

# 地形对包兰铁路沙坡头段防护体系的影响

周 娜<sup>1</sup>, 张春来<sup>1</sup>, 邹学勇<sup>1</sup>, 吴晓旭<sup>2</sup>, 张 峰<sup>1</sup>

(1.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室 北京师范大学防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875; 2.北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

**摘要:** 选择沙坡头铁路防护体系典型断面, 利用野外风场观测与风洞模拟, 讨论地形在道路防沙体系中的作用。结果表明, 防护体系前沿栅栏沙丘下风向 10 倍沙丘高度的水平范围内, 地表摩阻风速通常小于临界值; 风速递减系数随防护距离的增大而增大, 地形倾斜和起伏对贴地层风力减弱的贡献占防护体系风速削弱程度的 43%。自流沙区至铁路路基, 潜在输沙率迅速波动降低, 其中地形变化使得防护体系内潜在输沙率降低 50% 以上。这表明, 地形是沙坡头铁路防护体系发挥卓越功能的重要因素, 栅栏沙丘已成为防护体系的重要构成部分。

**关 键 词:** 防护体系; 地形; 栅栏沙丘; 风场; 潜在输沙率

**中图分类号:** P931.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0690(2014)07-0889-08

风沙活动规律是制定合理风沙防治方案、评价防沙工程体系防护效益和确定防护体系宽度的理论基础<sup>[1]</sup>。以往有关风沙工程技术措施防护效能的研究及防护宽度计算<sup>[2-4]</sup>, 多基于平坦流沙地表的输、阻平衡理论, 未考虑地形的影响, 较少从防护措施、风沙流场与地形相互作用的机理角度阐明防护体系的防护效能<sup>[5]</sup>。实际上, 防护体系的防护效能受到多种因素的影响, 包括沙障或植株与地形、气流场之间的耦合, 因此, 阐明防护工程与地形、流场之间的相互作用机理是科学界定有效防护宽度的关键。

沙丘表面风沙流场的变化广受关注<sup>[6-8]</sup>, 然而, 地形在道路防沙工程中的作用鲜有涉及。赵海燕<sup>[9]</sup>最早通过风洞实验, 证明沙坡头地区西北-东南倾斜的地势, 使西北气流顺坡面呈扩散状态, 有利于沙物质堆积。张春来等<sup>[10]</sup>基于地形和流场实测, 指出由于防护体系阶梯下降地形以及人工植被和草方格的存在, 防护带内近地面等风速线沿风向呈逐渐变疏和抬高趋势, 风速递减。可见, 地形对防护体系防护效益有着重要影响。研究同时表明, 防护体系前沿阻沙栅栏不仅改变局地风沙流场, 而且形成具有独特地貌形态特征的栅栏

沙丘<sup>[11]</sup>, 进一步观测发现, 栅栏沙丘的形成和发展, 对整个防护体系近地面流场都产生了不容忽视的影响。沙坡头地区下伏地貌为 4 级古黄河阶地, 自西北向东南倾斜下降的地形叠加微观的沙丘地形, 为研究地形对防护体系防护功能的影响提供了理想场所。本文选择沙坡头铁路防护体系的一个典型断面, 利用野外风场观测与室内风洞模拟实验, 讨论地形以及栅栏沙丘在防沙体系中的作用, 以为道路防沙体系及其合理宽度的设定提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 区域概况

研究区由流沙区及人工防护体系构成。流沙区发育走向为 SW-NE 的主梁和与其近于垂直的副梁(SE-NW)组成的格状沙丘, 主梁高 3~20 m, 丘间地不明显, 副梁迭置在主梁迎风坡, 高 1~6 m, 间距 50~100 m<sup>[12]</sup>。铁路防护体系被称为四带一体, 第一带为前沿阻沙带, 距迎风坡脚 2/3 处设置 1.2 m 高、孔隙度约 30% 的阻沙栅栏; 第二带为无灌溉草方格人工植被固沙带, 由草方格沙障和人工植被组成, 草方格规格 1m×1m, 草头高度

收稿日期: 2013-05-16; 修订日期: 2013-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171004)资助。

作者简介: 周 娜(1982-), 女, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要从事风沙地貌与工程研究。E-mail: zhouna@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 张春来。E-mail: clzhang@bnu.edu.cn

15~20 cm。植被由柠条(*Caragana korshinskii*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙拐枣(*Calligonum arborescens*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)组成;第三带为灌溉林带;第四带为砾石输沙平台。

## 1.2 研究方法

1) 野外地形测量与风场观测。在包兰铁路K708-710段,选取横穿防护体系、北起阻沙栅栏上风向200 m处的流动沙丘,南至铁路北侧砾石输沙平台,与常年优势主风向近似平行的观测断面。断面长度1 050 m,宽度170 m,相对高差70 m。采用水平精度 $1\pm 0.2\%$  cm、垂直精度 $0.2\pm 0.2\%$  cm的Trimble 4700 双频高精度DGPS,对断面地形进行测量。

