

西安工程大学

---

硕士学位论文

---

植被结构特征和空气动力学粗糙度对沙粒跃移起动影响的实验  
研究

---

姓名：朱海波

---

申请学位级别：硕士

---

专业：环境工程

---

指导教师：仝攀瑞;梅凡民

---

20070310

# 摘要

研究植被结构特征对沙粒起动的影响,对全面理解植被-沙粒-气流互馈机制、改进沙尘暴预报模式和完善植物防沙理论有着重要的意义。

本文在环境风洞中用圆柱木棍和塑料管粗糙元模拟密实植被,用细铁丝粗糙元模拟孔隙植被。利用测定不同结构特征(密度、方向比率、高度/间距比和孔隙率)粗糙元床面的风速廓线,获得床面的空气动力学粗糙度,依此研究植被的结构特征对地表空气动力学粗糙度的影响。然后,通过测定不同结构特征粗糙元床面沙粒起动时的风速廓线,得到沙粒的起动摩阻风速,在此基础上,研究植被结构特征和空气动力学粗糙度对沙粒起动的影响。研究得到以下主要结论:

- 1) 当密实植被的密度  $\lambda \geq 0.11$  时,无量纲粗糙度  $Z_0/h$  的值继续增大,而不是已有研究者指出的将维持在一个常量(0.05),但增加趋势相对于  $\lambda < 0.11$  时的  $Z_0/h$  的增加趋势有所减缓。 $Z_0/h$  与  $\lambda$  的线形回归关系为 
$$\frac{Z_0}{h} = 0.557\lambda - 0.01, (F_{2, 21}=553.1, P<0.0001).$$
- 2) 密实植被的密度和高度/间距比对地表沙粒起动摩阻风速的影响程度不同。高度/间距比对地表沙粒起动摩阻风速的影响程度大于密度对地表沙粒起动摩阻风速的影响。
- 3) 对于密实植被,只有当植被密度  $\lambda > 0.3$  时,地表的起动摩阻风速  $U_{*t}$  才大于  $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 对应地表的空气动力学粗糙度  $Z_0 > 13 \text{ mm}$ 。地表空气动力学粗糙度  $Z_0$  与相应地表沙粒起动摩阻风速  $U_{*t}$  的回归关系为: 
$$U_{*t} = 34.52 + 16.67Z_0^{0.557}, (F_{2,21}=180.15, P < 0.001).$$
- 4) 孔隙率变化对孔隙植被地表沙粒起动摩阻风速有着显著的影响。当植被孔隙率由 75%减小到 15%时,地表沙粒的起动摩阻风速增大 36%。在具有相同直径和高度时,孔隙率  $P=75\%$  的孔隙植被和  $P=0$  密实植被地表沙粒的起动摩阻风速近似相等。

关键词: 植被, 密度, 孔隙率, 空气动力学粗糙度, 起动摩阻风速

# An Experimental Investigation of the Influence of Vegetation Structure on Saltation Threshold

## ABSTRACT

Full understanding of how vegetation structure influence on sand particles threshold have considerable benefits for understanding feedback mechanisms between vegetation, sand particles and air flow and perfecting the theoretic of desertification control.

Cylindrical wooden dowels, plastic pipes and stainless metals were used to model solid vegetation and porous vegetation in wind tunnel. The influence of vegetation structure (vegetation density, aspect ratio, height/space ratio and porosity) on aerodynamic roughness length was investigated by measurement of wind velocity profile of vegetated surface. The threshold shear velocity was calculated thought measurement wind velocity profile of sand surface covered by vegetation. And then, the effect of vegetation structure and aerodynamic roughness length on sand particles entrainment was studied. The main results and conclusions are as follows:

- 1) Dimensionless ratio  $Z_0/h$  continue to increase with roughness density larger than 0.11, but change trend is not like roughness density lower than 0.11. This variety law does not agree with previous studies that  $Z_0/h$  value is constant (0.05). The regression relationship between  $Z_0/h$  and  $\lambda$  is  $\frac{Z_0}{h} = 0.557\lambda - 0.01$ , ( $F_{2, 21}=553.1$ ,  $P<0.0001$ )
- 2) Structure factors of vegetation, including roughness density, aspect ratio and height/space ratio influence sand particles threshold, but height/space ratio strongly effect sand particles threshold, roughness density and aspect ratio secondary important.
- 3) Threshold wind shear velocity  $U_{*t}$  can be more than  $100 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , when roughness density exceed 0.3, aerodynamic roughness length is larger than 13mm. The regression relationship between aerodynamic roughness length  $Z_0$  and threshold wind shear velocity  $U_{*t}$  is  $U_{*t} = 34.52 + 16.67Z_0^{0.557}$  ( $F_{2,21}=180.15$ ,  $P < 0.001$ ).
- 4) Porosity is seen to have a noticeable effect on sand particles threshold.

Threshold wind shear velocity  $U_{*t}$  could be increased by 36% with porosity of vegetation decreased from 75% to 15%. In the same height and diameter,  $U_{*t}$  of surface covered by solid vegetation is equal to  $U_{*t}$  of surface covered by vegetation with porosity of 75%.

Zhu Hai-bo (Environmental Engineering)

Directed by Prof. Tong Pan-rui

Dr. Mei Fan-min

**Keywords:** vegetation, density, porosity, aerodynamic roughness length, threshold wind shear velocity

# 主要符号表

A	无量纲起动因子	$U_{*t}$	起动摩阻风速 ( $\text{cm s}^{-1}$ )
AR	植被方形比率	$U_{*ub}$	裸露地表的起动摩阻风速 ( $\text{cm s}^{-1}$ )
d	植被直径 (mm)	$U_{*UR}$	植被地表的起动摩阻风速 ( $\text{cm s}^{-1}$ )
$d_p$	沙粒直径 ( $\mu\text{m}$ )	$S_p$	植被间距 (mm)
D	零平面位移高度 (mm)	$U_z$	距地面 Z 高度的风速 ( $\text{m s}^{-1}$ )
$D_k$	孔隙植被直径 (mm)	$R_t$	起动摩阻风速比率
$D_p$	沙粒的中值粒径 ( $\mu\text{m}$ )	P	孔隙度
f	应力分配系数	$R_{ep}$	雷诺数
F	气流应力 (N)	S	地表面积 ( $\text{m}^2$ )
g	重力加速度 ( $\text{m s}^{-2}$ )	K	冯卡曼常数 (0.4)
h	密实植被高度 (mm)	$\rho$	空气密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ )
H	孔隙植被高度 (mm)	$\rho_p$	沙粒密度 ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$N_s$	单位底面积孔隙植被中分散植被总数量 ( $\text{n m}^{-2}$ )	$\Delta\rho$	颗粒密度与空气密度的差值
m	地表剪切应力不均一性经验常数	$\delta_p$	颗粒密度与空气密度的比值
$n_s$	单个孔隙植被中分散植被单体个数 ( $\text{n m}^{-2}$ )	$\tau$	地表总的前切力 ( $\text{N m}^{-2}$ )
$S_h$	植被高度与间距比	$\tau_R$	作用在植被上的剪切力 ( $\text{N m}^{-2}$ )
Z	地表以上高度 (m)	$\tau_s$	作用在裸露地表的剪切力 ( $\text{N m}^{-2}$ )
$Z_0$	植被地表空气动力学粗糙度 (mm)	$\lambda$	植被密度
$Z_{0s}$	裸露地表空气动力学粗糙度 (mm)	$\nu$	动力粘质系数 ( $0.15\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )
$U_*$	摩阻风速 ( $\text{cm s}^{-1}$ )	$\beta$	植被阻力系数与地表阻力系数比值

# 西安工程大学学位论文知识产权声明

本人完全了解西安工程大学有关知识产权的规定，即：研究生在校攻读学位期间学位论文工作的知识产权归属西安工程大学。本人保证毕业离校后，使用学位论文工作成果或用学位论文工作成果发表论文时署名单位仍然为西安工程大学。学院有权保留送交的学位论文的复印件，允许学位论文被查阅或借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存学位论文。

(保密的学位论文在解密后应遵守此规定)

学位论文作者签名：朱海波

指导老师签名：梅凡

日 期：2007.3.10

# 西安工程大学学位论文独创性声明

禀承学校严谨的学风与优良的科学道德，本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，学位论文中不包含其它人已经发表或撰写过的研究成果，不包含本人已申请学位或他人已申请学位或其它用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所作的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了感谢。

学位论文与资料若有不实之处，本人承担相关责任。

学位论文作者签名：朱海波  
日 期： 2007.3.10.

# 1 绪论

## 1.1 引言

由地表风蚀而释放到大气环境中的粉尘粒子是大气气溶胶的主要成分<sup>[1]</sup>。粉尘气溶胶可以通过散射、反射和吸收太阳的短波辐射以及大气的长波辐射,对气候变化产生影响;同时,沙尘气溶胶作为云的凝结核影响云的物理特性、辐射特性和生命周期以及雨水的形成,从而影响气候系统。沙尘气溶胶在影响全球气候变化中扮演着重要的角色<sup>[2-3]</sup>。另外,远距离传输的粉尘是海洋和陆地生态系统的主要营养来源,粉尘提升了海洋和陆地生态系统的生产力,对全球生物地球化学循环产生重要的影响<sup>[4-7]</sup>。

干旱半干旱地区频发的沙尘暴,不但将大量的粉尘传输到大气环境中,对全球气候变化和生物地球化学循环产生重要的影响,而且沙尘暴也是一种灾害性天气,对当地和下游地区人民的生产和生活带来极大的危害<sup>[10-13]</sup>。悬浮的粉尘粒子降低了下游地区的空气质量<sup>[14-15]</sup>,增加了居民的健康风险<sup>[16]</sup>。同时,频发的沙尘暴使当地的土壤质量下降、沙漠化加剧和生态系统退化<sup>[17]</sup>。

为了能够准确评价粉尘气溶胶的气候效应,预报沙尘暴的发现和防治沙漠化,首先需要理解土壤风蚀和粉尘释放的机制<sup>[18-19]</sup>。

前人研究表明粉尘释放机制主要是跃移沙粒的冲击作用而引起粉尘粒子的释放(sandblasting process),是否发生跃移过程是判断粉尘气溶胶是否能够释放,沙尘暴是否能够发生的基本依据<sup>[19-20]</sup>。起动风速和起动摩阻风速或跃移起动摩阻风速是诊断跃移是否发生关键参数。它们反映了地表特征,如表土微团粒粒度分布与土壤质地、土壤水分、地表覆盖的粗糙元(如砾石、植被等)等诸多因素对沙粒起动的的影响,体现了气流-颗粒-粗糙元三者之间的互馈作用机制<sup>[21-23]</sup>。研究地表特征对跃移起动的的影响机制是风沙运动研究的基本科学问题。

从国内外研究现状来看(见 1.2),尽管前人关于跃移起动与植被等粗糙元的结构特征和空气动力学特征作了一些研究,取得了一些重要结论,但对涉及跃移起动的两方面问题还没有搞清楚:(1)粗糙元结构特征如何影响空气动力学粗糙度,在粗糙元的孔隙率与其他结构参数(如高度、密度、高度与间距比等)等因素中,哪些是主要因素,哪些是次要因素,它们之间与空气动力学粗糙度的定量关系如何;(2)粗糙元结构特征和空气动力学粗糙度如何影响起动摩阻风速,它们谁是主要

因素谁是次要因素，它们与起动摩阻风速的定量关系如何，如何改进现有模式存在问题。

上述2个问题系统研究，一方面有助于从理论上揭示粗糙元结构特征、空气动力学粗糙度对起动摩阻风速的影响机制以及它们之间定量关系，为全面理解跃移起动机制、应力分配机制和粗糙元-边界层气流-沙粒之间的互馈机制提供参考和依据；另一方面利用实验取得数据改进目前有关应力分配和起动摩阻风速的预报模式，为沙尘暴天气的预报和沙漠化的防治提供依据和支持。

## 1.2 研究进展

### 1.2.1 光滑地表沙粒跃移起动研究进展

研究植被等粗糙元对沙粒起动的影响，首先需要知道在光滑地表情况下（无植被、砾石等粗糙元覆盖的地表称为光滑地表）沙粒起动的机制<sup>[24]</sup>。从力学机制来看，气流施加于地表上颗粒的力包括前后压差和附面摩擦引起的拖曳力、竖向流速梯度产生流场梯度力和颗粒沿风向顺时针转动产生的马格努斯升力等。只有当空气的动力即拖曳力和升力之和超过颗粒的重力与颗粒之间的粘聚力之和，颗粒才能开始运动<sup>[25-26]</sup>。沙粒有三种基本运动形式即蠕移、跃移和悬移。沙粒跃移是风沙运动的主要方式和粉尘释放的主要动力<sup>[27]</sup>。

能够使地表沙粒起动的临界风速称为起动风速。由于大气边界层内地表风速随高度变化，且某一高度的风速不能直接反映气流产生的切应力（对颗粒起动的影响 shear stress），所以，一般用摩阻风速表征跃移起动的临界条件<sup>[28]</sup>。摩阻风速代表风动量的大小，为地表剪切应力与空气密度的比值，即： $U_* = \tau / \rho$ 。风沙物理学中，摩阻速度被用来反映颗粒所受空气动力的大小，沙粒的起动摩阻速度反映湍流起动颗粒所受阻力的大小，表征了沙粒粒度分布（影响沙粒重力）、含水量、含盐量（与沙粒之间粘附力和粘结力有关）等沙粒起动的影响<sup>[29]</sup>，体现了不同可蚀性地表的抗风蚀能力。

目前国内外在这个方面取得了比较一致的认识。沙粒粒度分布、含水量、含盐量以及颗粒周围湍流发育状况等被认为是影响跃移起动的主要因素。研究者对沙粒粒度和颗粒周围湍流发育状况与起动摩阻风速的关系开展了很多的理论研究和实验研究，提出了诸多的经验模式<sup>[30-31]</sup>，其中，拜格诺（Bagnold）研究奠定了这方面的理论基础，后人的研究主要是对其模式进行改进和完善。

风沙物理学的奠基人拜格诺 (Bagnold) 在仅考虑颗粒与气流相互作用过程中的拖曳力和重力平衡时, 提出起动摩阻风速随颗粒直径变化的半经验模式:

$$U_{*t} = A \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g d_p} \quad (1-1)$$

式中,  $g$  代表重力加速度;  $\Delta\rho = \rho_p - \rho$ ,  $\rho_p$  是颗粒密度,  $\rho$  是空气密度;  $d_p$  是颗粒直径;  $A$  是无量纲的起动因子, 即经验常数, 依赖于颗粒的雷诺数。颗粒起动时, 雷诺数定义如下: 其中  $\nu$  为空气的粘度系数, 当  $Re_p > 3.5$  时,  $A$  一般取 0.12。

$$Re_p = \frac{U_{*t} d_p}{\nu} \quad (1-2)$$

其中,  $\nu$  为空气的粘度系数, 当  $Re_p > 3.5$  时,  $A$  一般取 0.12。

Bagnold 模式能较好的模拟大粒径颗粒的起动状况, 但当对粒径较小颗粒来说, 其可靠性较差。这主要是由于随着颗粒粒径的减小, 重力对起动摩阻风速的影响逐渐退居次要地位, 而颗粒间粘聚力的作用越来越显著, 导致粘性颗粒的起动摩阻风速随颗粒粒径减小而增大的现象<sup>[26]</sup>。

