

沙蒿植被粗糙度动力学特性的检验与研究

马士龙, 丁国栋, 罗俊宝, 贾瑞燕, 张 东, 顾小华

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 主要利用 Dong 等提出的曲线拟合的方法, 结合野外实测数据计算沙蒿植被的空气动力学粗糙度, 对计算出的粗糙度和风速进行回归分析和相关分析, 由此对沙蒿植被地表粗糙度的动力学特性进行检验与研究, 结果表明: 在下垫面不发生改变的情况下, 沙蒿的空气动力学粗糙度与风速的增长呈负相关关系, 即粗糙度具有动力学特性。但是由于两者相关程度并不显著, 因此在实际工作中可以忽略风速对粗糙度的影响, 仍然应用 Bagnold 的传统方法对粗糙壁面的粗糙度进行测量。

关键词: 粗糙度; 动力学特性; 风速廓线; 相关检验

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)01-0086-03

Study on the Dynamical Characteristic of the Roughness of *Artemisia arenaria* DC

MA Shi-long, DING Guo-dong, LUO Jun-bao, JIA Rui-yan, ZHANG Dong, GU Xiao-hua

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the curve, which was put forward by Dong, and the field data, the authors analyzed the relationship between the roughness and the wind velocity. The result was that above the stable roughness surface, the roughness of vegetation decreased while the wind velocity was increasing, namely, the roughness had the dynamical characteristic. However, because the correlativity between them was not significant, the effect could be put aside in the practice.

Key words: roughness; dynamical characteristic; wind profile; correlativity analysis

当今世界荒漠化已经成为人类面临的主要三大环境问题之一。1992 年 6 月联合国在巴西里约热内卢召开环境与发展大会, 大会把防治荒漠化问题作为重要内容, 将其纳入《21 世纪议程》等几个框架文件, 引起人们对荒漠化的广泛关注, 之后又提出了《荒漠化防治公约》明确了荒漠化的概念^[1]。对于荒漠化防治, 植物治沙是控制和固定流沙的一种最根本而经济、有效的措施。植物防止土壤风蚀作用早已为人类所知, 目前在世界各地被广泛的应用。在土壤风蚀量的预报中, 植被被列为主要的风蚀因子之一。植物通过三种方式阻止地表风蚀或风沙活动: (1) 覆盖部分地表, 使被覆盖部分免受风力作用; (2) 分散地表以上一定高度内的风动量从而减弱到达地表的风动量; (3) 拦截运动沙粒促其沉积。上述三种形式的作用都是通过下垫面与气流流场相互作用来实现的。在研究下垫面与气流流场相互作用时, 研究者通常引入粗糙度的概念来表达下垫面在气流作用下的阻力特征, 通过风速廓线的观测来计算出粗糙度。从传统的空气动力学方面来看, 人们认为粗糙度只是一个几何参数, 由壁面上粗糙单元的大小、形状及分布情况决定, 而与流场无关^[2]。但是近些年, 有些学者从模拟试验及理论分析的角度出发, 得出粗糙度不仅是一个几何参数, 而且是一个与流场性质相关的动力学参数的结果。研究指出: 对于几何条件相同的壁面, 随着风速的增大, 其粗糙度逐渐减少, 他们定义粗糙度这种随风速而变化的特点为其动力学特性^[3]。但是由于模拟试验本身的局限性, 其结果与实际情况难免有所出入, 因此本文从野外采集的实测资料出发, 在前人理论分析以及模拟试验的基

