

地形起伏对气流速度影响的风洞实验研究

李 振 山

(北京大学城市与环境学系 北京 100871)

摘 要 地形起伏主要通过对气流的扰动极大地影响着土壤风蚀特征。通过对 4 种坡度下气流变化的风洞实验,发现坡面对气流的影响表现在两个方面,一是气流在爬坡过程中的速度除在坡角点略有下降外,整体上呈逐渐加强趋势,速度增加率与坡长呈良好的线性关系;二是在垂直方向上速度的增加率符合对数规律。前者使风蚀程度加强,后者使风蚀程度减弱,二者共同制约着坡面上土壤的风蚀特征。

关键词 地形坡度 风洞实验 气流速度 风速廓线 土壤风蚀

Wind Tunnel Simulation of Flow Velocity on the Windward Slope

Li Zhenshan

(Department of Urban and Environmental Sciences, Beijing University Beijing 100871)

Abstract By means of velocity perturbation of airflow the landform has a significant effect on the soil erosion by wind. The wind tunnel simulation of the airflow on the windward slope shows that the velocity perturbs is of two change trends. Firstly the velocity increases along the up-slope; secondly the vertical rates of the velocity over the slope to that on the level surface at the same height above the bed-surface obeys by log-linear function. On the one hand the increase in the velocity strengthens the wind erosion of soil on the slope, but on the other hand the vertical rates weaken the wind erosion. Both the counter-actions control the feature of the slopes.

Key words the slope of landforms wind tunnel experiment airflow velocity velocity profiles soil wind erosion

土壤风蚀区的地表往往并不平坦,各种坡度的地形对气流产生强烈扰动,影响着风速的空间变化,进而控制着土壤风蚀的分布特征。因此,精确估算区域风蚀程度就需要考虑地形坡度对气流速度影响。早在本世纪 50 年代,前苏联学者雅可波夫^[1]就指出,地形条件对土壤风蚀强度有极大影响,且迎风坡较其它地貌部位吹蚀强烈。后来不少学者从风沙地貌的角度进一步将坡面对气流的影响归结为风速廓线规律的变化上。在平坦的地表,风速垂线分布遵循流体力学中熟知的对数规律,但坡面上的风速廓线与此有较大偏离,不再完全遵循对数规律^[2~4]。不过由于以往室内

实验多针对某一种沙丘迎风坡, 坡度单一, 或者变化不大, 野外测量又大多局限于某一高度, 未能得出具体的坡面风速廓线形式。本文通过较精细的风洞实验就这一问题作进一步探讨。

1 实验方法

实验在中国科学院兰州沙漠研究所风洞实验室进行。该风洞实验段长 16.23 m, 截面宽 90 cm, 高 60 cm。实验在距实验前缘 13 ~ 14 m 进行。模型由五合板制作, 呈等腰三角形, 模型制作材料与洞体底面材料相似, 可以消除粗糙度变化对风速廓线的影响。实验坡度为 4°、7.5°、10° 和 15°; 前三个坡度模型的迎风面和背风面各为 90 cm, 后一个坡度迎背风坡均为 45 cm, 模型宽度与风洞同宽, 为 90 cm。风洞轴线 (30 cm 高) 出口风速为 6 m/s。风速测量限于模型迎风坡, 测点位于洞体中央。

