

白子怡,董治宝,肖锋军,等.基于野外移动风洞实验的沙打旺植被空气动力学特征研究[J].中国沙漠,2024,44(3):1-8.

基于野外移动风洞实验的沙打旺植被 空气动力学特征研究

白子怡,董治宝,肖锋军,李超,南维鸽,邵天杰,
孔玲玲,马慧蓉,池政

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

摘要: 空气动力学粗糙度(Z_0)和摩阻速度(u^*)是反映下垫面与大气相互作用的空气动力学参数,植被对 Z_0 和 u^* 的调节起着重要作用。通过在野外种植沙打旺植被,设置4种植被盖度和3种植被布局,利用移动风洞进行原位测试。结果表明:(1)随着风速增大, Z_0 和 u^* 存在负相关,即随着 u^* 增大 Z_0 呈线性减小趋势;相同输入风速下,随着植被盖度的增加, Z_0 和 u^* 存在正相关,两者增加趋势符合对数函数形式。(2) Z_0 与植被盖度符合对数函数变化规律,随着植被盖度增大 Z_0 出现阈值现象。(3)不同植被布局的 Z_0 为两行一带>交叉布局>一行一带。(4)从空气动力学角度提出沙打旺植被盖度为30%,布局为两行一带布局时,防风蚀效能较强。

关键词: 空气动力学粗糙度;摩阻速度;植被盖度;植被布局;移动风洞

文章编号: 1000-694X(2024)03-001-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00102

中图分类号: K903

文献标志码: A

0 引言

空气动力学粗糙度(Z_0)是反映下垫面与大气相互作用空气动力学特征的重要参数,表征对风流运动的扰动和摩擦效应。摩阻速度(u^*)指风流通过地表粗糙表面时受到阻力作用的速度,是气流对床面剪切力的反映。二者是研究地表与大气间能量、物质交换过程中首先要确定的基本参数,也是影响土壤风蚀的重要参数^[1-3]。

土壤风蚀是近地表土壤与气流之间相互作用的结果,植被是抑制土壤风蚀的重要措施^[4],自从半个世纪多前 Bagnold^[5]建立起风沙物理学后,植被对空气动力学粗糙度(Z_0)影响的探究一直是重要的课题^[6],Wolfe等^[7]认为植被能增大地表 Z_0 、提高 u^* 以降低风速来阻挡风沙流对地表的风蚀作用。室内风洞研究表明,增加植被盖度对增大 Z_0 和降低土壤风蚀率具有显著作用^[8-9]。张春来等^[10]通过室内风洞实验发现, Z_0 和 u^* 的增大对土壤风蚀具有显著影响。赵永来等^[11-13]对内蒙古农田的野外风洞实验表

明, Z_0 随植被盖度的增加而增大,提高 Z_0 对土壤风蚀发生具有明显抑制作用。石雪峰等^[14]通过对室内风洞实验仿真(植被模型)发现,植被的不同排列方式对 Z_0 的作用具有显著差异。这些研究的重点多数是植被对土壤抗风蚀的影响,对 Z_0 的变化以及其与 u^* 关系的研究还不足^[15-17]。室内风洞实验的模型植物不可能完全代表真实植被,植物的生理特性及土壤真实环境难以被有效复制^[18]。

为此,本实验应用移动风洞野外原位测试方法,为实现单一变量控制,在野外种植沙打旺植被,设置4种植被盖度(10%、20%、30%和40%)和3种植被布局(一行一带、两行一带和交叉布局),以测试植被覆盖地表的空气动力学特征变化规律,以期干旱与半干旱区的土壤风蚀防治提供技术支持。

1 实验设计

1.1 研究区概况

研究区位于中国陕西榆林市榆阳区灯炉滩村

收稿日期:2023-06-13; 改回日期:2023-07-13

资助项目:陕西省科技厅项目(2021JCW-17);国家自然科学基金面上项目(42171004,42071009);国家自然科学基金重点项目(41930641)

作者简介:白子怡(1994—),女,陕西榆林人,博士研究生,研究方向为风沙地貌学。E-mail: zybai@snnu.edu.cn

通信作者:董治宝(E-mail: zbdong@snnu.edu.cn)

(38°23'N、109°23'E),距榆林市中心约60 km,海拔约1 000 m,年平均气温约10℃,年降水量200~300 mm(雨量分配不均,春冬干旱频发,秋季暴雨集中),处于毛乌素沙地的南缘,气候干燥以及大量的裸露沙地导致了较严重的风蚀现象,尤其春季,最大风力可达10级^[19],《全国防沙治沙规划(2021—2030年)》将该区域定为优先防沙治理区。

1.2 实验样地布置

实验选择植被是斜茎黄芩(俗称沙打旺, *Astragalus adsurgens*),沙打旺是多年生草本植物(豆科,黄芩属),是当地典型(常见)的植被,被视为一种重要的防风蚀沙漠植被,被广泛应用于荒漠化土地的生态修复和防沙治沙工作中。因此,选择沙打旺作为实验对象。

