

固定裸沙地粗糙度动力学特性的分析与研究

马士龙, 匡栋, 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: 主要利用曲线拟合的方法, 结合野外实测数据计算固定裸沙地的粗糙度, 对计算出的粗糙度和风速进行回归分析和方差分析, 由此对粗糙度的动力学特性进行分析与研究, 结果表明: 在下垫面不发生变化的情况下, 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。
关键词: 粗糙度; 动力学特性; 风速廓线; 方差分析
中图分类号: S 157 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2005)05-0218-03

Study on Dynamical Characteristic of
the Roughness of Stable Sand Surface

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 Wiggs, and the field data, the relationship between the roughness and the wind velocity was analyzed. The result was that above the stable surface, the roughness 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; ANOVA

边界层地表障碍物的空气动力学性质以及它们对风沙活动的影响是人们一致关注的焦点。研究地表粗糙性质对边界层气流的影响是长期以来存在的一大难题^[1~4]。空气动力学粗糙度已被广泛地用于表征各种地表类型(如沙质地表、植被覆盖地表、冰雪面、海面)的空气动力学性质^[5~9]。
粗糙度是现代流体力学中一个非常重要的指标, 不同的粗糙度状态下, 沙粒与地表的碰撞过程、沙粒的临界起沙风和风沙输送量不同, 因此, 空气动力学粗糙度直接影响绝对和相对风沙输送量。对于粗糙度的研究是深入理解不同床面风沙活动产生机制, 以及防治风沙危害的关键。但是自从 Bagnold^[5]通过对气流与沙粒之间的一系列风洞试验而提出风沙物理以来, 对于粗糙度是否具有动力学特性的争论也就开始存在, 长期以来一直成为学术界的焦点, 有不少国内外学者已经通过风洞试验等模拟手段对其进行研究分析, 但是野外的实地条件下的粗糙度动力学特性研究却鲜有所问, 有鉴于此, 本文通过对固定裸沙地的实地观测, 结合前人理论分析和模拟试验, 对其粗糙度动力学特性进行初步的分析和研究。

1 粗糙度定义

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, 建立了摩擦损失方程, 即著名的 Darcy^[4] 方程:

$$F_L = f \frac{Lu^2}{D2g}$$

式中: F_L ——距离 L 处的摩擦损失; D ——圆管直径; L ——距离; u ——流体速度; g ——重力加速度; f ——摩擦系数。从现代流体力学观点来看, Darcy 的试验结果揭示了摩擦系数 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 为管壁直径; ϵ 为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:

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

或:

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

式中: z ——地表高度; u_z ——高速 z 处的流体速度; u_* ——摩擦速度; 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:

$$\frac{u}{u_*} = 8.5 + 2.5\ln(\frac{z}{\epsilon})$$

或者:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z}{z_0}$$

式中: k ——卡门常数, 通常取值为 0.4; z_0 ——粗糙度, 在此

¹ 收稿日期: 2004-11-22
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的研究”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。

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:

$$u = \frac{u_*}{u_*} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

而 u_* 定义为

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

式中 $\tau_0(\mu \frac{du}{dy})$ ——切应力; ρ ——流体密度。

2 材料与方法

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 5 cm, 15 cm, 30 cm, 60 cm, 120 cm, 180 cm, 240 cm 和 300 cm 八个不同高度同时进行 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") 的裸沙地, 地势平坦, 坡度 < 5°; 地表为沙质表面。试验时间为 4 月中旬的下午 15 时到 16 时(假设此时地表温度与空气温度相似, 大气可以看成中性层结, 气流流动可以认为是定常流), k 取值为 0.4。风向为西北风。

根据粗糙度的物理含义, 首先本文运用最小二乘法拟合所测得的风速廓线, 计算 z_0 进而研究其动力学特性, 此方法与 Wiggs 等^[10] 研究 Kalahari 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。用最小二乘法回归所测得的风速资料为:

$$u_z = A + B \ln z \tag{1}$$

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,

$$z_0 = \exp\left(\frac{-A}{B}\right) \tag{2}$$

其次假设 300 cm 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分析和研究。

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, 首先对同一高度同一时段的风速进行平均计算, 为了确保试验过程中没有风沙流产生, 选取研究的风速为 5 m/s 以下, 然后进行数据筛选得到 24 组测量结果, 对观测的风速进行回归分析, 作出风速廓线(图 1), 由图 1 直观的可以看出风速与高度之间的相关趋势非常接近对数分布, 相关系数(R^2) 为 0.893 9, 而粗糙度是根据所测得的风速廓线确定。