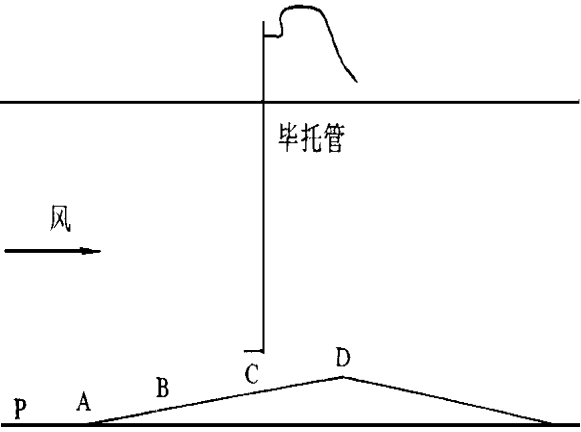


图 1 实验布置图

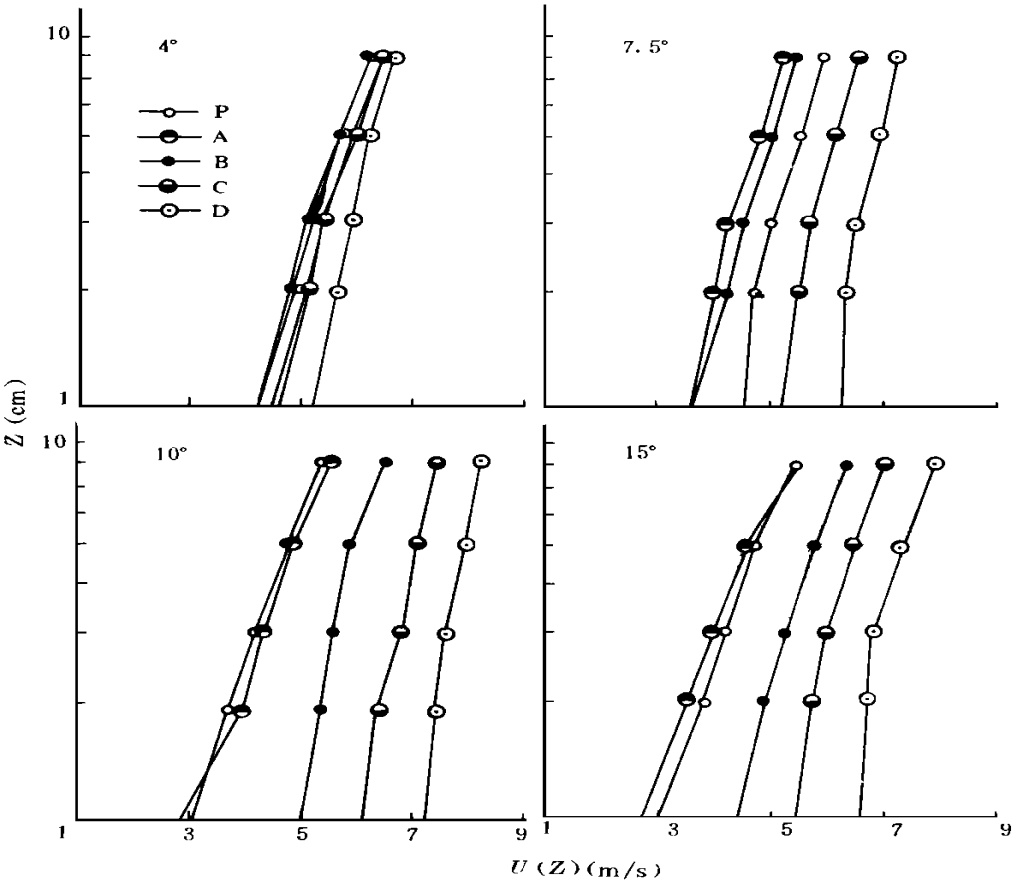


图 2 坡面上风速变化特征

与坡面的距离为 1, 2, 3, 5, 8 cm。测量仪器采用皮托管连结国产数字压力仪表。每一测点连续记录 10 个左右的数值, 然后取平均值。实验模型及测点位置见图 1。其中 P 点为坡面前缘水平面上风测测点, A 点为坡角点, B 、 C 、 D 点均为坡面等距测点, 点距为 30 cm (对于 4° 、 7.5° 和 10° 的坡面) 或 15 cm (对于 15° 坡面)。