以防护体系前沿栅栏沙丘丘顶风速观测点为参照,沿断面中线进行流场测定,测点共计43个,覆盖了沙丘迎风坡、丘顶、背风坡、丘间地等各种地貌部位。观测时间为2010年4~5月。采用北京师范大学与北京市气象局联合研制的野外用梯度风速仪进行风速观测,该风速仪测量范围为0.3~30 m/s,精度0.1 m/s,风速数据采集时间设定为0.5 min,每个测点设定9个观测高度,依次为0.1、0.2、0.4、0.6、1.0、1.5、2.0、3.0和4.0 m。测定时,将一套梯度风速仪固定在栅栏沙丘丘顶作为风速参照基站,另一套梯度风速仪作为流动观测站依次测量选定测点的风速廓线,每点测定3 min,共6组数据,取平均值,然后参照张春来等<sup>[10]</sup>的方法将移动观测的风速数据转换为相同时刻的平均风速。

2) 风洞流场模拟。模拟实验在北京师范大学风沙环境与工程风洞中进行。该风洞为直流吹气式风洞,长度66.6 m,实验段长24 m,截面3 m(宽)×2 m(高),顶板可调节 $\pm 20$  cm。实验轴心风速2~45 m/s连续可调。实验段设有三维移测机,可以实现风速廓线的三维移动观测。

依据实测高程数据,按1:200比例制作防护体系典型断面地形模型。模型长480 cm,宽85 cm,相对高差37 cm,表面铺设腾格里沙漠天然沙并喷洒胶水固定。为了保证实验段流场边界层充分发育,模型布置于风洞实验段中部,其前沿距实验段前沿10 m,该10 m长度范围内风洞底板平铺厚度为37 cm的泡沫板;平铺泡沫板上风向为风洞收缩段和扩散段,在该段内风洞底板铺设长422 cm、高37 cm、截面为直角三角形的泡沫板,与实验段泡沫板连接(图1),保证实验气流的平稳爬升和过渡。在模型上风向100 cm范围内的泡沫板表面均匀喷洒并胶结固定薄层天然沙,使模型表面来流尽量与野外实际相近。

采用TSI公司生产的IFA300热膜风速仪系统测定模型表面流场。1210-20型一维热膜探头的标定精度为 $\pm 2\%$ ,风速测量范围为0~50 m/s。热膜探头安装在三维移测活动杆上,测量最大高度为距风洞底板100 cm。热膜探针杆末端连接到热膜风速仪上,仪器响应频率为260 kHz,数据采集频率为2 000 Hz,采样时间为8.19 s。模型断面测点设置与野外测点基本对应,其中,在铁路模型下风向1和2 cm处分别增加一个测点,共计43个模拟测点。

在野外防护体系上风向流沙区约100 m处的平缓沙丘顶部,测量沙丘表面3 m高度风速( $u_{3\text{ m}}$ )分别为6、9、12 m/s时的3组风速廓线。按模型比例缩小,分别对应风洞内该沙丘模型表面15 mm高度风速( $u_{15\text{ mm}}$ )为6、9、12 m/s时的风速廓线。如图2所示,该沙丘表面3组风速廓线的野外观测结果与风洞模拟结果相似。在上述3组风速下,风洞内气流雷诺数介于 $1.5\times 10^5\sim 3.9\times 10^5$ ,显示风洞实验观测区域达到自模拟要求,湍流边界层充分发育。

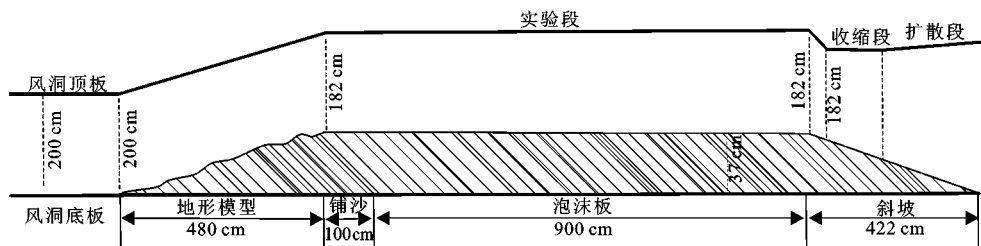


图1 地形模型的风洞参数设置

Fig.1 Arrangement of the transect model in wind tunnel

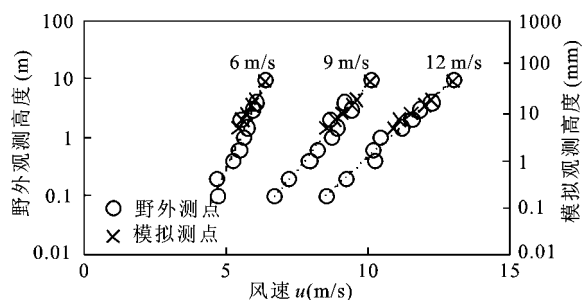


图2 不同风速条件下野外实测流动沙丘表面与风洞模型表面的风速廓线

Fig.2 Wind profiles on the moving dune top at different reference wind speeds in field and in wind tunnel