础上, 对沙蒿 (*Artemisia arenaria* DC.) 植被粗糙度的动力学特性进行了初步的检验和研究。

1 粗糙度定义

1.1 粗糙度概念的由来

粗糙度的概念起源于古典水力学研究, 1854 年, Darcy 在 21 根不同直径、不同材料的圆管内进行水流试验之后, 建立了摩阻损失方程, 即著名的 Darcy^[4] 方程:

$$F_L = f \frac{L u^2}{D 2g}$$

式中: F_L —— 距离 L 处的摩阻损失; D —— 圆管直径; L —— 距离; u —— 流体速度; g —— 重力加速度; f —— 摩阻系数。从现代流体力学观点来看, Darcy 的试验结果揭示了摩阻系数 f 随流体雷诺数 $Re(uD\rho/\mu)$ 和管壁相对粗糙度 (r_0/ϵ , 其中 r_0 —— 管壁直径; ϵ —— 管壁粗糙凸出的平均高度) 的变化而变化这一重要现象。后来 Prandtl 根据 Nikuradse 的试验结果建立了适合光滑和粗糙圆管的速度分布方程:

$$u_z = u_{\max} + 2.5 \ln \left(\frac{z}{r_0} \right) \quad (1)$$

或:

$$\frac{u}{u_*} = B + 2.5 \ln \frac{z}{\epsilon} \quad (2)$$

式中: z —— 地表高度; u_z —— 高速 z 处的流体速度; u_* —— 摩阻速度; u_{\max} —— 轴线风速; B —— 常数。根据 Nikuradse^[4] 的试验结果: $B = 8.5$ 。因而, 在充分粗糙条件下:

收稿日期: 2005-02-23

基金项目: 国家自然科学基金“基于空气动力学流动阻力及绕流理论的植被防风蚀机理研究”项目 (30471422) 资助

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。

$$\frac{u}{u_*} = 8.5 + 2.5 \ln \frac{z}{\epsilon} \tag{3}$$

或者:
$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z}{z_0} \tag{4}$$

式中: k ——卡门常数, 通常取值为 0.4; z_0 ——粗糙度, 在此高度处, 流体的速度为 0。在风沙流研究中, Bagnold^[5]通过一系列风洞试验研究了气流与沙粒的相互作用, 发现风速廓线在稳定的床面上遵循壁面定律, 这一定律已经在风沙研究领域广泛接受。也就是说, 在中性湍流边界层中, 温度随高度的变化基本保持不变, 空气密度均一时, 气流流动为定常流, 光滑地表的风速廓线服从对数定律:

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \tag{5}$$

而 u_* 定义为

$$u_* = \frac{\tau_0}{\rho} \tag{6}$$

式中: $\tau_0 = \mu \frac{du}{dy}$ 为切应力; ρ ——流体密度。

1.2 植被覆盖影响下的风速廓线方程

当地表有植被覆盖时, 此时在稳定地表上, 风速廓线方程仍然遵从对数定律, 方程为:

$$u_z = \frac{u_*}{k} \ln \left[\frac{z-d}{Z_0} \right] \tag{7}$$

式中: d ^[6,7] ($d = Z_0 - z_0$)——有效表面粗糙度, 其物理意义为地表之上 0 风速高度上移高度; Z_0 ——有植被覆盖的地表粗糙度。由式子可知, 有植被覆盖的地表, 其粗糙度增加为 $Z_0 > z_0$, 而高度值却由 z 减少为 $(z-d)$, 因此, 有植被覆盖的地表上同一高度的风速低于相同高度上光裸地表的风速, 这也就是植被覆盖对地表形成保护的内在机理。

2 试验材料及试验设计

试验采用 PC-2F 型多通道自计式遥测风速风向仪, 风速通道数为 14 个, 风速测量范围: 0~70 m/s, 风速测量精度: $\pm(0.3 + 0.03V)$ m/s, 启动风速: 0.4 m/s。选取 40 cm, 80 cm, 120 cm, 160 cm 和 200 cm 不同高度同时进行 2 次重复观测风速, 设定测量间隔为 1 min。