由各个不同风速风速廓线的回归方程, 应用式(1) 确定 A、B, 然后由式(2) 确定该固定裸沙地的粗糙度 z_0 (表 1)。

3.2 空气动力学粗糙度随风速的变化

从表 1 我们可以直观的看出: 固定裸沙地的粗糙度随风速(3 m) 的增大而减小, 变化范围为 0.000 819 ~ 0.084 908 cm, 平均值为 0.011 72 cm, 固定裸沙地的 z_0 随自由风速而

变化, 并非一个常数。由此可见以往在确定 z_0 时仅考虑下垫面性质, 不考虑风速和流场性质有其局限性。因此, 讨论 z_0 必须在明确特定风速的前提下进行。式(2) 中的 z_0 不仅仅是一个反映下垫面粗糙特征的物理量, 更准确地讲是反映下垫面与近地表气流相互作用力学特征的物理量, 应当称作“空气动力学粗糙度^[11]”。为了进一步分析风速与空气动力学粗糙度之间的关系, 本文应用回归分析作出风速和空气动力学粗糙的趋势线(图 2), 由趋势线可以看出, 风速与空气动力学粗糙度之间的最佳相关曲线为指数函数($R^2 = 0.369\ 5$), 也就是说, 空气动力学粗糙度随着风速的增大呈指数递减趋势, 这与刘小平^[11] 等人通过风洞试验研究的结论一致。

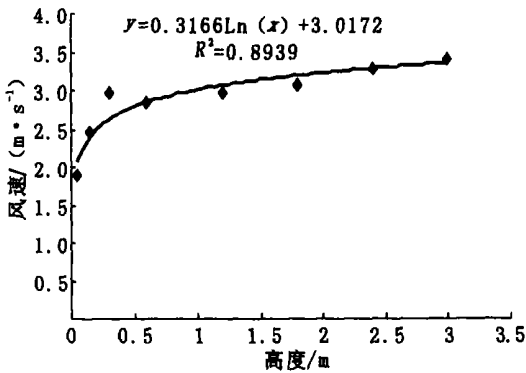


图 1 风速廓线图

表 1 不同风速下粗糙度的值

3 m 风速 $U/(m \cdot s^{-1})$	A	B	R^2	Z_0/m	Z_0/cm
3.01	0.3191	2.6073	0.9075	0.000283	0.028279
3	0.2881	2.5855	0.8758	0.000127	0.012662
2.441	0.2496	2.1372	0.8865	0.000191	0.019114
2.921	0.2867	2.5901	0.9233	0.000119	0.011926
2.558	0.3125	2.2098	0.9733	0.000849	0.084908
3.534	0.3301	3.195	0.8649	6.26E-05	0.006259
2.821	0.2339	2.5673	0.8395	1.71E-05	0.001711
2.706	0.2398	2.3973	0.8166	4.55E-05	0.004553
3.794	0.4032	3.2645	0.9335	0.000305	0.030461
3.449	0.3501	3.0071	0.9518	0.000186	0.018609
2.919	0.2958	2.5785	0.8932	0.000164	0.016377
3.291	0.2726	3.0042	0.8442	1.64E-05	0.001636
3.735	0.3252	3.3424	0.8711	3.44E-05	0.003438
3.382	0.3091	3.0685	0.8396	4.88E-05	0.004883
3.759	0.3253	3.3855	0.8817	3.02E-05	0.003021
3.588	0.3336	3.2351	0.8673	6.14E-05	0.006143
4.097	0.3524	3.6701	0.8998	3E-05	0.002999
3.844	0.3411	3.4613	0.8522	3.92E-05	0.003918
4.419	0.3591	4.007	0.8556	1.43E-05	0.001425
4.651	0.3782	4.198	0.8463	1.51E-05	0.001511
3.873	0.2988	3.4998	0.8829	8.19E-06	0.000819
4.181	0.3453	3.785	0.8771	1.74E-05	0.001736
3.262	0.2846	2.9203	0.8843	3.5E-05	0.003497
2.742	0.2632	2.3896	0.8946	0.000114	0.011403

究其原因可能是由于风速的增大, 气流紊流程度增强, 阻力系数减小, 流体本身所受到的阻力减小, 空气动力学粗糙度减少。

3.3 方差分析

通过以上分析可以看出, 风速与空气动力学粗糙度之间存在相关关系, 但是在实际观测工作中是否我们一定要局限于明确特定风速下的空气动力学粗糙度, 也就是说, 风速对与空气动力学粗糙度的影响是否显著? 为了解决这个问题, 本文对风速与粗糙度之间应用单一因素方差分析进行讨论, 假定

空气动力学粗糙度随风速的变化不显著, 分析结果(表 2)表明, 在 $\alpha=0.05$ 的显著水平下, $F=0.02926 < 1.993239$, 因此无法否定假设, 也就是说在实际工作中对某一个固定表面可以忽略风速的变化对于空气动力学粗糙度影响。

