

单一白刺灌丛堆周围风速流场的试验研究

马士龙, 匡栋, 郝玉光, 肖辉杰, 杨婷婷, 尚润阳  
(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 主要利用 PC-2F 型多通道自计式遥测风速风向仪对乌兰布和沙漠东北部绿洲边缘的单一白刺灌丛堆周围风速进行观测, 应用二维圆柱绕流理论模型, 对野外实测数据应用流体力学的观点和方法进行风速流场分析, 绘出白刺灌丛周围风绕流的速度等势线图 and 速度矢量图, 进一步探讨了白刺灌丛的防风效应, 以及其对风蚀荒漠化影响的机理。  
关键词: 乌兰布和沙漠; 单一白刺灌丛堆; N-S 方程; 速度场测量; 防风效应  
中图分类号: X171.1; S157 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2006) 06-0147-03

Experimental Research of Viscous Flow Around a *Nitraria tangutorum* Boscage

MA Shi-long, DING Guo-dong, HAO Yu-guang, XIAO Hui-jie, YANG Ting-ting, SHANG Run-yang  
(College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Flow characteristics of viscous flow around a *Nitraria tangutorum* boscage were investigated by wind-speed instrument. According to two-dimensional of viscous flow around circular cylinder model, the velocity fields were analyzed with mean velocity contours and vector fields. Through different observation of type boscages, the effect of windbreak, and the mechanism of wind erosion were discussed.  
**Key words:** Wulanbuhe desert; a *Nitraria tangutorum* boscage; N-S equation; velocity observation; the effect of windbreak

白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛是荒漠、半荒漠地区典型的旱生、沙生植物。以它为优势种和建群种构成的草地是我国风沙干旱地区家畜重要的天然放牧场<sup>[1]</sup>, 国内外许多学者主要从植物生理特性及经济利用等方面对白刺灌丛进行了研究<sup>[2, 3]</sup>, 但是野外的实地条件下对白刺灌丛堆防风效应研究却鲜有所闻, 在我国西部近几十年却饱受风沙侵袭, 大面积耕地沙化, 生存环境逐年恶化, 在这样一种状况下, 对白刺的生境防护和改良效应研究方兴未艾。试验主要针对单一白刺灌丛周围风速流场应用流体力学的观点和方法进行野外观测和研究, 探讨了单一白刺灌丛堆对风蚀荒漠化影响的机理。

1 圆柱绕流模型

二维圆柱绕流属于开流系统, 它不同于闭流系统的一个显著特点就是存在上下流区别<sup>[4]</sup>。在直角坐标系下, 绕圆柱流体的运动规律可用 N-S 方程, 连续方程和动量方程<sup>[5]</sup>表示为:

连续方程:

$$\iint_A \rho \cdot dA = 0$$

动量方程:

$$\Sigma F = \frac{\partial}{\partial t} \iint_V \rho v dV + \iint_A \rho v (v \cdot dA)$$

N-S 方程:

$$f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \frac{dv_x}{dt},$$

$$f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \frac{dv_y}{dt},$$
$$f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \frac{dv_z}{dt}$$

边界条件:

(1) 上风边界条件。前人研究表明, 速度  $u(h)$  与高度  $h$  的关系即来流速度假设是按实际风廓线分布, 在中性层结构状况下,  $u(h)$  与高度  $h$  的对数值成正比<sup>[6]</sup>。但在二维数值模拟中假设来流风速是一个常数。其他两个方向的来流速度取为零, 即  $v(h) = w(h) = 0$ 。

