

白子怡,董治宝,南维鸽,等.植被盖度对风沙流结构及输沙率的影响[J].中国沙漠,2024,44(2):25-34.

植被盖度对风沙流结构及输沙率的影响

白子怡,董治宝,南维鸽,肖锋军,李超,邵天杰,
孔玲玲,刘小楝,梁爱民,池政

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

摘要: 土壤风蚀是全球干旱和半干旱地区生态环境安全的重要威胁。植被通过降低风速和捕获土壤颗粒能够有效降低土壤风蚀发生的风险。目前,人们对于植被控制土壤风蚀的最优格局和盖度的理解仍然有待深入。借助野外移动风洞,测量了地表输沙率和风沙流结构对草本植物沙打旺(*Astragalus adsurgens*)盖度的响应程度。结果表明:(1)当植被盖度较小时,风沙流结构的分布曲线遵循指数函数分布规律,随着植被盖度增大,其曲线形态变化差异大。(2)植被覆盖能够有效地降低土壤输沙率并抬高风沙输移发生的高度。(3)地表空气动力学粗糙度与植被盖度服从对数函数变化规律,其增长率随植被盖度的增大而逐渐减小并最终趋于零,下垫面空气动力学粗糙度存在阈值现象。(4)沙打旺控制土壤风蚀的最佳盖度约为30%,能够有效地抑制20 cm高度以下约90%的风蚀量。

关键词: 植被盖度; 风沙流结构; 空气动力学粗糙度; 沙打旺(*Astragalus adsurgens*); 移动风洞

文章编号: 1000-694X(2024)02-025-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00088

中图分类号: K903

文献标志码: A

0 引言

土壤风蚀是全球干旱与半干旱地区的主要环境问题^[1-2]。植被通过遮盖地表,降低风速和捕获土壤颗粒来削弱风力侵蚀,已得到了广泛的认可^[3-5]。在植被防治土壤风蚀的研究进程中,国内外学者从刚性粗糙元模拟植被到具有柔性的真实植被已开展了很多研究。Abulaiti等^[6]探究柔性和刚性粗糙元对风沙流结构的影响,Liu等^[7]在日本风洞实验中分析不同形状和植被覆盖度的植物模型(圆柱体、圆锥体、倒截锥体)对风速和空气动力学粗糙度的影响,Miri等^[8-10]探索真实植物植被秋英(*Cosmos bipinnatus*)和女贞(*Ligustrum lucidum* Ait)的形态(锋面面积和孔隙率)对风速与输沙量的影响,Kinugasa等^[11]在蒙古模拟牧草不同高度对风蚀量的响应,Suter-Burri等^[12]利用彩色沙观察多年生黑麦草的风沙沉积过程,Bhutto等^[13]探究灌木(白刺、梭梭、沙拐枣、红芪)对风蚀过程的影响。国外学者在植被防治土壤风蚀方面,更侧重植被特征与风速和输沙量之间的定量关系,并且得出植被主要通过植

被形态、密度、高度、排列方式及植株弹性对风蚀有很大贡献^[10,14-15]。而国内学者多集中在从植被盖度视角的风沙流结构,研究植被盖度和风速与风蚀量的定量关系^[16-18],而如何合理配置植被,确定最优防风蚀条件下的植被盖度特征的临界值,目前尚需深入研究^[19],且草本植被盖度对风沙流影响的研究有限,不同植被盖度下的空气动力学粗糙度是土壤防治风蚀理论中仍需深入探讨的重要参数^[19]。

准确测量和预测风成沙规律对于风成沙地貌的演变评估和风成沙灾害的管理非常重要^[20-21]。室内风洞实验的模型植物不可能完全代表自然环境中活植被的有效性,植物的生理特性及土壤真实环境难以复制^[22]。本文利用移动风洞^[23]进行野外原位测试,首次在野外相同受控条件下大量种植沙打旺植被,利用自然环境中土壤、地形、植被等真实特性,促进实验结果更接近实际情况。本研究目的是探索不同植被盖度视角下沙打旺的输沙率与风沙流结构特征,以期确定野外自然环境下最优防风蚀植被盖度特征的临界值,为进一步研究典型干旱地

