

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.022.

徐铮铮, 高永, 韩彦隆, 等. 基于风洞模拟的不同出风口高度导风板的聚风效应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 284-294, 306.

Xu Zhengzheng, Gao Yong, Han Yanlong, et al. Wind Gathering Effect of Wind Guide Plate with Different Outlet Heights Based on Wind Tunnel Test[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 284-294, 306.

基于风洞模拟的不同出风口高度导风板的聚风效应

徐铮铮¹, 高永^{1,2,3}, 韩彦隆^{1,2,3}, 张超¹, 田晓宁¹, 王鹏¹

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010011; 2.内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 鄂尔多斯 017400; 3.内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 呼和浩特 010011)

摘要: [目的]揭示不同出风口高度导风板下的风速流场特征及规律, 阐明其聚风效能, 进而为导风板配置模式提供理论支撑。[方法]应用风洞模拟手段, 测定不同风向夹角($\beta=90^\circ, \beta=60^\circ, \beta=45^\circ$ 和 $\beta=30^\circ$)条件下, 不同出风口高度($h=3\text{ cm}, h=5\text{ cm}, h=7\text{ cm}, h=9\text{ cm}$)导风板的流场特征, 分析1/2出风口高度处的相对风速。从而选取风向夹角(β)、出风口高度(h)、来流风速(V_0)以及距离导风板的水平距离(x)等对导风板1/2出风口高度处各点位风速(V_x)进行多元回归建模。[结果](1)各风向夹角条件下, 不同出风口高度导风板均形成一定范围的强风区和增速区, 但不同出风口高度及风向夹角下其流场特征存在差异。 $\beta=90^\circ$ 时, $h=3\text{ cm}$ 和 $h=5\text{ cm}$ 导风板的增速区和强风区影响范围分别为最大; $\beta=60^\circ$ 时, $h=9\text{ cm}$ 导风板形成的增速区和强风区影响范围均最大; $\beta=45^\circ$ 和 $\beta=30^\circ$ 时, $h=9\text{ cm}$ 导风板增速区和集流加速区影响范围均最大。(2) $\beta=90^\circ$ 和 $\beta=60^\circ$ 时, 各导风板1/2出风口高度处相对风速随水平距离的变化近似呈“N”形。由于狭管效应, 在 $0.5H$ (H 为模型高度)处达到相对风速峰值, 而后气流发生扩散, 到 $2H$ 处降至最低值。随迎风夹角减小, 导风板垂直风向投影面积急剧减小, 过境气流在板后汇集, 此时对水平测点 $1H$ 后气流有较强加速效果。(3)1/2出风口高度处导风板风速预测模型为 $V_x = -0.144 + 0.145h + (-0.022)\beta + 0.808V_0 + 0.092x$ ($R^2=0.758$)。[结论]风向夹角 $\beta=60^\circ$ 时, $h=9\text{ cm}$ 导风板聚风效果最优; 构建的预测模型参数选用较为合理, 模型拟合程度较高, 可为导风板干扰下1/2出风口高度处各点位风速预测提供理论支撑。

关键词: 荒漠化防治; 风速流场; 导风板; 风洞模拟; 聚风效应

中图分类号: S775

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0284-11

Wind Gathering Effect of Wind Guide Plate with Different Outlet Heights Based on Wind Tunnel Test

Xu Zhengzheng¹, Gao Yong^{1,2,3}, Han Yanlong^{1,2,3}, Zhang Chao¹, Tian Xiaoning¹, Wang Peng¹

(1.College of Desert Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010011, China; 2.Hangjin National Positioning Observation and Research Station of Desert Ecosystem, Ordos, Inner Mongolia 017400, China; 3.Inner Mongolia Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Engineering, Huhhot 010011, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the characteristics and rules of the wind speed flow field under different outlet height wind guide plates, clarify its wind gathering effect, and then to provide theoretical support for the configuration mode of wind guide plates. [Method] By means of wind tunnel simulation, the flow characteristics of the wind guide plate with different air outlet heights were measured under different wind direction angles, and the relative wind speed at 1/2 air outlet height was analyzed. The wind speed (V_x) at each point at 1/2 the height of the air vent of the wind guide plate was modeled by multiple regression by selecting the angle between the wind direction (β), the height of the air vent (h), the

收稿日期: 2022-10-29

修回日期: 2022-11-05

资助项目: 内蒙古科技攻关项目“库布齐沙漠沿黄段流动沙丘综合治理技术研究”(2021GG0073); 内蒙古农业大学“高层次人才引进科研启动项目”(NDYB2018-36)

第一作者: 徐铮铮(1996—), 女, 辽宁凌源人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。E-mail: 1637278644@qq.com

通信作者: 高永(1962—), 男, 内蒙古包头人, 博士, 教授, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: 13948815709@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

incoming wind speed (V_0), and the horizontal distance from the wind guide plate (x). [Results] (1) Under the condition of wind angle, the wind guide plates all formed a certain range of strong wind zone and growth zone, but its flow field characteristics were different under different air outlet height and wind direction angle. When β was 90° , the influence range of the growing zone and the strong wind zone of the $h=3$ cm and $h=5$ cm wind guide plate were the largest. When β was 60° , the influence range of the growth zone and the strong wind zone formed by the $h=9$ cm wind guide plate was the largest. When β was 45° and β was 30° , the influence range of $h=9$ cm wind guide plate increasing zone and gathering flow accelerating zone were the largest. (2) When β was 90° and β was 60° , the relative wind speed at $1/2$ outlet height of each wind guide plate changed with horizontal distance approximately in the shape of 'N'. Due to the narrow pipe effect, most of them could reach the peak value of relative wind speed at $0.5 H$ (H stands for model height), and then the air flow spread and dropped to the lowest value of relative wind speed at $2 H$. As the angle between windward decreased, the vertical wind direction projection area of the wind guide plate decreased sharply, and the transit air collected behind the wind guide plate. At this time, the airflow of the horizontal measuring point after $1 H$ had a strong acceleration effect. (3) The wind speed prediction model of the wind guide plate at the height of $1/2$ air outlet was $V_{(x)} = -0.144 + 0.145h + (-0.022)\beta + 0.808V_0 + 0.092x$ ($R^2 = 0.758$). [Conclusion] In the effect of wind gathering effect, when the wind direction angle $\beta = 60^\circ$, $h = 9$ cm wind guide plate has the best wind accumulation effect. The parameters of the constructed prediction model were reasonable, and the model has a high degree of fitting, which can provide theoretical support for the wind speed prediction at each point at the height of $1/2$ outlet under the interference of the wind guide plate.

Keywords: combating desertification; wind speed flow field; wind guide plate; wind tunnel test; wind gathering effect

在荒漠化防治进程中,输(导)沙工程措施可以改变风沙流的结构和方向改变沙物质的蚀积状态,包括导风板工程、羽毛排导沙工程和输沙断面工程等。其中导风板工程由栅栏工程发展而来,是一种典型的输沙工程措施,根据原理不同可分为下导风板和侧导风板^[1]。常被应用于铁路^[2]、公路的沙害^[3]及风吹雪防治工作中^[4]。目前导风板应用已深入到生产、生活等^[5]方方面面,而在荒漠化防治领域,对于导风板组成的下导风工程的作用机理及工程体系等问题缺乏系统研究。其主要包括导风板不同倾角^[6]、线路清沙^[7]及其结构的优化配置等方面^[7-8]。在风力强劲、沙源丰富的高大密集型流动沙丘地区,采用固沙、阻沙措施虽在短时间内可以达到控制沙害的目的,但随时间推移会造成更大的沙害^[9]。导风板工程的作用机理是通过聚合加速作用使风沙流体加速通过区域,气流本身携带的沙物质基本不会降落在防护区内,防护区内积沙也会被吹走,达到聚风输沙的目的^[10]。并且因其成本低廉、体积小、易于运输以及可实现大规模施工等优势,被广泛应用于输沙工程。因此,利用地形借助风力设置导风板工程措施在高大密集型流动沙丘的开发利用中更为有效。作为导风板工程的主要组成结构,其板面高度和开口高度直接影响工

