;

2. 中国科学院 太阳能热利用及光伏系统重点实验室, 北京 100190;

3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要:**风沙两相流结构的理论与研究方法已趋于成熟,主要集中在风沙物理运动本身和防风固沙工程方面,然而,将风沙运动现象及其对建筑结构物的作用效应相结合的研究还比较鲜见,继续开展风沙地区工程结构的抗风沙研究具有重要的现实与工程意义。通过风沙风洞试验,模拟了实际沙漠地貌下的风场特征,重点通过风洞顶部落沙研究了类似沙尘暴环境下的沙浓度、风沙流速度廓线以及湍流强度随高度的变化情况。通过控制相同风速、变化不同输沙率进行落沙,以此形成多种不同类型的风沙两相流耦合流场,并与净风工况相比较。试验结果表明:沙浓度梯度分布与落沙孔数量、控制风速以及高度均相关;风沙流场中沙颗粒的运动对风速剖面有一定的削弱作用,对湍流强度却有增强作用;风场中沙质量浓度沿高度方向的分布特征直接影响了各高度处风速和湍流强度的大小,沙浓度越大的高度处对风速的削弱程度越显著,且对湍流强度的增强程度越大。

**关键词:**风沙两相流;风洞试验;落沙;沙浓度;风速剖面;湍流强度

**中图分类号:**TU312;X43 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)01-0116-10

## Coupling flow field characteristics of wind-sand two-phase flow based on wind tunnel test

Cong Shun<sup>1</sup>, Li Zhengnong<sup>1</sup>, Gong Bo<sup>2</sup>, Huang Bin<sup>1</sup>, Zhao Aiguo<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China; 2. Key Laboratory of Solar Thermal Utilization and Photovoltaic System of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P. R. China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute of the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P. R. China)

**Abstract:** The theory and research methods of wind-sand two-phase flow have become mature, mainly focusing on the physical movement of wind-sand and wind-sand consolidation engineering. However, the study of wind-sand movement phenomenon and its effect on building structures is relatively rare. It is of great practical and engineering significance to continue the research on wind-sand resistance of engineering structures in wind-sand areas. In view of this, the wind field characteristics under the actual desert

**收稿日期:**2019-04-23

**基金项目:**国家自然科学基金(51478179,51678233)

**作者简介:**丛顺(1987-),男,博士生,主要从事工程结构抗风抗风沙研究,E-mail: cylscyls@126.com。

李正农(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,E-mail: zhn88@263.net。

**Received:**2019-04-23

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51478179, 51678233)

**Author brief:** Cong Shun (1987-), PhD candidate, main research interests: wind and wind-sand resistance of engineering structure, E-mail: cylscyls@126.com.

Li Zhengnong (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: zhn88@263.net.

landform are simulated through wind tunnel test. The variation of sand consistency, wind velocity profile and turbulence intensity with height under the similar sandstorm environment is mainly studied through the falling sand on the top of the wind tunnel. By controlling the same wind speed and changing the sand transport rate, sand fall is carried out to form a variety of different types of wind-sand two-phase flow coupled flow field and compare with the non-sand-driving wind. The experimental results show that the distribution of sand consistency is related to the number of sand holes, the control of wind speed and height; the movement of sand particles in wind-sand flow field weakens the wind velocity profile, but enhances the turbulence intensity; the influence of the presence of sand particles in wind field on the wind speed at different heights is directly related to the vertical distribution characteristics of sand consistency, and the larger the sand consistency is, the weaker the wind speed is, and the stronger the turbulence intensity is.

**Keywords:** wind-sand two-phase flow; wind tunnel test; falling sand; sand consistency; wind velocity profile; turbulence intensity

风沙流是风与其所携带的沙物质组成的气、固两相流,是风沙物理的核心内容,也是风沙地貌、沙漠化、防沙工程的基础理论之一,在整个风沙学科中占有极其重要的地位,因而半个多世纪以来,引起了学者们的深切关注,并取得了一定的成果<sup>[1]</sup>。但与建立完善的理论体系、广泛而有成效地应用于生产实践的目标还有一段距离,还有许多工作要做。与其他国家相比,中国风沙流研究稍显薄弱,这与中国沙漠化危害程度及防沙、治沙的重要性不相称。如何在较短时间内革新、创建研究手段、方法,提高研究水平,是从事风沙流研究人员面临的问题<sup>[2]</sup>。风沙流结构研究是风沙物理学中风沙运动规律研究的重点,对沙尘暴气候以及常态风挟沙环境下沙尘启动机制的研究起决定性作用<sup>[3]</sup>。孙秋梅等<sup>[4]</sup>指出,风沙物理学经过半个多世纪的发展,在许多领域取得突破性进展。风洞试验作为风沙物理学发展的技术支撑,在试验手段和内容上都有了长足的进步,如风速廓线皮托管、风洞多路集沙仪等风洞试验仪器的发展都有效地推动了风洞试验的进步<sup>[5]</sup>。

风沙流研究越来越受到人们的重视,其中,风沙流通量廓线的研究起着重要作用<sup>[6-7]</sup>。董飞等<sup>[8]</sup>采用统计平均方法和悬浮体二相流连续介质模型方法研究了风沙流场中颗粒浓度和输运通量沿高度的分布规律,并针对负指数分布是经验规律这一事实,对现阶段常用的理论模型和测算颗粒浓度的方法进行了讨论,指出引进更高精度实验测试手段的必要性。李振山等<sup>[9]</sup>找出了风沙流结构中反映风沙输移特征规律的输沙率参数和特征风速参数,并从它们之间的相互关系入手,结合已有的实测输沙率资料,对形式多样的输沙率公式进行了系统比对,发现了各家公式结构上的一致性,指出了现行输沙率公式的适用性和局限性,提出了适用范围更大、具有一般结构形式的输沙率公式。马小明等<sup>[10]</sup>总结了3种典型地表(流沙地表、草方格地表、戈壁地表)风沙流通量廓线研究现状及存在问题,并根据研究中存在的问

题,提出风沙流通量廓线研究的发展趋势。王洪涛等<sup>[11]</sup>通过粒子图像测速技术(PIV),利用石英沙与天然沙相似原理,在风洞内研究了风沙流中沙颗粒浓度沿高度的分布,结果表明,3个不同轴线风速情况下,风沙流中沙粒浓度沿水平方向基本保持不变,而沿垂直方向呈指数衰减,并且,其衰减速率与风速大小关系密切。