## 2 结果与分析

### 2.1 防护体系断面近地面流场特征

在野外防护体系断面,观测断面自流沙区向砾石平台由5个高能区和两大低能区组成。其中,高能区分布在流动沙丘丘顶、防护体系前沿沙丘丘顶(水平距离50 m处)和防护体系内3个较明显的地形阶梯边缘(水平距离300、400~550和750 m处),低能区分别位于前沿沙丘背风侧100 m宽度范围(水平距离150 m处)和第2级阶梯下风向150 m宽度范围内;砾石平台附近(水平距离约900 m处)出现一个微弱的高能区(图3a~d)。防护体系的模拟流场与野外近地面实测流场结构相似。在不同风速下,自防护体系前沿沙丘至铁路路基的模型断面,分布四大高能区和两大低能区,其中,高能区分别位于前沿沙丘丘顶和防护体系内部3个地形阶梯的迎风面(水平距离125、200和325 cm处),低能区分别位于前沿沙丘背风坡50 cm宽度内和

第2级阶梯下风向100 cm宽度内;在其余沙丘丘顶和背风坡分别出现次一级的高能区和低能区。随风速增大,沙丘地形对近地面流场的作用减弱,3个高能区的范围逐渐扩大。当实验风速达到12 m/s时,第1级阶梯边缘的高能区与砾石平台附近的次一级高能区合并为一个高能区。

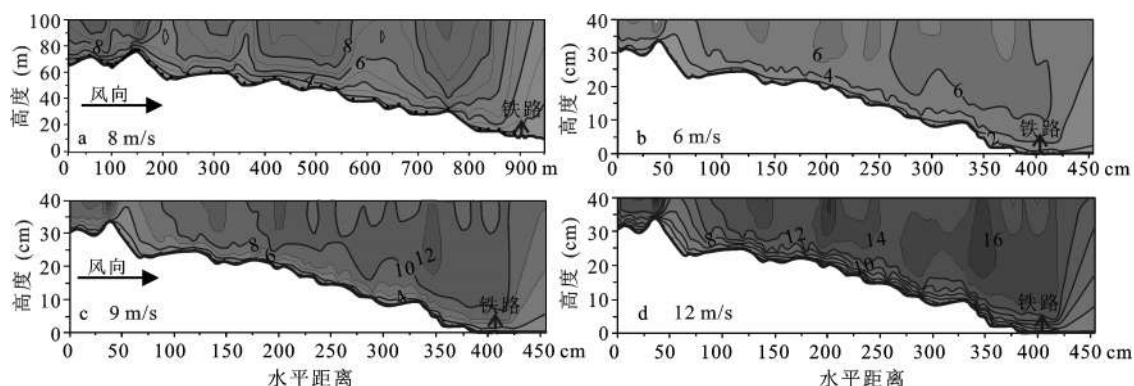
为定量分析沿观测断面的风速变化,以防护体系前沿流动沙丘表面风速为对照点,计算了防护体系近地面风速降低系数 $R_{c(x,z)}$ 。计算公式为:

$$R_{c(x,z)} = (u_{x_0,z} - u_{x,z}) / u_{x_0,z} \quad (1)$$

式中, $R_{c(x,z)}$ 表示防护体系内部水平距离 $x$ 、 $z$ 高度处风速的减小系数; $x_0$ 为防护体系前沿流动沙丘的水平距离; $u_{x,z}$ 为防护体系内该点的平均风速, $u_{x_0,z}$ 为防护体系前沿流动沙丘表面 $z$ 高度的平均风速。在某一高度上,防护体系的总风速削弱程度采用 $T_{R_{cz}}$ 表示。计算公式为:

$$T_{R_{cz}} = \frac{1}{x_M - x_1} \int_{x_1}^{x_M} R_{c(x,z)} dx \quad (2)$$

式中, $M$ 为防护体系内观测点数, $x_M$ 为防护体系内 $M$ 测点水平距离, $x_1$ 为防护体系内上风向第一个测点的水平距离。结果表明,前沿栅栏沙丘顶部风速递减系数 $R_{c(x,z)}$ 最小(-0.20),自该部位向下风向至铁路路基, $R_{c(x,z)}$ 不断增大(图4)。阻沙栅栏对 $R_{c(x,z)}$ 的影响非常大(图4),阻沙栅栏位于前沿沙丘迎风坡上部,在实测栅栏下风向水平距离 $8H$ ( $H$ ,栅栏高度)范围内,不同高度的 $R_{c(x,z)}$ 均明显增大。在砾石平台附近,实测 $R_{c(x,z)}$ 与模拟结果显著不同,表现为实测 $R_{c(x,z)}$ 自固沙带向砾石平台增大,而模拟 $R_{c(x,z)}$ 略有降低。原因在于,野外砾石平台上风向有乔、灌木植被分布,尽管砾石平台区地面有所抬升,但