在 Bagnold 的基础上, Greeley 和 Iversen 除了考虑气流的拖曳力和颗粒的重力, 还考虑了气流的升力以及颗粒间的粘聚力, 提出了颗粒起动摩阻风速的半经验公式:

$$U_{*t} = A_1 F(Re_p) G(d) (g\sigma d)^{1/2} \quad (1-3)$$

其中,  $\sigma$  是颗粒密度与空气密度的比值;  $A_1$  是经验系数;  $F(Re_p)$  和  $G(d)$  是经验函数, 其他符号意义同(1-1)、(1-2)式;  $A_1$ 、 $F(Re_p)$ 、 $G(d)$  是由风洞实验测定  $U_{*t}$  时获得的。后经实验发现,  $d_p=75\mu\text{m}$  时,  $U_{*t}$  最小。

相对于(1-1)式, (1-3) 式给出的关系可以说明整个粒径范围内, 起动摩阻风速随粒径的变化, 但函数关系  $F(Re_p)$ 、 $G(d)$  在使用较为复杂,  $G(d)$  的不正确表达, 将导致  $U_{*t}$  的不正确。所以, 一般不使用上式<sup>[20]</sup>。

香港科技大学邵亚平<sup>[18]</sup>对 Greeley 和 Iversen 提出的颗粒起动摩阻风速关系做了简化和修正, 提出了新的表达式:

$$U_{*t} = \sqrt{A_N \left( \delta_p g d + \frac{\gamma}{\rho d} \right)} \quad (1-4)$$

式中,  $A_N=0.0123$ ;  $\gamma=3\times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}$ ;  $\rho$  表示空气的密度;  $\delta_p$  是颗粒密度与空气密度的比值。

B.Martcorena 等<sup>[32-33]</sup>在 Iversen 和 White 模式基础上, 不但改进了模式迭代计

算的复杂过程,而且考虑了不同大小颗粒所产生的粘结力和粘附力对颗粒起动的影响,使模式不但能用来模拟均匀颗粒的起动摩阻风速,而且可以模拟粗细不均的混合沙的起动摩阻风速。正因为如此,该模式被用于全球和中国北方的沙尘暴预报之中<sup>[21]</sup>。其表达关系式:

$$U_{*i} = \frac{0.129K}{\left[1.928(aD_p^X)^{0.0092} - 1\right]^{0.5}} \quad 0.03 < \text{Rep} < 10 \quad (1-5)$$

$$U_{*i} = 0.129K \left[1 - 0.00858 \exp(-0.0617(aD_p^X + b) - 10)\right] \quad \text{Rep} > 10 \quad (1-6)$$

式中,  $D_p$  是沙粒的中值粒径;  $K$  为冯卡曼常数,  $0.4$ ;  $a=1331$ ;  $b=0.38$ ;  $X=1.56$ 。

从目前研究现状来看,关于光滑地表沙粒起动研究比较成熟,在理论和实验观测方面取得了很大进步。

### 1.2.2 植被结构特征对空气动力学粗糙度影响机制的研究进展

据考证粗糙度的概念源于水力学边界层理论,用来描述圆管的凸凹程度对边界层的影响<sup>[34]</sup>,风沙学者将其引入到风沙物理学中来表征沙粒粒度和粗糙元对边界层气流的阻力。空气动力学粗糙度是风沙物理学、流体力学和大气科学领域的一个重要概念,反映了边界层湍流与地表的相互作用机制。

光滑地表的空气动力学粗糙度被认为是沙粒直径的函数。拜格诺曾提出  $1/30$  定律<sup>[35]</sup>。董治宝等<sup>[36]</sup>研究修正了这个结论,指出其大小不仅是沙粒直径的函数,还与流体动力学特征有关,如湍流雷诺数、风速和摩阻风速等因素有关,反映出空气动力学粗糙度的复杂性。然而,植被等粗糙元的空气动力学粗糙度问题更加复杂,一方面是因为粗糙元存在复杂形状和结构,简化实验模型和几何参数难以很好地反映粗糙元实际特征,特别是植被的形态和结构千差万别,所以,如何选择合适参数来刻画其结构特征是值得考虑的;另一方面是因为目前还不能直接测定空气动力学粗糙度,主要是根据边界层风廓线数据推算的,而植被等粗糙元风廓线比较复杂,实际计算过程和方法还存在一定不确定性<sup>[37]</sup>,如是否考虑零平面位移高度,根据风廓线计算空气动力学粗糙度的起始高度还存在不同意见;再者,由于研究目的、研究方法和实验条件等方面的差异,前人关于粗糙元结构特征对空气动力学粗糙度的影响机制的结论还存在明显的差异,相应地建立的空气动力学粗糙度模式也存在显著的差异,特别是植被孔隙率和其他参数对空气动力学粗糙度的影响机制还不是很清楚。

对植被结构对空气动力学粗糙度的影响机制的研究趋势来看,早期研究主要考

虑了植被高度对空气动力学粗糙度的影响<sup>[37]</sup>，并建立了一些统计模式，随着研究深入，开始考虑植被密度和高度对空气动力学粗糙度的影响。近年来风蚀研究中开始系统研究粗糙元结构对空气动力学粗糙度的影响。Marticorena 等<sup>[32-33]</sup>研究表明粗糙元密度  $\lambda < 0.1$ ，空气动力学粗糙度主要与高度和密度有关， $\lambda > 0.1$  空气动力学粗糙度主要与高度有关。Minvielle 等<sup>[38]</sup>的风洞实验进一步说明在植被孔隙率和密度较低的情况下，Marticorena 的结论是可靠的。董治宝等<sup>[39]</sup>系统研究了直立植被的密度和高度对空气动力学粗糙度的影响，发现植被高度比密度对空气动力学粗糙度的影响显著，但随着密度增高空气动力学粗糙度会达到最大，预示着植被对气流总阻力达到最大。

孔隙植被和密实植被的显著区别在于两个方面，一是具有一定柔韧性能够随风摆动而消耗的风动量，目前在理论上和技术上研究植被柔韧性对空气动力学粗糙度的影响还有一定的难度；另一方面，植被具有一定的孔隙率，不但降低了植被有效密度，而且由于气流能够从植物枝条和枝叶的缝隙或间隙透过，可能造成植被的空气动力学特征不同于密实植被。风洞实验初步表明在植被密度较低的情况下，植被孔隙率是通过降低植被有效粗糙度而降低空气动力学粗糙度，而且在孔隙率低于 30% 情况下对空气动力学粗糙度影响不大<sup>[38]</sup>。Minvielle 的实验数据还很有限，还不能回答不同高度和密度情况下植被孔隙率如何影响空气动力学粗糙度的问题，即植被孔隙率主要是通过改变有效密度来影响空气动力学粗糙度，还是在改变有效密度同时还改变了气流与植被相互作用过程并进而影响空气动力学粗糙度，如果是前一种情况只需要根据植被孔隙率和其他结构参数来换算有效粗糙度，然后利用适合密实粗糙元的空气动力学粗糙度模式来模拟孔隙植被空气动力学粗糙度；如果是后者模拟空气动力学粗糙度还需要考虑孔隙率对植被空气动力学特征的影响，建立适合植被粗糙元的空气动力学粗糙度模式。

总之，鉴于目前还不清楚植被孔隙率与其他结构参数对空气动力学的影响机制，因而有必要开展这方面的研究。

### 1.2.3 植被空气动力学粗糙度对跃移起动影响机制的研究进展

目前关于粗糙元的空气动力学特征对跃移起动的的影响机制主要用应力分配理论来说明，即气流在经过粗糙元覆盖地表时风应力会在光滑地表和粗糙元之间的分配。粗糙元通过吸收部分风动量而起到控制跃移起动和提高起动摩阻风速的作用。粗糙元对跃移起动的的影响必然和应力分配相联系，因而常用光滑地表与粗糙元覆盖

地表的起动摩阻风速之比 ( $R_t = \frac{U_{*R}}{U_{*S}}$ ) 来反映应力分配关系。

自 20 世纪 30 年代 Schlichting 提出流体应力分配的基本框架以来<sup>[40]</sup>, 研究人员开展一系列实验研究和理论分析, 对风应力在与粗糙元的空气动力学特征和几何特征进行了一些研究, 取得了许多重要认识和积累了重要科学数据。应力分配实验研究主要通过两个途径开展工作, (1) 是通过直接测定光滑地表和粗糙元覆盖地表的风应力或阻力大小来研究应力分配与粗糙元密度、结构参数 (地面积与迎风面积之比  $\sigma$ , 方向比率 AR) 和单个粗糙元阻力系数或者粗糙元总阻力系数的关系<sup>[41-42]</sup>。(2) 是通过测定研究粗糙元和光滑地表的空气动力学粗糙度来研究粗糙元对应力分配和起动摩阻风速的影响, 这方面研究比较少, 如 Alfaro, MacKinnon, Lancaster 等研究成果<sup>[43-45]</sup>。相应地也形成了两类应力分配的理论模式, 即 Raupach 模式和 Marticorena 模式, 前者与 (1) 的实验研究相对应, 后者主要是从粗糙元的空气动力学粗糙度来表征粗糙元对起动摩阻风速和应力分配的影响。Raupach 模式和 Marticorena 模式分别为:

$$R_t = \left( \frac{\tau}{\tau_s} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{U_{*R}}{U_{*S}} = \left[ \frac{1}{(1 - m\sigma\lambda)(1 + m\beta\sigma)} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (1-7)$$

$$R_t = \left( \frac{\tau}{\tau_s} \right)^{\frac{1}{2}} = \left\{ 1 - \left[ \frac{\ln\left(\frac{Z_0}{Z_{0s}}\right)}{\ln\left[0.35\left(\frac{10}{Z_{0s}}\right)^{0.8}\right]} \right] \right\}^{-1} \quad (1-8)$$

其中,  $U_{*R}$  是粗糙元覆盖地表的起动摩阻风速;  $U_{*S}$  是光滑裸露的地表起动摩阻风速;  $\sigma$  是粗糙元的地面积与迎风面积之比;  $m$  是经验常数, 代表地表剪切力分布的不均匀性;  $\beta$  是分配在粗糙元上的阻力系数与地表阻力系数之比;  $\lambda$  是粗糙元的密度;  $Z_0$  是植被覆盖地表的空气动力学粗糙度;  $Z_{0s}$  光滑裸露地表的空气动力学粗糙度。

前人研究试图通过粗糙元的动力学特征和结构特征对起动摩阻风速和应力分配的影响来表征所有粗糙元 (密实粗糙元和孔隙粗糙元) 对跃移起动的影响, 但如前所述, 植被具有一定的柔韧性和孔隙度, 其结构特征和空气动力学特征不同于密实粗糙元。鉴于目前定量研究植被柔韧性比较困难的情况下, 有人试图通过研究风力作用下由于植被体积变化而引起其孔隙率变化来说明植被柔韧性的特征以及空气动力学特征, 这样植被对应力分配和跃移起动的影响便被归结为植被孔隙率及植被其他结构参数与空气动力学特征 (如阻力系数或空气动力学粗糙度) 的作用。近

几年来大多数的实验研究主要是从单个植物的阻力系数和植被密度来分析其对应力分配和跃移起动的的影响。诸多研究表明确定单个植物的阻力系数还存在明显的不确定性，与此相关的是植物的高度、形状和孔隙度如何影响其阻力系数的机制还不清楚。除植被密度、形状参数和阻力系数等因素外，还存在一些不确定因素如应力分布不均等也影响着应力在植被和地表之间的分配，尽管目前提出用经验参数来表征这些不确定因素对应力分配的影响，但目前实验研究表明这个经验参数还存在较大变异，对其变化的趋势还了解不多。

鉴于上述研究存在困难，一些研究人员开始从粗糙元结构特征和空气动力学粗糙度来研究其对跃移起动和应力分配的影响机制。Alfaro通过模拟实验研究了粗糙元和光滑地表的空气动力学粗糙度对应力分配和起动摩阻风速的影响，其实验结果和Marticorena模式预测结果还存在较大的差异<sup>[46]</sup>，说明除空气动力学粗糙度这个因素以外，粗糙元的结构特征和其他结构参数因素还可能显著影响跃移起动，这些因素与空气动力学粗糙度如何影响跃移起动有待于进一步实验研究。MacKinnon 等<sup>[44]</sup>通过野外观测研究了不同地表覆盖包括植被覆盖的空气动力学粗糙度，并结合前人研究指出 Marticorena 的研究可能过高估计了空气动力学粗糙度对跃移起动和应力分配的影响，需要在不同粗糙元密度的情况进一步确定跃移起动和空气动力学粗糙度的关系。Lancaster等<sup>[45]</sup>的野外研究结果也暗示了Marticorena 的研究也存在类似问题。James King 等<sup>[47]</sup>认为像 Marticorena 的研究那样，仅考虑空气动力学粗糙度对跃移起动的的影响是不够的，还需要考虑粗糙元的几何特征。可是，关于粗糙元几何特征和空气动力学粗糙度如何影响对跃移起动的定量问题现在还缺乏系统研究，特别是关于植被的孔隙度和其他结构参数、空气动力学粗糙度对跃移起动的系统研究还少有报道，而这对准确理解植被抑制风蚀机制、沙尘暴预报和沙漠化防治具有重要的意义。

综上所述，目前国内外对植被的孔隙率及其他结构参数对空气动力学粗糙度的影响机制、植被结构参数和空气动力学粗糙度对跃移起动的的影响机制还不很清楚，目前还缺乏这方面的系统实验研究。本论文将上述问题作为研究内容和拟解决科学问题。

### 1.3 研究目的、意义

本文研究目的有两个：一是从理论上阐述植被的结构特征和空气动力学粗糙度对跃移起动的的影响机制；二是为跃移起动经验模式改进提供观测依据，核实验数据，改进现有模式存在问题，服务于沙尘暴预报工作。前一个目的对于全面理解植被-

颗粒-气流互馈机制，完善植被防沙的理论有主要的贡献，后一个目的有助于进一步完善沙尘暴预报工作，具有重要实践意义。

## 2 实验方法与研究内容

国内外对植被覆盖地表的风沙运动的研究主要采用野外观测实验和风洞模拟实验<sup>[48]</sup>。风洞模拟实验条件易于控制和排除随机干扰因素，实验数据的重复性好，适合用来开展系统的理论研究，本文研究方法采用风洞模拟实验。