沙打旺种植生长时间是2022年3月15日至2022年7月18日,沙打旺风洞实验是2022年7月18日至2022年7月24日,历时总计约5个月。

实验样地中,植被盖度设置为10%、20%、30%和40%,植被布局设置为一行一带、两行一带和交叉布局,植被高度分为10 cm和20 cm,共计24块样地,其中样地大小是1.5 m×10 m,实验段(实验床面)植被分布范围为0.5 m×7.2 m。如图1~2所示,本次风洞实验段床面设置有24种,每种床面分别进行4种风速实验,当来流风速为7、9、11、13 m·s⁻¹时(该测点位于实验段前端),对应变频器的输入频率约为18、22、27、32 Hz。

实际种植过程中,存在补苗和生长高度不一致现象,由此超出10 cm的植物高度由剪刀去除。沙打旺高10 cm时,平均冠幅约17 cm×15 cm,且沙打旺有丛生现象,计算单株面积在0.5 m×7.2 m的实验段上,按植被盖度10%、20%、30%、40%来配置风洞实验的植被株数,分别为16、32、48、64株,其对应实际中植被盖度约为400、800、1 200、1 600株·hm⁻²等4种密度。植被盖度指垂直方向植被的投影面积在试验区的面积占比,以植被盖度10%为例,计算方法是:4行×0.17 m×0.5 m(每行垂直投影面积)/(0.5 m×7.2 m(试验段总面积))。

1.3 野外风洞及布置

陕西师范大学移动风洞^[20]为开路式直流吹气式风洞,由动力段、整流段和实验段3部分组成,全长11 m,实验段长7.2 m,高0.6 m,宽0.5 m,风速0~27 m·s⁻¹,由Y500-X0075G3变频器控制,实现了风

速连续可调,配套电机为Y132S-2型三相异步电动机,由常柴ZS1115型标定功率16.2 kW的柴油发电机供电。风洞结构设计为3段可拆卸式,由主体段、实验段(3.6 m)和实验段加长段(3.6 m)组成,各段之间可以实现灵活拆卸,拆卸后装载在风洞专用车厢中进行远距离运输(图2)。本实验进行3次裸地测试,均显示风速与高度的分布具有良好的对数关系,其拟合曲线的 R^2 均值(3次裸地测试均值)可达0.99,符合近地表自然风况的特征,满足实验要求。

实验中采用热线风速仪^[21]进行风速测量,采用交流220 V供电,共有6个测量探头,其中5个测点布置于风洞尾部的中心,距离地面垂直高度分别为1、5、10、20、30 cm,一个测点布置在实验段前端距离地面垂直高度为30 cm处,作为来流风速(指示风速),其中风速7 m·s⁻¹吹10 min,风速9 m·s⁻¹吹5 min,风速11 m·s⁻¹吹3 min,风速13 m·s⁻¹吹1 min,数据采集频率为每1 s,文中所用数据为该吹蚀时段内的风速均值。

2 研究方法

当地表有植被覆盖时,普朗特-冯·卡曼的风速廓线方程为^[16]:

$$u_z = \frac{u^*}{\kappa} \ln \frac{z-d}{Z_0} \quad (1)$$

式中: u_z 为高度 z 处的风速; u^* 为摩阻速度(或剪切速度); κ 为卡曼常数,一般取值为0.4; d 为零风速平面位移高度; Z_0 为空气动力学粗糙度。前人将风速廓线测定结果应用最小二乘法做相关分析,得到了广泛的应用^[1,7]。其方程表示为:

$$u_z = a + b \ln z \quad (2)$$

式中: u_z 是高度为 z 处的风速,令 $u_z=0$ 即可得出:

$$Z_0 = \exp(-a/b) \quad (3)$$

结合式(1)~(3),可得出:

$$u^* = \kappa b \quad (4)$$

本次风洞实验中计算植被高度为10 cm的沙打旺的下垫面空气动力学粗糙度(Z_0)和摩阻速度,其是由垂直高度10、20、30 cm上的风速与其对数高度拟合确定。

3 结果与分析

3.1 空气动力学粗糙度(Z_0)与摩阻速度(u^*)