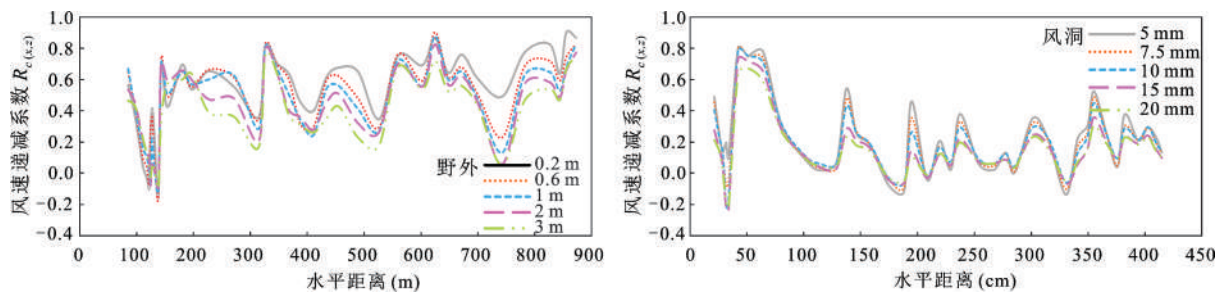


a为野外流场;b、c、d为模拟流场

图3 防护体系流场断面特征

Fig.3 Airflow field along the observation transect



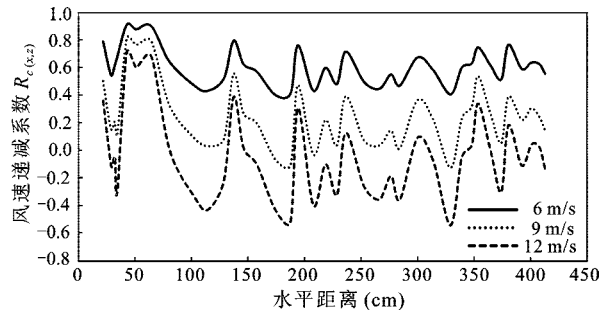
图4 来流风速8~9 m/s的防护体系断面风速递减系数 $R_{c(x,z)}$ 变化Fig.4 Variation of reduction coefficient ( $R_{c(x,z)}$ ) along the observation transect under reference wind speed of 8-9 m/s

仍处于上风向植被对气流的影响范围内,而模拟实验中地表无植被覆盖,砾石平台的地势抬高即导致风速回升。

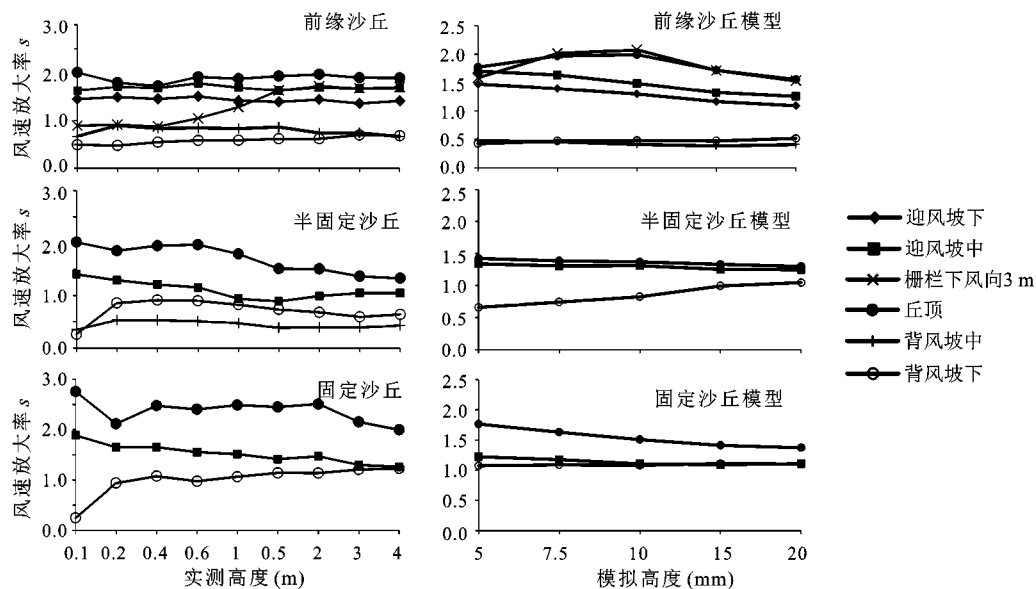
相似来流条件下,将风洞模拟的单纯由地形引起的风速递减系数 $R_{c(x,z)}$ ,与野外地形叠加综合防护体系条件下的 $R_{c(x,z)}$ 进行对比,发现叠加地形影响的野外综合防护体系近地面 $R_{c(x,z)}$ 显著高于仅由地形引起的 $R_{c(x,z)}$ 。来流风速为8~9 m/s时,野外实测0.6 m高度以下的贴地层和风洞模型表面10 mm以下的贴地层总风速消弱程度 $T_{R_{c(0.1-0.6 m)}}$ 和 $T_{R_{c(5-10 mm)}}$ 分别为0.525、0.223,野外0.6 m高度以上、风洞模型表面10 mm以上的近地表总风速消弱程度分别为0.414和0.159。据此计算,单纯由地形引起的贴地层和近地表的总体风速消弱程度分别占防护体系总风速消减程度的43%和38%。模拟实验中,不同来流速度下的断面风速递减系数 $R_{c(x,z)}$ 对比分析表明(图5),随风速增大,由倾斜下降地形引起的气流扩散和减速作用不断减弱,而三大阶梯边缘的气流汇聚不断增强, $R_{c(x,z)}$ 逐渐由正值转为负值。当来流速度约为6~9 m/s时,断面 $R_{c(x,z)}$ 为正值,说明倾斜下降地形对防护体系的防护效益有正向作用;当来流速度达到12 m/s时,倾斜下降地形对防护体系的减速作用变弱,三大阶梯边缘的 $R_{c(x,z)}$ 高达-0.40。这一结果与野外调查的风沙蚀、积状况一致,在5~9 m/s风速条件下(占全年风速发生频率的90%),防护体系内基本上没有沙害发生;随着风速的增强,防护体系内沙丘顶部及三大阶梯边缘的沙丘顶部成为局部风沙活动中心,风蚀强烈。