### 2.1 环境风洞简介

实验是在中国科学院寒区旱区环境工程研究所风沙物理与沙漠环境实验室的野外风洞中进行。野外风洞为直流闭口吹气式，全长约 31m，由连接段、整流段、稳定段、实验段和扩散段组成。实验段长 21m，截面积  $1.2 \times 1.2\text{m}$ 。来流风速  $2\text{-}30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，连续可调。实验段边界层厚度可达 40-50cm。图 2-1 给出了风洞实验段的示意图。

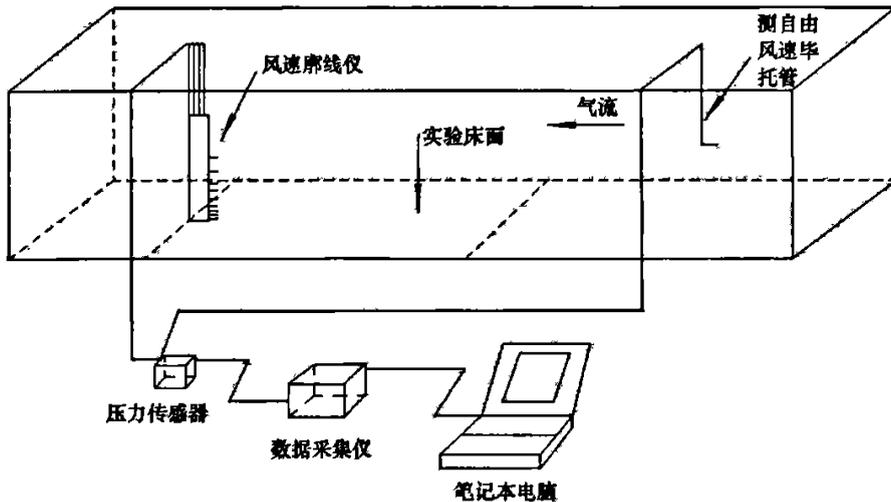


图 2-1 环境风洞实验段及实验布置示意图

### 2.2 植被特征的描述和植被模型的设计

#### 2.2.1 植被特征参数的描述

本文采用直立植被的结构参数有高度、密度、高度与间距比、方向比率、孔隙率，有关参数定义如下：

- 植被密度 植被密度或侧影盖度指直立植被的总的迎风面积与下地面面积之比：

$$\lambda = \frac{nhd}{S} \quad (2-1)$$

其中， $\lambda$  为密度， $n$ 、 $h$ 、 $d$  分别为植被粗糙元的个数，高度和直径； $S$  为下地面面积。

- 方向比率 方向比率定义为圆柱形粗糙元的高度与直径比：

$$AR = \frac{h}{d} \quad (2-2)$$

- 高度与间距比  $S_h = \frac{h}{S_p}$  (2-3)

其中， $S_p$  为两个相邻粗糙元之间的距离。

- 植被孔隙率 孔隙率定义为单个孔隙粗糙元的透风迎风面积与粗糙元的迎风面积比值：

$$P = \frac{HD_k - n_s h_s d_s}{HD_k} \quad (2-4)$$

其中， $H$ 、 $D_k$  为孔隙植被的高度与直径； $n_s$ 、 $h_s$ 、 $d_s$  为分散在孔隙植被中单个植被的个数、高度与直径。

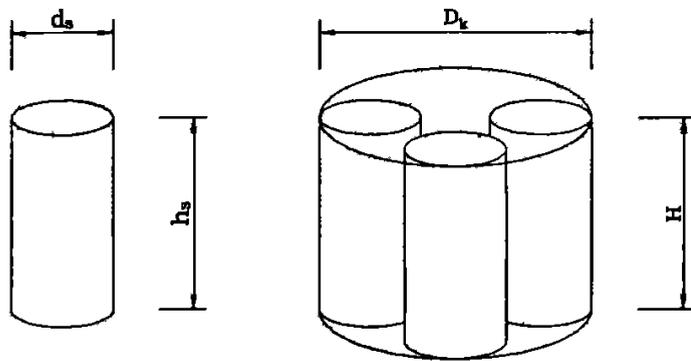


图 2-2 分散在孔隙植被中单个粗糙元与孔隙植被示意图

## 2.2.2 植被模型的设计与实验布置

表 2-1 植被模型结构参数

编号	d (mm)	h(mm)	行×列	$\lambda$	AR	$S_b$
01	5	20	6×12	0.0072	4	0.05
02	5	20	11×12	0.0132	4	0.1
03	5	20	21×12	0.0252	4	0.2
04	5	20	41×12	0.0492	4	0.4
05	5	20	41×25	0.1025	4	0.4
06	5	40	6×12	0.0144	8	0.1
07	5	40	11×12	0.0264	8	0.2
08	5	40	21×12	0.0504	8	0.4
09	5	40	41×12	0.0984	8	0.8
10	5	60	6×12	0.0216	12	0.15
11	5	60	11×12	0.0396	12	0.3
12	5	60	21×12	0.0756	12	0.6
13	5	60	41×12	0.1476	12	1.2
14	5	60	41×25	0.3075	12	1.2
15	5	80	6×12	0.0288	16	0.2
16	5	80	11×12	0.0528	16	0.4
17	5	80	21×12	0.1008	16	0.8
18	5	80	41×12	0.1968	16	1.6
19	5	80	41×25	0.41	16	1.6
20	5	100	6×12	0.036	20	0.25
21	5	100	11×12	0.066	20	0.5
22	5	100	21×12	0.126	20	1
23	5	100	41×12	0.246	20	2
24	5	100	41×25	0.5125	20	2
25	40	10	21×5	0.042	0.4	0.1
26	40	20	21×5	0.084	0.5	0.2
27	40	30	21×5	0.126	0.75	0.3
28	40	40	21×5	0.168	1	0.4
29	40	50	21×5	0.21	1.25	0.5

表 2-2 植被模型孔隙度与其他结构参数

编号	$h_s(\text{mm})$	$d_s(\text{mm})$	$n_s$	$H(\text{mm})$	$D_k(\text{mm})$	$N_s(\text{n}\cdot\text{m}^{-2})$	$\lambda$	P
01	30	2	17	30	40	1780	0.1068	0.15
02	30	2	9	30	40	945	0.0567	0.55
03	30	2	5	30	40	525	0.0315	0.75
04	40	2	17	40	40	1780	0.1424	0.15
05	40	2	9	40	40	945	0.0756	0.55
06	40	2	5	40	40	525	0.042	0.75
07	50	2	17	50	40	1780	0.178	0.15
08	50	2	9	50	40	945	0.0945	0.55
09	50	2	5	50	30	525	0.0525	0.75

本文设计了两种植被模型：密实粗糙元(compact roughness elements)和孔隙粗糙元(porous roughness elements)。前者主要用来研究植被高度、密度、高度与间距比、方向比率等结构特征对空气动力学粗糙度和跃移起动的的影响，后者主要研究植被孔隙率与其它结构参数对空气动力学粗糙度和跃移起动的的影响。

为了保证风洞模拟实验结果和野外实际情况的可比性和相似<sup>[49]</sup>，这里用相似准则参数雷诺数( $R_{ep}$ )来判定实验模型几何高度选择的合理性。雷诺数( $R_{ep}$ )定义为：

$$R_{ep} = \frac{UL}{\nu} \quad (2-5)$$

式中,U为风速;L为特征长度; $\nu$ 为动力粘滞系数(常温、常压下 $\nu \approx 0.15\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )。

在我国干旱、半干旱地区,植被的高度约为40-120cm之间,气象站典型风速 $500\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,根据(2-5)式计算得雷诺数 $R_{ep}=1.33\times 10^5-4.0\times 10^5$ 。本次风洞实验的最大风速为 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,植被模型的最大高度10cm,计算得此实验条件下的 $R_{ep}=1.33\times 10^5$ ,与野外情况相似。实验使用的风洞的 $R_{ep}=10^5-10^6$ <sup>[50]</sup>,流态是完全湍流的,可达到模拟的要求。由于实验在风洞实验段中自然形成的平板附面层进行,经实验验证,风速廓线符合对数分布规律,与自然界相似。根据雷诺数的限制和风洞边界层厚度,所有模型高度在10-100mm是合适的。

模型用细木棍、塑料管和细铁丝制作。按不同的结构特征将每种模型布置在宽500mm,长为2000mm的三合板床面上。具体结构特征参数见表2-1和2-2。

### 2.2.3 实验沙样的粒径分布

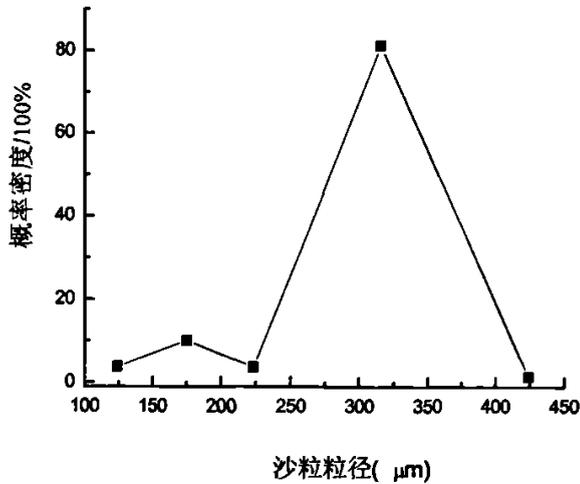


图 2-3 沙粒粒径分布概率密度曲线

用于跃移起动实验的沙样为粒度比较均一的中沙，其粒径分析采用干筛筛分法，实验时在百分之一的天平上称量干沙样品 50g 左右，放在一组筛网上，用手摇动 5 分钟，然后分别称重各筛网上的沙粒，之后计算沙粒粒径的百分比。具体粒度分布见图 2-3。

## 2.3 实验方法

### 2.3.1 风速廓线测点的选择

风速廓线的测定，需要选择在湍流边界层发育较好且稳定的点<sup>[36]</sup>。气流在流经粗糙元地表时，需要经过一段距离才能达到稳定，这段距离与风速和地表的粗糙度有关。所以理解地表植被粗糙元与气流的互馈关系需要检验边界层风速廓线。为此，我们以 4cm 高度模型植被为例，在  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速下，通过测定距模型起点位置  $X=1.00\text{m}$  和  $X=1.95\text{m}$  点的风速廓线，了解在植被地表情况下风洞边界层湍流发育和对数廓线情况。图 2-4 列出了所测得风速廓线。由图可以看出，在边界层内，在距模型开始端两不同距离处，形成的风速廓线相差不大，但相对来说，植被末端的风速廓线更符合对数规律。两测点处风速沿对数高度拟和直线的可确定系数都大于 0.99，但计算这两种情况的下的空气动力学粗糙度时，发现差别较大， $X=1.00\text{m}$  处，

$Z_0=0.2936\text{mm}$ ，而  $X=1.95\text{m}$  处， $Z_0=1.0136\text{mm}$ ，所以我们认为  $X=1.95\text{m}$  处，风洞边界层湍流发育的更充分，风速廓线更趋向于服从对数规律。因此，本文的所有实验均在  $X=1.95\text{m}$  处测量不同特征参数植被床面的风速廓线，以确保实验结果的准确性。

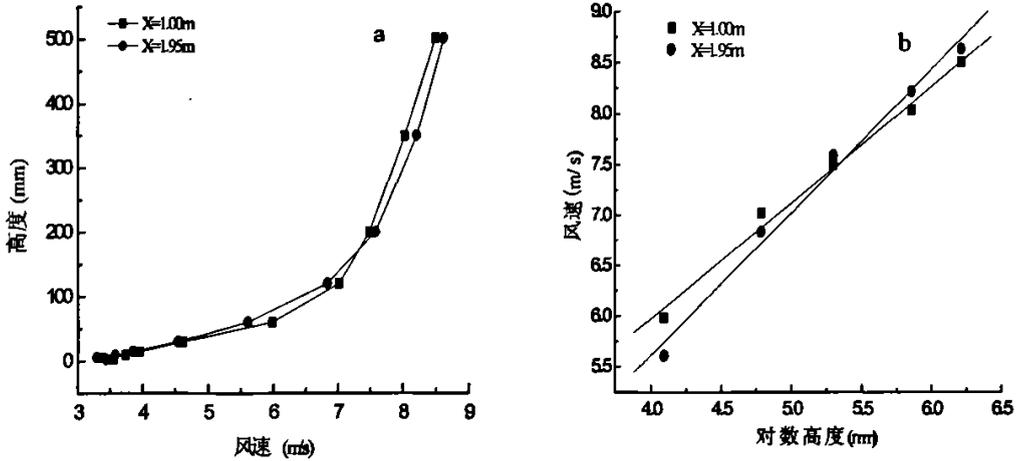


图 2-4 沿植被模型床面轴线(X)变化的风速与高度(a)及对数高度(b)的关系

### 2.3.2 植被模型床面风速廓线的测定

分别将设计并制作好的植被模型按编号依次放入环境风洞实验段，模型的床面即三合板的底面与风洞的底面平行。每种模型在 9 种自由来流风速 ( $4$ 、 $6$ 、 $8$ 、 $10$ 、 $12$ 、 $14$ 、 $16$ 、 $18$ 、 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 下测定风速廓线。风速廓线仪由基本上按对数规律于不同高度上 ( $3.0$ 、 $6.0$ 、 $10.0$ 、 $15.0$ 、 $30.0$ 、 $60.0$ 、 $120$ 、 $200$ 、 $350$ 、 $500\text{mm}$ ) 的 10 个精细毕托管组成，使用前经标准毕托管标定。自由风速  $U$ ，即来流风速用置于实验段入口处轴线位置的毕托管测定。所有毕托管都通过微压差传感与计算机相连，实验时的气温和大气压用计算机键盘键入风压测量系统程序中，实现风速适时自动采集。本实验的风速采集周期为  $2\text{s}$ ，采集周期  $60\text{s}$ ，最终用于分析的是  $60\text{s}$  时间段内采集的各个高度上的平均风速。

### 2.3.3 沙粒起动实验

在植被床面均匀撒大约  $1\text{mm}$  厚的沙子，使沙粒覆盖床面。慢慢开启风机，当观测到粘贴在床面上的白色胶带上  $5$  粒左右的沙粒时，就认为沙粒起动，立即停

止增大风速，记录此时的风速廓线。用胶带粘贴沙粒判断沙粒起动的的方法已被 Musick<sup>[54]</sup>、刘小平<sup>[55]</sup>、移小勇<sup>[56]</sup>等采用，证明方法是可行和有效的。为了减小实验的误差，每种模型做 5 次平行实验，同时为了减小肉眼直接观测的误差，在测试点布置和计算机相连接的一个高清晰度的摄像头用来监测下风向沙粒起动。

### 2.3.4 植被空气动力学粗糙度和沙粒起动摩阻风速的计算

植被空气动力学粗糙度主要是根据风速廓线的风速梯度数据来计算的<sup>[51]</sup>。在中性或近中性、光滑下垫面边界层，风速廓线沿高度呈对数变化规律，即风速变化遵循对数规律：

$$\frac{U_z}{U_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{Z}{z_{0s}} \quad (2-6)$$