3.1.1 风速对 Z_0 和 u^* 的影响

从图3可知,在3种布局(一行一带、两行一带

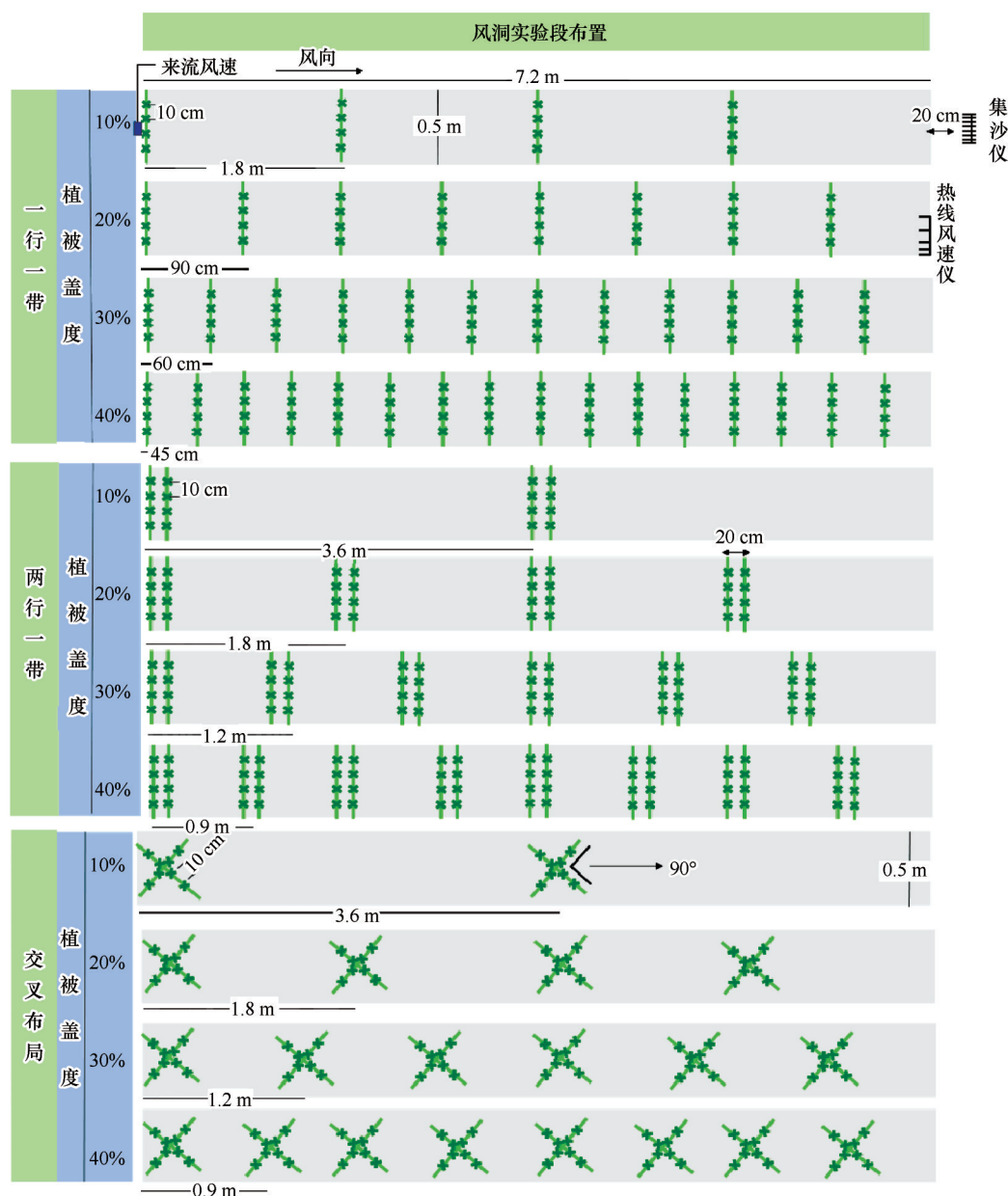


图1 风洞实验段布置概况

Fig.1 Overview of wind tunnel experimental section

和交叉布局)和4种盖度(10%、20%、30%和40%)下,随着风速增大,摩阻速度(u^*)均呈增大趋势,主要原因是当地表风速增大时,风流在通过植被地表时会受到更多的摩擦力和阻力作用,导致 u^* 的增加。空气动力学粗糙度(Z_0)随着风速增大而呈减小趋势,植被的茎秆在风中倒伏是引起 Z_0 随风速的增加而减少的主要原因^[2]。从流场角度来看,随着风速的增加风洞内部湍流增强,使垂直高度上的风速梯度增加,在一定程度上降低了植被的挡风效果,压缩了风速为零的高度,造成风速的零平面位移高度下降,导致 Z_0 随风速的增加而减少。因此,随着风

速增大,植被的影响会导致空气动力学粗糙度的减小,这同时也反映了植被对 Z_0 的干扰反应更为复杂、也更强烈^[5]。这与赵永来等^[11]、张克存等^[15]得出的结论一致。

从图3还可发现,在交叉布局中当植被盖度为10%时,随着风速增大(从 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 到 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), Z_0 出现先增大趋势。这表明植被的存在对风流产生了复杂的影响,一方面,植被的茎秆在风中倒伏会减小空气动力学粗糙度,另一方面,植被增加了地表的粗糙性,风速的增大增加了植被与风流之间的摩擦作用,可导致 Z_0 增大,为此产生了上述现象。