程聚风输沙能力^[11],合理确定导风板板面高度与出风口高度对于获得高聚风输沙效益具有重要意义。作为风沙流常用的3种研究方法之一,相较于野外观测,风洞试验可以有效控制风力条件,而相较于数值模拟过于理想化的模拟环境,风洞试验又几乎可以完美模拟自然状况下的流场分布,并还原沙粒受力运动状态。因此,基于前人研究,运用风洞模拟手段,对与风向呈不同角度设置的不同出风口高度前倾式 45° 导风板的流场特征进行系统研究,实现对其流场规律的认识与把握,而后采用多元回归法建立导风板聚风效应定量模型,为预测不同条件下导风板干扰下风速,进而确定其配置模式提供理论支撑。

1 试验设计

1.1 试验风洞

试验在中国林业科学研究院沙漠林业试验中心可适应野外起伏地形的便携式环境风洞开展。由入口段、动力段、导流段、整流段、过渡段和试验段等组成的开口吹气直流式风洞,建成于2013年,洞体总长30 m(本文安装长度18 m),横断面面积 $1.80\text{ m} \times 1.90\text{ m}$ (内壁尺寸:宽 \times 高)。风洞通过变频器调节风速,设计最大风速18 m/s,气流稳定性小于4%,风洞下边界层厚度28 cm。

该风洞可以进行土壤风蚀、风沙动力地貌、风沙防治工程、种子风力传播等模拟试验研究。

1.2 试验材料

试验所用导风板原型为封闭式导风板,实际板面规格为2 m(长)×1 m(宽),本试验模型按5:1将导风板缩小为40 cm×20 cm,材质为三合板,采用固定支撑架支撑于地面(图1)。模型在风洞试验段中的最大阻塞率为2.3%,满足风洞试验对阻塞率的要求^[12]。

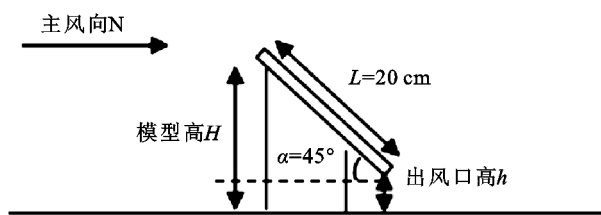


图1 导风板模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wind guide plate model

1.3 试验方案

本试验选取4种出风口高度的前倾式45°导风板

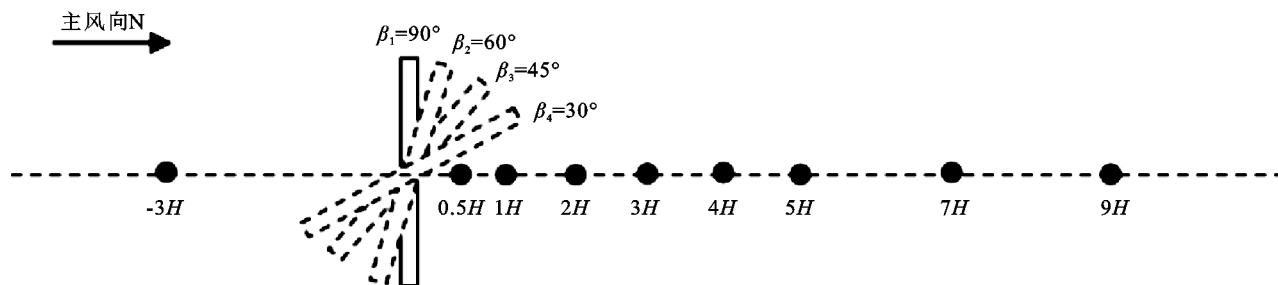


图2 风洞内不同角度导风板测点位置示意图(俯视图)

Fig. 2 Schematic diagram of measuring points of wind guide plate at different angles in the wind tunnel(top view)

表1 三种风速梯度下不同出风口高度导风板观测点位

Table 1 Observation points of wind guide plate at different air outlet heights under three wind speed shavings

导风板参数			测点位置/cm
导风板与水平面夹角(α)/(°)	出风口高度(h)/cm	迎风侧	背风侧
45	3	54.7	9.1,18.2,36.5,54.7,72.9,91.2,127.6,164.1
	5	60.7	10.1,20.2,40.5,60.7,80.9,101.2,141.6,182.1
	7	66.7	11.1,22.2,44.5,66.7,88.9,111.2,155.6,200.1
	9	72.7	12.1,24.2,48.5,72.7,96.9,121.2,169.6,218.1

1.4 数据处理方法

采用Excel 2019对1 min内所测持续稳定($\pm 4\%$)的风速数据进行平均,采用Surfer 21.1,Origin 2021软件进行风速流场和相对风速等的制图,利用SPSS 22.0的线性回归分析功能模块对导风板干扰下风速与各个因素之间的关系进行分析并构建预测模型。

采用相对风速对导风板的聚风效能变化进行定量分析。相对风速计算方法如下:

$$u' = \frac{u_{(x,y)}}{U_{(x_0,y_0)}} \quad (1)$$

式中: u' 为相对风速; $u_{(x,y)}$ 为距离导风板 x 处,高度 y 处的平均风速(m/s); $U_{(x_0,y_0)}$ 为空洞下试验段水平

进行试验,分别为 $h=3$ cm, $h=5$ cm, $h=7$ cm和 $h=9$ cm(换算为野外实际规格分别为 $h=15$ cm, $h=25$ cm, $h=35$ cm和 $h=45$ cm)。设置4个风向夹角, $\beta=90^\circ$, $\beta=60^\circ$, $\beta=45^\circ$ 和 $\beta=30^\circ$ 。风速采用TSI AIRPRO风速计AP500进行测定。在净风条件下,选择3种风速梯度(4 m/s,6 m/s,8 m/s)进行空洞和不同模型气流速度场测定,设置数据采集频率为1 s,待气流稳定后,记录吹刮时间为1 min。测风高度分别为:1/2出风口高度处(1/2 h)、出风口高度处(h)、导风板板面1/2处(1/2 L),30 cm和40 cm。如图2所示,测点位置为模型迎风侧3 H ,模型背风侧:0.5 H ,1 H ,2 H ,3 H ,4 H ,5 H ,7 H ,9 H ,其中 H 表示模型高度(4个导风板模型高度分别为 $H=18.2$ cm, $H=20.2$ cm, $H=22.2$ cm和 $H=24.2$ cm)。测点换算为水平距离见表1。在空洞条件下测定风洞试验段上述各测点的风速作为对照风速。

距离 x ,高度 y 处的平均风速(m/s)。

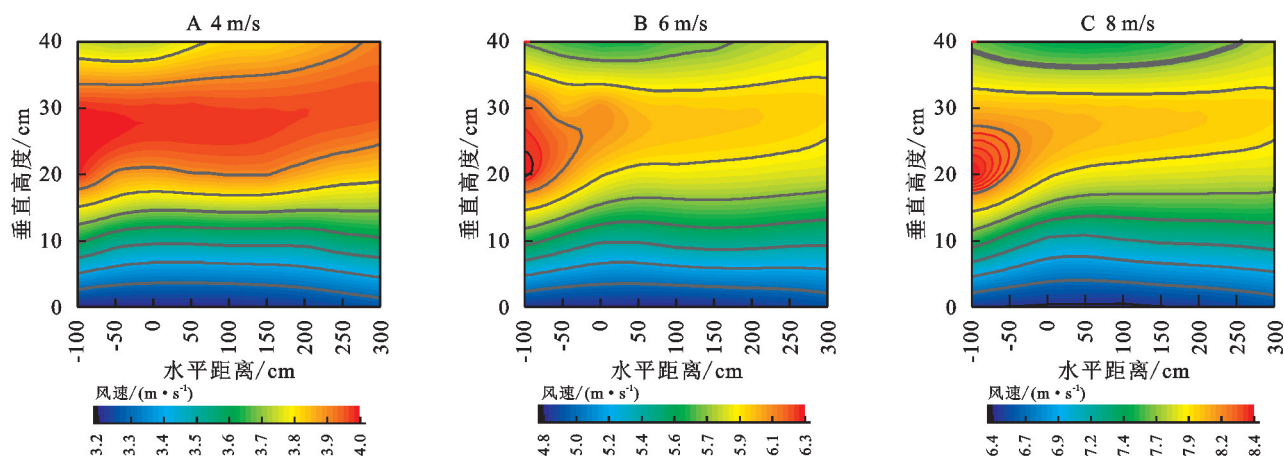
2 结果与分析

2.1 导风板对风速流场的影响

图4—7分别为 $\beta=90^\circ$, $\beta=60^\circ$, $\beta=45^\circ$ 与 $\beta=30^\circ$ 4种风向夹角条件下,导风板模型纵剖面风速流场特征。以空洞测得的风速流场作为对照。对比图3可知,在测定范围内,各风速流场大体可分为4个重新组合的风速能区,但能区大小、强弱各有不同。来流受到导风板阻挡后能量强烈衰减,导致其进风口区域风速明显下降,形成降速区并在模型中后部形成较为明显的风影区(后文将降速区及风影区统称为弱风速区)。当气流到达导风