(2) 下风边界条件。在二维绕流中, 沿流体主流方向压强、密度、温度等一阶导数为 0。

(3) 壁面条件。试验风速观测高度为 1 m, 壁面条件只考虑白刺灌丛与流体的接触面, 认为在白刺灌丛侧面一定距离前后为自由表面, 即法向速度的一阶导数为 0。

2 材料和方案

试验器材采用 PC-2F 型多通道自计式遥测风速风向仪, 风速通道数为 8 个, 风速测量范围: 0~70 m/s, 风速测量精度:  $\pm(0.1 + 0.003V)$  m/s, 启动风速: 0.4 m/s。试验根据白刺灌丛高度的不同分别选取了小型白刺灌丛( $H < 2$  m)、中型白刺灌丛( $H = 2$  m)和大型白刺灌丛( $H > 2$  m)进行风速观测, 风速观测高度 1 m, 同时观测, 每次观测时间为 60 min, 自动记录数据间隔时间为 1 min。

每种白刺灌丛分别进行三种观测布设(图 1), 以灌丛高

\* 收稿日期: 2005-09-06  
基金项目: 自然科学基金“基于空气动力学流动阻力及绕流理论的植被防风蚀机理的研究”项目(30471422)  
作者简介: 马士龙(1980-), 男, 在读硕士研究生, 主要方向水土保持与荒漠化防治; 责任作者: 匡栋。

度为基准,第一种总体风速观测,迎风面 1H, 2H 处两组风速仪,侧面 1H 处各一组风速仪,后面 1H, 2H, 3H, 4H 处四组风速仪;第二种侧面风速观测,迎风面 1H, 2H 处两组风速仪,侧面 1H, 2H, 3H 处各三组风速仪;第三种轴面风速观测。迎风面 1H, 2H 处两组风速仪,背风面 1H, 2H, 3H, 4H, 5H, 6H 处六组风速仪。

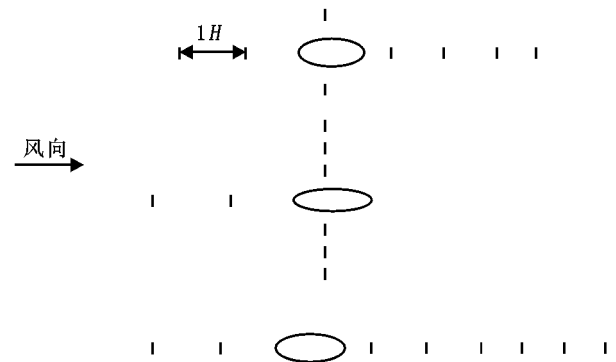


图 1 三种试验布设图

试验地选在乌兰布和沙漠东北部磴口林业试验中心第一试验场绿洲边缘,乌兰布和地区风季为每年的 3~ 5 月份,试验观测时间分别是 4 月 11 日,4 月 16 日和 4 月 17 日的下午 16:00~ 18:00 左右,此时地表温度与空气温度相似,大气可以看成为中性层结,气流流动可以认为是定常流,观测地小型白刺灌丛、中型白刺灌丛、大型白刺灌丛周围地势平坦,地表为盐碱土覆盖,在选取的各个白刺灌丛周围方圆 15 m 内没有其他植被或障碍物,认为测量的速度场为理想绕流场。小型白刺灌丛(40°21′46″N,106°53′09″E)高度为 1.7 m,覆盖冠幅为 5 m× 4.4 m,迎风面冠幅为 6 m× 1.7 m。处于流沙地带,北部 18 m 处有一高大的白刺灌丛堆(高度约 10 m)而且广布流动沙丘链;西部有流动沙丘零星分布,高度约 2 m;东部和南部地势平坦开阔。中型白刺灌丛(40°21′43″N,106°53′23″E)高度为 2 m,覆盖冠幅为 6 m× 5 m,迎风面冠幅为 5 m× 2 m。处于盐碱地内,北部 15 m 处有一高大的白刺灌丛堆(高度约 2.5 m);南部 15 m 处也有一高大的白刺灌丛堆(高度约为 6 m);西部 30 m 外为籽蒿和沙蒿植被的分布区;东部 50 m 处有流动沙丘分布,高度约 2 m。大型白刺灌丛(40°21′43″N,106°53′03″E)高度为 2.5 m,覆盖冠幅为 6 m× 6 m,迎风面冠幅为 6 m× 2.5 m,局部地貌与中型白刺灌丛一致,位置在其北部。