式中， $U_z$  是  $Z$  高度上的水平风速； $U_*$  为摩阻风速，与风速随高度的变化率成正比， $U_* = (\tau / \rho)^{1/2}$ ； $\tau$  为地表剪切应力； $\rho$  为空气密度； $K$  为冯卡曼常数，其值为 0.35-0.4，一般取 0.4； $Z_{0s}$  为水平风速为零的高度，称之为粗糙度。(2-6)式描述的风廓线在大气低层(<10m)，也可以用于描述风洞中边界层的廓线。

由(2-6)式可知，在同一下垫面点， $Z_{0s}$  可以由两个已知高度 ( $Z_1, Z_2$ ) 的风速值求出，如下式所示：

$$Z_{0s} = \exp \left[ \frac{U_1 \ln Z_2 - U_2 \ln Z_1}{U_2 - U_1} \right] \quad (2-7)$$

当地表有植被时，植被粗糙元与气流的相互作用，流场发生改变。大粗糙元与气流相互作用的原理可以表述为：大粗糙分散风的动量，风的动量一部分传给地面，大部分被植被截获，在地表产生类似弱风区的湍流，将大涡旋分成小涡旋，结果导致风速廓线的改变<sup>[54]</sup>。调整后的对数廓线如下：

$$\frac{U_z}{U_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{Z - D}{Z_0} \quad (2-8)$$

式中， $Z_0$  为植被覆盖地表的空气动力学粗糙度； $D$  为零平面位移高度，是相当于将大粗糙元条件下的零风速高度向上移动一个位移量( $D$ )，其定义为将所有粗糙元在光滑地面上摊平的高度，也可以认为是平均动量损失的高度<sup>[37]</sup>。光滑裸露和植被

覆盖地表的理想平均风速廓线见图 2-5。

零平面位移高度也反映地表对气流的反馈作用的空气动力学特性，与下垫面特征存在紧密地联系。低矮和稀疏植被的零平面位移高度较小，甚至接近零。但随着植被的高度和密度增加而增加<sup>[34]</sup>。有研究者指出， $D$  值随着地表植被的稀疏程度在  $0.02\sim 0.07\text{m}$  之间变化<sup>[52]</sup>，但同样，也有研究者指出，零平面位移高度至今还没有明确的物理意义<sup>[53]</sup>，需要进一步深入的研究，所以，在大多数已有研究中在计算下地表的空气动力学粗糙度时，考虑零平面唯一高度，即使用(2-8)式得非常少<sup>[39]</sup>。另外，刘小平<sup>[34]</sup>计算大量的风洞实验数据后发现，在有粗糙元覆盖床面时，得出的各种床面的  $Z_0$  和光滑床面的  $Z_0$  处于同一数量级，因此，认为  $D$ 、 $Z_0$  只能研究其中

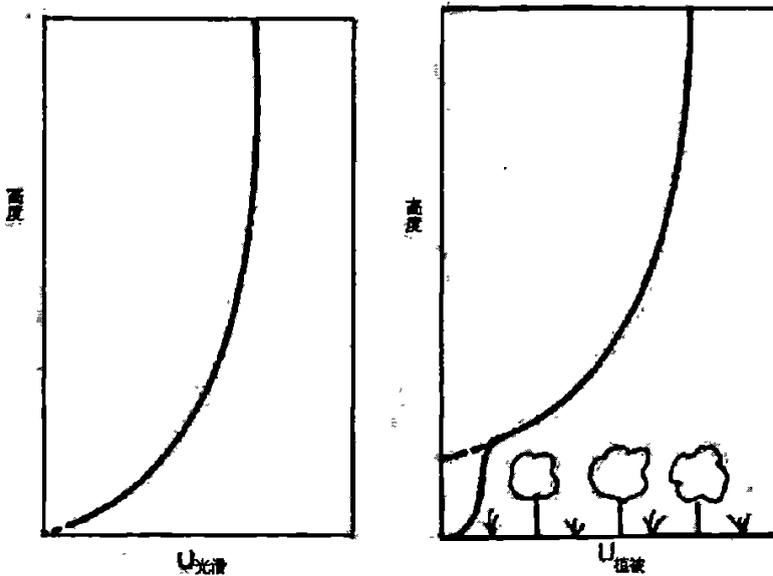


图 2-5 光滑和植被覆盖地表的风速廓线<sup>[37]</sup>

一个，其中一个参数就能反映地表对气流的反馈作用的空气动力学特性。由于  $Z_0$  具有明确的物理意义，所以，在本文中同样不考虑  $D$  的影响，即  $D=0$  这将使问题得到简化。那么，方程(2-8)也将转化为方程(2-6)。

通过边界层内任意两个高度处的风速廓线资料可根据(2-7)式计算植被覆盖地表的空气动力学粗糙度( $Z_0$ )，但是，由两个高度风速的值计算出的  $Z_0$  的误差很大，往往不够精确，任何一个风速资料的误差都会影响  $Z_0$  值，所以，可以通过多个高度风速值通过最小二乘法计算  $Z_0$ ，以提高  $Z_0$  的精确度。

用最小二乘法拟和所测得风速廓线计算  $Z_0$ ，这种方法已得到很多研究者的认同。Lancaster 等<sup>[45]</sup>在美国西部 Owen 湖野外观测计算植被覆盖地表的空气动力学粗糙度使用了此种方法；董治宝等<sup>[39]</sup>用此种方法计算了风洞实验砾石和直立植被床面的空

气动力学粗糙度；Gillies 等<sup>[52]</sup>在美国农业部野外研究站计算模拟粗糙元的空气动力学粗糙度同样也使用此种方法。对风速廓线应用最小二乘法拟和，其拟和方程为：

$$U_z = a + b \ln Z \quad (2-9)$$

式中， $U_z$  为高度  $Z$  处的风速； $a$ ， $b$  为回归系数。在(2-9)式中，令  $U_z=0$  可以去求出  $Z_0$ ，

$$Z_0 = \exp(-a/b) \quad (2-10)$$

由(2-6) 和(2-9)式得到：

$$U_* = Kb \quad (2-11)$$

其中， $K$  为冯卡曼常数，0.4。

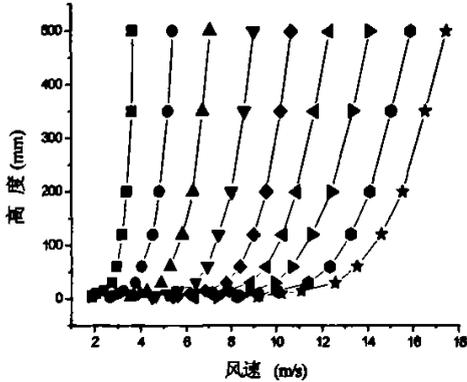
本文在测定不同特征植被床面上不同高度(3.0、6.0、10.0、15.0、30.0、60.0、120、200、350、500mm)风速后，用上述方法拟和获得不同特征植被床面的空气动力学粗糙度  $Z_0$ 。在测定沙粒时的风速廓线后，同样用上述方法获沙粒起动时的摩阻风速。数据拟合采用 Origin 软件。拟合过程用可确定系数 ( $R^2 > 0.90$ ) 控制，以保证风速测量结果计算选取的高度在对数分布区域内。

## 2.4 研究内容

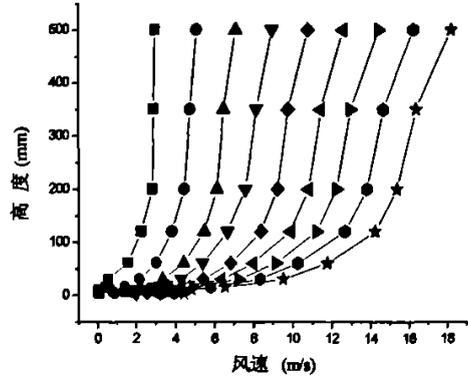
本文研究内容集中在两个方面：一是研究植被结构特征对空气动力学粗糙度的影响；二是研究植被结构特征和空气动力学粗糙度对跃移起动的影响。

### 3 植被结构特征对空气动力学粗糙度的影响

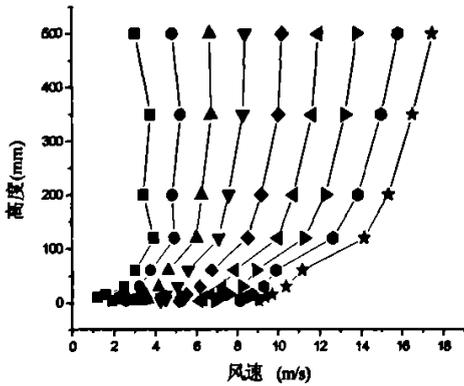
#### 3.1 植被特征对风速廓线的影响



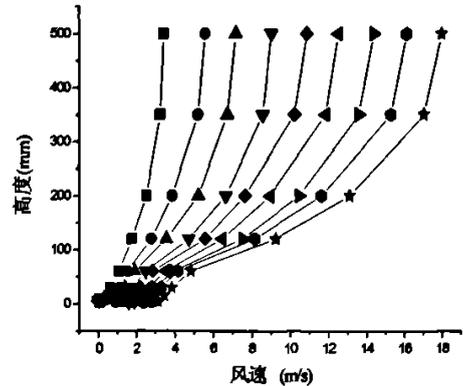
A  $d=5\text{mm}$   $h=20\text{mm}$   $\lambda=0.0072$



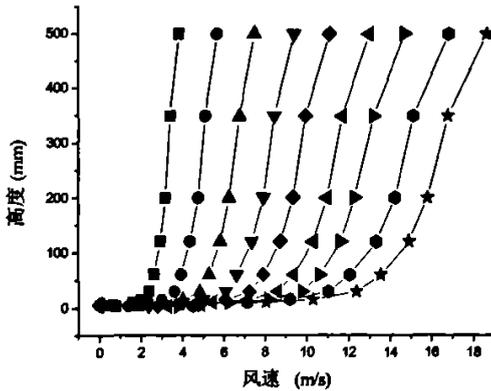
B  $d=5\text{mm}$   $h=20\text{mm}$   $\lambda=0.1025$



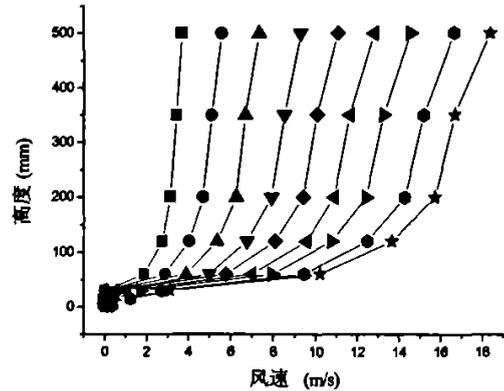
C  $d=5\text{mm}$   $h=100\text{mm}$   $\lambda=0.036$



D  $d=5\text{mm}$   $h=100\text{mm}$   $\lambda=0.5125$



E  $d=40\text{mm}$   $h=10\text{mm}$   $\lambda=0.042$



F  $d=40\text{mm}$   $h=50\text{mm}$   $\lambda=0.21$

图 3-1 不同特征密实型植被模型床面在不同自由风速下的风速廓线

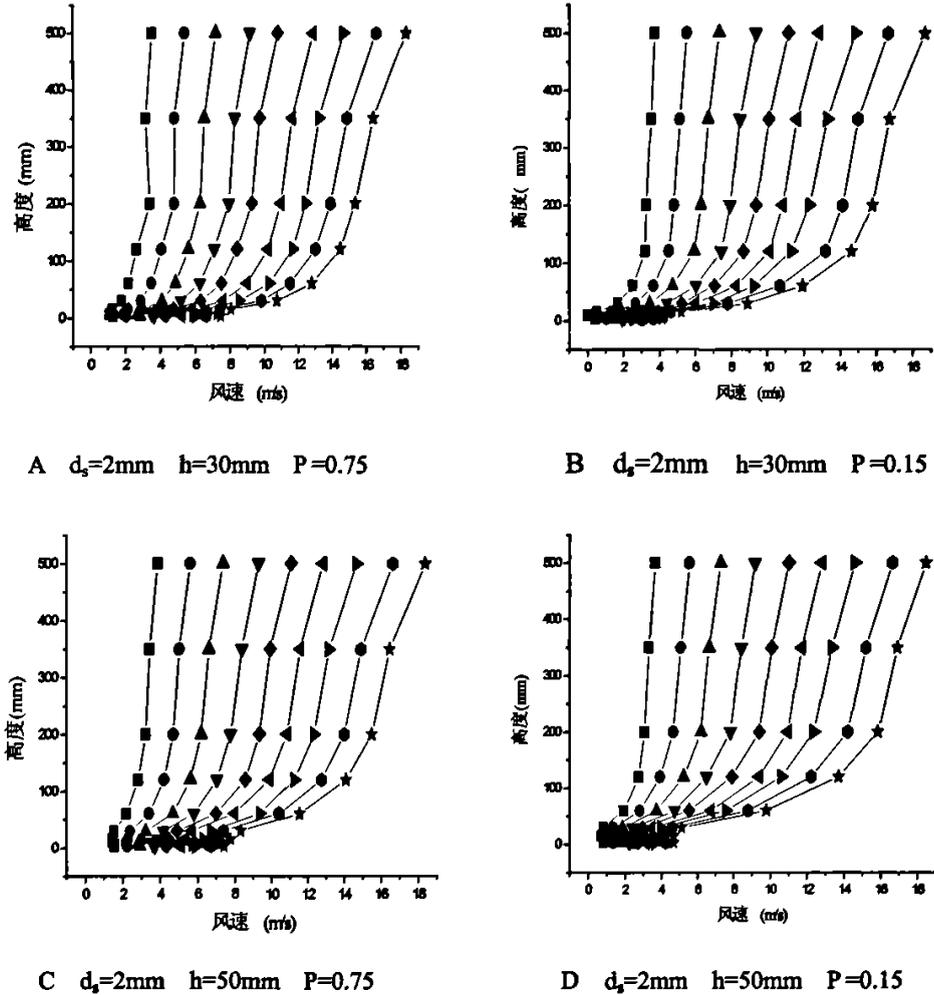


图 3-2 不同高度和孔隙度的植被 9 种自由风速的风速廓线

图 3-1 和 3-2 是测定的部分不同植被结构特征的植被模型床面在 9 种自由来流风速(4m/s、6 m/s、8 m/s、10 m/s、12 m/s、14 m/s、16 m/s、18 m/s、20 m/s)下的风速廓线图。对比图 3-1-A 和 3-1-B, 可以看到在植被高度、直径相同情况下, 植被密度对风廓线的影响显著, 密度在 0.1 以下整个高度的风廓线服从对数律, 密度大于 0.1 植被高度以下风速廓线偏离对数规律, 而且这个趋势会随着高度和植被直径增加表现得更加明显, 如图 3-1-C 到 3-1-D。植被直径较大时, 在植被的后面形成大范围尾流区, 如图 3-1-E 到 3-1-F, 特别当高度也较高时, 植被层内风速可减小为零, 如图 3-1-F。