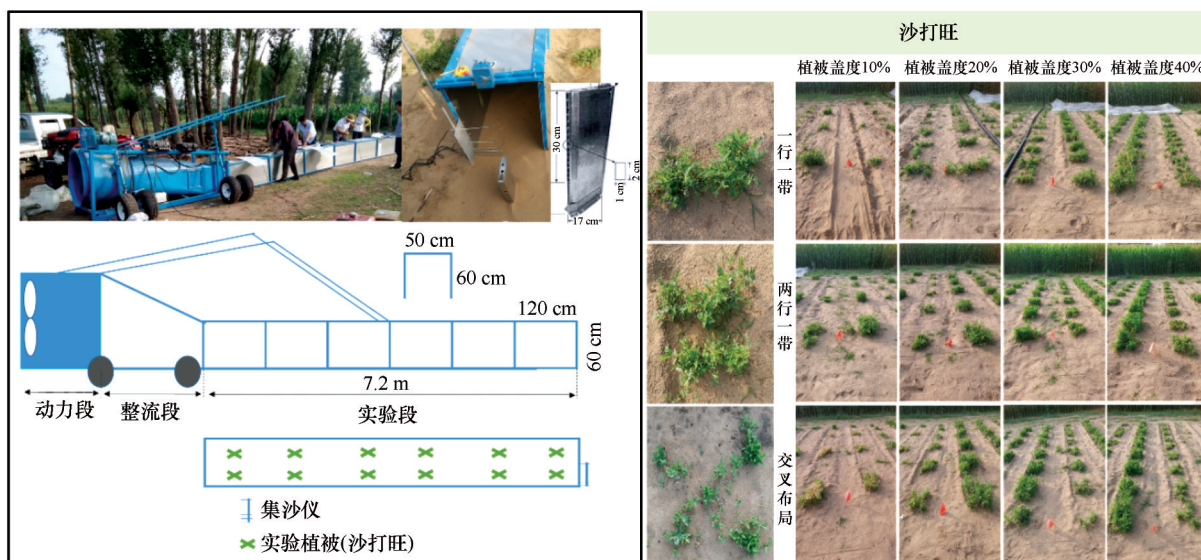
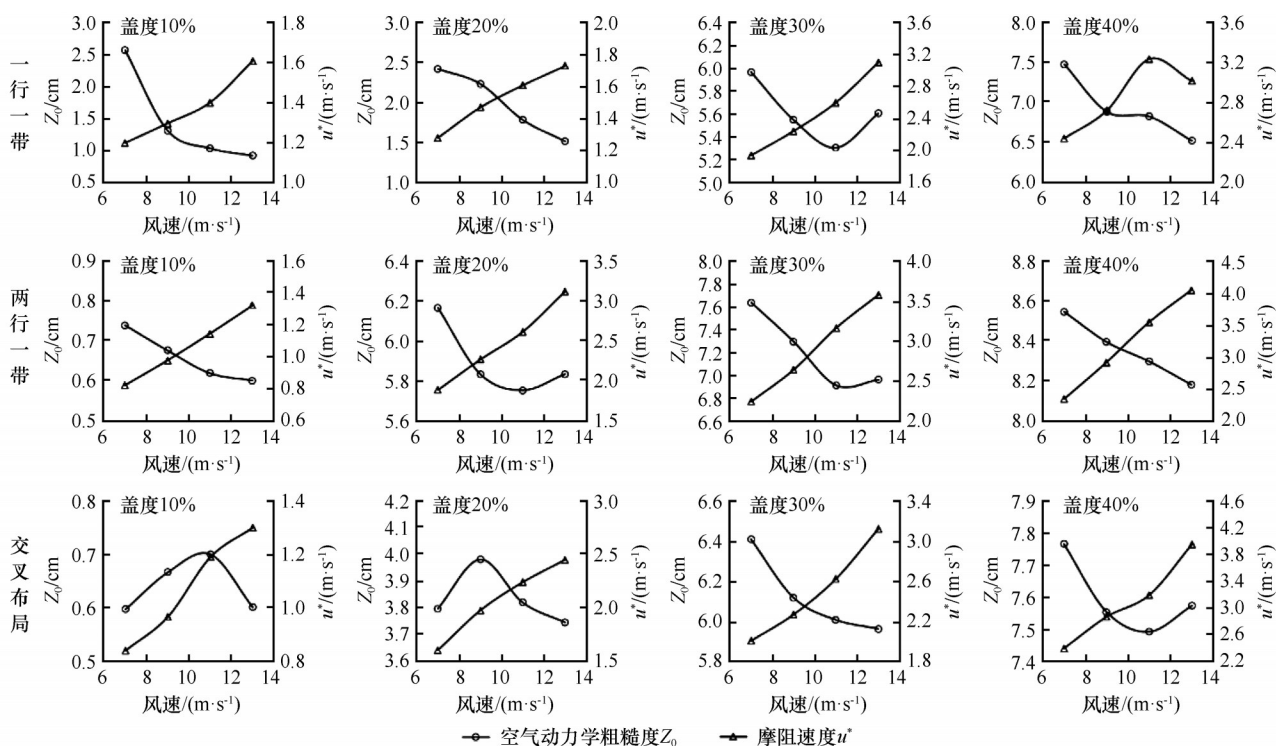


图2 实验设备与实验样地概况

Fig.2 Overview of experimental equipment and experimental places

图3 不同风速下 u^* 与 Z_0 (3种布局,4种盖度)Fig.3 Variation of u^* and Z_0 under different wind speeds (three layouts, four coverage)

3.1.2 植被盖度对 Z_0 和 u^* 的影响

从图4可知,在4种风速(7、9、11、13 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)下,随着植被盖度增大,摩擦速度(u^*)均呈增大趋势,空气动力学粗糙度(Z_0)也呈增大趋势。主要原因是当地表植被盖度增大时,相同风速在通过植被地表时会受到更多的摩擦力和阻力作用,表现为 Z_0 和 u^* 呈增大趋势。而随着风速增大,在 Z_0 和 u^* 两因素中,植被茎秆的倒

