

# 不同灌木覆盖状态下防风机理研究

魏宝<sup>1</sup> 丁国栋<sup>1,2</sup> 吴斌<sup>1,2</sup> 张宇清<sup>1,2</sup> 包岩峰<sup>1</sup> 高广磊<sup>1</sup> 石慧书<sup>3</sup> 赵进宏<sup>3</sup>

(1 北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室)

2 宁夏盐池荒漠生态系统定位研究站 3 宁夏盐池县环境保护和林业局)

**摘要:**通过野外观测,定量研究毛乌素沙地西南缘不同灌木覆盖状态下的防风机理。以沙蒿灌木林地和沙柳灌木林地为研究对象,裸沙地作为对照,用多剖面自计式遥测风速仪连续观测、记录距离地面0.1、0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0和6.0 m 8个不同垂直高度位置的风速变化。通过对风速测定结果的统计分析,绘制3种状态下的风速廓线图,并计算风速廓线方程、边界层位移厚度、边界层动量损失厚度和空气动力学粗糙度。结果表明:沙蒿灌木林和沙柳灌木林在近地层较裸露沙地有明显的降低风速作用,随着风速增大这种作用逐渐减弱。不同地表覆盖的空气动力学粗糙度随着风速的增大而呈对数减小。当风速较大时,边界层位移厚度比空气动力学粗糙度更能实际地反映整体观测高度范围内风速降低的状况。从空气动量的角度分析,有植被覆盖的地表空气动量损失比较稳定,裸沙地的空气动量损失则随风速增大而减小。

**关键词:**灌木覆盖; 防风机理; 风速廓线; 边界层厚度; 毛乌素沙地

**中图分类号:**S761.2   **文献标志码:**A   **文章编号:**1000-1522(2013)05-0073-06

WEI Bao<sup>1</sup>; DING Guo-dong<sup>1,2</sup>; WU Bin<sup>1,2</sup>; ZHANG Yu-qing<sup>1,2</sup>; BAO Yan-feng<sup>1</sup>; GAO Guang-lei<sup>1</sup>; SHI Hui-shu<sup>3</sup>; ZHAO Jin-hong<sup>3</sup>. **Windbreak mechanism under different shrub cover conditions.** *Journal of Beijing Forestry University*(2013)35(5)73-78 [Ch, 26 ref.]

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

2 Yanchi Research Station, Ningxia, 751500, P. R. China;

3 Environmental Protection and Forestry Bureau of Yanchi County, Ningxia, 751500, P. R. China.

Windbreak mechanism under different shrub cover conditions was quantitatively studied by carrying out a field investigation in southwestern marginal zone of the Mu Us Sandy Land, northwestern China. *Artemisia ordosica* and *Salix psammophila* shrub land were taken as the object of this study. Bare sand was set as control and the wind velocities at 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 and 6.0 m height upon research grounds were recorded. By doing statistical analysis of wind velocity measurements, drawing wind profile, calculating the wind profile equation, boundary layer thickness, aerodynamic roughness, we got the conclusion that both *A. ordosica* and *S. psammophila* shrub land decreased wind velocity of boundary layer much more significantly than bare land, and this effect decreased with wind velocity increasing. Aerodynamic roughness of shrub land decreased logarithmically with wind velocity increasing. When wind velocity was high, boundary layer displacement thickness would reflect the decrease of wind velocity at observation height more realistically than aerodynamic roughness. Analyzing from the air momentum, the loss of air momentum on the surface covered with vegetation was relatively stable. While the loss of air momentum on bare sand would decrease as wind velocity increasing.