## 2.2 沙丘表面风速变化

为了突出沙丘地形对风速的影响,这里讨论沙丘表面不同部位风速与迎风坡脚风速之比,即采用风速放大率 $s(s=u/u_0, u_0$ 为迎风坡脚风速, $u$ 为沙丘迎风坡风速)描述风速沿迎风坡的加速程

图5 模拟观测断面5 mm高度风速递减系数 $R_{c(x,z)}$ 变化Fig.5 Variation of reduction coefficient ( $R_{c(x,z)}$ ) at 5 mm height over the observation transect under different reference wind speeds in wind tunnel

度。迎风坡坡度是控制气流在迎风坡加速和背风坡附着距离的主要因素<sup>[13]</sup>。本文选取了防护体系前沿沙丘及其下风向的半固定沙丘和固定沙丘,分析防护措施影响下、具有不同迎风坡坡度的沙丘表面风速变化。其中,前沿沙丘迎风坡坡度为16°,半固定和固定沙丘迎风坡坡度为4~5°。由图6可以看出,风速约为8 m/s时,前沿沙丘表面的风速放大率向丘顶增大,迎风坡下部各高度层平均值为1.4,丘顶各高度层平均为1.9;沙丘背风坡不同高度的风速放大率均小于1.0,其中背风坡脚风速仅为迎风坡脚风速的50%。在垂向上,0.6 m高度以下的沙丘迎风坡贴地层风速放大率略高于0.6 m高度以上的近地表风速放大率。丘顶部位各高度层风速放大率的变化趋势正好相反。李振山等<sup>[12]</sup>研究认为,在沙丘迎风坡下部,贴地层风速的增幅高于上层,坡面为侵蚀状态;迎风坡上部,贴地层风速增幅小于上层,坡面以堆积为主;在沙丘背风坡中部,贴地层风速的减幅小于上层,与背风坡中部分离回涡加速作用较强有关<sup>[14]</sup>;背风坡脚贴地层风速减幅高于上层,则是背风坡湍流由上而下传递的结果<sup>[15]</sup>。在防护体系前段半固定沙丘表

图6 野外和模拟沙丘表面风速放大率 $s$ 变化Fig.6 Speed-up ratio ( $s$ ) at different dune positions in field and wind tunnel

面,迎风坡坡度变小,但沙丘表面的风速放大率与前沿沙丘相似,变化范围为1.0~2.0;背风坡中部风速降低约50%,背风坡脚风速有所恢复,风速仅降低10%~40%。垂直方向上,除10 cm高度风速受植被影响迅速降低外,其他高度风速减弱幅度随高度增加而略有增大。固定沙丘迎风坡的风速放大率分布范围为1.2~2.7,背风坡仅低层20 cm高度内风速放大率小于1,其它高度风速放大率均大于1,这与固定沙丘背风坡坡度较小(15°)有关。