伏使得边界气流层切应力增大,伴随着摩擦力增大摩擦速度增大,导致 Z_0 和 u^* 出现增幅降低现象。

3.1.3 Z_0 与 u^* 的关系

从图5和图6可知,风速一定条件下, Z_0 和 u^* 存在正相关,且符合对数函数变化规律(相关系数 R^2 均大于0.9)。在植被盖度相同的情况下, Z_0 和 u^* 存在负相关,随着 u^* 增大, Z_0 呈线性递减趋势。

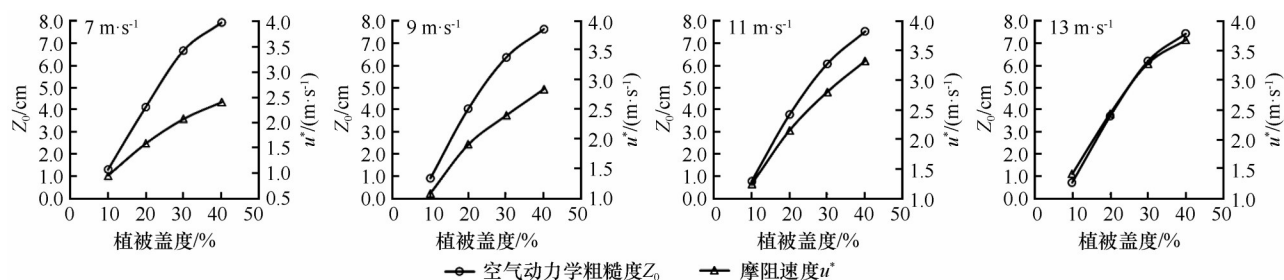


图4 不同植被盖度下空气动力学粗糙度与摩擦速度(4种风速)

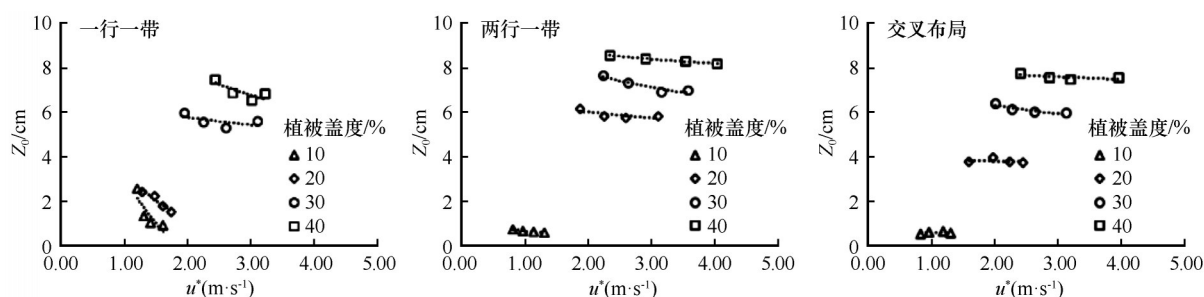
Fig.4 Variation of Z_0 and u^* under different vegetation coverage (four wind speeds)

图5 不同植被盖度下摩擦速度与空气动力学粗糙度(3种布局,4种风速)

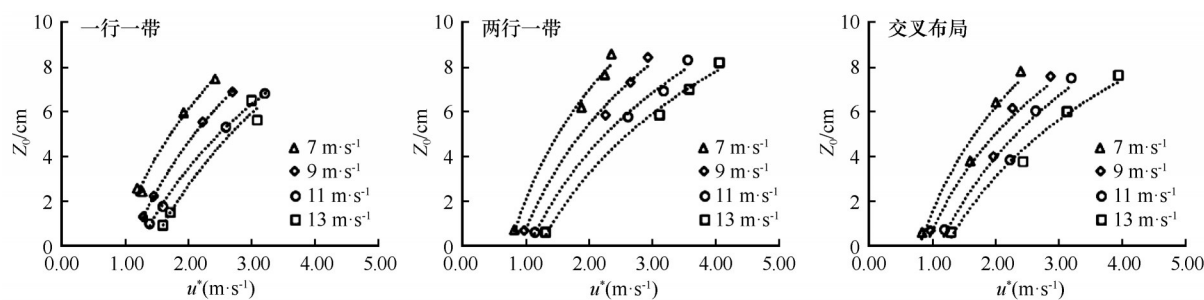
Fig.5 Variation of u^* and Z_0 under different vegetation coverage (three layouts, four wind speeds)

图6 不同风速下摩擦速度与空气动力学粗糙度(3种布局,4种盖度)

Fig.6 Variation of u^* and Z_0 under different wind speeds (three layouts, four coverage)

在风沙物理学研究中,研究者们更多关注空气动力学粗糙度(Z_0),由于 Z_0 对风沙过程的直接影响和调节作用更为显著,导致摩擦速度(u^*)作为一个参数被考虑,但相对而言,对空气动力学粗糙度的研究更为广泛、复杂且具有更广泛的应用领域^[11]。