风速廓线的研究也是风沙相互作用研究中的关键问题,其难点在于风沙流中沙粒的运动对它的改变<sup>[12-15]</sup>。黄宁等<sup>[16]</sup>、张克存等<sup>[17]</sup>对戈壁地表风沙流进行了风洞模拟试验,讨论分析了戈壁地表对气流紊动的影响效应,以及对风沙流结构和风沙活动层内风速廓线产生的影响。董治宝等<sup>[18]</sup>将跃移风沙流视为一种颗粒拟流体,用颗粒流的阻力系数来表达跃移颗粒对气流产生的阻力,建立了风沙两相流场相互作用的数学模型,应用所建立的数学模型,结合风洞试验得出的跃移风沙流浓度和速度分布结果,拟合出了跃移风沙流中的风速廓线,并与风洞试验结果进行了对比。王洪涛等<sup>[19]</sup>对不同学者关于风沙流中风速廓线的研究成果进行了分析与总结,指出了已有研究的不足之处,得出了两种比较典型的沙床面稳定状态下风沙流风速廓线,建立了新的风速廓线模型。亢力强等<sup>[20]</sup>采用相位多普勒粒子分析仪测量了风沙两相流动中沙床面上沙粒碰撞和起跳速度概率分布以及不同高度处沙粒速度概率分布。

以上研究表明,目前,现场监测手段主要侧重于沙颗粒输移特性,缺少沙颗粒运动对不同高度处风速和湍流强度的具体影响程度。已进行的风沙风洞试验没有对实际沙漠地区的湍流特性进行模拟,结果与实际情况存在一定偏差,对风沙运动规律的描述不够充分和准确。数值模拟计算中,边界条件选择、网格划分以及两相流模型的选取等均会直接影响到数值分析结果,因此,需要更符合实际情况的风洞试验予以论证。为此,笔者在以往研究经验的基

基础上,专门针对特定沙漠地貌进行了现场勘察和实测,在后续相关的风沙风洞试验中,以这种实际沙漠地貌风场特征为依托并进行调试。重点研究了风洞顶部落沙环境下的沙浓度、风沙流速度廓线以及湍流强度随高度的变化情况;对比分析了净风场和多种落沙条件下风沙流场的风速剖面与湍流强度的不同。研究结果有助于类似沙尘暴气候条件的灾害治理和西北沙漠地区铁路沿线列车玻璃、太阳能光伏板、输电线塔以及聚光器等工程结构的抗风沙设计。

## 1 试验概况

### 1.1 风沙风洞简介

早在 20 世纪 40 年代,拜格诺、切皮尔等开始利用风洞进行风沙运动和土壤风蚀的试验研究。兹纳门斯基专门设计和建造了沙风洞,开展沙地风蚀过程和沙堆防治问题的试验研究。1967 年,中国科学院地理研究所的沙风洞在兰州建成投入使用。1988—1990 年,原中国科学院兰州沙漠研究所在沙坡头试验站设计建造了一座中型土壤风蚀风洞。统计资料发现,当前在风洞中进行的风沙模拟试验研究主要包括:风沙运动试验研究,风蚀作用试验,风积地貌形态形成试验研究,风沙电试验,防沙工程模拟试验,林带、林网及防风沙效益的试验研究<sup>[21]</sup>。

由于传统风洞试验室较难实现风沙环境的模拟,因此,开展风沙试验需要对传统风洞进行相应改造,增加供沙装置、集沙装置、防沙风场测试仪和沙粒回收装置等设备<sup>[22]</sup>。试验研究在中国科学院电工研究所进行过风沙试验功能改造的野外直流边界层风洞中进行,该风洞能够准确模拟相应比例的风沙流场,是一座单试验段风洞,风洞洞体为全钢结构,如图 1 所示。风洞外围全长 60 m,试验段长度 20 m,断面尺寸 3 m×2.5 m,尾部收缩段收缩比为 3.0。另外,为了减小试验位置处的轴向静压梯度,下风向两侧壁分别设置了 0.23°的扩散角,该风洞试验段风速为 1.5~30 m/s 连续可调。



图 1 边界层风洞

Fig.1 Boundary layer wind tunnel

### 1.2 风沙流场建立

为了贴合实际,并能够指导后续工程结构的抗风沙设计,在试验研究初期建立了风沙两相流运动的风洞试验相似准则,利用风洞内的粘性不可压缩

两相流体以及相互之间的等温和各相连续运动,来模拟自然界平坦沙床表面处于动态平衡状态下的风沙运动过程。这是因为自然界中的风沙传输运动是大范围的,其形成与发展过程长期并且复杂,要进行全过程模拟比较困难,因此,需要加以简化,进行近似。测试分析表明,该相似准则能够准确模拟相应比例的风沙流场。

基于沙漠地区特别的地貌环境,其近地面风沙流场存在特殊性,研究组在风洞试验前期进行了西北内陆典型沙漠地区的现场勘察和实测。实测地点选址于宁夏中卫市腾格里沙漠东南部边缘的一片空旷风沙观测场,利用现场实测的方法获取了近地面约 10 m 高度范围内的风场特性,图 2(a)、(b)分别为实测风场的相对风速剖面和湍流度剖面,并在图中将其与规范值相比较。从图 2 可知,实际沙漠风场特征已偏离标准的 A 类地貌,由于其实际地貌特征和流场特性的差异,与开阔海面、湖面等标准 A 类地貌相比,沙漠地区地貌有其自身的特点。笔者以这种实际的沙漠地貌特性来指导风沙风洞试验。

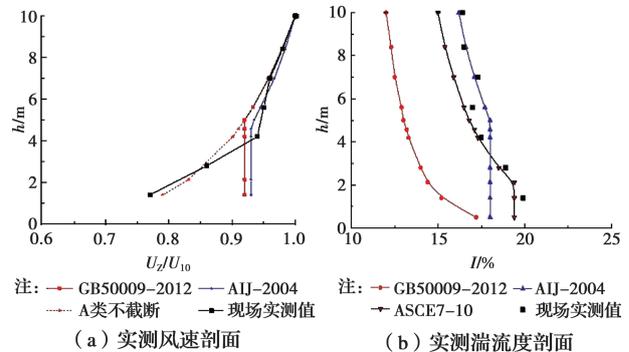


图 2 实测风场特性

Fig.2 Characteristics of measured wind field

基于现场实测结果,风洞试验风沙流场对应的几何缩尺比选为 1:10。风场调节通过改变风洞内的尖劈、横档布置以及粗糙元的大小、位置及密度来完成,图 3 所示为试验风洞中模拟得到的特定沙漠地区下的风速剖面和湍流度剖面,与现场实测结果比较,其吻合性较好,这为后续类似沙尘暴气候条件下风沙流场特性的研究奠定了基础。