收稿日期:2023-05-19; 改回日期:2023-06-19

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,研究方向为风沙物理学。E-mail: zybai@snnu.edu.cn

通信作者:董治宝(E-mail: zbdong@snnu.edu.cn)

区土壤风蚀过程制定合理的防风固沙技术提供实践参考。

1 实验设计

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市榆阳区灯炉滩村(38°23'N、109°23'E),距榆林市区约60 km,海拔约1 000 m,年平均气温约10 °C,年降雨量200~300 mm(雨量分配不均,春冬干旱频发,秋季暴雨集中),属于中国北方半干旱地区,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级以上^[24]。对当地的生态环境、农田和人民的生产生活带来了一定的影响和挑战。《全国防沙治沙规划(2021—2030年)》将该区域定为优先防沙治理区^[24],如推进植树造林、沙土固定工程等,以保护当地的生态环境和农业生产。

1.2 实验方案

1.2.1 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),是当地常见的植被,也是抗风蚀的典型沙漠植被,被广泛应用于荒漠化土地的生态修复和防沙治沙工作中。

2022年3月15日种植沙打旺,2022年7月18日至2022年7月24日进行沙打旺风洞实验,历时约5个月。实验样地中,植被盖度设置为10%、20%、30%、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,其中样地大小为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和图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,对应裸地的风洞尾部轴流风速约为8、10、12、14 m·s⁻¹(该测点位于实验段尾部)。

沙打旺实际种植过程中,存在补苗和生长高度不一致现象,超出10 cm的植物高度以剪刀去除。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,其对应实际大范围盖度约为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,其计算方法是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)。

1.2.2 实验设备

陕西师范大学移动风洞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^[23](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,拟合曲线的 R^2 均值可达0.99,符合近地表自然风况的特征,满足实验要求。

1.2.3 实验监测

输沙量测量:实验中采用WITSEG集沙仪(风洞用多路集沙仪)高45 cm,监测高度为30 cm,楔形入口段有15个进沙口(1 cm×2 cm),总输沙率随风速的变化与Lattau和Lattau式方程非常一致,集沙效率约为0.91,基本满足实验要求^[25]。集沙仪放置在风洞尾部中线处,距离风洞尾部边缘中垂线距离20 cm,距离风洞试验段前端7.4 m(图1)。每个实验样地进行4组风速实验,其中来流风速为7 m·s⁻¹吹10 min,9 m·s⁻¹吹5 min,11 m·s⁻¹吹3 min,13 m·s⁻¹吹1 min,每组风速时间到后关闭风机,取走集沙仪,先将其15个集沙盒的沙子装入自封袋,后回实验室用千分位秤测量其质量,每组风速以此往复。本文使用来流风速为9 m·s⁻¹时集沙仪中的风蚀物质量数据,未考虑集沙效率。

风速测量:实验中采用热线风速仪^[26],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),数据采样频率为1 s(图1),文中所用数据为该吹蚀时段内的风速均值。