**Key words** shrub land; windbreak mechanism; wind profile; boundary layer thickness; Mu Us Sandy Land

收稿日期: 2012-12-18 修回日期: 2013-03-19

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD16B02)、教育部博士点基金项目(20090014110003)、北京林业大学科技创新计划项目(TD2011-04)。

第一作者:魏宝。主要研究方向:荒漠化防治。Email:weibao73@126.com 地址:100083北京市清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任编辑:丁国栋,教授,博士生导师。主要研究方向:荒漠化防治。Email:dch1999@263.net 地址:同上。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

风是塑造地球表面的重要营力<sup>[1]</sup>,尤其在干旱半干旱地区,风是公认的影响风蚀和土壤流失的重要因素<sup>[2-3]</sup>。植物主要通过覆盖部分地表、增大下垫面粗糙度和拦截起动的沙粒这3种生态过程来减弱气流对地表土壤的侵蚀作用<sup>[4-8]</sup>。对此问题许多学者进行了大量的野外观测<sup>[9-14]</sup>和风洞模拟实验<sup>[15-18]</sup>。比较不同地表覆盖状态下的防风作用有几种不同的方法,有些研究者使用2个风速的比值来说明降低风速的情况<sup>[9-14]</sup>,但风速比值只能对个别点的风速进行比较,无法反映一个高度范围内风速的变化;另外一些研究者利用对数风速廓线规律来计算空气动力学粗糙度,并以此说明地表状况和空气运动的相互作用<sup>[15-18]</sup>,空气动力学粗糙度反应灵敏,当风速数据有微小的差异时,会导致空气动力学粗糙度显著变化。通过风速廓线计算边界层厚度的相关研究较为少见,魏宝等<sup>[19]</sup>通过计算不同盖度沙蒿群丛的边界层位移厚度和边界层动量损失厚度得到,盖度由30%增至60%,其降低风速的作用相似。

本文通过对毛乌素沙地重要的灌丛群落沙蒿(*Artemisia ordosica*)灌木林地和沙柳(*Salix psammophila*)灌木林地进行6 m高度范围内垂直风速梯度分布的野外观测,在裸沙地设置对照点,获得不同灌木覆盖状态不同风速情况下的风速廓线变化资料,并藉此绘制了风速廓线图,分别计算了风速廓线方程、边界层位移厚度、边界层动量损失厚度和空气动力学粗糙度,定量研究了毛乌素沙地不同灌木覆盖状态下的防风机理。

## 1 研究区概况

野外观测实验地位于宁夏回族自治区东部的盐池县(37°04'~38°10'N,106°30'~107°41'E)。盐池北部风沙区位于毛乌素沙地西南缘,属于黄土高原向鄂尔多斯台地的过渡地带。该区地貌类型复杂,地形起伏较大,土地类型以滩地、平地、缓坡地、丘陵地、沙丘地为主。由于远离海洋,气候干燥,降水量少,年均降水量仅296.5 mm,年际变化幅度高达30%以上,且降水集中分布于7、8、9这3个月份,超过全年降水量的65%;蒸发量为降水量的5~7倍<sup>[20]</sup>。该地区风多而大,常出现沙尘暴,最大风力可达11级,多集中在11月和翌年4月,主要风向为西北风,最常见风速为8~9 m/s(2 m高处),起沙风速为4.85 m/s(2 m高处)。

## 2 试验方法

### 2.1 试验布设

在研究区选择地势平坦开阔的天然沙蒿灌木林

地和人工沙柳灌木林地作为观测样地,以裸沙地作为对照。其中沙蒿灌木林样地设为40 m×40 m,盖度为60%,平均株高为0.46 m;沙柳灌木林样地设为39 m×25 m,盖度为32%,株行距配置为3 m×5 m,平均株高为2.04 m;裸沙样地设为40 m×40 m。野外观测试验在2010年6—7月进行。

在样地中央定点观测记录距离地表面0.1、0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0和6.0 m 8个不同垂直高度位置处的风速。使用多通道自计式遥测风速仪对风速进行测定,24 h连续不间断观测,采样的时间间隔为10 s。风速仪的量程范围为0~45 m/s,风速的测量精度为±1.1 m/s。

### 2.2 防风机理重要参数计算

空气动力学粗糙度和边界层厚度作为重要的参数,反映不同覆盖状态的防风机理。

#### 2.2.1 空气动力学粗糙度

当大气处于中性稳定层结状态时,边界层风速廓线方程可用如下公式表达:

$$U_z = \frac{U_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

式中: $z$ 为距离地面的高度; $U_z$ 为距离地面高度 $z$ 处的风速; $U_*$ 为摩阻风速; $z_0$ 表示空气动力学粗糙度; $k$ 代表冯·卡曼常数,一般情况下其值取0.4。