3.2 植被盖度对空气动力学粗糙度的影响

从图7中可发现,3种植被布局和4种风速下, Z_0 均随植被盖度的增大而增大,且两者的变化规律符合对数函数形式(表1),这表明其增长率随植被盖度的增大而逐渐减小并最终趋于零。为此,下垫面空气动力学粗糙度有一临界值(阈值),这一规律对于指导半干旱区的植被恢复具有十分重要的现实意义。在上述规律的指导下,可以对干旱与半干旱地区植被与 Z_0 之间的关系进行科学研究,寻找最佳

的植被覆盖范围和 Z_0 的结合点,提出最佳防风蚀植被密度,以有效解决最小植被生物量与土壤水分胁迫以及防止风蚀之间的矛盾。

沙打旺植被盖度达到约30%时,其空气动力学参数(Z_0)的增长率较小(图8),由此认为植被盖度为30%是沙打旺的临界点(阈值),提出沙打旺的防风蚀最佳植被盖度约为30%。

3.3 植被布局对空气动力学粗糙度的影响

从图9可知,沙打旺植被的空气动力学粗糙度(Z_0)两行一带>交叉布局>一行一带,这表明两行一带的防风蚀效能更好,其次是交叉布局,最后是一行一带。

主要原因是植被通过改变气流的流动方向降低风速,通过与气流的摩擦消耗风动量,同时降低

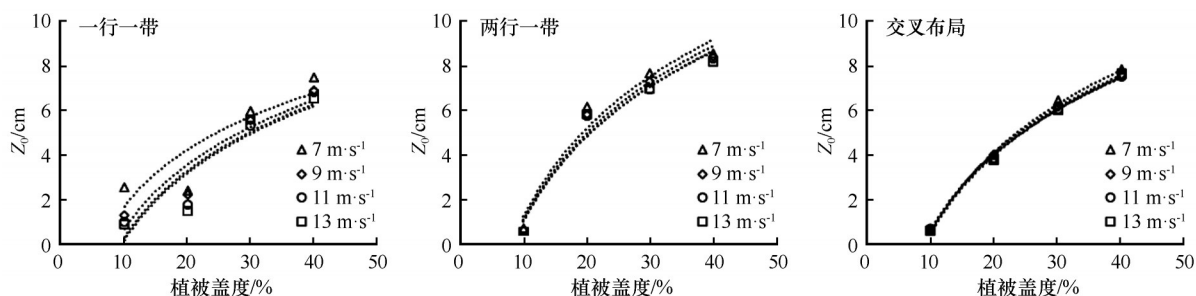


图7 空气动力学粗糙度随植被盖度的变化情况(3种布局,4种风速)

Fig.7 Variation of aerodynamic roughness with vegetation coverage (three layouts, four wind speeds)

表1 空气动力学粗糙度与植被盖度的拟合函数

Table 1 Fitting function of aerodynamic roughness and vegetation coverage

风速/(m·s ⁻¹)	一行一带	两行一带	交叉布局
7	$y = 3.6385\ln(x) + 10.099$ $R^2 = 0.7574$	$y = 5.6949\ln(x) + 14.364$ $R^2 = 0.9573$	$y = 5.2472\ln(x) + 12.557$ $R^2 = 0.9951$
9	$y = 4.1391\ln(x) + 10.239$ $R^2 = 0.8839$	$y = 5.5931\ln(x) + 13.987$ $R^2 = 0.968$	$y = 4.9812\ln(x) + 12.093$ $R^2 = 0.9995$
11	$y = 4.2854\ln(x) + 10.201$ $R^2 = 0.8627$	$y = 5.4816\ln(x) + 13.664$ $R^2 = 0.9661$	$y = 4.9067\ln(x) + 11.905$ $R^2 = 0.998$
13	$y = 4.3141\ln(x) + 10.149$ $R^2 = 0.8387$	$y = 5.8139\ln(x) + 14.036$ $R^2 = 0.95$	$y = 5.3915\ln(x) + 12.475$ $R^2 = 0.9998$

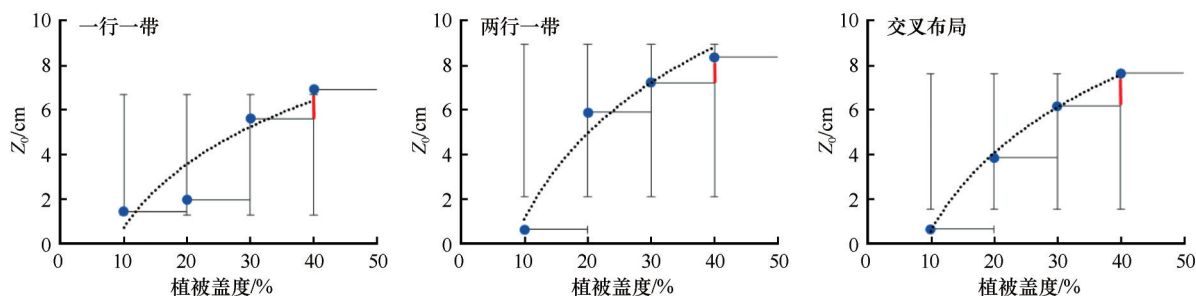


图8 空气动力学粗糙度随植被盖度的变化情况(3种布局,4种风速均值)