3 结果与分析

3.1 风速观测

按照试验布设分别对白刺灌丛堆进行总体风速观测、侧面风速观测和轴面风速观测。每种试验连续观测 60 min,进行数据初步筛选,剔除不合理数据,最后各得到数据 30 个(表 1)。

从列表可以直观的看出风向多在 0°~ 90°,且基本上为 NE 或 ENE。由于白刺灌丛堆对气流的阻挡,在其迎风面产生涡旋,风动能减少,2H 处风速大于 1H 处的风速;侧面控制体过流断面面积减小,由连续方程可知风速大于自由风速(迎风面 2H 风速),而且气流在 2H 处发生分离;背风面在 1H 处风速减小程度最大,由动量方程可知,此处白刺灌丛阻力对流体的影响最大,其后数据逐渐增大,表明在白刺灌丛背风面产生了巨大的涡旋,风能衰减剧烈,反向掏蚀作用强烈。由此可以断定白刺灌丛周围的局部地貌表现为:沿风

的来流方向,前方有一定的堆积范围,侧面为强烈侵蚀区,后方堆积范围广,但是堆积的沙物质又受到反向掏蚀作用。

表 1 风速观测表  
(a) 总体风速观测值

风速/(m·s <sup>-1</sup> )								
迎风面		侧面		背风面				风向
2H	1H	2H	1H	1H	2H	3H	4H	
5.524	5.008	5.901	5.676	2.707	2.902	3.424	3.747	69.37
5.691	5.265	6.201	6.188	3.265	3.666	4.35	4.491	67.5
5.822	5.476	6.159	6.27	3.733	3.919	4.311	4.547	70.5
7.09	6.469	7.44	7.1	4.093	4.3	5.224	5.243	68.51
6.64	6.521	6.714	6.921	6.067	6.194	6.532	6.313	54
6.695	6.513	6.994	6.87	6.007	6.282	6.709	6.509	54.4
6.619	6.236	7.16	7.08	5.346	5.644	6.257	6.253	59.7
7.74	7.28	7.92	8	5.041	5.403	6.142	6.193	62.64
5.874	5.588	6.264	6.209	5.239	5.515	6.044	5.879	53.21
6.169	5.862	6.245	6.305	4.83	5.118	5.427	5.46	60.75

(b) 轴面风速观测值

风速/(m·s <sup>-1</sup> )								
迎风面		背风面						风向
2H	1H	1H	2H	3H	4H	5H	6H	
4.572	4.14	2.503	2.897	3.584	3.56	3.738	4.33	77.3
5.712	5.371	2.769	3.061	3.72	4.067	4.568	5.238	83.5
5.232	4.692	2.644	2.944	3.519	3.487	3.786	4.296	76.2
5.794	5.28	2.819	3.042	3.553	3.708	4.063	4.653	77.6
7.52	6.919	4.717	5.162	5.811	5.845	6.202	6.89	71.6
8.5	7.8	5.085	5.528	6.584	6.362	7.09	7.71	73.9
7.1	6.482	3.912	4.146	5.006	4.84	5.272	5.868	75.4
7.04	6.462	3.915	4.28	5.193	5.25	5.852	6.537	74.6
6.226	5.827	3.641	3.965	4.47	4.776	5.264	5.944	82.9
5.811	5.406	2.827	3.109	4.092	3.799	4.319	4.938	77.9