使用最小二乘法拟合风速廓线来计算 $z_0$ ,并进一步研究其动力学特性,这种方法与Wiggs等<sup>[21]</sup>研究卡拉哈里沙漠西南部植被覆盖部分线性沙丘的空气动力学特征所使用的方法相同。最小二乘法拟合所测得的风速为:

$$U_z = A + B \ln z \quad (2)$$

式中: $A$ 、 $B$ 为拟合系数。

令式(2)中 $U_z=0$ ,可求出:

$$z_0 = \exp\left(-\frac{A}{B}\right) \quad (3)$$

#### 2.2.2 边界层厚度

普朗特把紧靠物体表面流速从零迅速增加到与来流速度相同数量级的薄层称为边界层(boundary layer)。边界层位移厚度 $\delta_1$ (boundary layer displacement thickness)的定义为:对于不可压缩流体,当在理想流动情况下流速等于主流速度 $U$ 时,流过 $\delta_1$ 的流量应和在实际情况下,由于黏性而使流速减低时整个流场减小的流量相等,这个流量损失的高度就是边界层位移厚度,如图1所示。边界层动量损失厚度 $\delta_2$ (boundary layer momentum loss thickness)是指理想情况下通过厚度 $\delta_2$ 的流体动量等于实际情况下整个流场中实际流量与速度减小量的乘积,如图1所示。计算式<sup>[22]</sup>为:

$$\delta_1 = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (4)$$

$$\delta_2 = \int_0^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (5)$$

式中:  $U$  为主流速度, 本文中为 6 m 高度处的风速;  $u$  为各高度处的实际风速。

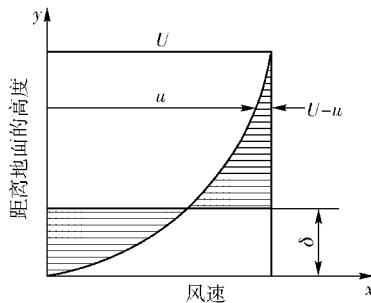


图 1 边界层厚度示意图

Fig. 1 Sketch figure of boundary layer thickness

### 3 结果与分析

#### 3.1 风速廓线图

当 6 m 高度风速相同时, 随着高度的降低, 风速也随之减小, 裸沙地风速下降幅度最小, 沙柳地风速整体下降较快, 沙蒿地风速 2 m 高度以上风速下降

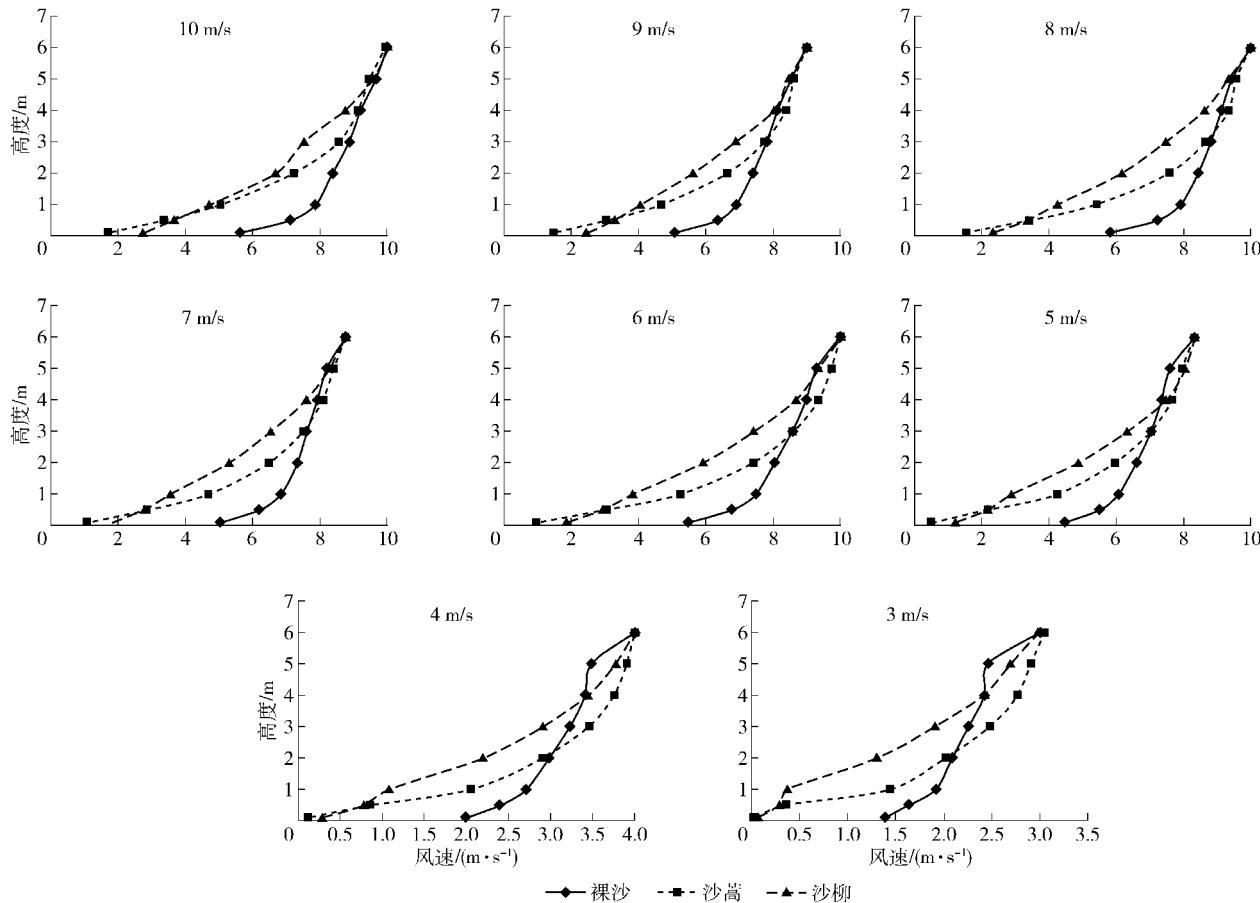


图 2 不同地表覆盖风速廓线图

较慢, 2 m 以下急剧下降, 在 0.5 m 高度时沙柳地和沙蒿地的风速接近, 0.1 m 高度沙蒿地的风速更低 (图 2)。

#### 3.2 风速廓线方程

沙蒿地垂直风速分布最符合对数风速廓线, 其拟合系数  $R^2$  值都大于 0.91, 其次是裸沙地, 而沙柳地对数廓线规律并不显著 (表 1)。一般认为, 在裸地或林冠上的风廓线均呈对数规律变化, 但在单株树木和林分内风速随高度的变化则不呈对数规律<sup>[23]</sup>。沙柳灌丛的平均株高为 2.04 m, 约占观测高度的 1/3, 受灌丛影响 6 m 高度内的对数廓线规律并不显著。沙蒿平均株高为 0.46 m, 约占观测高度的 1/13, 其对上层气流的影响较弱, 所以更符合对数廓线规律。当 6 m 高度风速小于 5 m/s 时, 拟合系数  $R^2$  值开始明显减小, 说明当风速较小时, 不同地表覆盖的垂直风速分布开始偏离对数风速廓线规律。

#### 3.3 空气动力学粗糙度

不同风速下裸沙地、沙蒿灌木林地和沙柳灌木林地的空气动力学粗糙度的平均值分别为 1.597、103.756 和 112.547 mm, 沙蒿地和沙柳地的粗糙度远大于裸沙地 (图 3)。当 6 m 高度风速小于 5 m/s 时, 沙柳地的粗糙度大于沙蒿地, 当风速大于 5 m/s