植被孔隙率对风速廓线的影响是显著的, 当孔隙度为 0.75 时 (见图 3-2-A 和 3-2-C), 植被层内的气流沿高度梯度变化不大, 这主要是由于气流经过植被间的孔

隙通过, 植被分散了湍流涡旋的形成, 而且可能存在气流的回流现象导致风速垂直梯度变化不大; 反之而当空隙度较小时 (图 3-2-D 和图 3-2-B), 植被高度以下风速急剧减小, 并且与植被以上高度风速形成较大的梯度。

前人认为植被气流结构可以分为两部分, 植被高度以下为粗糙亚层, 以上为惯性亚层。在粗糙亚层气流受植被的影响较为强烈, 植被与气流间的相互作用复杂多变, 植被密度较小时, 此层风速梯度随植被特征变化呈明显的随机特征, 而当植被密度较大时, 此层几乎无气流通过, 气流形成植被顶部掠流; 在惯性亚层, 气流受植被单体的影响较小, 气流的变化主要受制于整个植被层, 风速随高度的变化仍呈对数变化规律, 但与植被特征有明显的相关性。上述风廓线实例情况体现了植被的气流特征<sup>[51, 58]</sup>。

## 3.2 植被结构特征对地表空气动力学粗糙度的影响

### 3.2.1 密实植被密度和高度对空气动力学粗糙度的影响

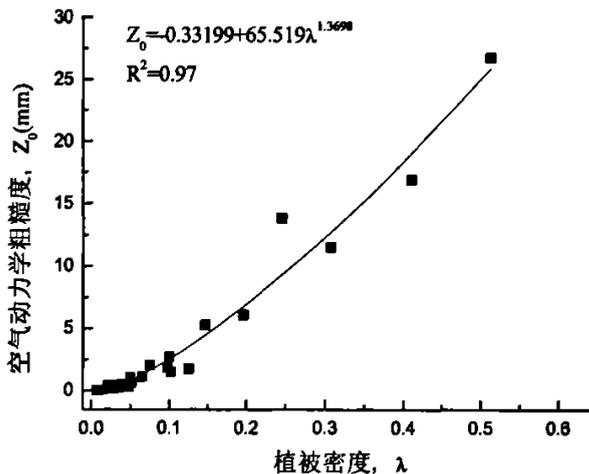


图 3-3 密实植被密度( $\lambda$ )与植被覆盖地表空气动力学粗糙度 ( $Z_0$ )之间的关系

图 3-3 反映了实测的植被覆盖地表的空气动力学粗糙度与植被密度的变化关系。从统计分析来, 看空气动力学粗糙度可以表示为植被密度的幂函数。当植被密度  $\lambda < 0.1$ , 空气动力学粗糙度约在  $10^{-3} \sim 10^0$  mm; 当  $\lambda > 0.1$ , 空气动力学粗糙度约在  $10^0 \sim 10^1$  mm, 说明  $\lambda > 0.1$ , 空气动力学粗糙度随密度增大而增大的趋势减缓, 这与前人<sup>[32-33]</sup>关于植被密度与空气动力学粗糙度定量关系描述是基本一致的。

从图 3-4 可以看到空气动力学粗糙度与植被高度变化的特征: 一方面, 空气动力学粗糙度随着植被高度增加而增大; 另一方面, 可以看到在植株稀少的情况下,

如本次实验的  $N_s=72, 132$  (即每平方米植株数量为 72 株, 132 株) 的情况下, 空气动力学粗糙度随高度变化不明显, 可见空气动力学粗糙度随高度的变化趋势同时还受密度的影响。

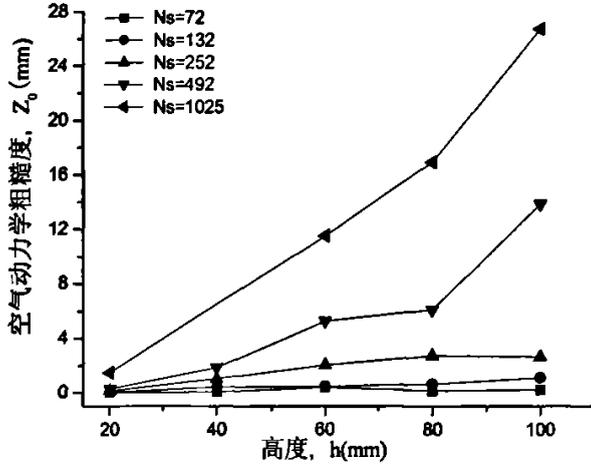


图 3-4 粗糙元高度(h)与地表空气动力学粗糙度 ( $Z_0$ )之间的关系

为了更好的说明空气动力学粗糙度与植被高度和密度的关系, 这里建立无量纲的  $Z_0/h$  与  $\lambda$  间的关系 (见图 3-5)。从图可以看到随着植被密度从  $10^{-2}$  增加到  $10^0$ ,  $Z_0/h$  也从  $10^{-3}$  增加到  $10^{-1}$ 。本次实验结果与前人<sup>[32, 37, 38, 45, 47]</sup>的研究有所不同, 当  $\lambda < 0.1$ , 本文实验的  $Z_0/h$  部分值有点偏低, 但变化关系的趋势与其他结果是基本接近的; 当  $\lambda > 0.1$ , 与 Lettau, Marticorena 等预测的结果不同,  $Z_0/h$  随着  $\lambda$  增大而呈线性增加。本文实验的  $Z_0/h$  与  $\lambda$  的回归关系式为 3-1, Lettau, Marticorena 的关系式分别为 3-2, 3-3 和 3-4, 其中 3-2 式中 0.5 表示粗糙元的平均阻力系数的近似值, 3-3 和 3-4 式表示的关系在粗糙元相互独立, 适用粗糙元密度较低情况下即尾流相干流存在时的情况, 如果  $\lambda > 0.1$ , 则  $Z_0/h=1/C$  ( $C$  在 0-30 之间变化)。Okin 等<sup>[58]</sup>对 Marticorena 给出的  $Z_0/h$  与  $\lambda$  经校正并转化给出关系式 3-5。

$$\frac{Z_0}{h} = 0.557\lambda - 0.01 \quad (F_{2, 21}=553.1, P<0.0001) \quad (3-1)$$

$$\frac{Z_0}{h} = 0.5\lambda \quad (3-2)$$

$$\frac{Z_0}{h} = 10^{(1.33 \log^2 - 0.33)} \quad \lambda < 0.11 \quad (3-3)$$

$$\frac{Z_0}{h} = 0.05 \quad \lambda \geq 0.11 \quad (3-4)$$

$$\frac{Z_0}{h} = 0.479\lambda - 0.01 \quad (\lambda < 0.11) \quad (3-5)$$

本实验结果与前人研究的差异可归结为植被排列方式对空气动力学粗糙度的影响。在 Marshall<sup>[32]</sup>研究 (Marticorena 模式的数据来源), Gilles<sup>[47]</sup>等的室内和野外研究工作中,粗糙元的排列方式主要是交错式排列。这种排列方式可以获得比较均一的流场,风动量可以在粗糙元之间比较均一的分配,而这与实际情况可能存在较大差距,因为在野外不论是指被还是砾石等粗糙元分布在空间上是随机变化的,气流经过粗糙元覆盖地表后其动量分配是不均一的。本实验采用各行与气流垂直、各列与气流平行的排列方式,其必然存在气流加速的“风道区”,而这可能是最可能发生风蚀的,本实验测定是风道区的空气动力学粗糙度,因而与前人的实验结果有所不同,但说明了粗糙元排列方式对气流和空气动力学粗糙度的影响。

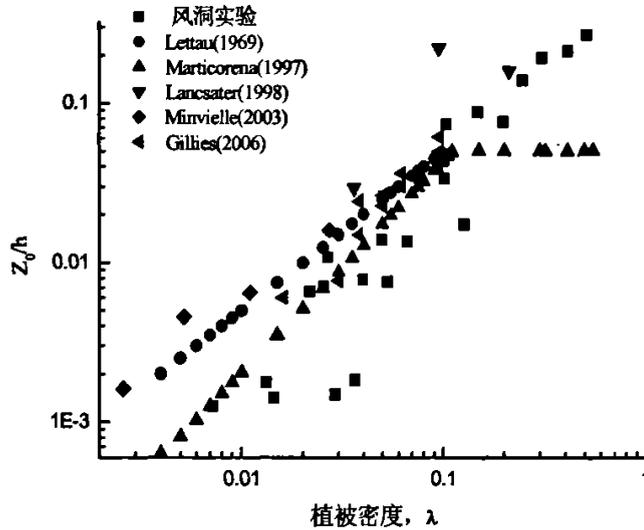


图 3-5 本实验测定无量粗糙度( $Z_0/h$ )与粗糙元密度( $\lambda$ )及其与前人研究比较

### 3.2.2 密实植被方向比率对空气动力学粗糙度的影响

随着植被方向比率的变化,地表空气动力学粗糙度也随之变化(见图 3-6),如单位地表面积上植被粗糙元的个数  $N_s=1025 \text{ m}^{-2}$  的植被,当植被方向比率  $AR=4$  时,地表空气动力学粗糙度  $Z_0=1.48\text{mm}$ ,当  $AR=20$  时,  $Z_0$  增大到  $26.78\text{mm}$ ,增大了 18 倍。除  $N_s=252$  的植被外,植被方向比率与沙粒起动摩擦风速的回归关系中的指数都在 1.4 以上(见表 3-1),说明植被的方向比率对地表空气动力学粗糙度影响程度显著。

植被方向比率  $AR$  的变化可以改变粗糙元周围的涡旋气流的结构和粗糙元背后

尾流区的范围<sup>[45, 58]</sup>。Musik 等<sup>[45]</sup>指出, AR 的变化对植被与地表的阻力系数之比,  $\beta$  有显著的影响, 在相同的粗糙元密度情况下, AR 由 0.25 变化到 0.4,  $\beta$  增加了两倍。Crawley 等<sup>[42]</sup>经过风洞实验研究发现, AR 变化 50%, 而  $\beta$  只变化了 12%, 即 AR 对  $\beta$  的影响作用不大。虽然本次风洞实验研究没有测定  $\beta$ , 但是  $\beta$  和  $Z_0$  都是植被与气流间相互作用的反映, 相对于 Crawley 的实验结果, 本次实验结果表明, AR 对植被周围以及植被间的气流的形成有显著的影响。

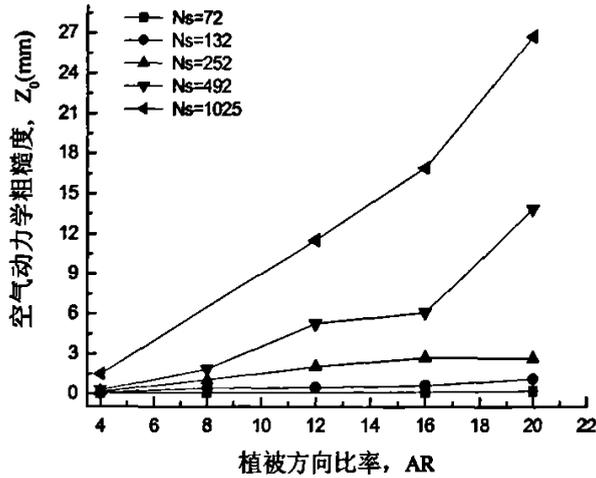


图 3-6 粗糙元方向比率与地表空气动力学粗糙度之间的关系

表 3-1 空气动力学粗糙度与粗糙元方向比率回归分析结果(回归方程:  $Z_0=a+b*AR^c$ )

$N_s(n \cdot m^{-2})$	a	b	c	$R^2$
72	0.022	0.0005	1.92	0.98
132	0.008	0.142	1.42	1
252	-3.12	1.87	0.83	0.86
492	0.656	0.004	2.73	0.82
1025	0.096	0.13	1.77	1

### 3.2.3 密实植被高度与间距比对空气动力学粗糙度的影响

图 3-7 给出了空气动力学粗糙度与植被高度/间距比间的关系。由图可以看出,  $S_h=0.05$ ,  $Z_0=0.0252mm$ , 当  $S_h$  增大到 0.2 时,  $Z_0=0.143mm$ , 增加约 6 倍, 可见,  $Z_0$  随着  $S_h$  的增大而增大, 并且当  $S_h>1.0$  时, 随着  $S_h$  的增加, 地表空气动力学粗糙

度  $Z_0$  急剧增加。Lee 等<sup>[37]</sup>在风洞中以  $2 \times 2 \text{cm}$  的立方体为模拟粗糙元，研究粗糙元特征对植被间气流形成的影响，结果发现，当  $S_h < 0.28$  时，气流主要以单独粗糙流存在，植被对边界层的气流没有显著的影响； $S_h > 0.44$ ，气流以顶部掠流存在，介于两者之间为相互影响流<sup>[37]</sup>。植被对气流的影响，即植被的空气动力学特性以空气动力学粗糙度来反映。由图 3-7 可以看出，在  $S_h < 0.28$  时，随着  $S_h$  的增大， $Z_0$  的增加趋势比较平缓，此时植被周围或植被间形成单独粗糙流，当  $S_h > 0.28$  左右时， $Z_0$  随着  $S_h$  的增大而增加，但并不如 Lee 等实验结果所发现，当  $S_h > 0.44$  时，气流以顶部掠流形式出现，空气动力学粗糙度不再随  $S_h$  的增大而增大，这主要是因为，Lee 的实验粗糙元模型是以错列形式分布的，而本文风洞实验的模型是以均一形式排列，不同的排列方式对气流的影响作用不同。

由粗糙元的密度、高度/间距比和方向比率与地表空气动力学粗糙度回归关系式的指数可以看出，高度与间距比相对于密度和方形比率对地表空气动力学的影响程度大，接下来以依次方向比率、密度。

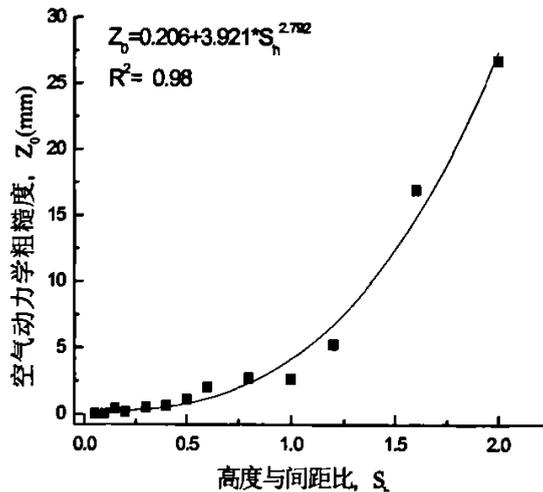


图 3-7 空气动力学粗糙度与粗糙元的高度/间距比率之间的关系

### 3.2.4 孔隙植被孔隙率、高度和密度对空气动力学粗糙度的影响

从图 3-8 可以看到植被高度和孔隙度对空气动力学粗糙度的双重影响，一方面，空气动力学粗糙度随着高度增加；另一方面，随着高度增加，植被孔隙率对空气动力学粗糙度的影响愈显著，且孔隙率对空气动力学粗糙度影响呈现相反的趋势。当孔隙率分别为 0.55 和 0.75 时，空气动力学粗糙度明显低于  $P=0$  的密实粗糙元，例如对于高度  $h=5$  的植被，当植被孔隙度  $P=0.75$  时，其空气动力学粗糙  $Z_0=1.32\text{mm}$ ，