### 1.3 风沙流场测试技术

为了建立类似沙尘暴气候条件下的风沙流场,试验开始前,对风洞进行相应的升级改造(图 4)。在风洞试验段的前缘顶部位置增加安装风沙流漏沙槽装置,该装置包括梯形漏斗、漏沙孔、漏沙管和螺旋塞,通过人工落沙来模拟与沙尘暴相类似气候条件下的风沙试验。在漏斗位置处,通过控制漏沙孔的数量与落沙时间来调整进入实验段的沙量;在一定风速下,经过实验段较长距离的扩散,风吹落沙能够在试验测试位置处形成质量浓度均匀的风沙工况。通过调节风洞进口处的风速和漏沙槽装置的各

种参数,可以获得不同工况下的多种沙质量浓度梯度。

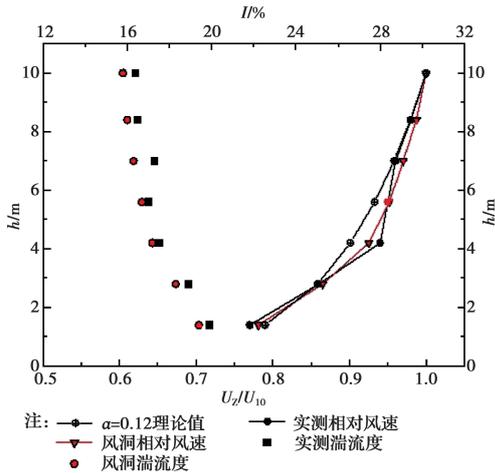


图 3 风速剖面 and 湍流度剖面

Fig.3 Wind profile and turbulence intensity profile



(a) 顶部漏沙槽装置 (b) 内部上侧漏沙孔

图 4 风沙流场落沙装置

Fig.4 Sand falling device for wind-sand flow field

风沙两相流场环境不同于常规净风场环境,常见的三维脉动风速测试仪和热线风速仪不适用,因此,需要专门用于风沙试验的防沙风速廓线测试仪。试验过程中,风速测试装置由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所开发研制,基于皮托管原理测试风速值的大小,沿高度方向一共有 10 路通道,各传感器和对应的变送器集成安装在图 5(a)所示的仪器内部,防止了大簇走线对风场特性的影响并起到防沙的作用。风场稳定后,通过裸露在外的与流场方向平行的感应探针可以直接采集测试位置处的风速值,并能够精确到 0.001 m/s,但不能直接测量湍流强度,湍流强度通过各高度处采集到的风速样本值进行计算,即采集时段内风速的标准差与平均值之比。该测试仪能够采集到的风速高度分别为 5、10、15、50、100、250、500、750、1 000、1 250 mm<sup>[23]</sup>。

风沙试验过程中,集沙仪由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所开发研制,其能够获取不同工况下风沙流场不同高度处的沙质量浓度分布情况。该梯度集沙测试仪安装在试验段中部,总高度 1 m,沿高度方向一共设置了 50 路通道,每路通道的进沙口为边长 20 mm 的正方形,并连通一个集沙盒,最终可收集 50 个梯度高度处的集沙量,如图 5(b)所示。测试完成后,用千分位(0.001 g)的电子天平对

每个集沙盒内沙量分别进行称重,通过计算后可以得到 1 m 高度范围内的沙质量浓度分布规律。边界层风洞中仪器设备的布置和安放信息见图 6。



(a) 风速廓线测试仪 (b) 梯度集沙测试仪

图 5 风沙流场设备

Fig.5 Equipment for wind-sand flow field

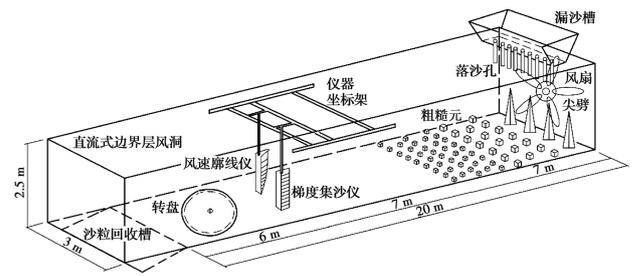


图 6 试验装置布置

Fig.6 Layout of test equipment

### 1.4 沙质量浓度计算

气流在单位时间内通过单位面积所搬运的沙量,叫做风沙流的输沙通量,简称为输沙率<sup>[24-25]</sup>。输沙率的计算式为

$$q(z) = Q(z)/(tA_0) \quad (1)$$

式中: $q(z)$ 为高度  $z$  处的输沙率,  $g/(cm^2 \cdot s)$ ;  $Q(z)$ 为集沙测试仪在高度  $z$  处的集沙量,  $g$ ;  $t$ 为集沙时间,  $s$ ;  $A_0$ 为集沙测试仪的每一路通道的进沙孔截面积,  $cm^2$ 。

沙质量浓度是在输沙率的计算中同时考虑了风速存在的影响。对采集到的梯度集沙仪 50 路通道的集沙量分别进行称重,然后,通过式(2)计算可以得到 1 m 高度范围内 50 个高度处的沙质量浓度。沙质量浓度的计算式为

$$\omega(z) = Q(z)/(tA_0V_H) \quad (2)$$

式中: $\omega(z)$ 为高度  $z$  处的沙质量浓度,  $g/m^3$ ;  $V_H$ 为试验参考高度处的平均风速,  $m/s$ 。

## 2 数据处理结果

### 2.1 风沙流场的沙质量浓度

倪晋仁等<sup>[26]</sup>通过对风沙流进行长期的系统研究发现,风沙环境特性与风速大小有很大关系。为了能够在风沙风洞中建立类似沙尘暴气候条件下的风沙流场,研究不同风速下的风沙流动特性,落沙试