表1 不同地表覆盖的风速廓线方程参数

Tab. 1 Wind profile parameters under different land covers

风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	裸沙			沙蒿			沙柳		
	A	B	R <sup>2</sup>	A	B	R <sup>2</sup>	A	B	R <sup>2</sup>
10.0	7.884	1.031	0.987	5.840	2.169	0.961	5.876	1.884	0.903
9.5	7.500	0.942	0.984	5.668	1.991	0.973	5.158	1.915	0.890
9.0	7.004	0.902	0.976	5.310	1.989	0.965	5.222	1.694	0.889
8.5	6.632	0.849	0.977	4.966	1.884	0.970	4.812	1.657	0.909
8.0	6.339	0.763	0.983	4.759	1.775	0.972	4.457	1.563	0.897
7.5	5.928	0.724	0.985	4.435	1.714	0.972	4.457	1.563	0.897
7.0	5.489	0.676	0.978	4.069	1.605	0.977	3.819	1.432	0.897
6.5	4.967	0.656	0.965	3.640	1.494	0.975	3.547	1.328	0.895
6.0	4.571	0.621	0.968	3.441	1.432	0.975	3.191	1.260	0.893
5.5	4.157	0.572	0.965	3.067	1.346	0.975	2.848	1.183	0.891
5.0	3.737	0.522	0.955	2.735	1.229	0.973	2.587	1.140	0.891
4.5	3.324	0.477	0.950	2.472	1.135	0.971	2.157	1.053	0.880
4.0	2.828	0.444	0.917	2.164	1.044	0.966	1.871	0.976	0.887
3.5	2.424	0.387	0.893	1.798	0.923	0.954	1.498	0.876	0.856
3.0	1.994	0.339	0.862	1.516	0.815	0.945	1.167	0.759	0.823
2.5	1.638	0.274	0.825	1.244	0.689	0.931	0.919	0.647	0.798
2.0	1.101	0.250	0.713	0.899	0.532	0.911	0.667	0.496	0.766

注:拟合函数为  $U_z = A + B \ln z$ 。

时沙柳地和沙蒿地粗糙度值相近。不同灌木覆盖的粗糙度随着风速的增大而呈对数形式减小(拟合函数为  $z_0 = a - b \ln(u + c)$ ) (表2),这与董治宝等<sup>[15]</sup>和刘小平等<sup>[17]</sup>在风洞模拟实验中得到的指数函数关系的结论并不相同,可能是由于野外观测与风洞模拟实验环境条件不同所致。

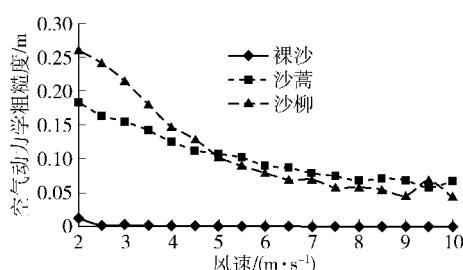


图3 不同风速不同地表覆盖下的空气动力学粗糙度

Fig. 3 Aerodynamic roughness length under different wind velocity conditions and varied land covers

表2 不同地表覆盖下的空气动力学粗糙度与风速之间的关系

Tab. 2 Relationship between aerodynamic roughness length and wind velocity under different land covers

地表类型	a	b	c	R <sup>2</sup>
裸沙	0.002 13	0.000 98	1.999 97	0.989 20
沙蒿	0.203 99	0.065 53	0.702 23	0.985 55
沙柳	0.252 70	0.101 03	1.196 26	0.957 02

### 3.4 边界层位移厚度

边界层位移厚度的排列顺序依次是沙柳地>沙蒿地>裸沙地,说明沙柳地对6 m高度内风速的整体削弱作用最强,沙蒿地次之,裸沙地最弱(图4)。随着风速的增大,沙柳地、沙蒿地和裸沙地的边界层位移厚度都出现减小的趋势,说明风速增大时,不同地表覆盖降低风速的作用都在减弱。比较图2、3和4,当6 m高度风速大于5 m/s时,沙蒿地和沙柳地粗糙度趋于一致,而边界层位移厚度沙柳地大于沙蒿地,后者与风速廓线图中规律较为一致,可见边界层位移厚度能更实际地反映整体观测高度范围内风速降低的状况。