试验地选在阿拉善左旗境内, 巴彦浩特到月亮湖旅游区的公路沿线, 距离公路约为 200 m 处 (N38°30'44.2" E105°19'59.7") 的半流动沙地, 地势平坦, 坡度 < 5°。观测点前方上风向 50 m 处为一高为 6 m 左右的沙丘。地表为沙质表面, 植被主要是人工飞播的 2 年生沙蒿, 分布方式为随机分布, 植被平均高度为 40 cm, 冠幅为 50 cm × 70 cm, 植被盖度约为 15%。试验时间为 2004 年 4 月下旬的下午 15:00~16:00, 此时地表温度与空气温度相似, 大气可假设为中性层结, 气流流动可以认为是定常流, k 取值为 0.4。风向为北风。首先通过测量不同高度的风速, 通过回归分析利用 Dong^[8,9]等提出的曲线拟合方法, 计算空气动力学粗糙度, 最佳拟合关系式为:

$$u_z = A + B \ln z$$

式中: u_z ——高度 z 处的风速; A, B ——回归系数。当 z 处风速为 0 时,

$$z_0 = \exp \frac{-A}{B} \tag{8}$$

其次假设 2 m 风速和粗糙度之间具有相关性, 则在下垫面不变的情况下, 应用回归分析对试验结果进行比较和检验。

3 结果与分析

3.1 风速廓线的观测

通过对试验地的连续观测, 两台风速仪 (相隔为 2 m, 平行迎风放置) 测得的不同风速各 50 个, 观测时段内确保没有风沙流产生, 对同一高度同一时段的风速进行平均, 进行数

据筛选 (速度随高度增加而增大) 得到 16 组测量结果 (表 1), 对结果进行回归分析。

表 1 不同高度风速观测表

高度/cm	风速/(m·s ⁻¹)															
40	4	2.6	4.9	4.4	5.9	2.8	4.1	5.8	6.2	6.3	5.2	5.5	3.8	2.7	2.5	3.1
80	4.5	2.8	5.2	6.2	6.5	3.4	4.5	6.4	6.9	6.9	5.5	5.7	4.7	4.2	3.0	3.4
120	4.8	3.0	5.9	6.5	6.8	3.6	4.7	6.9	7.6	7.2	5.9	5.9	4.9	4.3	3.1	3.8
160	4.9	3.1	6.8	6.6	7.1	4.6	4.8	7.1	7.8	7.3	6.7	6.0	5.1	4.4	3.5	3.9
200	6	3.5	6.9	7.0	7.4	5.0	5.4	7.5	8.1	7.8	6.9	6.3	5.6	4.5	4.0	4.3

通过表 1 做出不同序列的风速相对应的对数趋势线 (图 1), 由此可以直观的看出对于不同的风速 (2 m) 其粗糙度不尽相同, 下面我们通过各条趋势线的回归方程求出 A, B 应用式 (8) 得到相应的粗糙度。

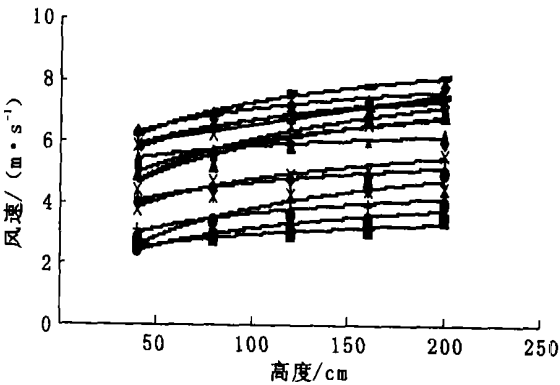


图 1 风速廓线图

3.2 粗糙度与风速之间关系分析

由空气动力学粗糙度的物理涵义出发, 根据实测数据所作出的拟合曲线 (图 1) 推算出相应的粗糙度值 (表 2), 对于风速为 6.9 m/s 时, 所对应的粗糙度的值, 本文采取求平均值方法进行处理, 然后应用回归分析作出风速和粗糙的趋势线 (图 2), 由趋势线可以看出当风速发生变化时, 同一地表状况下的粗糙度也发生相应的变化, 总体趋势为随风速的增大, 粗糙壁面的粗糙度减少, 其趋势线分别为多项式函数、线性函数和指数函数, 但是由表 3 推算的趋势线方程可以看出, 当粗糙度与风速之间为多项式函数且风速为 0 时, 粗糙度为负数, 不符合实际情况, 而方程为线性时, 风速的增大一定会出现 z_0 为 0 的情况, 也不符合实际情况。进一步通过对粗糙度和风速进行相关关系检验, 我们发现两者之间的相关