板处时,在板面某一点产生分离,一部分气流被迫抬升形成绕流,在导风板顶部形成增速区;另一部分气流沿板面向下流动与近地表气流相汇加速通过出风口,在出风口处产生狭管效应,形成一定范围的强风区。而后气流到达相对宽阔地域时发生扩散,形成风速减弱

区。随着导风板与主风向夹角 β 的减小,导风板垂直风向投影面积减小,流经导风板处的气流产生平行和垂直导风板方向的分量,使导风板侧导效应加强,流动的区域逐渐合并,划分的区域越来越少。此时,过境气流在背风侧汇集,又产生新的集流加速区。



注:水平距离0表示模型摆放位置,“-”表示导风板模型迎风侧。

图3 空洞风速流场

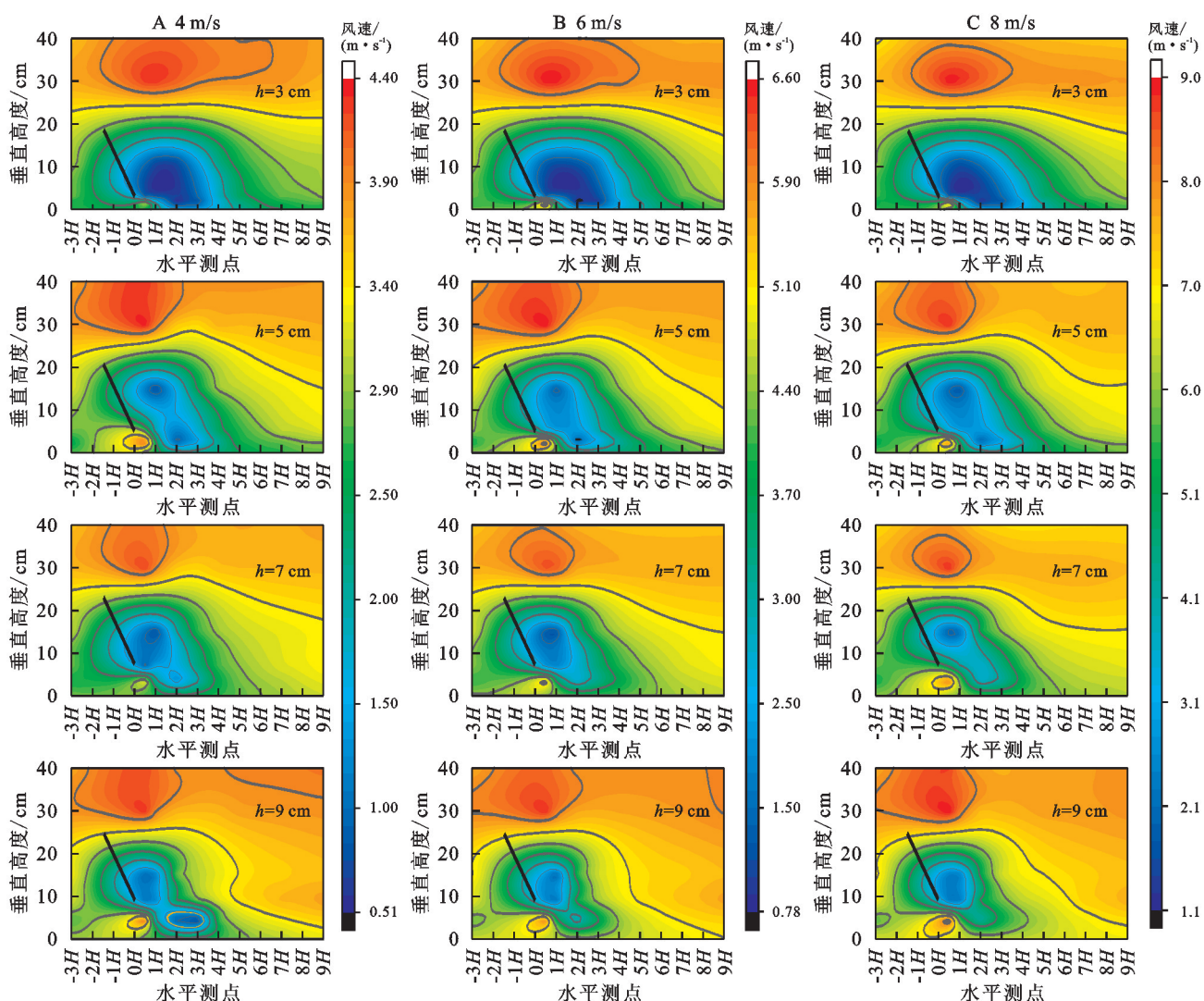
Fig. 3 Air velocity flow field of cavity

当风向夹角 $\beta=90^\circ$ 时,不同风速条件下不同出风口高度导风板流场特征如图4所示。4个出风口高度导风板顶部增速区分布范围依次为 $-1.4\sim 4.1H$, $-2.4\sim 1.9H$, $-1.1\sim 0.9H$, $-2.3\sim 1.6H$ 。增速区内最大风速分别为4.28, 4.35, 4.21, 4.28 m/s, 较CK同位置分别增加8.91%, 10.69%, 7.13%, 8.91%。随风速增大,顶部增速区逐渐向导风板处移动。当 $h\leq 5$ cm时,随风速增大导风板顶部增速区影响范围呈减小趋势; $h>5$ cm时则呈逐渐增大趋势。 $h=3$ cm和 $h=7$ cm导风板在4 m/s风速条件下无强风区。 $h=5$ cm和 $h=9$ cm导风板强风区分布范围分别为 $-1.6\sim 0.8H$ 和 $-1.5\sim 0.7H$ 。强风区内最大风速分别为4.07, 3.97 m/s, 较CK同位置分别增加29.21%, 23.29%。当 $h\leq 5$ cm时,随风速的增大导风板强风区影响范围呈减小趋势; $h>5$ cm时呈逐渐增大趋势。随导风板出风口高度的增加,强风区的影响范围呈先增大后减小再增大趋势。弱风区的影响范围随风速的增大逐渐增大。且出风口高度越高,弱风区影响范围越小。扩散减速区随风速的增大影响范围逐渐增大。随出风口高度的升高,扩散减速区由原来的1个区逐渐分解为2个区域。

当 $\beta=60^\circ$ 时(图5),4个出风口高度导风板顶部增速区分布范围分别为 $-0.5\sim 1.9H$, $-0.5\sim 0.7H$, $-1.1\sim 0.8H$, $-3\sim 3.6H$ 。增速区内最大风速分别为4.18, 4.06, 4.19, 4.38 m/s, 较CK同位置分别增加6.41%, 3.36%, 6.67%, 11.51%。当 $h\leq 7$ cm时,随风速增大导

风板顶部增速区影响范围呈先增大后减小趋势; $h>7$ cm时,则呈减小趋势。 $h=3$ cm, $h=5$ cm和 $h=7$ cm导风板强风区分布范围分别为 $-0.9\sim 0.6H$, $0\sim 0.4H$, $-1.4\sim 0.8H$, $h=9$ cm导风板无强风区。强风区内最大风速分别为3.40, 3.28, 3.84 m/s, 较CK同位置分别增加8.28%, 4.13%, 20.0%。随导风板出风口高度增加,强风区影响范围呈增加趋势。随风速增大,弱风区无明显变化。扩散减速区影响范围随风速增大逐渐增大。随出风口高度增加,扩散减速区逐渐分解为两个区域,且影响范围逐渐减小。