验总共选用了 3 种风洞控制风速工况,分别为 10、13、16 m/s。通过在每种风洞控制风速下利用风洞顶部漏沙槽装置改变输沙率而控制漏沙孔的数量(0.5、1、1.5、2、2.5 孔),分别模拟了实际沙尘天气中的浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴和特强沙尘暴 5 种强度类似沙尘暴环境的不同沙浓度工况。试验用沙取自现场实测位置处的腾格里沙漠,平均粒径为 0.375 mm 左右,试验前用 1 mm 孔径的筛子筛除杂质。经粒度分析可知其中粒径组成范围为 0.25~0.5 mm 的细沙颗粒约占 75%,0.5~1 mm 的粗沙颗粒约占 25%,细沙颗粒与粗沙颗粒按照约 3:1 混合构成。

对各工况下不同高度位置处收集到的沙量分别进行称重,依次计算出对应高度处沙质量浓度,共得到 15 种工况下的质量浓度分布。采用控制单一变量进行比较,分别画出相同风速下不同落沙和相同落沙不同风速下的沙质量浓度梯度曲线,如图 7 所示。试验结果表明,沙质量浓度分布与落沙孔数量、控制风速以及高度均有关。

图 7(a)~图 7(c)表明,同一控制风速下,5 种孔数落沙沙浓度随高度的变化趋势基本一致,且浓度随落沙量的增大而增大。然而,风速的改变却对沙质量浓度的垂直分布特性有明显的影响,总体规律是随着风速的逐步加大,下部浓度越来越小,上部浓度逐渐增大,其中,在风速 16 m/s 时,转折点比较明显,大概在 0.2~0.4 m 之间。在风速较小时,底部沙质量浓度最大,浓度随高度的增加呈现指数递减规律,其中,在 0~0.2 m 高度内减小幅度大,在 0.2~1 m 高度内减小幅度小,且在 0~0.2 m 高度内的浓度明显大于 0.2~1 m 高度内的浓度;伴随着风速的增大,0.2~1 m 高度内的浓度渐渐增大,与此同时,底部的沙量逐渐减小,浓度随高度减小的幅度变小。这主要是由于从风洞顶部下落的沙颗粒在伴随着气流运动过程中,会受到重力的作用而下沉,在风速较大时,沙子水平运动速度增大,脉动也较明显,因此,上部被吹起的沙子也会增多,在到达风洞测试位置处,仍有大部分沙颗粒的下沉位移较小。伴随着风速的增大,沙质量浓度垂直分布曲线呈现规律性变化,在 0~0.2 m 高度内的浓度要明显小于风速较小的情况,在 0.2~1 m 高度内的浓度随风速的增大慢慢变大,逐步转变为随高度的增加而增大。

图 7(d)~图 7(h)表明同一孔数落沙的情况下,即输沙率相同而风速不同时,3 种风速下沙质量浓度随高度的变化趋势不同,总体规律是随着风速的逐步加大,下部浓度越来越小,上部浓度逐渐增大,其中,2.5 孔落沙时规律比较明显,交叉点大概出现在 0.4 m 处。在 0~0.4 m 高度内,风速越小,浓度越大,浓度与高度成反比;在 0.4~1 m 高度内,风速

越大,浓度越大,浓度随高度变化规律逐步由反比转变为正比关系。另外,在相同落沙的情况下,风速越大,对应的沙质量浓度总体上有减小的趋势。输沙率的改变在 3 种风速下对沙质量浓度的垂直分布特性没有明显的影响,整体浓度只是在数值上随着输沙率的增大而增大。

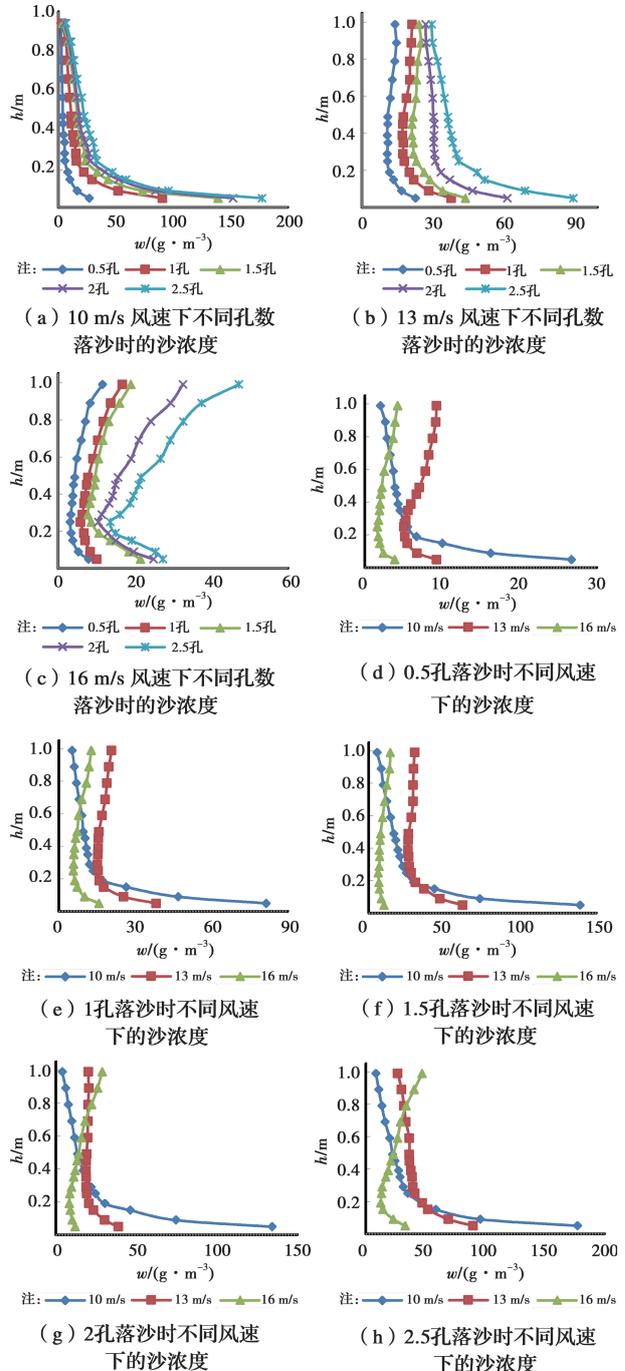


图 7 沙质量浓度垂直分布曲线

Fig.7 Vertical distribution curve of sand consistency

从图 8 可以看出,在同一(孔数)输沙率进行落沙的情况下,针对 3 个高度(0.09、0.49、0.89 m)分别对应不同风速下的沙质量浓度进行分析可知,底部 0.09 m 处的浓度都是随着风速的增大而减小,低风