表 2 不同风速下粗糙度的值

风速/(m·s ⁻¹)	A	B	R ²	Z ₀ /cm
3.5	0.6855	0.4981	0.8714	0.252529
4.0	-0.6892	0.8414	0.9019	2.268482
4.3	0.4073	0.7087	0.9434	0.562866
4.5	-0.9606	1.0719	0.8332	2.45019
5.0	-2.3336	1.3373	0.8895	5.725951
5.4	1.4597	0.6974	0.873	0.123309
5.6	0.0794	1.0203	0.962	0.925131
6.0	0.0354	1.0341	0.7953	0.966347
6.3	3.753	0.4578	0.9199	0.000275
6.9	-0.3311	1.3497	0.8939	1.278022
6.9	0.9464	1.0962	0.9102	0.421749
7.0	-0.9322	1.5221	0.9102	1.844934
7.4	2.5384	0.9043	0.9918	0.060384
7.5	1.9589	1.029	0.9876	0.149017
7.8	3.145	0.8512	0.9594	0.024853
8.1	1.7481	1.1992	0.9894	0.232766

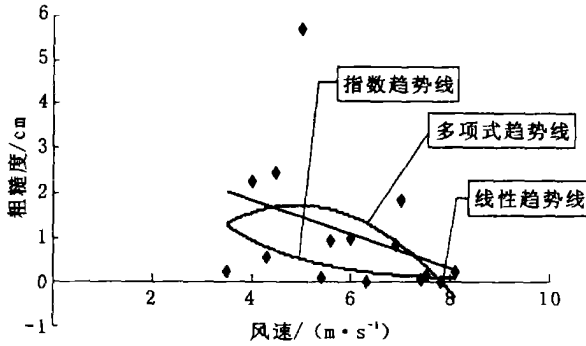


图 2 粗糙度与风速回归趋势线

系数为 $r = -0.37348$, 而相关系数的临界值为 $r_{0.05} = 0.514$, 即 $r < r_{0.05}$, 因此两者的相关关系不显著, 也就是说风速的变化对于下垫面粗糙度确实有作用, 但是其作用程度并不十分显著(图 3), 其偏移量基本集中于 $(-1, 1)$ 区间内, 因此在实际工作中, 对于粗糙壁面粗糙度的测量我们仍然可以沿用 Bagnold 的方法, 一定程度上忽略风速造成的影响。

表 3 回归趋势线方程表

表达式	相关系数平方	粗糙度 z_0/cm
$y = -0.2043x^2 + 2.0097x - 3.2095$	$R^2 = 0.1975$	- 3.2095
$y = -0.3836x + 3.3794$	$R^2 = 0.1395$	3.3794
$y = 10.472e^{-0.5995x}$	$R^2 = 0.1316$	10.472

参考文献:

- [1] 孙保平, 丁国栋, 姚云峰, 等. 荒漠化防治工程学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000
- [2] 董治宝, Donald W Fryrear, 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
- [3] 慕青松, 王建成, 苗天德. 粗糙度动力学特性的初步研究[J]. 力学学报, 2003, 35(2): 129- 134
- [4] Pao Richardson H F. Fluid Mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1967.
- [5] Bagnold R A. The Physics of Blow n sand Desert Dunes[M]. New York: Methuen, 1941.
- [6] Jackson P S. On the displacement height in the logarithmic velocity profile[J]. Fluid Mech, 1981, 111: 15- 25
- [7] Thom A S. Momentum absorption by vegetation[J]. Quart J Roy Met Soc, 1971, 97: 414- 428
- [8] Dong Z B, Liu X P, Wang X M. A crodynam ic roughness of gravel surface[J]. Geomorphology, 2002, 43: 17- 31.
- [9] Dong Z B, Liu XP, Zhao A G, et al A crodynam ic roughness of fixed sandy beds[J]. J. Gephys Res , 2001, 106(6): 1101 - 1111.