当 $\beta=45^\circ$ 时(图6),4个出风口高度导风板顶部增速区分布范围分别为 $-0.4\sim 0.7H$, $-0.3\sim 0.5H$, $-1.6\sim 1.8H$ 和 $-3\sim 9H$ 。增速区内最大风速分别为4.07, 3.96, 4.19, 4.38 m/s, 较CK同位置分别增加3.61%, 0.81%, 6.67%, 11.51%。随风速增大, $h=3$ cm导风板顶部增速区影响范围呈先增大后减小趋势; $h=5$ cm和 $h=9$ cm导风板呈逐渐增大趋势; $h=7$ cm导风板呈先减小后增大趋势。顶部增速区影响范围随出风口高度的增加呈先减小后增大趋势。在该风向夹角条件下,导风板垂直风向投影面积减小,导风板侧导作用加强。各风速条件下,4个出风口高度的导风板均无强风区。过境气流在背风侧汇集,形成新的集流加速区。 $h=3$ cm导风板无集流加速区,其余3个出风口高度导风板集流加速区分布范围分别为 $0.2\sim 1.0H$, $-0.1\sim 2.9H$ 和 $1.3\sim 9H$ 。随风速及出风口高度的增加,集流加速区影响范围均逐渐增大。

图4 $\beta=90^\circ$ 导风板风速流场Fig. 4 Wind velocity flow field diagram of the wind guide plate when the wind direction angle $\beta=90^\circ$

如图7所示,当 $\beta=30^\circ$ 时, $h=3\text{ cm}$ 和 $h=5\text{ cm}$ 导风板无顶部增速区,其余导风板顶部增速区分布范围分别为 $-2.5\sim 4.5H$ 和 $-3\sim 3.4H$ 。增速区内最大风速分别为 $4.20, 4.23\text{ m/s}$,较CK同位置分别增加 $6.92\%, 7.69\%$ 。随风速的增大, $h=3\text{ cm}$, $h=5\text{ cm}$ 和 $h=9\text{ cm}$ 导风板顶部增速区影响范围逐渐增大, $h=7\text{ cm}$ 导风板顶部增速区影响范围呈先减小后增加的趋势。顶部增速区影响范围随出风口高度的增加呈增大趋势。仅 $h=5\text{ cm}$ 导风板在 $6, 8\text{ m/s}$ 风速条件下存在强风区,分布范围分别为 $-1.3\sim 1H$ 和 $-0.5\sim 0.4H$ 。强风区内最大风速分别为 $5.43, 6.96\text{ m/s}$,较CK同位置分别增加 $12.55\%, 44.27\%$ 。 $h=7\text{ cm}$ 和 $h=9\text{ cm}$ 导风板集流加速区分布范围分别为 $0.4\sim 2.4H, 1.7\sim 4.5H$ 。随风速的增大,集流加速区影响范围逐渐增大。

2.2 导风板相对风速变化特征

相对风速反映导风板聚风能力的变化特征。相

对风速越大,导风板聚风效能越高。对来流中颗粒物起疏导作用的主要为近地面的强风区,故对导风板 $1/2$ 出风口高度处相对风速特征进行分析。

如图8所示,不同的风向夹角条件下,随着导风板出风口高度的增加,导风板 $1/2$ 出风口高度处相对风速变化趋势存在差异。当 $\beta=90^\circ$ (图A—C)时,导风板 $1/2$ 出风口高度处相对风速随出风口高度的变化呈现出先升高再降低然后升高的趋势。4个出风口高度导风板相对风速平均值分别为 $1.14, 1.31, 1.13, 1.25$; $\beta=60^\circ$ (图D—F)时,呈先升高后降低趋势。4个出风口高度导风板相对风速平均值分别为 $0.93, 1.13, 1.23, 1.14$; $\beta=45^\circ$ (图G—I)时,呈逐渐升高趋势。4个出风口高度导风板相对风速平均值分别为 $0.85, 0.90, 0.99, 1.03$; $\beta=30^\circ$ (图J—L)时,呈先升高后降低趋势。4个出风口高度导风板相对风速平均值分别为 $0.87, 1.05, 1.00, 0.97$ 。说明不同的风向夹角、不同出风口高度的导风板对相对风速变化

的影响程度存在差异, $\beta = 90^\circ$, $\beta = 60^\circ$ 和 $\beta = 45^\circ$ 时, $\beta = 30^\circ$ 时, $h = 5\text{ cm}$ 导风板对相对风速变化影响的波动性更大, $h = 9\text{ cm}$ 导风板对相对风速变化影响的波动性更大。

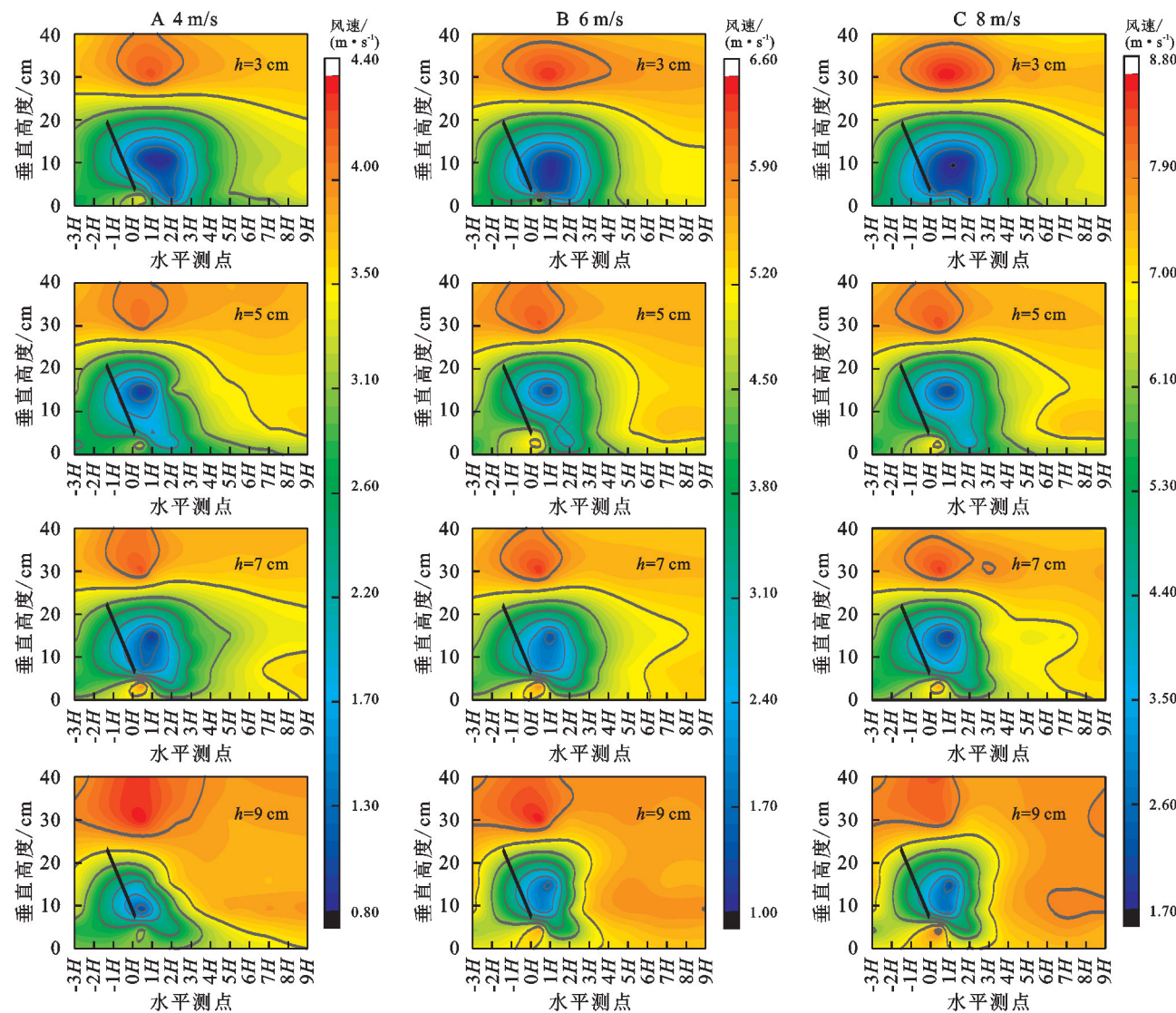


图 5 $\beta = 60^\circ$ 导风板风速流场

Fig. 5 Wind velocity flow field diagram of the wind guide plate when the wind direction angle $\beta = 60^\circ$