速时浓度相对最大;中部 0.49 m 处的浓度基本都是在风速为 13 m/s 时最大;高处 0.89 m 处的浓度在输沙率较小时于 13 m/s 时最大,在输沙率变大时逐渐转化为在 16 m/s 时最大。在风速为 10 m/s 时,中部的质量浓度都大于高处;在风速为 16 m/s 时,刚好相反,高处的质量浓度都大于中部;当风速为 13 m/s 时,随着输沙率的增加,中部的沙质量浓度逐步由小于高处变为大于高处。

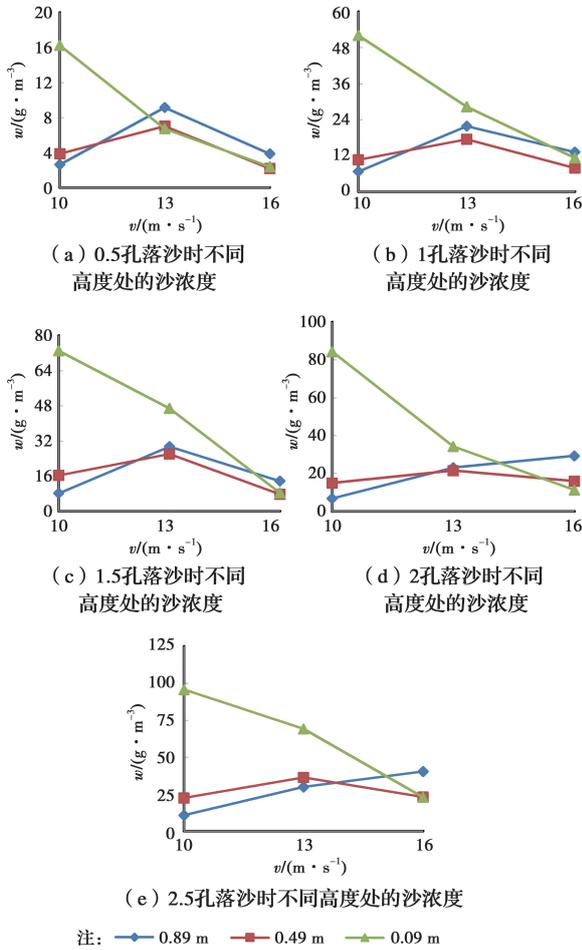


图 8 同一高度沙质量浓度随风速的变化曲线

Fig.8 Sand consistency variation curve of the same height with the velocity of the wind

2.2 风沙流场的风速剖面

风沙流场内沙颗粒的存在会对风速有直接影响,为了研究风沙流中沙的不同浓度对风速剖面影响的不同,图 9 给出了 5 种工况下风沙流场与对应净风场的风速剖面,并计算了相对应高度处的湍流强度。其中,净风场是指在相同的风场布置条件和风洞控制风速下控制了单一变量,即风沙流场内加入了风洞顶部落沙,而净风场并没有,这样在试验过程中可以使试验设备和仪器安装位置均相同,测试结果可以直接看出沙颗粒的存在对流场特征参数的影响。

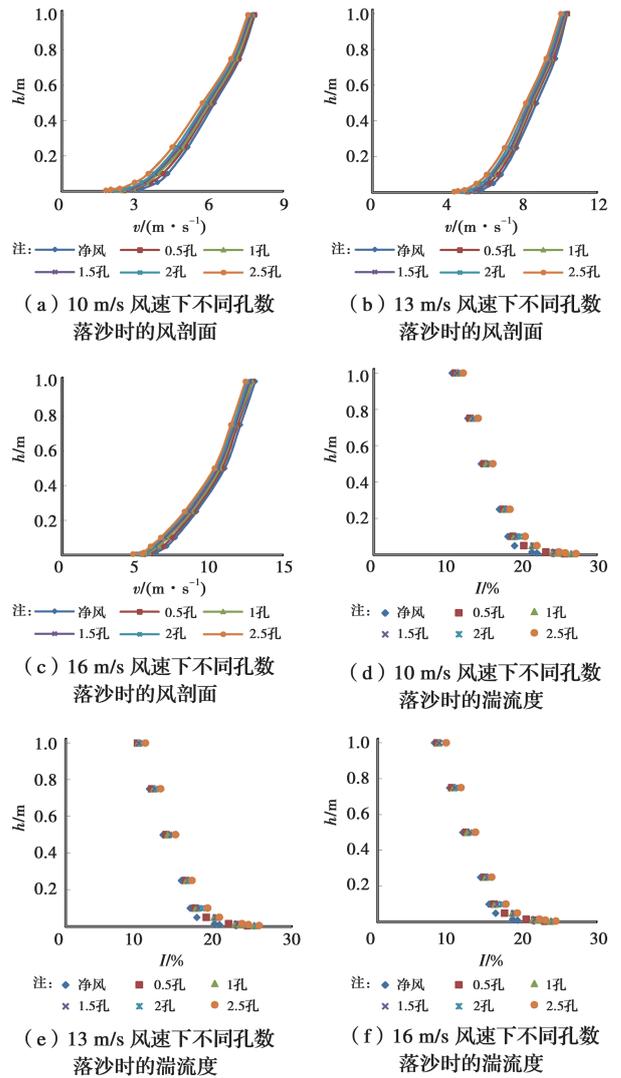


图 9 风沙流场的风速剖面与湍流强度

Fig.9 Wind profile and turbulence intensity in wind sand flow field

比较图 9(a)、(b)、(c)可知,沙颗粒的运动对风速剖面有一定影响,与净风场相比,主要表现为削弱作用。将多种工况下的不同高度位置处风速的削弱值大小 $\Delta v$ 进行计算,见表 1~表 3。

表 1 风速 10 m/s 不同孔数落沙时的风速剖面削弱程度

Table 1 Wind profile weakening degree of wind speed 10 m/s in different hole numbers

h/m	$\Delta v / (m \cdot s^{-1})$				
	0.5 孔	1 孔	1.5 孔	2 孔	2.5 孔
0.005	0.400	0.649	0.723	0.766	0.821
0.010	0.343	0.593	0.665	0.709	0.763
0.015	0.279	0.529	0.603	0.646	0.701
0.050	0.219	0.468	0.542	0.585	0.639
0.100	0.212	0.408	0.485	0.553	0.602
0.250	0.181	0.269	0.356	0.497	0.524