而密实粗糙元的空气动力学  $Z_0=3.77\text{mm}$ ，植被的空气动力学粗糙是  $P=0$  的密实粗糙元的 35%；当孔隙度减小到  $P=55\%$ ，植被的空气动力学粗糙度只有密实粗糙元的 81%，而当孔隙度进一步减小到 15% 时， $Z_0$  达到 4.95mm，是孔隙率  $P=75\%$  空气动力学粗糙度的 3.74 倍，是密实植粗糙元的空气动力学粗糙度的 130%。

一般认为，在其他条件相同情况下密实粗糙元的空气动力学粗糙度大于具有一定孔隙度的植被粗糙元，本实验结果表明情况不完全是这样。对此可以做粗略解释的是：植被孔隙度较低情况下可能意味着茂密枝条，这无形之中增加了植被与气流的有效接触面积即增大了有效的密度，相应地提高了植被的空气动力学粗糙度，高孔隙度的情况与此相反。这个分析只是从植被孔隙度的几何性质推测了其空气动力学粗糙度的影响，植被孔隙度如何影响气流结构并进而影响空气动力学粗糙度还需要进一步的研究。

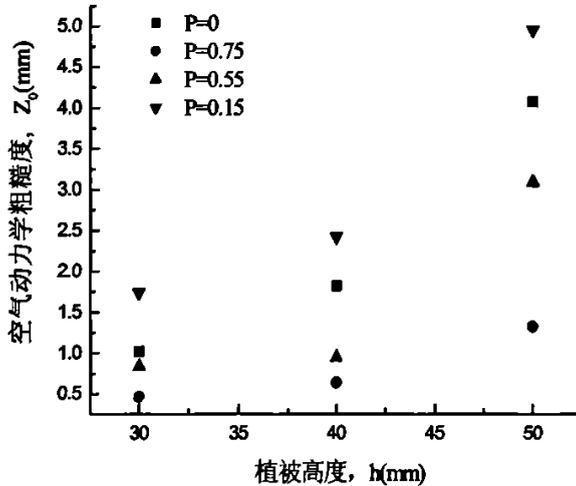


图 3-8 孔隙植被地表空气动力学粗糙度与孔隙率之间的关系

空气动力学粗糙度与孔隙植被密度之间的关系见图 3-9。由图可以看出，当植被密度  $\lambda=0.0315$ ，地表空气动力学粗糙度  $Z_0=0.46\text{mm}$ ，当  $\lambda=0.178$  时， $Z_0=4.95\text{mm}$ ，是  $\lambda=0.0315$  植被地表空气动力学粗糙度的 10.7 倍，说明随着植被密度的增大，孔隙植被地表的空气动力学粗糙度随之增大的，但也存在不一致的情况，如  $\lambda=0.0945$ ， $P=55\%$  的孔隙植被地表的  $Z_0=3.09\text{mm}$ ，而与此植被接近密度  $\lambda=0.1068$ ， $P=15\%$  的植被地表的  $Z_0$  却等于 1.736mm，两者相差接近 1.8 倍，这可能是由于植被的孔隙率特征所导致的。这也说明对于孔隙植被，如果仅用植被的密度， $\lambda$  来表征植被的结构特征所反映植被覆盖地表空气动力粗糙度已不再合适，必须附加植被的孔隙率特

征。在具有相同  $\lambda$  的情况下，孔隙植被地表空气动力学粗糙度  $Z_0$  远大于  $P=0$  的密实植被的  $Z_0$ ，如  $\lambda=0.042$ ，孔隙植被的  $Z_0=0.634\text{mm}$ ，是密实植被的 2 倍。这对生态环境建设也具有重要意义，可以优先考虑使用灌木类植被作为防风固沙的材料。由图 3-10 可以看出孔隙植被的无量纲粗糙度  $Z_0/h$  和  $\lambda$  之间的变化关系与 Marticarena 给出的经验关系较一致。 $\lambda < 0.1$  时， $Z_0/h$  随着  $\lambda$  的增大而线形增大， $\lambda > 0.1$ ， $Z_0/h$  将维持在 0.05 左右，不再线形增大，此时再增大  $\lambda$ ，对于  $Z_0$  的增大作用不大。

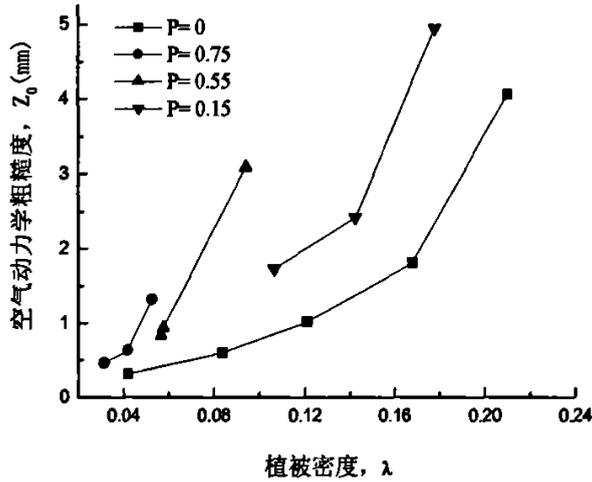


图 3-9 空气动力学粗糙度( $Z_0$ )与孔隙植被密度( $\lambda$ )之间的关系

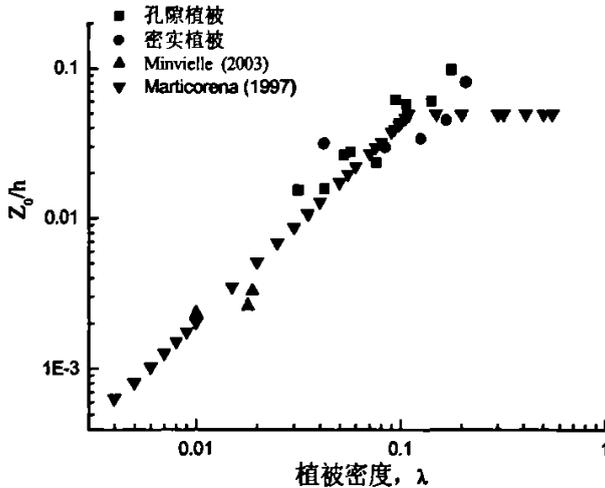


图 3-10 无量纲粗糙度( $Z_0/h$ )与孔隙植被密度( $\lambda$ )间的关系

### 3.3 小结

本章首先分析了不同结构特征植被地表的风速廓线特征，然后分析了植被的密

度, 方向比率、高度与间距比和孔隙率等结构特征对地表空气动力学粗糙度的影响。得到的主要实验结论有:

- 1) 随着植被密度的增大, 植被高度以下风速急剧减小。风速廓线明显的分为两层, 即上层的惯性亚层和下层的粗糙亚层。惯性亚层风速廓线基本遵循对数廓线规律, 而粗糙亚层风速廓线具有随机性特征。植被直径较大时, 植被高度以下风速接近零, 形成大范围的尾流区。植被具有孔隙时, 由于植被周围和植被中间存在复杂的扰流和回流, 植被高度以下的风速沿高度变化不大。
- 2) 密实植被的密度、高度与间距比和方向比率对植被地表的空气动力学粗糙度都有影响, 但高度与间距比对地表空气动力学粗糙度影响程度较强, 接下来依次为方向比率、密度。
- 3) 当密实植被的密度  $\lambda \geq 0.11$  时, 无量纲粗糙度  $Z_0/h$  的值不像已有研究者指出的将维持在一个常量 (0.05), 而是继续增大, 但增加趋势相对于  $\lambda < 0.11$  时的  $Z_0/h$  的增加趋势有所减缓。  $Z_0/h$  与  $\lambda$  的线形回归关系为 
$$\frac{Z_0}{h} = 0.557\lambda - 0.01, (F_{2, 21}=553.1, P<0.0001)。$$
- 4) 孔隙率对孔隙植被地表空气动力学粗糙度有着显著的影响。随着孔隙率的减小, 地表空气动力学粗糙度随之增大, 当孔隙率减小 80% 时, 孔隙植被地表空气动力学度增加 3.7-3.8 倍。在相同直径和高度时, 密实粗糙元的空气动力学粗糙度不一定大于具有一定孔隙率的植被粗糙元。

## 4 植被结构特征和空气动力学粗糙度对沙粒起动的影响

### 4.1 裸沙的空气动力学粗糙度对起动摩阻风速的影响

实测的裸沙的空气动力学粗糙度为  $10^{-4}$  mm, 5 次测定沙粒的起动风速的平均值是  $8.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 标准偏差 0.221, 起动摩阻风速  $0.25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 标准偏差 0.023。本次实测裸沙的起动摩阻风速与 Marticorena 的模式模拟结果基本一致, 说明目前关于光滑沙质地表的空气动力学粗糙度对起动摩阻风速的影响机制的认识是比较清楚的。对比董治宝等<sup>[59]</sup>测定  $250 \mu\text{m}$ — $400 \mu\text{m}$  粒级沙粒的起动风速为  $7.59 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 起动摩阻风速为  $0.41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可以看到, 本实验沙样的主要组分与董治宝的样品一致, 但因为是这里样品属于混合样品导致测定结果偏小。

### 4.2 密实植被的结构特征和空气动力学粗糙度对起动摩阻风速的影响

#### 4.2.1 植被密度对沙粒起动风速的影响

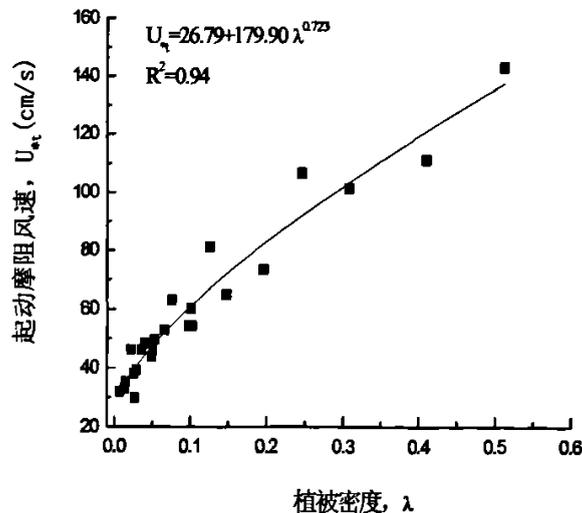


图 4-1 沙粒的起动摩阻风速 ( $U_{*t}$ ) 与植被密度 ( $\lambda$ ) 之间的回归关系

图 4-1 可以看到随着粗糙元密度的增大, 起动摩阻风速相应的增大, 大体上当

$\lambda < 0.025$ ,  $U_{*t}$  在  $30 \sim 40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间, 当  $\lambda$  在  $0.025 \sim 0.1$  之间,  $U_{*t}$  在  $40 \sim 60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  之间当  $\lambda$  在  $0.1 \sim 0.3$  之间,  $U_{*t}$  在  $60 \sim 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 即  $\lambda > 0.3$ , 沙粒很难起动而发生风蚀了。有研究者指出<sup>[20]</sup>, 当植被密度  $\lambda > 0.15$ , 地表起动摩擦风速  $U_{*t} > 100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 然而本文实验中, 只有当植被密度大于  $0.3$  时, 起动摩擦风速才大于  $100 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Lancaster 等<sup>[45]</sup>在 Owen 湖的风沙运动实验结果也与本研究相似。

#### 4.2.2 植被的高度与间距比对沙粒起动摩擦风速的影响

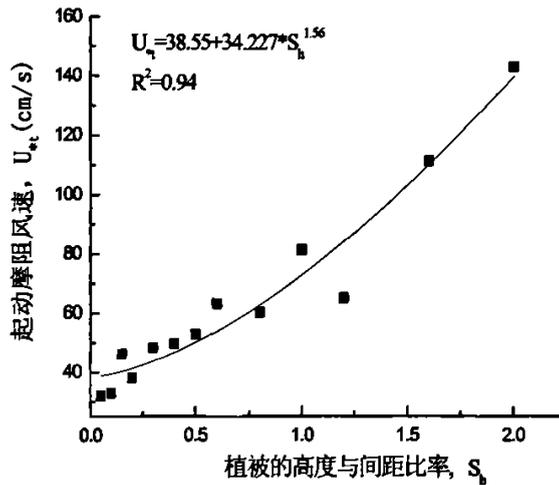


图 4-2 起动摩擦风速 ( $U_{*t}$ ) 与粗糙元高度/间距 ( $S_h$ ) 之间的关系

密实植被的高度与间距比对沙粒起动摩擦风速的影响见图 4-2。由图可以看出, 随着高度与间距比的增大, 植被覆盖地表沙粒的起动风速也随之增大。拟和回归方程中的指数为  $1.5$ , 确定系数为  $0.94$ , 说明植被的高度与间距比对沙粒起动摩擦风速有着显著的影响。

比较沙粒起动摩擦风速与植被密度的回归方程和起动摩擦风速与高度/间距的回归方程中指数可以发现, 植被的高度/间距比较密度对沙粒起动摩擦风速影响程度大, 这与它们对地表空气动力学的影响程度是相同的。

#### 4.2.3 空气动力学粗糙度对起动摩擦风速的影响

由图 4-3 和 4-4 可以看出, 随着空气动力学粗糙度的增大, 起动摩擦风速也随之增大,  $Z_0 = 0.0252 \text{ mm}$  时,  $U_{*t} = 31.95 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 当  $Z_0$  增大到  $26.78 \text{ mm}$ ,  $U_{*t}$  增大  $4.5$  倍, 达到  $143.21 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。有关研究认为<sup>[28]</sup>, 当粗糙度大于  $1 \text{ mm}$ , 地表就可以被有效的保护, 此时的  $U_{*t} > 100 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 而本文实验结果表明, 当  $Z_0 > 1 \text{ mm}$ ,  $U_{*t}$  却并未超过

$100 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 如  $Z_0=1.04\text{mm}$  时,  $U_{*t}=46.23 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 此时的  $\lambda=0.0504$ , 并且 Lancaster<sup>[45]</sup> 的研究结果发现,  $Z_0=10.78 \text{ mm}$  时,  $U_{*t}=75.29 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 也小于  $100 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