一般认为,迎风坡风速放大率随坡度增加而增大<sup>[15]</sup>。然而,尽管防护体系前沿沙丘迎风坡坡度显著变大,但其上部阻沙栅栏的存在,有效抑制了丘顶风速放大率的增大,并促使风沙流沉积于阻沙栅栏邻近区域。进一步分析认为,阻沙栅栏上、下风向低能区风沙流的连续沉积,使沙丘丘顶部位不断增高、变陡,丘顶逐渐演化成尖锐的丘脊。沙丘背风坡回流对维持这个沙脊形态十分重要。阻沙栅栏由于风沙沉积和掩埋,逐渐失去阻沙功能,如不设置新的栅栏,风沙流将迅速向防护体系内部扩张,威胁整个防护体系的安全。可见,由阻沙栅栏与沙丘表面风沙流相互作用所塑造的前沿沙丘对整个防护体系的稳定至关重要。我们把这类沙丘称为防护体系前沿栅栏沙丘<sup>[11]</sup>。

### 2.3 防护体系近地面输沙率变化

输沙强度作为表征风沙危害强度的物理量,

是评价防护体系效益的关键<sup>[16]</sup>。本文依据标准化处理的野外流场测定数据构建的流场结构,尽管可以较为客观地反映地形及植被与草方格覆盖条件下防护体系近地面流场分布的一般规律,但依据标准化处理后的风速廓线来计算摩阻风速则容易产生较大误差,很难真实反映摩阻风速沿观测断面的实际变化情况。而风洞模拟实验中,由于实验风速稳定,沿模拟断面测定的风速数据无需进行标准化换算,避免了风速换算导致的摩阻风速计算误差,因此本文采用风洞模拟结果,分析防护体系内摩阻风速和潜在输沙率的分布特征。

相关研究表明<sup>[8]</sup>,由坡面偏离对数分布的风速廓线计算出的摩阻风速不能反映沙丘表面颗粒的输移过程,颗粒输移过程受内边界层控制。根据Jackson和Hunt<sup>[17]</sup>提出的公式,Wu等<sup>[18]</sup>计算了迎风坡长度为40 m左右的新月形沙丘表面的内边界层厚度,进而利用内边界层的对数风速廓线,计算了新月形沙丘表面的摩阻风速和输沙率,这一结果与野外实测输沙率沿沙丘表面的变化趋势一致。因此,本文采用风洞模拟实验中距地表15 mm高度以下的风速廓线,计算模型表面内边界层摩阻风速以及无植被与草方格覆盖条件下地表潜在输沙率。结果表明(图7),模型表面摩阻风速自流沙区向铁路路基方向逐渐降低。6、9、12 m/s来流速度下,自流沙区向砾石平台,近地面摩阻风速分别

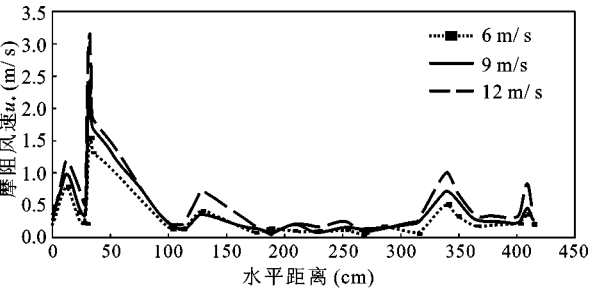


图7 断面模型表面摩阻风速变化

Fig.7 Variation of friction wind speed along the transect model

平均下降49%,45%和39%。随着风速增大,近地面摩阻风速不断增大,但地形的整体下降引起的气流扩散作用,使得防护体系内固定沙丘(模型)表面的摩阻风速始终普遍处于较低水平。特别是由于防护体系前沿栅栏沙丘的存在,下风向水平距离10*h*(*h*=75 mm,为栅栏沙丘的模型高度)范围内的表面气流处于该栅栏沙丘背风坡气流的控制之下,摩阻风速普遍小于沙粒起跳的临界摩阻风速,仅在沙丘脊部表现出较高的摩阻风速。而在栅栏沙丘下风向的防护体系内,沙丘模型微地形对气流的影响较弱。可见,防护体系前沿栅栏沙丘本身是防护体系的一个重要防护要素。对于栅栏沙丘本身,沿迎风坡向丘顶摩阻风速存在减小的趋势,当来流风速为9 m/s时,栅栏沙丘模型表面摩阻风速自迎风坡下部向中部由0.58 m/s降低为0.36 m/s。摩阻风速的这种变化,利于“栅栏沙丘”的成长和增高。

流沙表面的潜在输沙率按以下公式计算<sup>[19]</sup>,

$$Q_p=C\times\rho\times(u_*-u_{*c})\times u_*^2/g \tag{3}$$

式中, $Q_p$ 为输沙率, $C$ 为常数(4.2), $\rho$ 为空气密度(1.05 kg/m<sup>3</sup>), $u_*$ 为摩阻风速, $u_{*c}$ 为临界摩阻风速, $g$ 为重力加速度。 $u_{*c}$ 采用以下公式<sup>[20]</sup>计算:

$$u_{*c}=A\sqrt{\frac{(\rho_s-\rho)gd}{\rho}} \tag{4}$$

式中, $A=0.09$ , $\rho_s$ 为沙粒密度, $d$ 为沙粒粒径(取0.2 mm)。结果表明(表1),低风速时( $u_{15\text{ mm}}=5\sim9$  m/s),自流沙区向铁路路基理论输沙率降低88%以上,高风速下(12 m/s)降低56%。可见,在缺少草方格和人工植被防护的条件下,防护体系前沿栅栏沙丘和断面倾斜下降地形可以显著降低输沙强度。赵海燕通过风洞模拟,证明8°~10°的下行坡面可以引起气流搬运能力下降,并促使74%~79%的沙物质沉积下来。防护体系固定沙丘区域是风