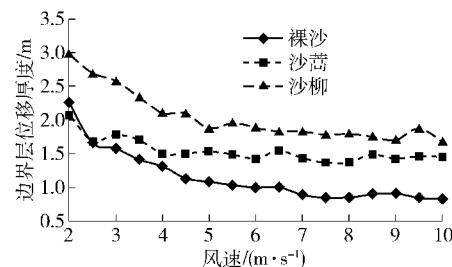


图4 不同地表覆盖不同风速下边界层位移厚度

Fig. 4 Boundary layer displacement thickness of different land covers

### 3.5 边界层动量损失厚度

由图5可见,沙蒿地和沙柳地的边界层动量损失厚度值较为稳定,其中沙柳地的值大于沙蒿地,而裸沙地的值则随着风速增大而减小。当风速小于4 m/s时,裸沙地空气动量损失大于沙柳地,当风速大于6.5 m/s时其值小于沙蒿地,当风速介于4.0和6.5 m/s时,其值介于沙柳地与沙蒿地之间。从空气动量的角度分析,有植被覆盖的地表空气动量损失比较稳定,裸沙地的空气动量损失则随风速增大而减小。

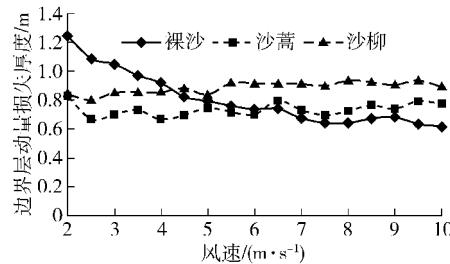


图5 不同地表覆盖不同风速下边界层动量损失厚度

Fig. 5 Boundary layer momentum loss thickness under different land covers and varied wind velocity conditions

## 4 结论与讨论

通过对不同地表覆盖类型的风速廓线图、风速廓线方程、空气动力学粗糙度、边界层位移厚度和边界层动量损失厚度的分析,得出沙蒿灌木林和沙柳灌木林在近地层较裸露沙地有明显的降低风速作用,随着风速的增大这种作用逐渐减弱。其中,沙蒿灌木林对距地面2 m范围内的风速降低作用更为明显,而沙柳灌木林对距地面6 m范围内的整体降低风速作用更明显。不同地表覆盖的空气动力学粗糙度随着风速的增大而减小,空气动力学粗糙度与风速呈对数函数关系,与风洞实验得到的结论并不一致,可能是由于实验环境条件不同所导致的。当风速较大时,边界层位移厚度比空气动力学粗糙度能更实际地反映整体观测高度范围内风速降低的状况。从空气动量的角度分析,有植被覆盖的地表空气动量损失比较稳定,裸沙地的空气动量损失则随风速增大而减小。

本文使用边界层位移厚度和动量损失厚度来计算不同灌木覆盖下的防风消能作用,是一种防风参数的创新应用,与传统研究方法中的风速廓线方程和空气动力学粗糙度等参数做出的研究结果相一致。这说明边界层位移厚度和动量损失厚度这2个参数可以作为防风机理研究中的重要指标。

由于实验条件限制,本文野外观测实验在6—7月进行,此时观测植物枝条与叶片已进入生长期,观

测结果为植被的最大防护效果,而半干旱区土壤风蚀一般发生在植物叶片还未长出的冬春大风季节。这是本实验的不足之处,后续将进行对比实验以完善研究。

风速廓线风洞实验观测高度约为模拟植株高度的3.3~6.0倍<sup>[16,18,24]</sup>,野外试验观测高度约为观测植株高度的1.5~5.0倍<sup>[11,24-25]</sup>。观测高度越高,其反映的地表风速变化越全面、越准确。由于野外试验条件的限制,本文选择6 m的观测高度,以与前人的研究保持一致<sup>[11,16,18,24-26]</sup>。

沙蒿灌木林对距地面2 m范围内的风速降低作用更为明显,而沙柳灌木林对距地面6 m范围内的整体降低风速作用更明显。造成土壤风蚀的直接原因是使地表沙粒起动的气流的吹蚀作用,沙蒿林地距离地表0.1 m高度处风速更低,其对地表的直接覆盖保护作用更好,而沙柳地对6 m高度内的整体风速降低作用更明显,其降低风速削减风能的作用更好,防护的范围更远。建议沙区植被建设应根据不同的防护目的,综合考虑沙蒿与沙柳的不同防风特性,合理设计与建设防风固沙林,以取得最优的防护效果。