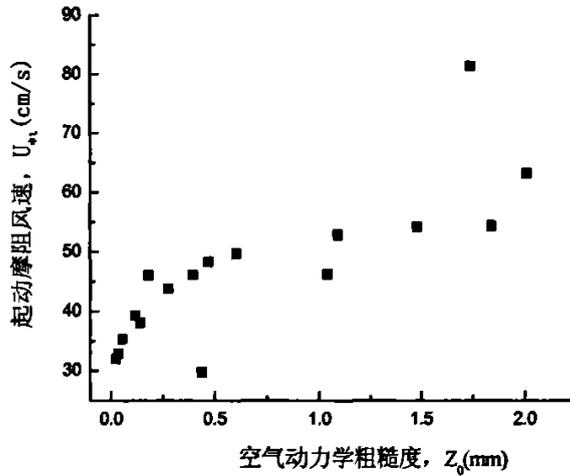


图 4-3 起动摩擦风速 ( $U_{*t}$ ) 与空气动力学粗糙度 ( $Z_0 < 2.0\text{mm}$ ) 之间的关系

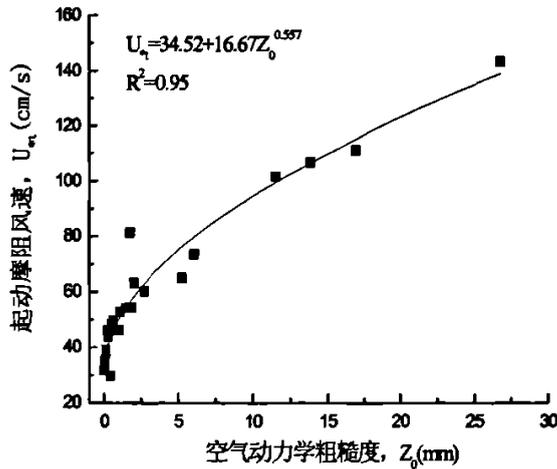


图 4-4 起动摩擦风速 ( $U_{*t}$ ) 与空气动力学粗糙度 ( $Z_0$ ) 之间的回归关系

Gillite<sup>[28]</sup>根据 B.Marticorena 等<sup>[32]</sup>所给出的  $U_{*t}$  与  $Z_0$  关系得出当  $Z_0 > 1\text{mm}$  时,  $U_{*t}$  与  $Z_0$  呈指数关系递增, 据此 Mansell<sup>[60]</sup>进一步给出了  $U_{*t}$  与  $Z_0$  给出的函数关系式:

$$U_{*t} = 0.30e^{7.22 \times (Z_0)} \quad (4-1)$$

而本文风洞实验结果的  $U_{*t}$  与  $Z_0$  的拟和回归关系为:

$$U_{*t} = 34.52 + 16.67Z_0^{0.557} \quad (F_{2,21}=180.15, P < 0.001) \quad (4-2)$$

回归方程在 95% 的置信度水平时, 可确定系数为 0.95, 说明  $U_{*t}$  与  $Z_0$  具有较好的拟合关系, 经 F 检验, 方程具有显著性意义。此回归方程与 Mansell 给出的方程存在差异, 这可能是由于实验模型得尺度不同而引起的。

### 4.3 孔隙植被结构特征和空气动力学粗糙度对起动摩阻风速的影响

#### 4.3.1 孔隙率对起动摩阻风速的影响

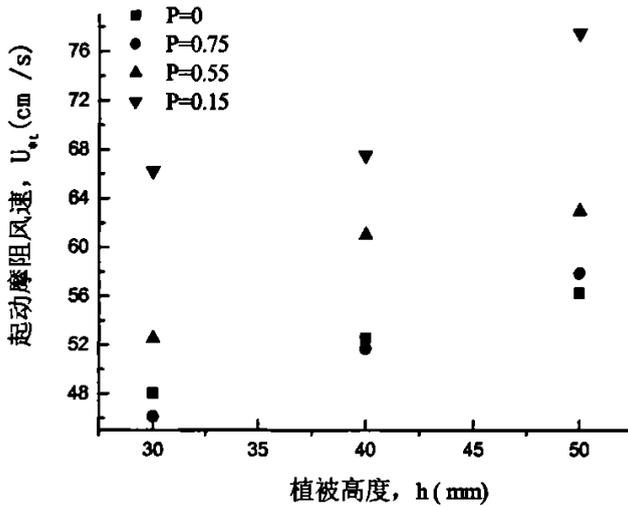


图 4-5 植被孔隙率与起动摩阻风速之间的关系

图 4-5 为植被孔隙度与起动摩风速间的关系。由图可以看出, 当孔隙度  $P=55\%$  时起动摩阻风速  $U_{*t}$  比  $P=75\%$  的植被地表平均增加了 14%; 当孔隙度继续减小到  $P=15\%$  时,  $U_{*t}$  比  $P=75\%$  植被地表的  $U_{*t}$  增加了 36%, 比  $P=55\%$  的增加了 20%, 说明随着孔隙度的减小, 植被地表沙粒起动摩阻风速随之增大。比较具有相同直径和高度的植被和密实粗糙元的起动摩阻风速可以发现, 当植被的孔隙率为 55% 和 15% 时, 植被覆盖地表的  $U_{*t}$  大于密实粗糙元, 说明植被的孔隙率减小到一定程度, 约小于 75% 时就可以获得比密实植被高的地表起动摩阻风速。植被覆盖地表的起动摩阻风速没有表现出随植被高度递增或递减的明显关系。

孔隙粗糙元与密实粗糙元地表沙粒起动摩阻风速的不同是由于两种粗糙元对地表气流的影响不同。植被具有孔隙来流气流可以通过孔隙而流过, 而对于密实植被, 气流则由于植被的阻挡而扰向植被两侧, 使密实粗糙元前缘和两侧气流加速, 加速区的沙粒就容易起动。随着植被孔隙度的减小, 对气流的阻力增大, 吸收了更多风的动量, 从而减小了到达地表的风的剪切力, 使地表沙粒就更难于起动, 增大

了地表的起动摩阻风速<sup>[31, 61]</sup>。

#### 4.3.2 密度对地表沙粒起动摩阻风速的影响

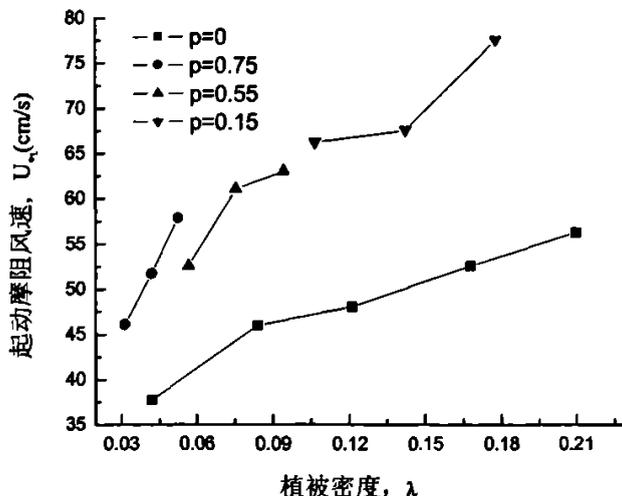


图 4-6 沙粒起动摩阻风速 ( $U_{*t}$ ) 与孔隙植被密度 ( $\lambda$ ) 之间的关系

孔隙植被地表沙粒起动摩阻风速与植被密度间的关系见图 4-6。由图可以看出, 随着植被密度的增大, 孔隙植被地表沙粒起动摩阻风速随之增大, 最大密度  $\lambda=0.178$  的地表沙粒起动摩阻风速比最小密度  $\lambda=0.031$  的地表的 ( $U_{*t}=46.11\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 增大了 68%。由图还可以看出, 在植被密度相同的情况下, 孔隙植被地表沙粒的起动摩阻风速远大于  $P=0$  的密实植被地表的, 植被的密度  $\lambda=0.042$ , 孔隙植被地表沙粒起动摩阻风速  $U_{*t}=51.72\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而密实植被地表沙粒的  $U_{*t}=37.72\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 只有孔隙植被地表沙粒起动摩阻风速的 72.9%。分析说明相对  $P=0$  的密实植被, 孔隙植被在较低密度时就可以增大地表沙粒起动摩阻风速。此结果对于生态环境建设也具有重要意义。生态环境建设中可以较多的使用灌木, 但是由于密实直立植被, 如乔木, 其具有较多的枝和叶, 可以在较高的高度消减风的动量, 使到达地表的风动量减少, 从而可以使树干两侧的所形成风加速区的速度减小, 在一定程度上提高了地表沙尘的起动摩阻风速。所以, 对于生态建设, 应根据当地实际合理的选择灌木和乔木或者两者相结合。

#### 4.3.3 空气动力学粗糙度对起动摩阻风速的影响

由图 4-7 可以看出, 随着空气动力学粗糙度的增加, 沙粒起动摩阻风速随之增加, 约当  $Z_0=0.8\sim 1.5\text{mm}$ ,  $U_{*t}=50\sim 60\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Z_0=1.5\sim 5\text{mm}$ ,  $U_{*t}=65\sim 80\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从图 4-8 还可以看出, 当  $Z_0 > 1 \text{ mm}$  后, 随着地表空气动力学粗糙度的增加, 起动摩

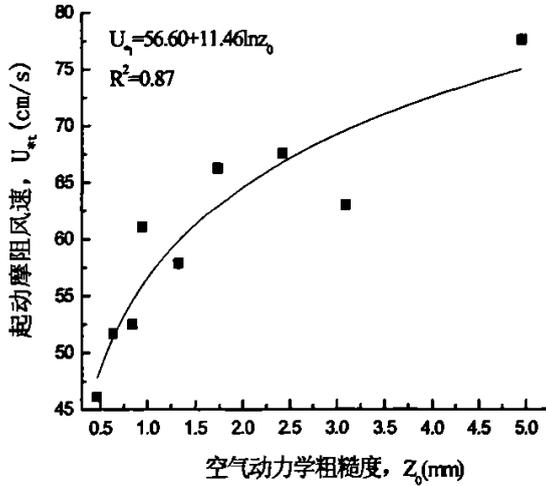


图 4-7 孔隙植被空气动力学粗糙度与地表沙粒起动摩阻风速之间的关系

阻风速增加趋势减缓。地表空气动力学粗糙度与沙粒起动摩阻风速的回归关系可确定系数为 0.87, 说明两者具有较好的拟合关系。此回归方程和密实植被地表的空气动力学粗糙度与其覆盖地表沙粒起动摩阻风速的回归方程不同, 进一步说明孔隙植被和密实植被对沙粒起动摩阻风速的影响不同。

#### 4.4 小结

本章分析了植被的密度、高度/间距比和孔隙率特征对地表沙粒起动摩阻风速的影响, 并在第二章的基础上分析了不同结构特征地表空气动力学粗糙度对地表沙粒起动摩阻风速的影响。得到的主要结论有:

- 1) 密实植被的密度和高度/间距比对地表沙粒起动摩阻风速的影响程度不同, 高度/间距比对地表沙粒起动摩阻风速的影响程度大于密度对地表沙粒起动摩阻风速的影响。
- 2) 对于密实植被, 只有当植被密度  $\lambda > 0.3$  时, 地表的起动摩阻风速  $U_{*i}$  才大于  $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 对应地表的空气动力学粗糙度  $Z_0 > 13 \text{ mm}$ 。而不是以前所认为的当  $\lambda > 0.15$  或  $Z_0 = 1 \text{ mm}$  时,  $U_{*i}$  就大于  $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。地表空气动力学粗糙度  $Z_0$  与相应地表沙粒起动摩阻风速  $U_{*i}$  的回归关系为:

$$U_{*i} = 34.52 + 16.67 Z_0^{0.557}, \quad (F_{2,21} = 180.15, P < 0.001).$$

- 3) 孔隙率变化对孔隙植被地表沙粒起动摩阻风速有着显著的影响。当植被孔

隙率由 75%减小到 15%(减少 80%)时,地表沙粒的起动摩阻风速增大 36%。在具有相同直径和高度时,孔隙率  $P=75\%$  的孔隙植被和  $P=0$  密实植被地表沙粒的起动摩阻风速近似相等。

- 4) 当孔隙植被与密实植被的密度基本相同时,孔隙植被地表沙粒起动摩阻风速是密实植被的 1.37 倍,所以,在描述孔隙植被对地表沙粒起动摩阻风速的影响时,不仅要考虑植被的密度,还需考虑植被的孔隙率特征。
- 5) 随着孔隙植被地表空气动力学粗糙度的增加,地表沙粒起动摩阻风速随之增加。当  $Z_0 > 1\text{mm}$  时,孔隙植被地表沙粒起动摩阻风速随地表空气动力学粗糙度增加趋势比  $Z_0 < 1\text{mm}$  的平缓。孔隙植被地表空气动力学粗糙度与地表沙粒起动摩阻风速的回归关系为:  $U_{*t} = 56.60 + 11.46 \ln Z_0$  ( $F_{2,7}=45.27$ ,  $P < 0.001$ )。

## 5 结束语

### 5.1 研究的主要结论

本文在环境风洞中模拟大气边界层，用圆柱木棍和塑料管粗糙元模拟密实植被，用细铁丝粗糙元模拟孔隙植被。通过拟和不同结构特征（密度、方向比率、高度/间距比和孔隙率）粗糙元床面的风速廓线，获得空气动力学粗糙度，研究植被结构特征对地表空气动力学粗糙度的影响，在此基础上，通过拟和不同结构特征粗糙元覆盖床面沙粒起动时的风速廓线，计算沙粒起动摩阻风速，研究植被结构和植被覆盖床面空气动力学粗糙度对沙粒起动的影响。主要研究结论如下：

- 1) 当密实粗植被的密度  $\lambda \geq 0.11$  时，无量纲  $Z_0/h$  的值不像已有研究者指出的将维持在一个常量 (0.05)，而是继续增大，但增加趋势相对于  $\lambda < 0.11$  时的  $Z_0/h$  的增加趋势有所减缓。 $Z_0/h$  与  $\lambda$  的线形回归关系为  $\frac{Z_0}{h} = 0.557\lambda - 0.01$ ，( $F_{2, 21}=553.1$ ,  $P<0.0001$ )。
- 2) 孔隙率对孔隙植被地表空气动力学粗糙度有着显著的影响。随着孔隙率的减小，地表空气动力学粗糙度随之增大，当孔隙率减小 80% 时，孔隙植被地表空气动力学粗糙度增加 3.7-3.8 倍。在相同直径和高度时，密实粗糙元的空气动力学粗糙度不一定大于具有一定孔隙率的植被粗糙元。
- 3) 密实植被的密度和高度/间距比对地表沙粒起动摩阻风速都有影响，但是，高度/间距比对地表沙粒起动摩阻风速的影响程度大于密度对地表沙粒起动摩阻风速的影响。
- 4) 对于密实粗糙元植被，只有当植被密度  $\lambda > 0.3$  时，地表的起动摩阻风速  $U_{*t}$  才大于  $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，对应地表的空气动力学粗糙度  $Z_0 > 13 \text{ mm}$ 。而不是以前所认为的当  $\lambda > 0.15$  或  $Z_0 = 1 \text{ mm}$  时， $U_{*t}$  就大于  $100 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。地表空气动力学粗糙度  $Z_0$  与相应地表沙粒起动摩阻风速  $U_{*t}$  的回归关系为：  
$$U_{*t} = 34.52 + 16.67Z_0^{0.557}$$
，( $F_{2,21}=180.15$ ,  $P<0.001$ )。
- 5) 孔隙率变化对孔隙植被地表沙粒起动摩阻风速有着显著的影响。当植被孔隙率由 75% 减小到 15% (减少 80%) 时，地表沙粒的起动摩阻风速增大 36%。在具有相同直径和高度时，孔隙率  $P=75\%$  的孔隙植被和  $P=0$  的密实植被地表沙粒起动摩阻风速近似相等。