(上接第 85 页)

- [22] Chapin F S. Effects of nutrition deficiency on plant growth: evidence for a centralized stress-response system [J]. British Society for Plant Growth Regulation, Monograph, 1990, 21: 135- 148
- [23] 肖焱波, 李文学, 段宗颜, 等. 植物对硝态氮的吸收及其调控[J]. 中国农业科技导报, 2002, 4(2): 56- 59
- [24] 傅志坚, 金子渔, 张德威, 等. 应用 ^{15}N 研究番茄对氮的吸收及其在体内的分配[J]. 核农学通报, 1992, 13(4): 185- 187.
- [25] 李燕婷, 米国华, 陈范骏, 等. 玉米幼苗地上部/根间氮的循环及其基因性差异[J]. 植物生理学报, 2001, 27(3): 226- 230
- [26] NeSmith D S, Duval J R. The effect of container size [J]. HortTechnology, 1998, 8(4): 495- 498
- [27] 赵雨明, 卢桂章, 史敏华, 等. 旱坡地枣树密植园密度与根系关系的研究[J]. 山西林业科技, 1998, 4: 10- 14
- [28] 王法宏, 王旭清, 刘素英, 等. 根系分布于作物产量的关系研究进展[J]. 山东农业科学, 1997, 4: 48- 51.
- [29] 潘静娴, 黄丹枫, 王世平, 等. 甜瓜幼苗生长及生理特性与根域体积相关关系研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2001, 19(1): 24- 29
- [30] 林开敏, 俞新妥, 邱尔发, 等. 不同造林密度杉木林分营养空间利用的差异[J]. 浙江林学院学报, 1996, 13(3): 243- 247.
- [31] Will R E, Teskey R O. Effect of elevated carbon dioxide concentration and root restriction on net photosynthesis, water relations and foliar carbohydrate status of loblolly pin seedlings [J]. Tree Physiology, 1997, 17: 655- 661.
- [32] 潘静娴, 黄丹枫, 王世平, 等. 根域体积对甜瓜幼苗生长及光特性的影响[J]. 西北植物学报, 2001, 21(4): 637- 643
- [33] Hurley M B, Rowarth J S. Resistance to root growth and changes in the concentrations of ABA within the root and xylem sap during root-restriction stress[J]. Journal of Experimental Botany, 1999, 50(335): 799- 804
- [34] Kharkina TG, Ottosen CO, Rosenqvist E. Effects of root restriction on the growth and physiology of cucumber plants [J]. Physiol Plant, 1999, 105: 434- 441.
- [35] Bar- Tal A, Feigin A, Sheinfeld S, et al Root restriction and $\text{N} - \text{NO}_3$ solution concentration effects on nutrient uptake, transpiration and dry matter production of tomato [J]. Scientia Horticulturae, 1995, 63: 195- 208

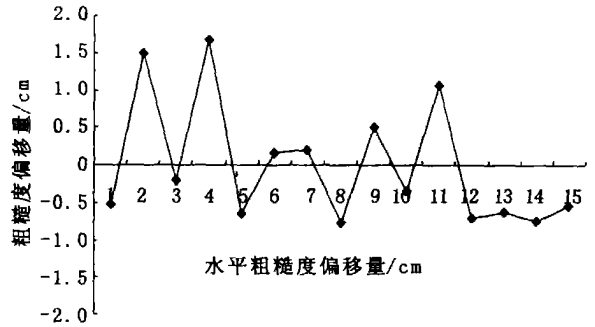


图 3 粗糙度距平偏移图

4 结 论

在利用 Dong 等提出的曲线拟合方法计算出的空气动力粗糙度基础上, 对粗糙度的动力学特性进行分析检验, 结果表明: 对于同一粗糙单元来说, 下垫面的状况不发生改变时, 粗糙度与风速的增长呈负相关关系, 即粗糙度具有动力学特性, 其趋势线方程为指数函数, 但是由于两者相关程度并不显著, 因此在实际工作中可以忽略风速对粗糙度的影响, 仍然应用 Bagnold 的传统方法进行测量。

本文在野外工作中得到了阿左旗林研所的大力帮助, 在此表示感谢!