综上所述,不同风向夹角、不同出风口高度的导风板对相对风速变化的影响程度存在差异。当迎风夹角 $\beta = 90^\circ$ 和 $\beta = 60^\circ$ 时,各导风板在 $1/2$ 出风口高度处相对风速均随水平距离的增加均呈先增加后减小再增加而后趋于稳定的趋势。由于出风口狭管效应,绝大部分导风板均能在水平测点 $0.5 H$ 处达到相对风速峰值。而后由于气流发生扩散,在水平测点 $2 H$ (在 4 m/s 风速条件下, $h = 9\text{ cm}$ 导风板为 $3 H$) 处风速减弱为最低值。当迎风夹角 $\beta = 45^\circ$ 和 $\beta = 30^\circ$ 时,导风板垂直风向投影面积急剧减小,侧导作用加强。此时,过境气流在导风板后汇集,对水平距离 $1 H$ 后的气流有较大的加速效果。

2.3 导风板聚风效果的预测模型

多元线性回归模型是描述变量的相关性模型,在满足模型决定系数、相关性检验等基础上,可对因变

量进行预测^[13]。研究表明,导风板倾角、气流扩散角、山坡坡度、风向与下导风走向的夹角以及风速等均能作为下导风防护效果的标志^[14]。在前人研究的基础上,本研究选取风向的夹角(β)、出风口高度(h)、来流风速(V_0)和距离导风板水平距离(x)4 个影响因素作为自变量,运用多元回归分析方法,建立导风板 $1/2$ 出风口高度处风速多元回归预测模型。

利用 SPSS 软件对 3 个风速条件下 4 个风向夹角、4 个出风口高度的导风板各 9 个水平点位的 432 个样本数据进行多元线性回归。回归分析结果见表 2—4。

此多元回归模型方程调整后的决定系数 $R^2 = 0.758$ (表 2),说明自变量(风向的夹角、出风口高度、来流风速以及距离导风板的水平距离)可以解释因变量(导风板干扰下 $1/2$ 出风口高度处的风速)75.8%

的变化,模型拟合程度较高。对回归方程进行显著性检验(表3),得出 p 值为 $0.000 < 0.05$,认为自变量和因变量有很强的相关性,回归方程有显著意义。由表4可知,所选参数 p 值均小于0.05,可见其对导风板风速均有显著影响,参数选用较为合理,且VIF值均小于5无多重共线性问题。各因素对风速的影响程度为来流风速>导风板出口高度>距离导风板的水平距离>风向夹角。可得最终预测模型为

$$V_{(x)} = -0.144 + 0.145h + (-0.022)\beta + 0.808V_0 + 0.092x \quad (2)$$

式中: $V_{(x)}$ 为导风板干扰下1/2出口高度处的风速(m/s); h 为出口高度,本文取3,5,7,9 cm; β 为风向夹角,取 $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$; V_0 为来流风速,取4,6,8 m/s; x 为距离导风板的水平距离,取-3,0.5,1,2,3,4,5,7,9 H (“-”号代表导风板模型迎风侧, H 代表导风板模型高,单位为cm)。