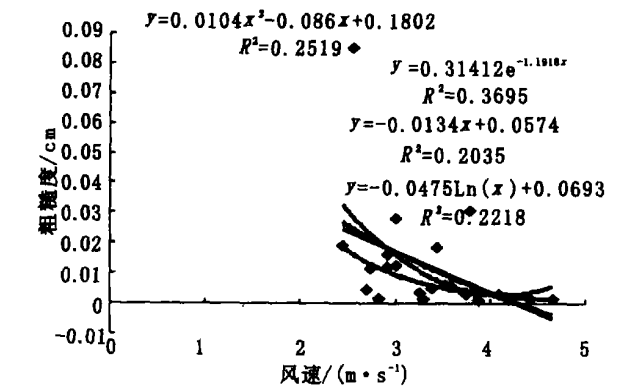


图 2 粗糙度与风速回归趋势线

参考文献:

[1] Schlichting H. Boundary Layer Thoery[M]. New York: McGraw – Hill, 1968. 653.
[2] Wooding R A, Bradley E F, Marshall J K. Drag dune to regular arrays of roughness elements of varying geometry[J]. Boundary- Layer Meteorology, 1973, 5: 285– 308.
[3] Raupach M R, Thom A S, Dwards I E. A wind tunnel study of turbulent flow close to regularly arrayed roughness surface[J]. Boundary- Layer Meteorology, 1980, 18: 373– 393.
[4] Iverson J D, Wang W P, Rasmassen K R, et al. Roughness element effect on local and universal saltation transport[J]. Acta Mechanic, 1999, (Suppl, 2): 65– 75.
[5] Bagnold R A. The Physics of Blown sand Desert Dunes[M]. New York: Methuen , 1941.
[6] Charnock H. Wind stress on water surface[J]. Q. J. R. Met. Soc , 1995, 81: 639– 640.
[7] Owen P R. Saltation of uniform grains in air[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, (20) : 225– 242.
[8] 李振山, 陈广庭. 粗糙度研究的现状 & 展望[J]. 中国沙漠, 1997, 17(1): 99– 102.
[9] 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.
[10] 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: 19– 34.
[11] 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.

(上接第 205 页)

见到效益需要较长时间, 运行管理也需要大量人力、财力, 但发展后劲大, 数年投资, 百年收效。因此大多都是政府行为, 或者是在水土保持部门的扶持下一些资金雄厚的个体户所为。

2.8 林草复合模式

以林牧业经营为主的这种栽培模式, 主要分布在陇南北部山区及西北高寒阴湿区, 多以人工林与野生草复合, 管理粗放, 仅仅满足农户零散放牧, 积累薪材, 直接经济效益不太高, 但对绿化荒坡、保持水土起到一定作用。

该模式对树种没有特殊要求, 陇南山区常见的乡土树种都可选择, 如: 刺槐、松、杜仲、杨、榆、李等。对草种要求也不严, 只要耐荫、与树种没有共同的病虫害即可。一般常见的人工栽培牧草, 如苜蓿、红豆草、草木樨、小冠花、三叶草、无芒黑麦、老芒麦、猫尾草、聚合草等都可用于林草复合栽培。

参考文献:

[1] 吴发启, 等. 黄土高原流域农林复合配置[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
[2] 郑宝宿, 等. 甘肃省长治工程优质高效实施技术[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1998.
[3] 李效栋, 等. 甘肃省长江流域水土保持生态建设模式[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2002.

表 2 风速与粗糙度之间的方差分析

差异源	SS	df	MS	F	P- value	F crit
组间	4. 017731	23	0. 174684	0. 02926	1	1. 993239
组内	143. 2839	24	5. 970162			
总计	147. 3016	47				

4 结 论

在利用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, 其单因素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。

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!

3 结 论

(1) 在陇南山区坡耕地及 梯田中进行农林复合栽培, 可提高土地产出率, 有效防治水土流失。

(2) 根据生产方式和栽培结构可将陇南山区复合农林生产划分为林药复合、林粮间作、田间地埂利用、果菜种植、特种林粮复合、庭院经营、小流域综合治理、林草复合等 8 种模式。以便在坡改梯、退耕还林等生态工程中较好地应用复合农林业技术。

(3) 陇南地区水土保持工作在多年的长治工程建设中已初步形成了行之有效的综合治理模式。根据区域优势, 在陡坡耕地治理中要应重视复合农林业技术的应用, 构建坡改梯、退耕还林与复合农林相结合的综合防治体系, 为较好地防治陡坡耕地水土流失及缓解人地矛盾、林粮矛盾提供技术支撑。