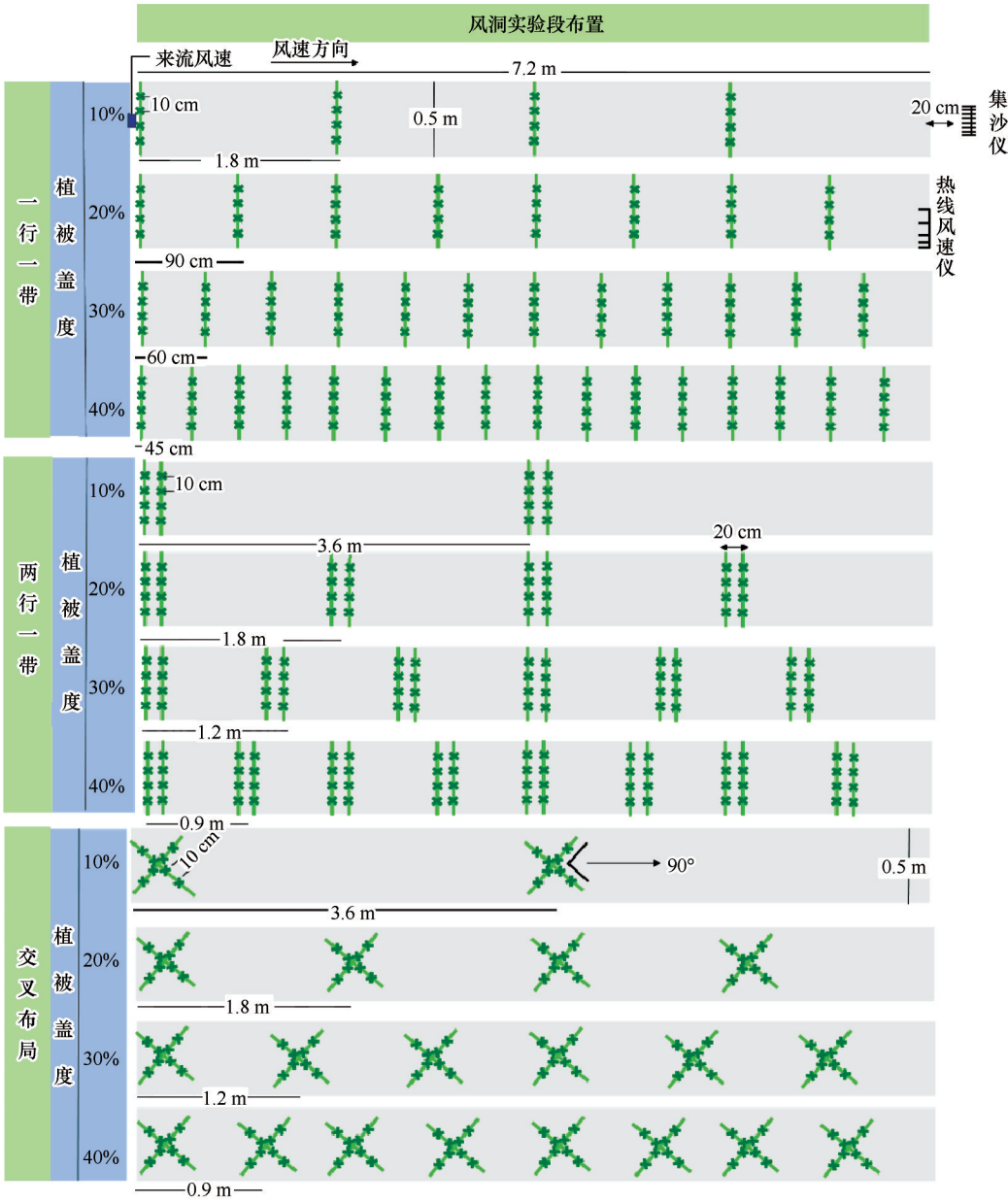


图 1 风洞的实验段布置

Fig.1 Layout of the experimental section of the wind tunnel

样地土壤含水量测量：在实验样地中随机选取 9 个样方，利用铝盒在每个样方中取 3 次土样，总计 27 个铝盒，在烘箱 105℃下烘干 24 h，计算得到 0~2.5 cm 土壤含水量均值 0.27%，2.5~5 cm 均值是 1.86%，5~10 cm 均值 2.99%。

样地土壤容重测量：在实验样地中随机选取 9 个样方，利用环刀法在每个样方中取二次土样，总计 18 个环刀（体积为 100 cm³），在烘箱 105℃下烘干 24 h，计算得到土壤容重在 0~5 cm 均值 1.3703 g·cm⁻¹，5~10 cm 均值 1.4387 g·cm⁻¹。