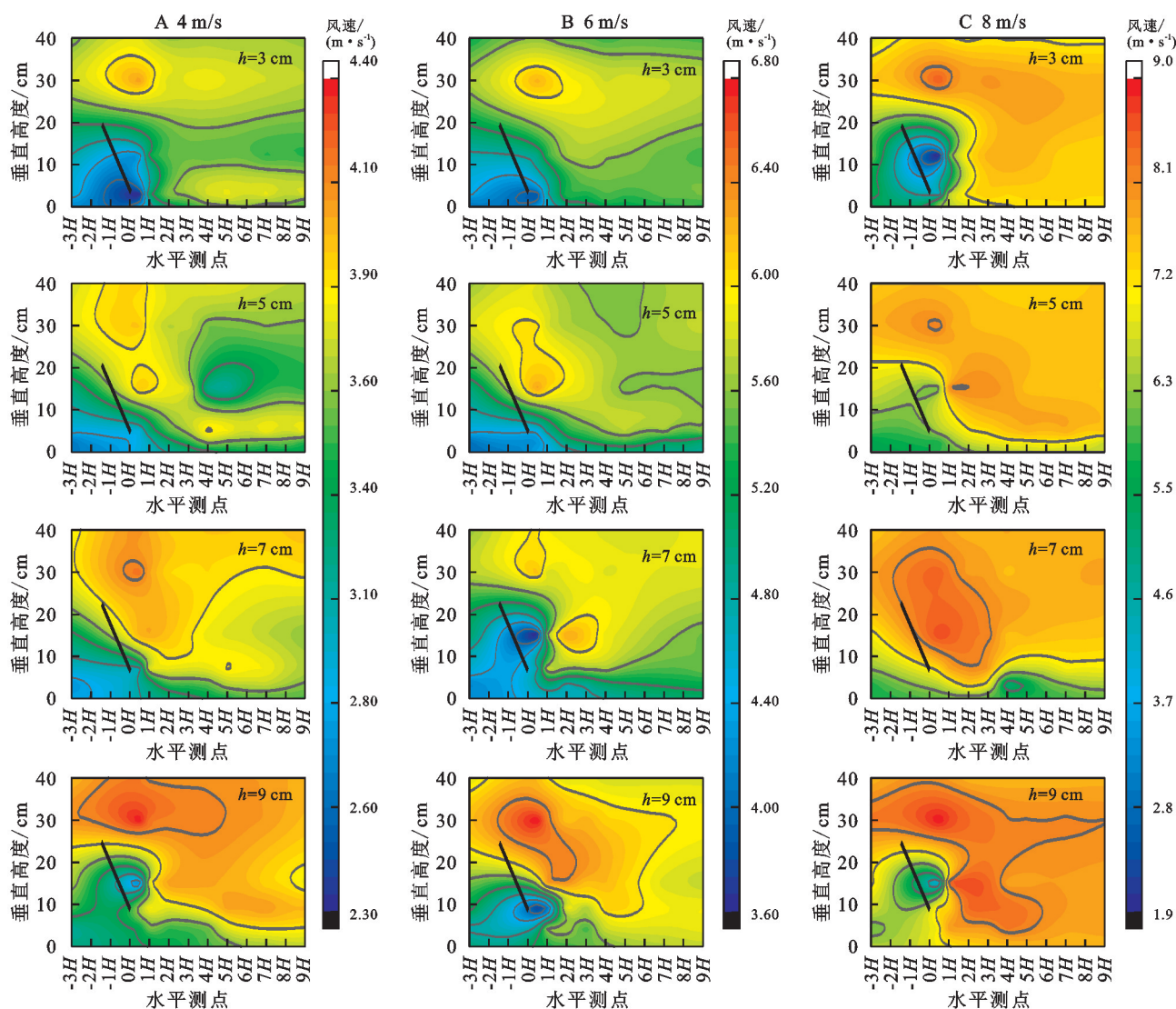


图6 $\beta=45^\circ$ 导风板风速流场

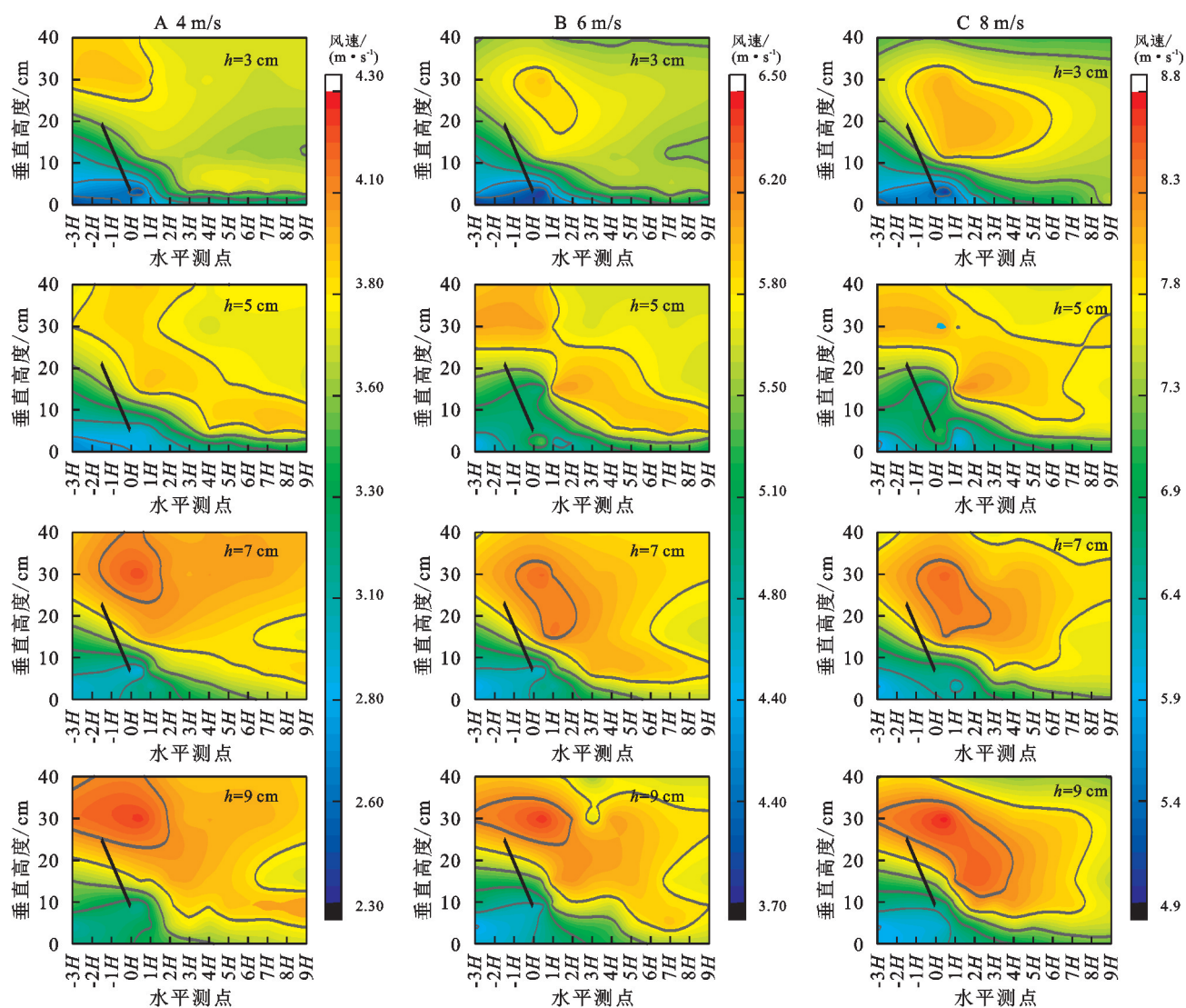
Fig. 6 Wind velocity flow field diagram of the wind guide plate when the wind direction angle $\beta=45^\circ$

3 讨论

本研究对不同风速条件下,与风向呈不同夹角的不同出口高度导风板的流场特性进行风洞模拟,基本掌握了各条件下的流场特征。在自然过程中,风向是不固定的,本研究通过调整导风板与风向的夹角,模拟了自然状况下多变的风向,更具实践意义。从风洞模拟结果来看,与韩彦隆^[15]对不同倾角导风板聚风输沙机理的野外试验流场规律相一致,表明导风板

风洞试验和野外试验对于流场的作用具有一定的相似性,可为实际应用提供理论参考依据。

导风板布设与地面呈 45° 角,将导风板所在流层流体的动能和位能重新分配,加强了导风板上、下端流体运动的能量,使原来流经地表的“一次流”变为人为干扰下的“次生流”^[16-17]。研究表明,4种不同出口高度的导风板在不同风向夹角条件下均表现出明显的流速分区特征。大体可以划分为4个典型区域:顶部增速区、底部强风区、弱风区及扩散减速区。

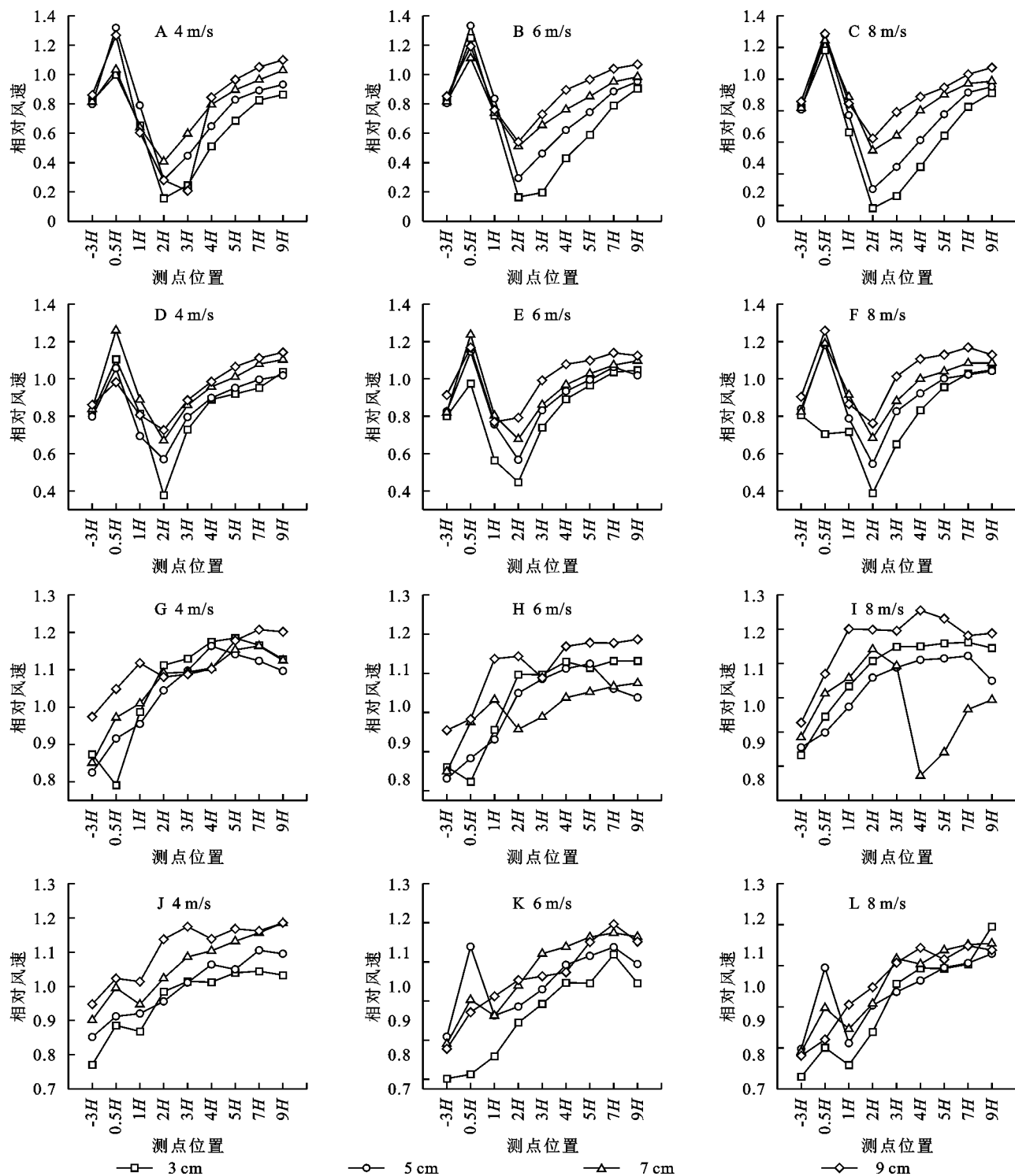
图7 $\beta=30^\circ$ 导风板风速流场Fig. 7 Wind velocity flow field diagram of the wind guide plate when the wind direction angle $\beta=30^\circ$