(c) 侧面风速观测值

风速/(m· s <sup>-1</sup> )								风向
迎风面		侧面						
2H	1H	1H	2H	3H	1H	2H	3H	
7.01	6.748	7.19	7.38	7.29	7.55	7.12	7.09	63.76
4.923	4.582	4.926	5.086	5.263	5.654	5.487	5.434	79.9
5.992	5.552	6.389	6.262	6.158	6.873	6.53	6.428	78.5
6.81	6.228	7.59	7.62	7.94	7.74	7.39	7.28	76.4
7.66	6.964	7.87	7.74	7.79	8.02	7.43	7.01	88.1

对所测数据进行作图(图 2~ 图 3)分析,图 2 展示了白刺灌丛平均速度等势线图,

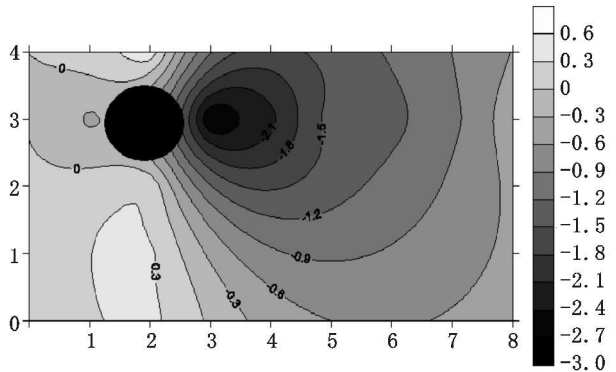


图 2 平均速度等势线图

从图中可以更清楚的看出速度分布情况,在白刺灌丛前后形成两个风速减小区域,特别是背风面速度衰减很快。侧面是速度加强区域,而且可以看出速度加强很快,在 1.5H

处即发生了气流分离,说明此时风速不大,雷诺数  $Re$  在临界值以下。根据有关学者研究,此时大约有 43% 左右扇形表面压力为正的,其他表面压力为负的,并且数值很相近<sup>[7]</sup>。表面压力为正,表明该表面受到风作用力作用,是迎面吹蚀;表面压力为负,表明受到的是形状阻力或涡旋阻力作用,是反向掏蚀。图 3 展示了平均速度矢量场分布情况,图中显示了在白刺灌丛前方存在一个回流区,也印证了等势线图的表现。背风面气流回流显著,而且出现涡旋,在  $3H$  处速度增大剧烈区,速度恢复跳跃发展。

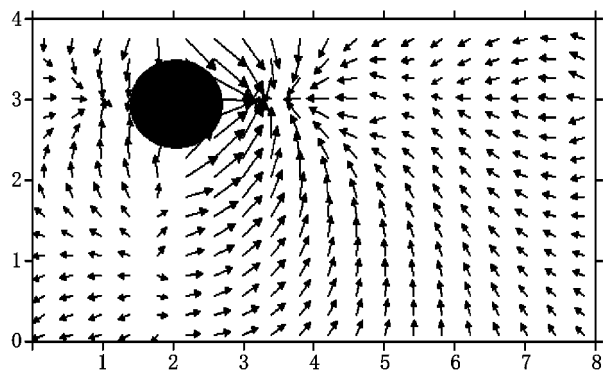


图 3 平均速度矢量场图

3.2 防风效应

白刺灌丛防风效应主要是体现在其防护距离上,根据白刺灌丛轴面平均风速图(图 4)可以看出,在误差允许范围内白刺灌丛防护距离约为其高度的 6~7 倍,也就是说,单一白刺灌丛堆速度恢复区域距离  $h \geq 6H$ 。

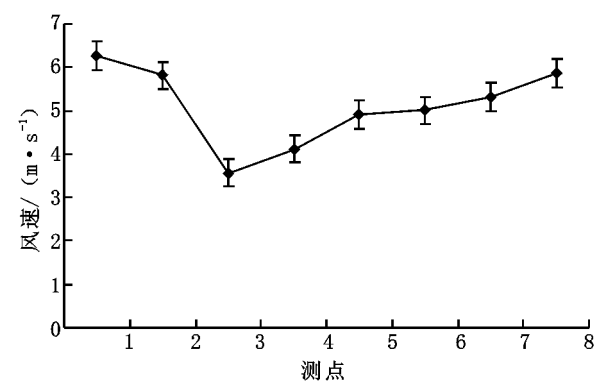


图 4 轴线风速变化图

参考文献:

[1] 孙祥. 籽蒿与白刺的特性及其利用的研究[J]. 内蒙古林学院学报, 1998, 20, (3): 43- 49.  
[2] 李博、孙祥. 饲用植物资源[A]. 内蒙古资源大辞典《草地资源分册》[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1997.  
[3] 中国沙漠研究所. 中国沙漠地区药用植物[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1973.  
[4] 酆庆增. 圆柱绕流的非线性动力学[J]. 力学进展, 1994, 24(4): 525- 546.  
[5] 张也影. 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 129.  
[6] 马玉明, 王林和, 姚云峰, 等. 风沙运动学[M]. 沈阳: 辽宁远方出版社, 2004. 51.  
[7] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 11.

(上接第 146 页)

[3] 赵善伦, 尹民, 张伟. GIS 支持下的山东省土壤侵蚀空间特征分析[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 694- 699.  
[4] 陈军, 邬论伦. 数字中国地理空间基础框架[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
[5] 李军, 周成虎. 地球空间数据集成多尺度问题基础研究[J]. 地球科学进展, 2002, 15(1): 48- 52.  
[6] 胡雪莲, 孙永军, 等. 基于地理空间概念的地理元数据组织管理研究[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(2): 11- 14.  
[7] 傅伯杰, 汪西林. DEM 在研究黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀类型和过程中的应用[J]. 水土保持学报, 1994, 3(8): 17- 21.

为了进一步研究白刺灌丛的防风效应, 本文使用形状系数和风速衰减率两个无量纲指标, 对不同类型的白刺灌丛的防风效应进行比较:

形状系数:  $f = \frac{h}{l}$

式中:  $h$ ——白刺灌丛迎风面高度;  $l$ ——白刺灌丛迎风面宽度。

风速衰减率:  $a = \frac{V_0}{V_{min}}$

式中:  $V_{min}$ ——风速衰减最强烈值;  $V_0$ ——来流风速值。

由这两个指标含义可知, 形状系数越大, 白刺灌丛越高; 风速衰减率越大, 风速恢复减缓。从小型、中型和大型白刺灌丛比较结果(表 2)看出, 随形状系数的增大, 风速衰减率减小,

表 2 不同类型白刺防风效应比较表

类型	形状系数( $f$ )	风速衰减率( $a$ )
小型白刺灌丛	0.28	1.75
中型白刺灌丛	2.5	1.69
大型白刺灌丛	2.4	1.72

也就是说风速恢复迅速。小型白刺灌丛形状系数最小, 但是其风速衰减率最大, 可以肯定在白刺防风效应影响因素中, 其迎风面宽度对风速衰减和恢复影响显著。

4 结论与讨论

(1) 本文利用野外实测数据, 从流体力学的角度和观点对单一白刺灌丛周围风速流场进行了研究和探讨, 通过计算机辅助技术和图像处理技术将白刺灌丛二维绕流场整体展现, 并挖掘了其防风蚀荒漠化影响的机理。

(2) 从试验看, 在风蚀荒漠化防治工作中, 影响不同类型白刺灌丛防风效应诸多因子中, 迎风面宽度起主导作用, 其影响明显大于其他因子。另外, 本文白刺灌丛的研究结果可以进一步引申为固定沙丘或其他防风固沙物体, 为荒漠化防治工作提供参考。

(3) 由于试验仪器本身的误差, 数据有限, 以及笔者能力限制, 所得结果错误在所难免, 希望在今后的工作实践中能进一步研究, 探讨。

致谢: 本文在野外工作中得到了磴口林业试验中心的大力帮助, 在此表示感谢!