1.3 研究方法

1.3.1 输沙量数据处理

本文重点分析不同植被盖度下输沙率及风沙流结构的变化，分析时以风洞来流风速为 9 m·s⁻¹（吹蚀 5 min），植被高度为 10 cm，植被布局为一行一带、两行一带和交叉布局。

将集沙仪中 15 个进沙口（1 cm×2 cm）收集到的风蚀物质质量分布绘制成风沙流结构分布曲线。将集沙仪中 15 个进沙口（1 cm×2 cm）收集到的风蚀物质质量进行累计百分比统计。

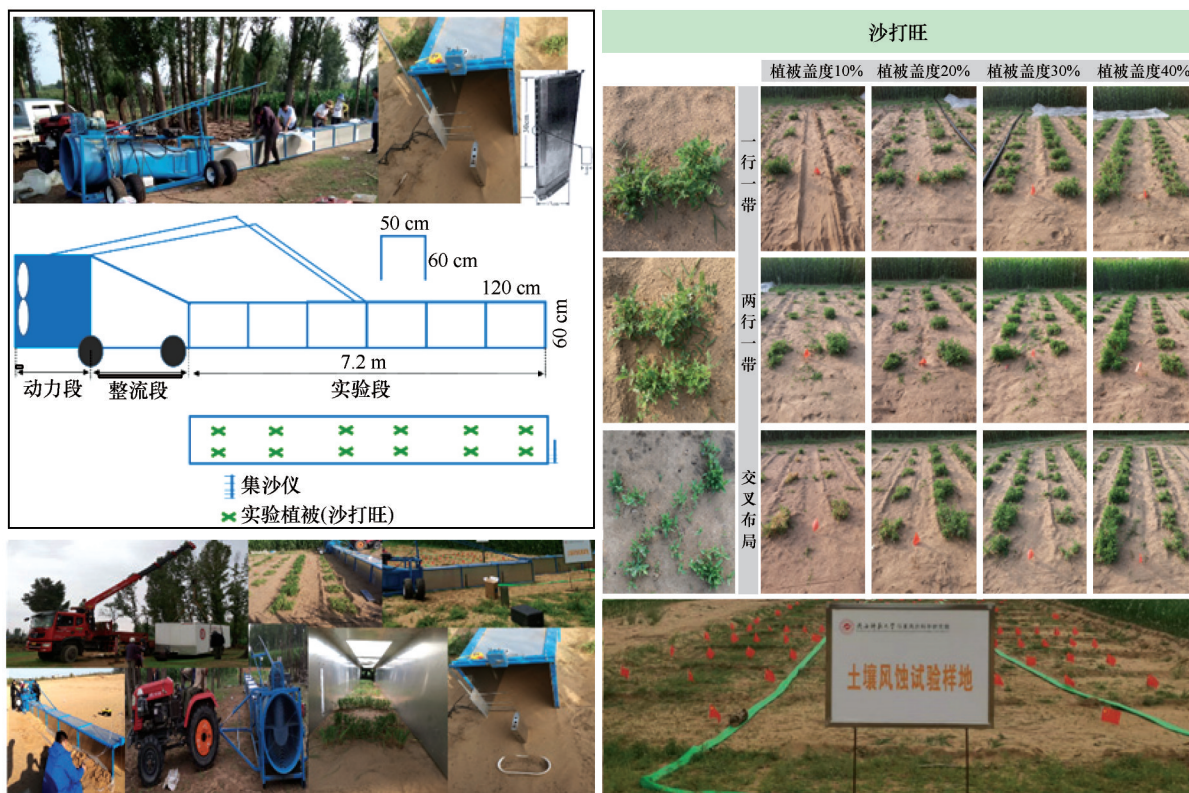


图2 实验设备与实验样地概况

Fig.2 Overview of experimental equipment and experimental plot

1.3.2 单宽输沙率计算

单宽输沙率是指单位宽度上的沙尘颗粒输送量:

$$Q_w = W_t / (L \times T) \quad (1)$$

式中: Q_w 表示单宽输沙率 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); W_t 表示沙量总质量 (本实验为集沙仪 15 个高度的沙量总和); L 表示实验区域的宽度 (本实验集沙仪宽度为 0.01 m); T 表示实验或观测的持续时间。