这些典型区域分别表示气流的不同运移特征,影响了导风板周围沙粒的跃移传输及沉积特征^[18]。来流到达导风板处时在板面某一点产生分离,一部分气流被迫抬升,与上方气流汇合,在顶部形成增速区。另一部分气流沿板面向下流动与近地表气流相汇加速通过出风口,在出风口处产生狭管效应,导致气流携沙能力加强。辛林桂^[7]、陈柏羽^[8]等认为导风板与挡沙墙对风速流场的作用具有一定的相似性,都是一种带有尖缘的钝体,也有减速区,涡流区以及上方加速区和下方加速区生成,此与本研究结果一致。且加速区的范围和风速大小可以反映导风板输导效果。导风板与光伏电板结构类似,其对过境气流的作用机理也类似。陈曦^[19]、唐国栋^[16]、袁方等^[20]、孙涛等^[21]研究显示光伏电板出风口后方出现一定范围的风速增大,此与本研究结果一致。石龙等^[22]对挡风墙设置向上开口的斜插板,通过向上输导过境气流以减小对过往车辆的影响,起到了同导风板相似的输导作用。蒋富强等^[23]通过进行挡风墙下部开口

疏导线路积沙试验,结果表明开口后铁轨支撑层台阶气流处在加速区,使其积沙量和积沙面积均显著减小。刘贤万^[24]、张超^[25]等研究发现,下导风工程在板后贴近地层会出现一个风速减弱区域。同样,本研究结果中在模型背风侧 $2H$ 附近风速也出现了一定程度的减弱。分析原因可能是气流通过导风板与地面形成的狭管后进入开阔区域会出现一定程度的扩散,从而使得风速再次减弱。且随出风口高度的增加气流通过狭管后受到的挤压减小,扩散能力减弱,使得扩散减速区逐渐分解,且影响范围逐渐减小。本研究还发现,当 $\beta<60^\circ$ 时,各导风板均无底部强风区和扩散减速区,而是在导风板背风侧产生新的气流加强区。分析原因可能是由于风向夹角变小,导风板侧导作用加强,流动的区域逐渐合并,导致划分的区域越来越少,过境气流在板后一定距离重新聚集导致风速加大。各风向夹角条件下,随出风口高度的增加导风板强风区呈逐渐增大趋势,分析原因可能是出风口高度的增加有助于导风板汇聚更多的风能,

更有利于狭管效应的产生。随风向夹角的增大, $h \leq 5$ cm 导风板强风区影响范围逐渐增大,而 $h \geq 7$ cm 导风板强风区的影响范围则逐渐减小,以风向夹角 $\beta = 60^\circ$ 时, $h = 9$ cm 导风板强风区影响范围为最大。将出风口高度为 9 cm 的导风板(换算为野外实际规

格分别为 $h = 45$ cm) 与主风向呈 60° 设置于沙丘迎风坡,能有效影响过境气流的运动规律,降低沙丘高度,减小高大密集型流动沙丘的治理难度;更有利于背风坡和丘间低地水源涵养,提升人工植被成活率及生态系统的稳定性。



注: A—C 为风向夹角 $\beta = 90^\circ$ 时 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s 风速条件下导风板 1/2 出风口高度处各水平测点相对风速; D—F 为风向夹角 $\beta = 60^\circ$ 时 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s 风速条件下导风板 1/2 出风口高度处各水平测点相对风速; G—I 为风向夹角 $\beta = 45^\circ$ 时 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s 风速条件下导风板 1/2 出风口高度处各水平测点相对风速; J—L 为风向夹角 $\beta = 30^\circ$ 时 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s 风速条件下导风板 1/2 出风口高度处各水平测点相对风速。

图 8 导风板 1/2 出风口高度处各水平测点相对风速

Fig. 8 Relative wind speed of each horizontal measuring point at the height of 1/2 air outlet of wind guide plate

表 2 模型摘要^b
Table 2 Model summary^b

模型	R	R^2	调整后的 R^2	标准估算的 错误
1	0.872 ^a	0.760	0.758	0.83693

注:a 预测变量(常量、风向夹角、出风口高度、来流风速、距离导风板的水平距离);b 因变量(导风板 1/2 出风口高度处风速)。

表 3 F 检验^a
Table 3 F test^a

模型	平方和	自由度	均方	F	显著性
回归	946.760	4.00	236.690	337.909	0.000 ^b
1 残差	299.095	427.00	0.700		
总计	1245.854	431.00			

注:a 因变量(导风板 1/2 出风口高度处风速);b 预测变量(常量、风向夹角、出风口高度、来流风速、距离导风板的水平距离)。

表 4 系数^a
Table 4 Coefficient^a

模型 1	非标准化系数		准系数 β 值	t 值	显著性	共线性统计	
	B	标准错误				容许	VIF
常量	-0.144	0.217		-0.662	0.508		
h	0.145	0.018	0.191	8.065	0.000	1.000	1.000
β	-0.022	0.002	-0.292	-12.333	0.000	1.000	1.000
V_0	0.808	0.025	0.777	32.783	0.000	1.000	1.000
x	0.092	0.012	0.183	7.729	0.000	1.000	1.000

注:a 因变量(导风板 1/2 出风口高度处风速)。

4 结 论

(1) 整体来看,不同出风口高度导风板风速流场均可划分为增速区、强风区、弱风区及扩散减速区。随风向夹角逐渐减小,导风板侧导作用增强,流动的区域逐渐合并,划分的区域减少,过境气流在导风板背风侧聚集从而产生新的集流增速区。不同出风口高度及风向夹角下导风板流场特征存在显著差异。 $\beta=90^\circ$ 时, $h=3$ cm 导风板顶部增速区影响范围最大, $h=5$ cm 导风板底部强风区影响范围最大。风向夹角 $\beta=60^\circ$ 时, $h=7$ cm 和 $h=9$ cm 导风板形成的强风区面积明显大于其他导风板,以 $h=9$ cm 导风板影响范围为最大。 $\beta=45^\circ$ 和 $\beta=30^\circ$ 时, $h=9$ cm 导风板顶部增速区和集流加速区影响范围均最大。总体来看在聚风效果上, $\beta=60^\circ$ 时 $h=9$ cm 导风板优于其他导风板。

(2) $\beta=90^\circ$ 和 $\beta=60^\circ$ 时各导风板 1/2 出风口高度处相对风速随水平距离的变化近似呈“N”形变化。由于狭管效应,绝大部分均能在 $0.5 H$ 处达到相对风速峰值,而后气流发生扩散,到 $2 H$ 处降为相对风速最低值。当迎风夹角 $\beta=45^\circ$ 和 $\beta=30^\circ$ 时,导风板侧导效应增强,过境气流在背风侧汇集,此时对水平测点 $1 H$ 后的气流有较大的加速效果。 $\beta=90^\circ$, $\beta=60^\circ$ 和 $\beta=45^\circ$ 时, $h=9$ cm 导风板对相对风速变化影响的波动性更大; $\beta=30^\circ$ 时, $h=5$ cm 导风板对相对风速变化影响的波动性更大。导风板 1/2 出风口高度处风速预测模型 $V_{(x)}=-0.144+0.145h+(-0.022)\beta+0.808V_0+0.092x$ ($R^2=0.758$),模型拟合程度较高。

参考文献:

[1] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003.
Wu Z. Aeolian Landform and Sand Control Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2003.

[2] 谢胜波,屈建军,刘冰,等.青藏铁路沙害及其防治研究进展[J].中国沙漠,2014,34(1):42-48.
Xie S B, Qu J J, Liu B, et al. Advances in research on the sand hazards and its controls along the Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of Desert Research, 2014,34(1):42-48.

[3] 刘畅.G111 线公路内蒙古科右中旗段沙害防治技术研究[D].长春:吉林大学,2011.
Liu C. Study on the Prevention and Control of Sand Damage of Keyouzhongqi Section of G111 Highway Innermongolia[D]. Changchun: Jilin University, 2011.

[4] 刘梦珂.克塔铁路风雪灾害防治措施的仿真研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2021.
Liu M K. Simulation Research on Preventive Measures of Wind-Blown Snow Disaster on Keta Railway [D]. Shijiazhuang, Shijiazhuang Tiedao University, 2021.