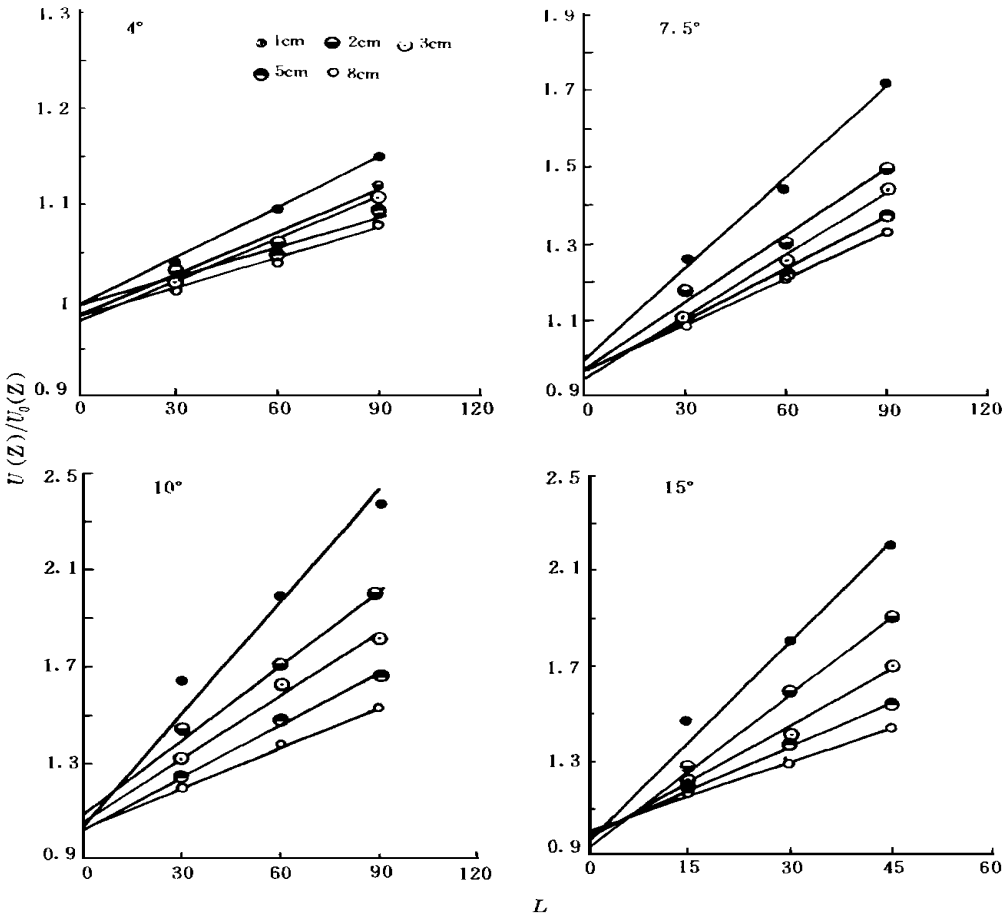


图 3 气流加速与坡长的关系

2 实验结果及讨论

实验结果示于图 2。 P 点为平坦床面上风速测点所在位置, 此点的风速垂线分布遵循对数规律, 在图 2 中表现为一条直线。坡角点处风速反而比 P 点处风速小, B 、 C 和 D 处的风速廓线均呈现出一定的弯曲趋势, 尤其是曲线下部, 说明这三点风速分布确实不再完全遵循对数规律, 这与过去研究所得的结论基本一致^[5,6]。值得注意的是随着地形坡度的增大风速也随之增大, 且下层风速增加幅度大于上层增加幅度。下面分别对气流在爬坡过程中加速特征以及风速在垂直方向上的变化规律作进一步分析。

2.1 气流的加速特征

为了突出坡面对风速的影响, 我们不直接讨论坡面上的风速特点, 而是讨论坡面上风速与平面上风速之比, 即讨论坡面上各点风速与 P 点风速之比的变化规律。图 2 是 5 个高度风速在 4 个