Fig.8 Variation of aerodynamic roughness with vegetation coverage (three layouts, four mean wind speeds)

作用在下垫面上的剪切力等来达到保护下垫面的目的。

当植被布局为两行一带时,两行植被之间的距离较窄,气流可以快速被连续两次切割阻挡,由于摩擦消耗的风动量多,降低近地表风速的能力就更强,从而使下垫面的零平面位移高度升高, Z_0 随之变大。Liu等^[22]得出二排防护林比单排防护林的风速降低效果更好;杨文斌等^[23]、徐高兴等^[24]证明了低覆盖度灌木的行带式分布的防风固沙效果最佳且两行一带式配置优于一行一带配置。本文以草本植物为实验对象,发现两行一带比一行一代带布局对风速影响更强烈。这与前人在乔灌尺度得到的结论一

致。相比一行一带,植被布局为交叉布局时,其具有较大的空间分布,植被迎风面与气流接触的有效面积比植被为单行排列时大,气流摩擦消耗的风动量多,降低近地表风速的能力更强,而且交叉布局与主流风向具有倾斜角度,容易改变主风速风向形成湍流,使得风速在交叉植被之间的速度下降,从而使下垫面的零平面位移高度升高, Z_0 随之变大。

在中国北方(干旱与半干旱区)实际应用中,交叉分布、双排(两行)防护林和沙障更为常见,因野外现场风向不稳定,植物会遭受沙粒的磨蚀和被沉积物掩埋的风险,从而可能导致植物死亡,双排分布防护林可用于风向变化不大、水分和养分充足的

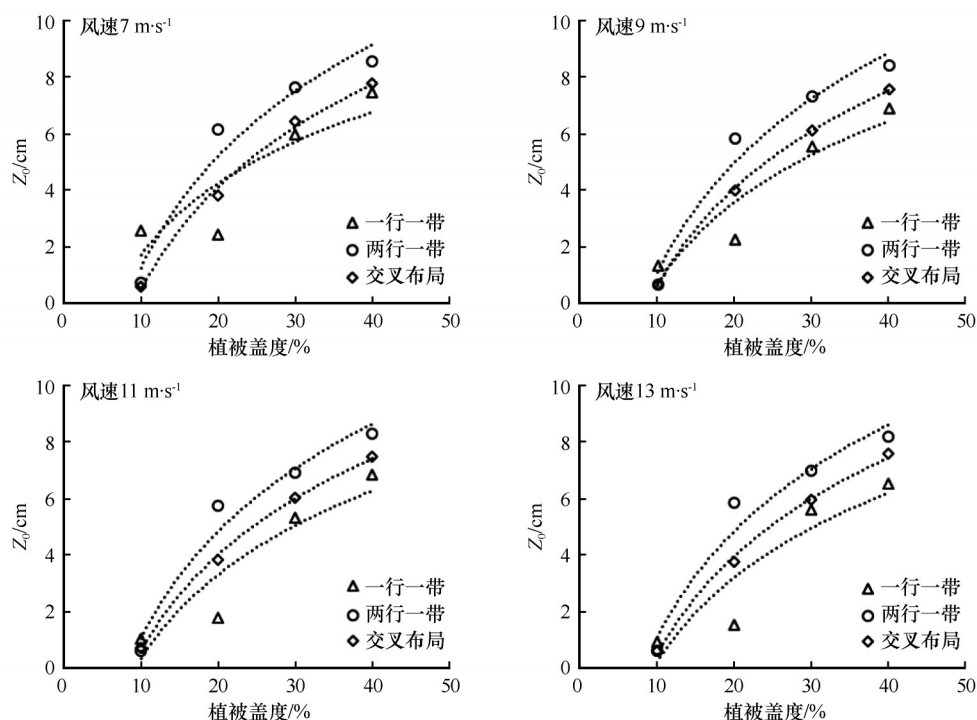


图9 不同布局下的空气动力学粗糙度随植被盖度的变化(4种风速)

Fig.9 Variation of aerodynamic roughness with vegetation coverage under different layouts (four wind speeds)

环境^[22]。本次沙打旺的野外风洞实验结果表明,两行一带布局的 Z_0 明显大于交叉布局和一行一带布局,因此在野外实际应用中,应根据当地的地形和风向选择两行一带布局,以达到最佳的防风效果。

4 结论

通过在野外种植沙打旺植被,设置4种植被盖度和3种植被布局,利用移动风洞进行原位测试(4种风速下),由风速廓线计算得到空气动力学粗糙度(Z_0)和摩阻速度(u^*),结果表明:①随着输入风速增大, u^* 和 Z_0 存在负相关,表现为随着 u^* 增大 Z_0 呈线性减小趋势;相同输入风速下,随着植被盖度的增加, u^* 和 Z_0 存在正相关,两者增加趋势符合对数函数形式。② Z_0 随植被盖度的增大而增大并符合对数函数变化趋势,其增加率随植被盖度的增大而逐渐减小并最终趋于零, Z_0 存在阈值现象。③在植被盖度相同的情况下,不同植被布局的 Z_0 表现为两行一带>交叉布局>一行一带。④从空气动力学角度提出沙打旺植被盖度为30%,布局为两行一带布局时,其防风蚀效能较强。