[5] 金琦凡,王宏光.旋流导风板湿式冷却塔填料区热力性能的数值研究[J].热能动力工程,2020,35(1):112-119,126.
Jin Q F, Wang H G. Numerical study on thermal performance of filling zone of wet cooling tower with swirl air deflector[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020,35(1):112-119,126.

[6] Han Y L, Gao Y, Meng Z J, et al. Effects of wind guide plates on wind velocity acceleration and dune leveling: A case study in Ulan Buh Desert, China[J]. Journal of Arid Land, 2017,9(5):743-752.

[7] 辛林桂,程建军,王连,等.基于 Design Exploration 方法

- 对铁路下导风工程关键设计参数的优化[J].中国沙漠, 2018,38(6):1193-1199.
- Xin L G, Cheng J J, Wang L, et al. Optimization of key design parameters of the aviation baffle engineering of railway based on Design Exploration method[J]. Journal of Desert Research, 2018,38(6):1193-1199.
- [8] 陈柏羽,程建军,辛林桂,等.基于离散伴随求解器的铁路下导风工程外形优化研究[J].铁道科学与工程学报, 2019,16(8):1923-1930.
- Chen B Y, Cheng J J, Xin L G, et al. Shape optimization of blower fences of railway based on discrete adjoint solver[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019,16(8):1923-1930.
- [9] 闫敏.乌兰布和沙漠防沙技术措施复合作用机制及其优化配置[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- Yan M. Combined Action Mechanism of Ulan Buh Desert Sand Prevention Technology Measures and Its Optimal Configuration[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [10] 邢启鑫.西北干旱荒漠区煤炭基地沙尘防控措施研究[D].北京:北京林业大学,2021.
- Xing Q X. Dust Control Measures of Coal base in Arid Desert Area of Northwest China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [11] 钱征宇.沙漠地区铁路的防护技术[J].铁道建筑,1987(2):17-18.
- Qian Z Y. Protection technology of railway in desert area[J]. Journal of Railway Engineering, 1987(2):17-18.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑工程风洞试验方法标准 JGJ/T 338—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Wind Tunnel Test of Buildings and Structures JGJ/T 338—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [13] 李莉.统计学原理与应用[M].南京:南京大学出版社,2019.
- Li L. Principles and Applications of Statistics[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2019.
- [14] 王中隆,白重瑗,陈元.天山地区风雪流运动特征及其预防研究[J].地理学报,1982,37(1):51-64.
- Wang Z L, Bai Z Y, Chen Y, et al. A study on the movement of snow drift in Tianshan and its control[J]. Journal of Acta Geographica Sinica, 1982,37(1):51-64.
- [15] 韩彦隆.导风板聚风输沙机理研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- Han Y L. Study on Mechanism of Wind Velocity and sediment Transport Increasing by Wind Guide Plate [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [16] 唐国栋.沙区光伏阵列地形表变规律及其动力学机制[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- Tang G D. Study on the Solar Photovoltaic Array Surface Geomorphology Development Characteristics and Dynamic Mechanism in Desert Area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [17] 闫敏,左合君,郭跃,等.风沙环境下防风挡沙墙复变作用规律的风洞模拟[J].北京林业大学学报,2021,43(5):108-117.
- Yan M, Zuo H J, Guo Y, et al. Wind tunnel simulation of complex deformation law on retaining wall under aeolian sand environment[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021,43(5):108-117.
- [18] 罗万银,董治宝,钱广强,等.直立阻沙栅栏流场特征的风洞模拟试验[J].中国沙漠,2009,29(2):200-205.
- Luo W Y, Dong Z B, Qian G Q, et al. Wind tunnel simulation on the flow characteristics around upright fences[J]. Journal of Desert Research, 2009,29(2):200-205.
- [19] 陈曦.沙区光伏电站对气固两相流及地表土壤粒径的影响研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- Chen X. Research on Impact Effect of Gas-solid Two-phase Flow and Soil Mechanical Composition to Photovoltaic Power Station [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [20] 袁方,张振师,卜崇峰,等.毛乌素沙地光伏电站项目区风速流场及风蚀防治措施[J].中国沙漠,2016,36(2):287-294.
- Yuan F, Zhang Z S, Bu C F, et al. Wind speed flow field and wind erosion control measures at photovoltaic power plant project area in Mu Us sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2016,36(2):287-294.
- [21] 孙涛,王祺,刘世增,等.单排光伏板防风固沙功能的风洞模拟研究[J].干旱区资源与环境,2022,36(4):111-119.
- Sun T, Wang Q, Liu S Z, et al. Wind tunnel simulation of wind prevention and sand fixation of single-row photovoltaic panels[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022,36(4):111-119.
- [22] 石龙,李来强,李凯崇,等.兰新高高速铁路挡风墙下部开口清沙试验研究[J].铁道建筑,2016(3):122-126.
- Shi L, Li L Q, Li K C, et al. Test research of sand removing through opening at bottom of wind-shield wall along Lanzhou-Xinjiang high speed railway[J]. Journal of Railway Engineering, 2016(3):122-126.

- physical mechanism of abnormal changes in tropospheric top pressure on the Qinghai-Tibet Plateau in the northern hemisphere in summer[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(3): 559-567.
- [36] 张大任, 郑静, 范军亮, 等. 近 60 年中国不同气候区极端温度事件的时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2019, 40(7): 422-434.
- Zhang D R, Zheng J, Fan J L, et al. Spatio-temporal variation characteristics of extreme temperature events in different climatic zones in China in the past 60 years [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(7): 422-434.
- [37] 杨涵洧, 封国林. 2013 年盛夏中国持续性高温事件诊断分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 484-494.
- Yang H Y, Feng G L. Diagnostic analysis of persistent high temperature events in China in the middle of the summer of 2013 [J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(2): 484-494.
- [38] 丁园圆, 缪启龙, 王勇. 中国北方冬季极端温度的变化及其与 AO 相关分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(5): 95-101.
- Ding Y Y, Liao Q L, Wang Y. Variation of winter extreme temperatures in northern China and their correlation with AO[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(5): 95-101.
- [39] Zhang J Y, Wu L Y. Land-atmosphere coupling amplifies hot extremes over China[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(31): 3328-3332.
- [40] He B, Wang H L, Wang Q F, et al. A quantitative assessment of the relationship between precipitation deficits and air temperature variations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(12): 5951-5961.
- [41] 肖秀程, 黄丹青, 严佩文. 极端气温和极端降水复合事件的气候特征[J]. 气象科学, 2020, 40(6): 744-751.
- Xiao X C, Huang D Q, Yan P W. Climatic characteristics of complex events of extreme temperatures and extreme precipitation[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(6): 744-751.
- [42] Zhou T J, Zhang W X, Zhang L X, et al. The dynamic and thermodynamic processes dominating the reduction of global land monsoon precipitation driven by anthropogenic aerosols emission [J]. Science China Earth Sciences, 2020, 63: 919-933.
- [43] 陈训来, 刘军, 郑群峰, 等. 基于卷积门控循环单元神经网络的临近预报方法研究[J]. 高原气象, 2021, 40(2): 411-423.
- Chen X L, Liu J, Zhen Q F, et al. Research on proximity prediction method based on convolutional gated recurrent unit neural network[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(2): 411-423.

(上接第 294 页)

- [23] 蒋富强, 石龙, 李凯崇. 兰新二线挡风墙下部开口疏导线路积沙试验[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(7): 13-17.
- Jiang F Q, Shi L, Li K C. Experiment of clearing route eolian-sand by opening at the bottom of windbreak along Lanzhou-Xinjiang railway second line[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(7): 13-17.
- [24] 刘贤万, 凌裕泉, 贺大良, 等. 下导风工程的风洞试验研究: [1] 平面上的试验[J]. 中国沙漠, 1982, 2(4): 18-25.
- Liu X W, Ling Y Q, He D L, et al. Studies on the effects of fence in wind tunnel: Part 1. experiment with level surface[J]. Journal of Desert Research, 1982, 2(4): 14-21.
- [25] 张超, 韩彦隆, 高永, 等. 导风板倾角对板后风沙流输沙的影响[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 520-527.
- Zhang C, Han Y L, Gao Y, et al. Effect of dip angles of wind guide plate on sediment discharge behind the plate[J]. Journal of Arid Zone Research, 2019, 36(2): 520-527.