表1 模拟防护体系潜在输沙率分布

Table 1 Latent sand flux along the observation transect model

$u_{15\text{ mm}}$ (m/s)	输沙率 $Q_p$ [kg/(m·s)]				流沙区向砾石平台 输沙率递减率 (%)
	流沙区	前沿 沙丘	固沙区	砾石 平台	
6	0.03	0.137	0.000	0.002	93
9	0.09	0.475	0.001	0.010	88
12	0.13	1.063	0.004	0.022	56

沙沉降的主要场所,在6~12 m/s模拟风速下,地面输沙率相对流沙区降低97%。实地条件下,由于防护体系内流沙地表大多已发育抗风蚀能力很强的生物结皮,而且受到人工植被和草方格沙障的保护,输沙率远远低于流沙地表的理论输沙率。上述分析表明防护体系前沿栅栏沙丘和沿主风向倾斜下降的地形特点,可以有效减弱防护体系内的风沙活动强度。在此基础上,人工植被和草方格等防护措施和流沙表面发育的生物结皮,可以进一步限制地表的风蚀起沙并促使过境风沙流沉积下来。

3 结 论

受防护体系前沿栅栏沙丘和断面倾斜下降地形的影响,观测断面风速递减系数随防护距离的增大而增大。相似来流条件下,叠加地形影响的野外综合防护体系近地面风速递减系数显著高于仅由地形引起的风速递减系数。来流8~9 m/s条件下,地形倾斜和起伏对贴地层风力减弱的贡献率占防护体系总风速消弱程度的43%;随来流风速增大,倾斜下降地形对防护体系的减速作用有所减弱。风速沿沙丘迎风坡的风速变化与地形有关,迎风坡上部阻沙栅栏的存在,有效抑制丘顶的风速放大作用,并促使风沙流沉积于阻沙栅栏附近,形成具有独特形态的栅栏沙丘。模型表面摩阻风速自流沙区向铁路路基方向降低39%~49%。随风速增大,近地面摩阻风速增大,但地形的整体下降引起的气流扩散作用,使得防护体系内固定沙丘(模型)表面的摩阻风速始终普遍处于较低水平。防护体系前沿栅栏沙丘本身是防护体系的一个重要防护要素,其下风向10倍沙丘高度水平距离内的表面气流处于该栅栏沙丘背风坡气流的控制之下,摩阻风速普遍小于沙粒起跳的临界摩阻风速。仅栅栏沙丘和断面倾斜下降地形,就使得



低风速下防护体系内部的理论输沙率降低率高达88%以上, 高风速下降低56%。

致 谢: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠实验研究站李新荣研究员、樊恒文高级工程师、赵金龙高级工程师对本项工作提供热情帮助和支持, 参加野外调查和观测的还有刘永刚、张加琮、马晓洁, 特致谢忱!