续表1

h/m	$\Delta v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$				
	0.5 孔	1 孔	1.5 孔	2 孔	2.5 孔
0.500	0.177	0.267	0.348	0.442	0.491
0.750	0.069	0.265	0.342	0.410	0.459
1.000	0.029	0.225	0.302	0.370	0.419

表 2 风速 13 m/s 不同孔数落沙时的风速剖面削弱程度  
Table 2 Wind profile weakening degree of wind speed 13 m/s in different hole numbers

h/m	$\Delta v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$				
	0.5 孔	1 孔	1.5 孔	2 孔	2.5 孔
0.005	0.243	0.448	0.535	0.603	0.655
0.010	0.217	0.432	0.519	0.587	0.639
0.015	0.208	0.403	0.490	0.558	0.610
0.050	0.198	0.383	0.470	0.538	0.590
0.100	0.193	0.358	0.445	0.513	0.565
0.250	0.118	0.273	0.360	0.476	0.528
0.500	0.178	0.298	0.381	0.473	0.525
0.750	0.192	0.314	0.405	0.449	0.501
1.000	0.198	0.321	0.408	0.428	0.480

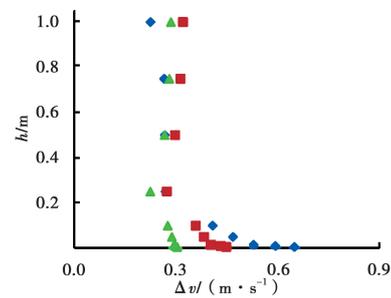
表 3 风速 16 m/s 不同孔数落沙时的风速剖面削弱程度  
Table 3 Wind profile weakening degree of wind speed 16 m/s in different hole numbers

h/m	$\Delta v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$				
	0.5 孔	1 孔	1.5 孔	2 孔	2.5 孔
0.005	0.215	0.303	0.405	0.449	0.565
0.010	0.205	0.299	0.401	0.445	0.561
0.015	0.203	0.294	0.396	0.440	0.556
0.050	0.196	0.287	0.389	0.433	0.549
0.100	0.184	0.275	0.377	0.421	0.537
0.250	0.103	0.224	0.322	0.340	0.461
0.500	0.175	0.266	0.342	0.412	0.523
0.750	0.189	0.280	0.382	0.426	0.542
1.000	0.194	0.285	0.387	0.431	0.547

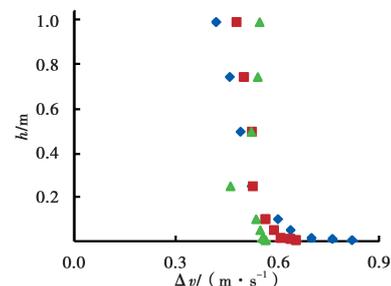
同一(孔数)输沙率进行落沙的情况下,取表 1~表 3 中 1、2.5 孔落沙时在不同风速下的各高度处风速削弱值进行统计分析,其结果见图 10。与图 7(e)、(h)比较可知,各高度处风速的影响程度与沙质量浓度的垂向分布特征有关,变化趋势基本一致,其他孔数落沙时规律也类似。总体表现为风速

的削弱程度随落沙孔数的增大而显著,浓度大的高度处风速减弱的幅度也越大。在风速较小时,由于沙质量浓度随高度的增加而减小,沙颗粒运动对风速剖面的削弱程度也随高度的增加而减弱,在 0~0.2 m 高度范围内的浓度最大,因此,底部风速剖面的削弱程度也较大。伴随着风速的增大,0.2~1 m 高度范围内的沙量逐渐增多,在风速较大时,0.2~1 m 高度范围内的浓度随高度的增加而增大,此时沙颗粒运动对风速剖面的削弱程度也随高度的增加而略有增大;与此同时,0~0.2 m 高度范围内的浓度依然随高度的增加而减小,其对风速剖面的削弱程度也刚好相反,只是相比较较低风速而言,削弱的幅度不大。

同时,从表 1~表 3 中可以看出,在相同落沙的情况下,整体影响程度也随风速的增大而减小,这是由于风速越大,对应的沙质量浓度总体上会有减小的趋势,因此,其对整体风速剖面的平均削弱程度就会变小。



(a) 1 孔落沙时不同风速下的风速减小值



(b) 2.5 孔落沙时不同风速下的风速减小值

注: ◆ 10 m/s ■ 13 m/s ▲ 16 m/s

图 10 不同高度处风速的减小值

Fig.10 Decrease of wind speed at different heights

### 2.3 风沙流场的湍流强度

为了研究风沙两相流耦合流场中沙粒的不同浓度对湍流强度的影响,从图 9(d)、(e)、(f)给出的 3 种风洞控制风速下的湍流强度随高度的变化关系可知,净风场与风沙流场的湍流强度均随着高度的增加而减小,且沙颗粒的运动对湍流强度有一定的影响,主要表现为增强作用。将多种工况时的不同高度位置处湍流强度的增大值  $\Delta I$  进行计算,结果见表 4~表 6。

**表 4 风速 10 m/s 不同孔数落沙时的湍流强度增大程度**  
**Table 4 Turbulence intensity increasing degree of wind speed 10 m/s in different hole numbers**

h/m	$\Delta I/\%$				
	0.5 孔	1 孔	1.5 孔	2 孔	2.5 孔
0.005	1.199	1.528	1.833	2.037	2.142
0.010	1.142	1.472	1.775	1.980	2.084
0.015	1.078	1.408	1.713	1.917	2.022
0.050	1.018	1.347	1.652	1.856	1.960
0.100	1.011	1.287	1.595	1.824	1.923
0.250	0.980	1.148	1.466	1.668	1.845
0.500	0.946	1.146	1.458	1.613	1.812
0.750	0.868	1.144	1.452	1.581	1.780
1.000	0.828	1.104	1.412	1.541	1.740

**表 5 风速 13 m/s 不同孔数落沙时的湍流强度增大程度**  
**Table 5 Turbulence intensity increasing degree of wind speed 13 m/s in different hole numbers**