参考文献:

- [1] 梅凡民,张宁宁,席媛,等.粗糙床面风廓线统一对数区的空气动力学粗糙度及其空间变异特征[J].中国沙漠,2018,38(3):445-454.
- [2] 亢力强,杨智成,张军杰,等.两种柔性植株地表风速廓线特征比较的风洞模拟[J].中国沙漠,2020,40(2):43-49.
- [3] 孙悦超,麻硕士,陈智,等.旱作农田近地表风沙运动与防风蚀效果[J].农业机械学报,2011,31(1):54-58.
- [4] 刘小平,董治宝.砾石床面的空气动力学粗糙度[J].中国沙漠,2003,23(1):40-47.
- [5] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M]. New York, USA: Methuen, 1941: 85-95, 265.
- [6] Dong Z B, Liu X P, Wang X M. Aerodynamic roughness of gravel surfaces[J]. Geomorphology, 2002, 43: 17-31.
- [7] Wolfe S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion[J]. Progress in Physical Geography, 1993, 17(1): 50-68.
- [8] 董治宝,陈渭南,李振山,等.植被对土壤风蚀影响作用的实验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996(2):1-8.
- [9] 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):13-19.
- [10] 张春来,邹学勇,董光荣,等.耕作土壤表面的空气动力学粗糙度及其对土壤风蚀的影响[J].中国沙漠,2002,22(5):66-68.
- [11] 赵永来,麻硕士,陈智,等.残茬覆盖地表空气动力学粗糙度变化规律[J].农业机械学报,2013,44(4):118-122.
- [12] 赵永来,麻硕士,陈智.直立植被抗风蚀性能的测试与评价[J].农机化研究,2007,143(3):107-110.
- [13] 赵永来,麻硕士,陈智.植被覆盖地表的空气动力学粗糙度及对土壤风蚀的影响[J].农机化研究,2007,142(2):36-39.
- [14] 石雪峰,夏建新,吉祖稳.空气动力学粗糙度与植被特征关系的研究进展[J].中央民族大学学报(自然科学版),2006(3):

- 218–225.
- [15] 张克存, 张伟民, 屈建军, 等. 不同砾石盖度戈壁床面动力学特征研究[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 1077–1082.
- [16] 程锋梅, 李生字, 郑伟, 等. 3类典型株型草本植物对沙面风蚀抑制作用的研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1526–1533.
- [17] 吴姗姗, 牛健植, 蔺星娜. 京郊延庆农田保护性耕作措施对土壤风蚀的影响[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 57–67.
- [18] Dong Z B, Luo W Y, Qian G Q, et al. Wind tunnel simulation of the three-dimensional airflow patterns around shrubs[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: F02016.
- [19] 李立国, 赵政才. 中华人民共和国政区大典·陕西省卷(下)[M]. 北京: 中国社会出版社, 2016: 1767–1768.
- [20] 拓宇. 可移动式土壤风蚀风洞的设计与应用[D]. 西安: 陕西师范大学, 2021.
- [21] 李刚, 韩杰, 王帆. 风洞变频调速系统对热线风速仪的影响及解决方法研究[J]. 测控技术, 2022, 41(11): 78–83.
- [22] Liu C, Zheng Z, Cheng H, et al. Airflow around single and multiple plants[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 252: 27–38.
- [23] 杨文斌, 杨红艳, 卢琦, 等. 低覆盖度灌木群丛的水平配置格局与固沙效果的风洞试验[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 2998–3007.
- [24] 徐高兴, 徐先英, 王立, 等. 梭梭不同密度与配置固沙效果风洞模拟试验[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(9): 189–195.

Aerodynamic characteristics of *Astragalus adsurgens* vegetation based on mobile wind tunnel experiment

Bai Ziyi, Dong Zhibao, Xiao Fengjun, Li Chao, Nan Weige, Shao Tianjie,
Kong Lingling, Ma Huirong, Chi Zheng

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Aerodynamic roughness (Z_0) and friction velocity (u^*) reflect the interaction between underlying surface properties and the atmosphere, and vegetation plays an important role in regulating Z_0 and u^* . This experiment was conducted by planting vegetation (*Astragalus adsurgens*) in the field, setting up four vegetation coverage and three vegetation layouts, and using a mobile wind tunnel for field experiments. The experimental results showed that: (1) As the input wind speed increases, there is a negative correlation between Z_0 and u^* , that is, as u^* increases, Z_0 shows a linear decreasing trend; Under the same input wind speed, as vegetation coverage increases, there is a positive correlation between Z_0 and u^* , which conforms to the logarithmic function form. (2) Z_0 follows a logarithmic function variation pattern with vegetation coverage, and as vegetation coverage increases, there is a threshold phenomenon in Z_0 . (3) The size of Z_0 with different vegetation layouts is in the order of two rows > cross layout > one row. (4) From the perspective of aerodynamics, it is proposed that *Astragalus adsurgens* vegetation coverage is 30%, and its wind erosion prevention efficiency is strong when the layout is two rows and one belt.

Key words: aerodynamic roughness; friction velocity; vegetation coverage; vegetation layout; mobile wind tunnel