## 参考文献:

- [1] 张伟民, 谭立海, 张克存, 等. 不同砾石覆盖床面蚀积过程的野外风洞实验研究[J]. 地理科学, 2012, **32**(11): 1370~1376.
- [2] 凌裕泉, 金 炯, 邹本功. 腾格里沙漠东南缘的风沙活动规律[C]//中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究. 银川: 宁夏人民出版社, 1988: 318~325.
- [3] 刘贤万. 草方格沙障的风洞实验[C]//中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究. 银川: 宁夏人民出版社, 1988: 326~334.
- [4] 胡孟春, 屈建军, 赵爱国, 等. 沙坡头铁路防护体系防护效益系统仿真研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2004, **12**(2): 140~147.
- [5] 卢春阳. 控制沙脊线防沙实验研究[J]. 干旱区研究, 1997, **14**(2): 42~44.
- [6] 韩致文, 缙倩倩, 杜鹤强, 等. 新月形沙丘表面100 cm高度内风沙流输沙量垂直函数分段拟合[J]. 地理科学, 2012, **32**(7): 892~897.
- [7] 董玉祥, 黄德全, 马 骏. 海岸沙丘表面不同部位风沙流中不同粒径沙粒垂向分布的变化[J]. 地理科学, 2010, **30**(3): 391~397.
- [8] Lancaster N, Nickling W G, McKenna-Neuman C K, et al. Sediment flux and airflow on the stoss slope of a barchan dune[J]. *Geomorphology*, 1996, **17** (1-3): 55-62.
- [9] 赵海燕. 包兰铁路沙坡头段铁路防护体系的防护原理及效益的初步探讨[D]. 兰州: 中国科学院兰州沙漠所, 1992.
- [10] 张春来, 邹学勇, 程 宏. 包兰铁路沙坡头段防护体系近地面流场特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, **14**(3): 353~360.
- [11] 马晓洁, 张春来, 张加琮, 等. 包兰铁路沙坡头段防护体系前沿“栅栏沙丘”形态与近地面流场[J]. 中国沙漠, 2013, **33**(3): 649~654.
- [12] 哈 斯, 王贵勇, 董光荣. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘表面气流及其地貌学意义[J]. 中国沙漠, 2000, **20**(1): 30~34.
- [13] 李振山. 地形起伏对气流速度影响的风洞实验研究[J]. 水土保持研究, 1999, **6**(4): 75-79.
- [14] Frank A J, Kocurek G. Airflow up the stoss slope of sand dunes: limitations of current understanding[J]. *Geomorphology*, 1996, **17** (1-3): 47-54.
- [15] Qian G Q, Dong Z B, Luo W Y, et al. Variations of horizontal and vertical velocities over two-dimensional transverse dunes: A wind tunnel simulation of the effect of windward slope[J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, **73**(12): 1109-1116.
- [16] 韩致文, 王 涛, 董治宝, 等. 塔克拉玛干沙漠公路沿线风沙活动的时空分[J]. 地理科学, 2005, **25**(4): 455~460.
- [17] Jackson P S, Hunt J C R. Turbulent wind flow over a low hill[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1975, **101** (430): 929-955.
- [18] Wu X X, Zou X Y, Zheng Z C, et al. Field measurement and scaled-down wind-tunnel model measurement of airflow field over a barchans dune[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, **75** (5): 438-445.
- [19] Lettau K, Lettau H. Experimental and micrometeorological field studies of dune migration[M]//Lettau H H, Lettau K. Exploring the World's Driest Climate. Institute of Environmental Science Report 101. Center for Climatic Research, Madison: University of Wisconsin, 1978: 110-147.
- [20] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. London: Methuen, 1941: 85-86.

## The Influence of Terrain on the Protective System of Shapotou Section of Baotou-Lanzhou Railway

ZHOU Na<sup>1</sup>, ZHANG Chun-lai<sup>1</sup>, ZOU Xue-yong<sup>1</sup>, WU Xiao-xu<sup>2</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology/Ministry of Education Engineering Center of Desertification and Blown-sand Control, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** To explore the role of terrain on preventing the railway from blown sand disaster, a typical transect within the protective system of Shapotou section was selected and its airflow measured in field and over a

scaled down model in wind tunnel. The airflow over this transect shows high speed wind centers on the top of the fence dune and on the edges of river terraces, while low speed wind centers appear at the leeward of the fence dune and downwind of the river terraces. The high wind speed center gets stronger as the wind speed increases. The reduction coefficient ( $R_{c(x,z)}$ ) is used to describe the airflow variation along this transect. A sharp increase of ( $R_{c(x,z)}$ ) is found behind the fence for a horizontal distance 8 times the fence height.  $R_{c(x,z)}$  increases with the increasing protection distance. Under the reference wind speed of 8-9 m/s, the decline and fluctuating terrain contribute about 43% the reduction of the near surface airflow to the total airflow reduction by the shelterbelt. As wind speed increases, airflow diffusion is weakened and ( $R_{c(x,z)}$ ) decreases to below zero. Dune topography and the protection measure play a role on the dune surface airflow. Though the fence dune has a windward slope gradient three times the gradient of the semi-fixed dune and the fixed dune, the speed-up ratio ( $s$ ) is almost the same. It is the drag force of fence exerting on the winds that effectively reduces the windward speed-up ratio, and leads to the large amount of sands accumulating around the fence to form a distinct artificial dune form. Friction wind speed decreases rapidly from the moving dune area towards the railway. Under reference wind speed of 6 m/s, 9 m/s and 12 m/s, the friction wind speed over dune surface decreases by 49%, 45% and 39% from the moving dune area to the railway, respectively. The friction wind speed in the fixed dune section (model) is always lower than 0.5 m/s due to the decline terrain. The fence dune has a protection distance ten times the dune height in which the friction velocity is always less than the threshold friction velocity. It is supposed that, when there are lacking of checkerboard and vegetation cover, the fence dune and the decline terrain would reduce 88% the latent sand flux from the moving dune area under wind speed of 5-9 m/s and 50% under wind speed of 12 m/s. All the results indicate that terrain is one of the most important factors to prevent the railway from blown sand disaster. The fence dune has become an indispensable part of the railway protective system.

**Key words:** the protective system of Shapotou section; terrain; fence dune; airflow field; latent sand flux