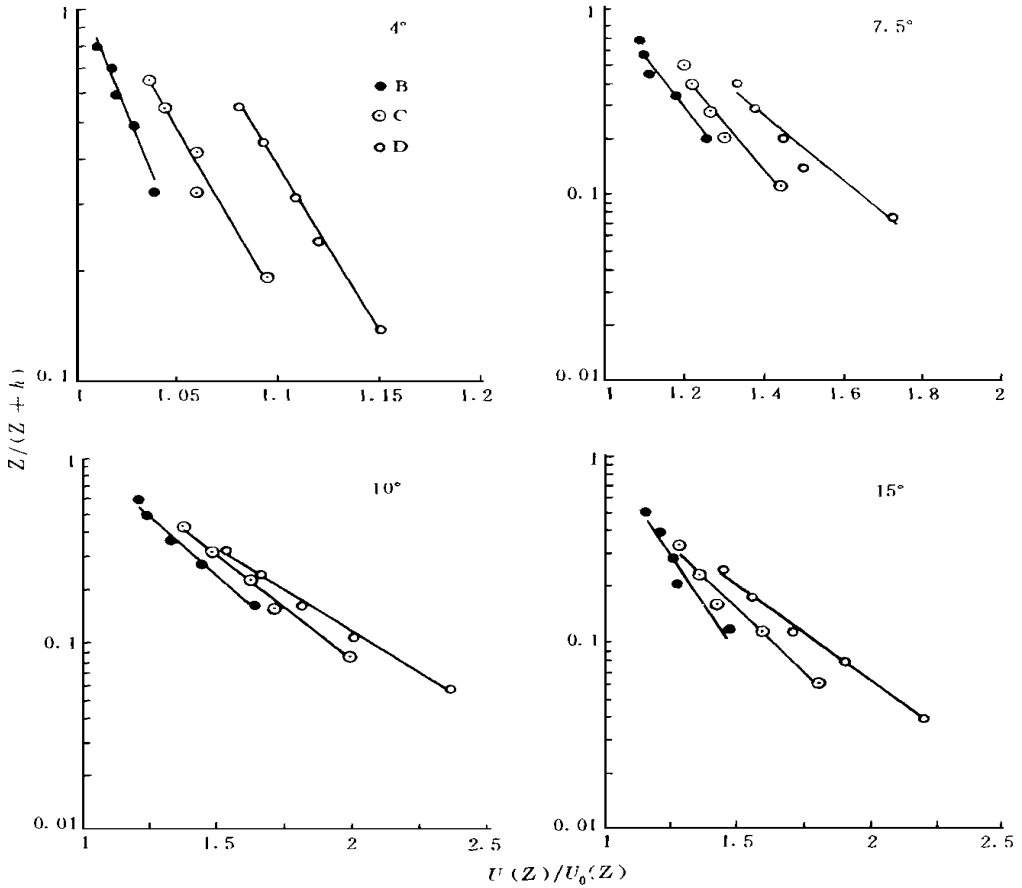


图 4 坡面上风速垂线变化率廓线

坡度下气流的加速与坡长的关系,可见二者呈良好的线性关系,即

$$\frac{U(z)}{U_0(z)} = aL + b \quad (1)$$

式中: $U(z)$, $U_0(z)$ ——坡面上和平面上距床面高度 z 处的风速; L ——风速测点处所对应的坡长, a 和 b 为系数。

图 2 反映出的另一个特点是各个高度上的气流加速幅度并不相同,下层速度增加率大于上层速度增加率。

2.2 风速垂线变化规律

图 4 表明,坡面上速度的垂直增加率按对数规律递减,即

$$\frac{U(z)}{U_0(z)} = \frac{1}{\lambda} \text{Ln} \frac{\beta(2+h)}{z} \quad (2)$$

式中: h ——坡面高度; λ , β ——系数。

(2) 式说明坡面对气流的扰动程度随着高度的增加急剧减小,不过图 4 中和直线斜率按 B、C 和 D 点顺次增大,说明气流在爬坡过程中地形对气流的扰动垂直传输相对而言越来越慢。

众所周知,地面上的风速廓线满足对数规律:

$$U_0(z) = 2.5U \text{Ln} \left[\frac{z}{z_0} \right] \quad (3)$$

式中: U ——平地上气流的摩阻速度; z_0 ——粗糙度;

将(3)式代入(2)式得

$$U(z)\lambda = 2.5U \operatorname{Ln}\left(\frac{z}{z_0}\right) e^{\frac{\beta z}{z_0 + h}} \quad (4)$$

上式即为坡地上的风速廓线规律。有了(4)式,我们就可以根据地上的风速大小,结合地形特点计算坡地上的风力状况,这不但对土壤风蚀的研究具有重要意义,对风沙地貌的研究也有价值。

另外从方程(2)可以求出坡面对气流的扰动高度 H ,当达到 H 高度时,气流就不再受地形变化的影响,此时: $U(H) = U_0(H)$,因此地形扰动气流的高度为

$$H = \frac{h \operatorname{Ln}(\lambda)}{\beta - \operatorname{Ln}(\lambda)} \quad (5)$$

从气流在爬坡过程中速度变化规律可以说明坡面土壤的蚀积特征。气流在爬坡过程中速度越来越大,坡面上的摩阻速度也随之增大,造成坡面上的土壤侵蚀率逐渐增大。但由于气流下层速度增加幅度比上层速度增加幅度大,因而坡面以外气流中的垂直速度梯度与地上的情形相比反而减小,这就造成了以速度梯度为计算依据的气流剪切力反而下降,进而阻碍坡面土壤侵蚀率无限增大。在气流爬坡过程中这两种对立的影响有时会在坡面上的某一部位达到平衡。理论上讲,在坡面的下部前一种作用占优势,坡面处于侵蚀状态,在坡面上部,后一种作用占优势,坡面处于堆积状态,当然也有整个坡都处于侵蚀或堆积状态,只是蚀积程度有一定差别而已。

3 结 语

风速大小、土壤特性和地形起伏是影响土壤风蚀的三大因素,长期以来的研究重点集中在前两个因素上,对后一因素注意不够。本文的研究表明气流在爬坡过程中呈加速趋势,速度的增加率与坡长存在良好的线性关系,在垂直方向上却按对数规律递减,两种变化规律共同决定着坡面的蚀积分布特征。充分考虑坡面上气流的这些特征将会进一步提高土壤风蚀预测精度,也有助于阐明风沙地貌等相邻学科的地形发育机制。

参考文献

- 1 雅克波夫 TФ 土壤风蚀及其防止. 北京: 农业出版社, 1955
- 2 Frank A, Kocurek G. Airflow up the Stoss Slope of Sand Dunes: Limitations of Current Understanding. *Geomorphology*, 1996, 17(1): 47 ~ 54
- 3 Howard A D, Morton J B, Gad-el-Hak M et al. Sand Transport Model of Barchan Dune Equilibrium. *Sedimentology*, 1978, 25: 307 ~ 338
- 4 Mulligan K R. Velocity Profiles Measured on the Windward Slope of A Transverse Dune. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, 13: 573 ~ 582
- 5 Weng W S, Hunt J C R, Carruthers D J et al. Airflow and Sand Transport over Sand. *Acta Mechanica*, Supplement 1999, 2: 1 ~ 22.
- 6 Wings G S, Livingstone I, Warren A. The Role of Streamline Curvature in Sand Dune Dynamics. *Geomorphology*. 1996, 17: 29 ~ 46