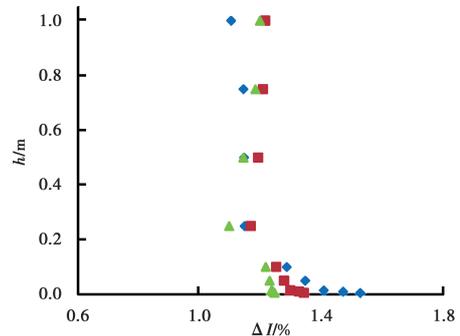
h/m	$\Delta I/\%$				
	0.5 孔	1 孔	1.5 孔	2 孔	2.5 孔
0.005	1.016	1.343	1.581	1.741	1.944
0.010	0.990	1.327	1.565	1.725	1.928
0.015	0.981	1.298	1.536	1.696	1.899
0.050	0.971	1.278	1.516	1.676	1.879
0.100	0.966	1.253	1.491	1.651	1.864
0.250	0.891	1.168	1.471	1.634	1.857
0.500	0.951	1.193	1.487	1.621	1.824
0.750	0.965	1.209	1.491	1.617	1.793
1.000	0.971	1.216	1.504	1.586	1.769

**表 6 风速 16 m/s 不同孔数落沙时的湍流强度增大程度**  
**Table 6 Turbulence intensity increasing degree of wind speed 16 m/s in different hole numbers**

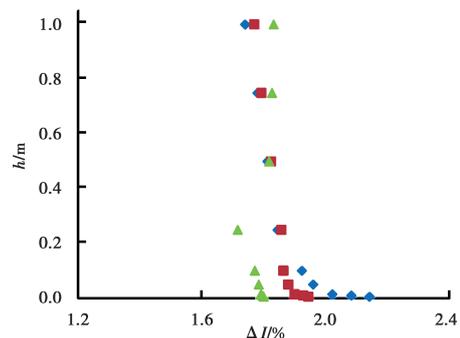
h/m	$\Delta I/\%$				
	0.5 孔	1 孔	1.5 孔	2 孔	2.5 孔
0.005	0.969	1.246	1.487	1.607	1.800
0.010	0.959	1.242	1.483	1.603	1.796
0.015	0.957	1.237	1.478	1.598	1.791
0.050	0.950	1.230	1.471	1.591	1.784
0.100	0.938	1.218	1.459	1.579	1.772
0.250	0.857	1.097	1.404	1.498	1.716
0.500	0.929	1.144	1.424	1.570	1.818
0.750	0.943	1.183	1.464	1.584	1.827
1.000	0.948	1.198	1.469	1.609	1.832

同一(孔数)输沙率进行落沙的情况下,取表 4~表 6 中 1、2.5 孔落沙时在不同风速下的各高度处湍流强度增大值进行统计分析,见图 11。与图

7(e)、(h)比较可知,各高度处湍流强度的影响程度与沙质量浓度的垂向分布特征有关,变化趋势基本一致,其他孔数落沙时规律也类似。与风速剖面的变化规律相同,总体表现为湍流强度的增强程度随落沙孔数的增多而显著,浓度大的高度处湍流强度增强的幅度也越大。在风速较小时,由于沙质量浓度随高度的增加而减小,沙颗粒运动对湍流强度的增强程度也随高度的增加而减弱,在 0~0.2 m 高度范围内的沙浓度最大,因此,底部湍流强度的增强程度也较大。伴随着风速的增大,0.2~1 m 高度范围内的集沙量逐渐增多,在风速较大时,0.2~1 m 高度范围内的浓度随高度的增加而增大,此时,沙颗粒运动对湍流强度的增强程度也随高度的增加而略有增大;与此同时,0~0.2 m 高度范围内的浓度依然随高度的增加而减小,其对湍流强度的增强程度也刚好相反,只是相比较低风速而言,增强的幅度不大。



(a) 1 孔落沙时不同风速下的湍流强度增大值



(b) 2.5 孔落沙时不同风速下的湍流强度增大值

注: ◆ 10 m/s ■ 13 m/s ▲ 16 m/s

图 11 不同高度处湍流强度的增大值

Fig.11 Increase of turbulence intensity at different heights

从表 4~表 6 同样也可以看出,在相同落沙的情况下,整体影响程度也会随着风速的增大而减小,原因是风速越大,对应的沙质量浓度总体上会有减小的趋势,因此,其对整体湍流强度的平均增大程度就会变小。

### 3 结论

通过对类似沙尘暴气候条件下的风沙两相流耦合流场进行风洞试验模拟和研究,得到了多种工况

下不同高度处的沙浓度、风沙流速、湍流强度的变化规律。

1) 风洞落沙条件下的沙浓度梯度分布与落沙孔的数量、控制风速以及高度均有关。同一风速下,沙浓度随落沙量的增大而增大;风速的改变对沙浓度的垂直分布特性有着明显的影响,随着风速的逐步加大,下部浓度越来越小,上部浓度逐渐增大,转折点出现在 0.2~0.4 m 之间。

2) 同一孔数落沙的情况下,3 种风速下沙浓度随高度的变化趋势不同,大概在 0.4 m 处存在明显交叉点。相同落沙的情况下,风速越大,对应的沙浓度总体上有减小的趋势。

3) 风沙流场中,沙颗粒的运动对风速有一定的削弱作用。风场中沙质量浓度沿高度方向的分布特征直接影响了各高度处风速值的大小,浓度越大对风速的削弱程度越显著,浓度大的高度处风速减弱的幅度也越大。