## 参 考 文 献

- [1] GUO Z L, ZOBECK T M, STOUT J E, et al. The effect of wind averaging time on wind erosivity estimation [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37: 797-802.
- [2] ZOBECK T M, PARKER N C, HASKELL S, et al. Scaling up from field to region for wind erosion prediction using a field-scale wind erosion model and GIS [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2000, 82: 247-259.
- [3] RAVI S, D'ODORICO P, BRESHEARS D D, et al. Aeolian process and the biosphere [J]. Reviews of Geophysics, 2011, 49(3): 328-327.
- [4] DAVIDSON-ARNOTT R G D, BAUER B O, WALKER I J, et al. High-frequency sediment transport responses on a vegetated foredune [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(11): 1227-1241.
- [5] VAN DE VEN T A M, FRYREAR D W, SPAAN W P. Vegetation characteristics and soil loss by wind [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(4): 347-349.
- [6] WOLFE S A, NICKLING W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion [J]. Progress in Physical Geography, 1993, 17(1): 50-68.
- [7] WOLFE S A, NICKLING W G. Shear stress partitioning in sparsely vegetated desert canopies [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21(7): 607-619.
- [8] 董治宝,陈渭南,董光荣,等.植被对风沙土风蚀作用的影响[J].环境科学学报,1996,16(4):442-446.
- [9] 杨文斌,丁国栋,王晶莹,等.行带式柠条固沙林防风效果[J].生态学报,2006,26(12):4106-4112.

- [10] 高永,邱国玉,丁国栋,等.沙柳沙障的防风固沙效益研究[J].中国沙漠,2004,24(3):365-370.
- [11] 王蕾,王志,刘连友,等.沙柳灌丛植株形态与气流结构野外观测研究[J].应用生态学报,2005,16(11):2007-2011.
- [12] 王翔宇,丁国栋,吴斌,等.均匀式沙蒿防风阻沙效益模拟试验研究[J].中国水土保持,2010,31(2):42-44.
- [13] 岳德鹏,刘永兵,徐伟,等.北京市永定河沙地人工植被防风阻沙效益分析[J].北京林业大学学报,2004,26(2):21-24.
- [14] 高函,张宇清,吴斌,等.柠条林防风阻沙效应模拟研究初报[J].北京林业大学学报,2010,32(4):175-180.
- [15] 董治宝,FRYREAR D W,高尚玉.直立植物防沙措施粗糙特征的模拟实验[J].中国沙漠,2000,20(3):260-263.
- [16] 刘小平,董治宝.直立植被粗糙度和阻力分解的风洞实验研究[J].中国沙漠,2002,22(1):82-87.
- [17] 刘小平,董治宝,王训明.固定沙质床面的空气动力学粗糙度[J].中国沙漠,2003,23(2):111-117.
- [18] 梅凡民,江珊珊,王涛.粗糙床面风廓线的转折特性及其物理意义[J].中国沙漠,2010,30(2):217-227.
- [19] 魏宝,丁国栋,吴斌,等.不同盖度沙蒿群丛防风作用研究[J].干旱区研究,2012,29(2):213-217.
- [20] 李生宝,蒋齐.盐池沙地综合治理优化模式的建立及其结构调整[J].农业系统科学与综合研究,1999,15(2):143-148.
- [21] WIGGS G F S, LIVINGSTONE I, THOMAS D S G, et al. Airflow and roughness characteristics over partially vegetated linear dune in the southwest Karahari Desert [J]. Earth Surface Process and Landforms,1996,21(1):19-34.
- [22] 张鸿雁,张志政,王元.流体力学[M].北京:科学出版社,2004:144-147.
- [23] ZHU J J, LI X F, YUTAKA G, et al. Wind profiles in and over trees [J]. Journal of Forestry Research,2004,15(4):305-312.
- [24] 关德新,朱廷曜,金昌杰.中性温度层结时森林郁闭度与林冠上风速廓线的关系[J].北京林业大学学报,1997,19(1):26-30.
- [25] 孙庆伟,王涛,韩致文,等.北疆铁路沿线风沙危害的研究[J].中国沙漠,2004,24(2):182-186.
- [26] 张克存,屈建军,俎瑞平,等.不同下垫面对风沙流特性影响的风洞模拟研究[J].干旱区地理,2004,27(3):352-355.

(责任编辑 李 娟)