- 
- 6) 当孔隙植被与密实粗糙元的密度基本相同时, 孔隙植被地表沙粒起动摩阻风速是密实植被的 1.37 倍, 所以, 在描述孔隙植被对地表沙粒起动摩阻风速的影响时, 不仅要考虑植被的密度, 还需考虑植被的孔隙率特征。

## 5.2 进一步研究展望

本文主要利用不同结构特征植被床面沙粒的起动摩阻风速, 研究植被结构对沙粒起动的影响, 这主要是间接方面的分析研究。在以后的工作中可以引入粒子图像测速(PIV)技术分析植被周围的气流流场以及沙粒起动的过程, 从直接的角度揭示植被结构对沙粒起动的影响机制。另外, 本文是室内模拟实验研究, 其结果可能与野外自然地表存在一定的差异, 为了能够较准确地反映自然地表的真实情况, 野外自然环境下植被结构对沙粒起动的影响有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] I. N.Soklik, O.B.Toon. Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols[J]. *Nature*, 1996, 380:681~683.
- [2] T.L.Zhao, S.L.Gong, X.Y.Zhang, et al. An assessment of dust emission schemes in modeling east Asian dust storms[J]. *J.Geophys Res.*,2006,D05S90, doi:10.1029/2004JD005746.
- [3] 王宏, 石广玉, T.Aoki, 等. 2001年春季东亚-北太平洋地区沙尘气溶胶的辐射强迫[J]. *科学通报*, 2004, 49(19):1993~2000.
- [4] T.D.Jickells, Z.S.An, K.K.Andersen, et al. Global Iron Connection Between Desert Dust, Ocean Biogeochemistry, and Climate[J].*Science*, 2006,308:67~70.
- [5] 韩永翔, 宋连春, 赵天良, 等. 北太平洋地区沙尘沉降与海洋生物兴衰的关系[J]. *中国环境科学*, 2006,26(2):157~160.
- [6] 韩永翔, 赵天良, 宋连春, 等. 北太平洋地区春季粉尘的空间分布特征—观测及模拟[J]. *中国环境科学*, 2005,5(3):257~261.
- [7] L.A. Remer. Dust, fertilization and sources[J]. *Environ Res. Lett*, 2006,011001: 1~2.
- [8] H.N. Lee, Y.Igarashi, M.Chiba, et al. Global Model Simulations of the Transport of Asian and Sahara Dust: Total Deposition of Dust Mass in Japan[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2006, 169: 13~7166.
- [9] Y CHEN, Q Cai, H Tang. Dust storm as an environment problem in North China[J]. *Environment Management*, 2003, 32(4): 413~417.
- [10] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因和治理对策[J]. *地理学报*, 2000, 55(05):513~521.
- [11] 刘洪利, 牛涛, 侯青, 等. 2006年春季东亚地区沙尘暴过程分析[A]. 见:中国气象学会2006年年会“大气成分与气候、环境变化”分会场论文集.
- [12] 史培军, 严平, 高尚玉. 我国沙尘暴灾害及其研究进展[J]. *自然灾害学报*, 2000,9(3):71~77.
- [13] 吴焕忠. 我国沙尘灾害述评及减灾对策[J]. *农村生态环境*, 2002,18(2):1~5,23.
- [14] 孙业乐, 庄国顺, 袁惠, 等. 2002年北京特大沙尘暴的理化特性及其组份来源分析[J]. *科学通报*, 2004,49(4):40~346.
- [15] C Liu, C Young, Y-C Lee. Influence of Asian dust storms on air quality in

- Taiwan[J]. *Science of the Total Environment*, 2006,368:884~887
- [16] 魏爱丽, 孟紫强, 牛瑞芳, 等. 沙尘暴细颗粒物对人体外围血淋巴细胞微核形成的影响[J]. *环境科学学报*, 2006,26(3): 509~514.
- [17] 刘颖茹, 杨持, 朱志梅, 等. 我国北方草原沙漠化过程中土壤碳、氮变化规律研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(9):1604~1606.
- [18] Y Shao, Y Yang, J Wang. Northeast Asian dust storms:Real-time numerical prediction and validation[J]. *J.Geophys Res.*, 2003(D22),4691, doi: 10.1029/2003JD003667.
- [19] S C Alfaro, A Gaudichet, Laurent Gome,et al. Modeling the size distribution of a soil aerosol produced by sandblasting[J]. *J.Geophys Res.*, 102(D10):11239~11249.
- [20] Y Shao, M R.Raupach, J F.Leys. A model for predicting Aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region[J]. *Aust. J.soil Res*,1996,34:309~342.
- [21] 梅凡民. 中国北方粉尘释放通量的模拟与观测—以巴丹吉林沙漠戈壁地区、阴山北部干草原农垦区和草原牧区为例[D]. 西安:中国科学院地球环境研究所, 2004.
- [22] 庞华基, 盛立芳, 丁锋, 等. 东亚沙尘暴研究进展及问题[A]. 见:中国气象学会 2006 年年会“大气成分与气候、环境变化”分会场论文集.
- [23] B. Marticorena, G. Bergametti, D. Gillette, et al. Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and arid areas of the United States[J]. *J.Geophys Res.*,1997,(D19):23277~23287.
- [24] Y Shao. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity[J]. *J.Geophys Res*, 2000(D17): 22437~22443.
- [25] 慕青松, 苗天德, 马崇武. 对不均匀沙起动理论及戈壁风蚀层形成动力学[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(3):268~273.
- [26] 慕青松, 苗天德, 马崇武. 对均匀沙流体起动风速的研究[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2004,40(1):21~25.
- [27] 程旭. 风沙两相流中沙粒起动规律的实验[D]. 北京:清华大学, 2003.
- [28] D A.Gillette. A Qualitative Geophysical Explanation for“Hot Spot” Dust Emitting Source Regions.Contr[J]. *Atmos.Phy.*, 1999, 72 (1): 67~77.
- [29] D.A. Gillette, J.Adams, D. Muhs, et al. Threshold friction velocities andrupture

- soil for the input of soil particles into the air.[J]. *J.Geophys Res.*,87(11): 9003~9015.
- [30] H Lu. An Integration Wind Erosion Modelling System With Emphasis on Dust Emission and Transport.Australia[D]. Sydney: The Uniniversity of New South Wales,1999.
- [31] J.K.Leeders. Wind Erosion Control with Scattered Vegetation in the SahelianZone of Burkina Faso.Wageningen[D]. Wageningen ,Wageningen University and Research Centre, 2006.
- [32] B. Marticorena, G. Bergrametti. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme[J]. *J. Geophys Res*: 1995(D8): 16415~16430.
- [33] B. Marticorena, G.Bergrametti, B. Aumont.Modeling the atmospheric dust cycle 2.Simulation of Saharan dust sources[J]. *J.Geophys Res.*,1997(D4):4378~4404.
- [34] 刘小平. 若干典型床面空气动力学特征参数的实验研究[D]. 兰州:中国科学院寒区旱区环境工程研究所, 2001.
- [35] 董飞, 刘大有, 贺大良. 风沙运动的研究进展和发展趋势[J]. *力学进展*, 1995, 25(3):263-383.
- [36] 董治宝, D 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.
- [37] S. A,Wofle, W. G Nickling. The Protective role of sparse vegetation in wind erosion[J].*Progress in Physical Geography*.1993,17(1):50~68.
- [38] F. Minvielle, B. Marticorena, D. A. Gillette, et al. Relationship between the Aerodynamic Roughness Length and Roughness Density in Case of Low Roughness Density[J]. *Environmental Fluid Mechanics*,2003,3:249~267.
- [39] Z Dong, S Gao, D W. Fryrear.Drag coefficient,roughness length and zero-plane displacement height as disturbed by artificial standing vegetation[J].*Journal of Arid Environments*,2001,49:485~505.
- [40] M.R.Raupach, D.A.Gillette, J.F.Leys. The Effects of Roughness Elements on Wind Erosion Threshold[J]. *J.Geophys Res.*,1993,98,3032~3029.
- [41] D. M. CrawleyA. Wind-Tunnel Investigation of Drag Partition[D]. Canada: University of Guelph, 2000.
- [42] D.M.Crawley, W.G.Nicking Drag partition for regularly-arraye drough surfaces[J].

- Boundary-Layer Meteorology 2003, 107: 445~468.
- [43] S.C.Alfaro, L.Gomes. Improving the large-scale modeling of the saltation flux of soil particles in presence of nonerodible elements[J]. J.Geophys Res.,1995 (D8): 16375~16366.
- [44] J MacKinnon, Clow D, Tigges K, et al. Comparison of aerodynamically and model-derived roughness lengths ( $Z_0$ ) over diverse surfaces, central Mojave Desert, California, USA [J]. Geomorphology, 2004, 63:103-113.
- [45] Lancaster N, Baas A. Influence of vegetation cover on sand transport by wind: field studies at Owens Lake, California [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998,23:69-82.
- [46] 梅凡民, 王涛, 张小曳, 等. 有关粉尘释放模型的应力分配模式存在问题的讨论[J]. 地球科学进展, 2006, 21(4):424~429.
- [47] J King, W G Nickling. Representation of vegetation and other nonerodible elements in aeolian shear stress partitioning models for predicting transport threshold[J]. J. Geophys Res, 2005, F04015, doi: 10. 1029/2004JF000281.
- [48] 石雪峰. 北方干旱区风沙活动与植被条件的耦合关系[D]. 北京:中央民族大学, 2005.
- [49] 王元, 张鸿雁. 大气表层与风沙现象相似参数的研究[J]. 中国沙漠, 1994, 14(1): 10~16.
- [50] 屈建军, 刘贤万, 雷加强, 等. 尼龙网栅栏防沙效应的风洞模拟实验[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3):276~280.
- [51] 董治宝, 陈渭南, 董光荣. 植被对风沙土风蚀作用的影响[J]. 环境科学学报, 1996,16(4):437~443.
- [52] J A. Gillies, W G Nickling, J King. Aeolian sediment transport through large patches of roughness in the atmospheric inertial sublayer[J]. J. Geophys Res, 2006,110,F02006, doi:10.1029/2005 JF000434.
- [53] 李振山, 陈广庭. 粗糙度研究的现状与展望 [J]. 中国沙漠, 1997, 19(3):99~102.
- [54] H.Brad Musick, Steven M.Traujillo, C. Randall Truman. Wind -Tunnel Modelling of the Influnce of Vegetation Structure on Saltation Threshold [J]. Eearth Surface Processes and Landforms, 1996,21:5896~05.
- [55] 刘小平, 董治宝. 湿沙的风蚀起动风速实验研究[J]. 水土保持学报, 2002,

- 22(2):1~4,61.
- [56] 移小勇, 赵哈林, 李玉霖, 等. 科尔沁沙地不同风沙土的风蚀特征[J]. 水土保持学报, 2006,20(2):10~13,53.
- [57] 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.
- [58] G.S.Okin, D.A.Gillette, J.E.Herrick. Multi-scale controls on and consequences of Aeolian processes in landscapes change in arid and semi-arid environment[J].Journal of Arid Environments,2006,65:253~275.
- [59] Z Dong, X Liu, H Wang, et al. Aeolian sand Transport: a wind tunnel model[J].Sedimentary Geology, 2003,161:71~83.
- [60] G E.Mansell, SLau, J Russell. Fugitive Wind Blown Dust Emissions and Model Performance Evaluation Phase II[R]. ENVIRON International Corporation 101 Rowland Way.Novato,CA 92507.15 April 2005.
- [61] 王蕾, 王志, 刘连友. 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.

# 攻读学位期间发表的学术论文目录

1. 朱海波, 梅凡民, 陈敏. 推行清洁生产技术, 实现陕北能源化工基地可持续发展. 陕西环境, 2006, 03:35-37.
2. 朱海波, 梅凡民, 陈敏. 西安市工业燃煤汞排放清单的建立. 环境保护科学(已录用)
3. 朱海波, 梅凡民, 陈敏. 西安市工业燃煤汞排放清单. 第十三届全国大气环境学术会议论文集. 2006, 444-447.
4. 梅凡民, 王涛, 张小曳, 朱海波. 阴山以北沙漠化地区表土的起动摩阻风速. 纺织高校基础科学报, 2006, 19(03): 264-270.
5. 陈敏, 程刚, 李艳, 朱海波. 微电解法处理磷化废水的实验研究. 环境科学与管理, 2006, 31(06):100-102.

# 致谢

论文至此，也预示着三年的研究生学习生活即将结束。三年前，在导师梅凡民博士的指引下，我进入到一个相对于自己来说比较陌生的学科领域。由于对这方面知之甚少，所以，开始学习时，疑惑颇多，但经导师的耐心讲解、细心传授以及和导师的热烈讨论，终于，慢慢的熟悉、理解和掌握了自己的学习和研究内容。导师严谨的治学态度、活跃的学术思想和孜孜以求的科学精神令我崇敬。在中科院寒旱所做实验期间，更得到导师的言传身教，深深地感受和体验到导师的科学思想和高尚品德。论文的选题、实验设计、风洞实验和撰写过程中始终得到导师精心指导。在此，向导师致以崇高的敬意和深深的谢意！

衷心感谢导师全攀瑞教授，教研室周飞博士等在课题选题和论文撰写过程中提出的宝贵建议。老师的宝贵建议得以使我的研究思路更加明晰，实验方案更加完善。感谢同职老师，于翔老师在大气气溶胶采样以及实验室分析过程中的支持与指导！

论文的实验是在中科院寒区旱区环境工程研究所完成的。研究所的赵爱国高级工程师和张正偲博士给予很多的指导和协助。在此，向赵爱国高级工程师和张正偲博士表示深深的谢意！

岁月如歌，和陈敏在工程大学一起学习已近7年，可谓同窗好友。能和陈敏本科同班，研究生又同师门，真是万分的荣幸。陈敏的聪明才智令我敬仰，陈敏的积极进取和勤奋好学的精神是我学习的榜样。感谢陈敏在7年的学习和生活过程中的热情指导与帮助！

感谢在校学习期间给予我指导和帮助的老师 and 同学！

衷心感谢我的父母和兄弟姐妹在我求学过程中一如既往地关爱和支持，家人的关爱使我不断成长，家人的支持使我不断的前进。

论文工作得到国家重点基础研究发展计划（973计划）(2006CB4003701)、中国博士后科学基金(2005037163)和陕西省教育厅自然科学研究专项(06JK288)的联和资助。