4) 与净风场相比,沙颗粒的存在对湍流强度有影响,具体表现为沙颗粒运动对湍流强度有一定的增强作用。与风速剖面的影响规律相类似,这种增强程度随沙浓度的增大而显著。

#### 参考文献:

- [1] 梅凡民,高自文,蒋缠文. 风沙流中蠕移粒子群动量分布特征的风洞实验研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 473-479.  
MEI F M, GAO Z W, JIANG C W. The stochastic distribution of rolling particles' momentum during aeolian sand transports based on digital high-speed photography images taken in a blown sand wind tunnel [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2013, 43(3): 473-479.(in Chinese)
- [2] 李振山,倪晋仁. 风沙流研究的历史、现状及其趋势[J]. 干旱区资源与环境, 1998, 12(3): 89-97.  
LI Z S, NI J R. The history, present situation and trend of wind-sand flow research [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1998, 12(3): 89-97.(in Chinese)
- [3] 李刚铁,贾玉奎,王永生. 乌兰布和沙漠风沙流结构的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 276-278.  
LI G T, JIA Y K, WANG Y S. Study on the structure of wind-sand flow in the Ulan Buh desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(1): 276-278.(in Chinese)
- [4] 孙秋梅,李志忠,武胜利,等. 风沙环境风洞研究进展综述[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2006, 25(3): 106-111.  
SUN Q M, LI Z Z, WU S L, et al. Review of wind tunnel research progress on wind-sand environment [J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2006, 25(3): 106-111.(in Chinese)
- [5] CHENG J J, JIANG F Q, XUE C X, et al. Characteristics of the disastrous wind-sand environment along railways in the Gobi area of Xinjiang, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, 102: 344-354.
- [6] ZHANG K C, QU J J, LIAO K T, et al. Damage by wind-blown sand and its control along Qinghai-Tibet Railway in China [J]. Aeolian Research, 2010, 1(3/4): 143-146.
- [7] YAO Z Y, XIAO J H, JIANG F Q. Characteristics of daily extreme-wind gusts along the Lanxin Railway in Xinjiang, China [J]. Aeolian Research, 2012, 6(5): 31-40.
- [8] 董飞,刘大有. 关于风沙层中颗粒垂向浓度分布规律等的思考[J]. 力学与实践, 1997, 19(6): 42-44.  
DONG F, LIU D Y. Thinking about the rule of vertical concentration distribution of particles in wind-sand layer [J]. Mechanics and Engineering, 1997, 19(6): 42-44. (in Chinese)
- [9] 李振山,倪晋仁. 挟沙气流输沙率研究[J]. 泥沙研究, 2001(1): 1-10.  
LI Z S, NI J R. Study on sediment transport rate of sediment carrying airflow [J]. Journal of Sediment Research, 2001(1): 1-10.(in Chinese)
- [10] 马小明,吕萍. 3 种典型地表风沙流通量廓线研究现状[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 302-306.  
MA X M, LV P. Research status of 3 typical surface wind-sand circulation profiles [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(2): 302-306.(in Chinese)
- [11] 王洪涛,董治宝,张晓航. 风沙流中沙粒浓度分布的实验研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(5): 732-735.  
WANG H T, DONG Z B, ZHANG X H. Experimental study on the distribution of sand concentration in wind-sand flow [J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(5): 732-735.(in Chinese)
- [12] 杨斌,张伟,张洋,等. 非定常风沙流中风速脉动对沙粒相瞬时浓度影响的实验研究[J]. 实验流体力学, 2013, 27(3): 47-50.  
YANG B, ZHANG W, ZHANG Y, et al. Experiment study of the wind fluctuation's effect on the sand concentration in unsteady wind-sand flow [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(3): 47-50.(in Chinese)
- [13] ALMEIDA M P, PARTELI E J R, ANDRADE J S, et al. Giant saltation on Mars [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(17): 6222-6226.
- [14] JACKSON D W T. A new, instantaneous aeolian sand trap design for field use [J]. Sedimentology, 1996, 43(5): 791-796.
- [15] 岳高伟,蔺海晓,贾慧娜. 风沙运动过程的颗粒流体力学模拟[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(2): 130-135.  
YUE G W, LIN H X, JIA H N. Granular flow dynamics simulation of wind-blown sand movement

- process [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(2): 130-135. (in Chinese)
- [16] 黄宁, 郑晓静. 风沙运动力学机理研究的历史、进展与趋势[J]. *力学与实践*, 2007, 29(4): 10-17.  
HUANG N, ZHENG X J. Research history, achievements and trend on mechanism of aeolian transport [J]. *Mechanics in Engineering*, 2007, 29(4): 10-17. (in Chinese)
- [17] 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 等. 戈壁风沙流结构和风速廓线特征研究[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(1): 54-58.  
ZHANG K C, QU J J, ZU R P, et al. Research on the characteristics of structure of drifting sand flux and wind velocity profile over Gobi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(1): 54-58. (in Chinese)
- [18] 董治宝, 慕青松, 王洪涛. 风沙流中风速廓线的数值模拟与实验验证[J]. *气象学报*, 2008, 66(2): 158-166.  
DONG Z B, MU Q S, WANG H T. Numerical and experimental simulation of wind velocity profile with a blowing sand cloud [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(2): 158-166. (in Chinese)
- [19] 王洪涛, 董治宝, 前广强, 等. 关于风沙流中风速廓线的进一步实验研究[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(6): 721-724.  
WANG H T, DONG Z B, QIAN G Q, et al. Further experimental study on wind profile in wind-sand flow [J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(6): 721-724. (in Chinese)
- [20] 亢力强, 郭烈锦, 刘大有. 风沙流中沙粒速度分布的实验研究[J]. *中国科学*, 2008, 38(6): 678-691.  
KANG L Q, GUO L J, LIU D Y. Experimental study on velocity distribution of sand particles in wind-sand flow [J]. *Science in China*, 2008, 38(6): 678-691. (in Chinese)
- [21] GONG B, WANG Z, WEI Z. Design wind and sandstorm loads on trough collectors in fields [C]// *SolarPACES 2016: International Conference on Concentrating Solar Power & Chemical Energy Systems*. Abu Dhabi, UAE, AIP Publishing LLC, 2017: 1880-1898.
- [22] 黄斌, 李正农, 丛顺, 等. 风沙流及建筑物风沙荷载的研究现状与展望[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)
- [23] 李正农, 王尚雨, 宫博, 等. 风沙对低矮建筑整体受力影响的风洞试验研究[J]. *土木工程学报*, 2017, 50(1): 63-69.  
LI Z N, WANG S Y, GONG B, et al. Wind tunnel test for impact of wind-sand flow on overall forces of low-rise building [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(1): 63-69. (in Chinese)
- [24] UNGAR J E, HAFF P K. Steady state saltation in air [J]. *Sedimentology*, 1987, 34(2): 289-299.
- [25] SHERMAN D J. An equilibrium relationship for shear velocity and apparent roughness length in aeolian saltation [J]. *Geomorphology*, 1992, 5(3/4/5): 419-431.
- [26] 倪晋仁, 李振山. 风沙两相流理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 8-10.  
NI J R, LI Z S. The theory and application of wind-blown sand flow [M]. Beijing: Science Press, 2006: 8-10. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)