1.3.3 风蚀抑制效率计算

风蚀抑制效率 (K) 是裸地的风蚀量 (F_1) 和不同植被盖度下的风蚀量 (F_2) 的差值, 与裸地的风蚀量 (F_1) 的比值^[20], 即:

$$K = (F_1 - F_2) / F_1 \times 100\% \quad (2)$$

式中: K 为风蚀抑制效率 (%); F_1 为裸地的风蚀量; F_2 为不同植被盖度下的风蚀量。应用公式 (2) 计算的是近地表 20 cm 以内的不同高度的风蚀抑制效率均值。

1.3.4 空气动力学粗糙度计算

当地表有植覆盖时, 近地表流场发生变化。气流受植被的影响被迫抬升, 此时呈对数分布的风速廓线相应地发生位移, 把原来在裸地面上的空气动

力学粗糙度向上抬升一个位移量 z'_0 , 这个位移量 z'_0 叫作零风速平面位移高度, 因此风速廓线的方程调整为^[16]:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z - z'_0}{z_0} \quad (3)$$

式中: u_* 为摩阻速度 (或剪切速度); u 为高度 z 处的风速; κ 为卡曼常数, 一般取值为 0.4。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:

$$u_z = a + b \ln z \quad (4)$$

式中: u_z 是高度为 z 处的风速值, 令 $u_z = 0$ 即可得出 z_0 :

$$z_0 = \exp(-a/b) \quad (5)$$

本实验 3 次裸地 (无植被覆盖) 测试结果中, 测定裸地的空气动力学粗糙度均值为 0.06 cm。由有植被覆盖的 z_0 (即增大后的 z_0) 减去裸地空气动力学粗糙度 (0.06 cm), 即为原来裸地面上的空气动力学粗糙度向上抬升一个位移量 z'_0 , 这个位移量 z'_0 也叫作零风速平面位移高度, 其计算如下:

$$z'_0 = z_0 - 0.06 \quad (6)$$

本次风洞实验中主要计算植被高度为 10 cm 的沙打旺的下垫面空气动力学粗糙度 (z_0), 其是由垂直高度 10、20 cm 和 30 cm 上的风速与其对数高度拟

合确定。

2 结果与分析

2.1 风沙流结构分布曲线

从图3可知,当植被盖度较小时,风沙流结构的分布曲线遵循指数函数分布规律,随着植被盖度增大,曲线不再遵循指数变化规律。曲线形态变化差异大,除了主要受植被盖度的影响外,还可能与植被高度、植被形态、集沙仪与植被距离等综合作用有关。如两行一带中,植被盖度为40%时,在10 cm高度处,出现跳跃性输沙量增大,这可能与植被高度为10 cm有关,加之集沙仪与植被距离较近,出现了10 cm处输沙量跳跃性增长和12 cm处断崖式下

降的现象。如交叉布局中,植被盖度为30%时,输沙量在0~15 cm处呈现增加趋势,而15 cm之后呈现阶梯式下降趋势,这可能与植被形态相关,且在实验时也发现,每个样地会有微地形差异性,加之真实的植被并不是统一的模型,出现植物生长高低不一致、植被生长异常,以及缺苗现象等,因此会出现风沙流分布曲线的异常值现象。另外发现,3种植被布局下风沙流曲线的形态变化规律不显著,相比植被布局,风沙流结构分布曲线受植被盖度影响大(图3)。

2.2 风沙流结构特征

从图3和表1可发现,随着植被盖度增大,输沙总量呈减小趋势,且近地层的输沙量不断减少,高

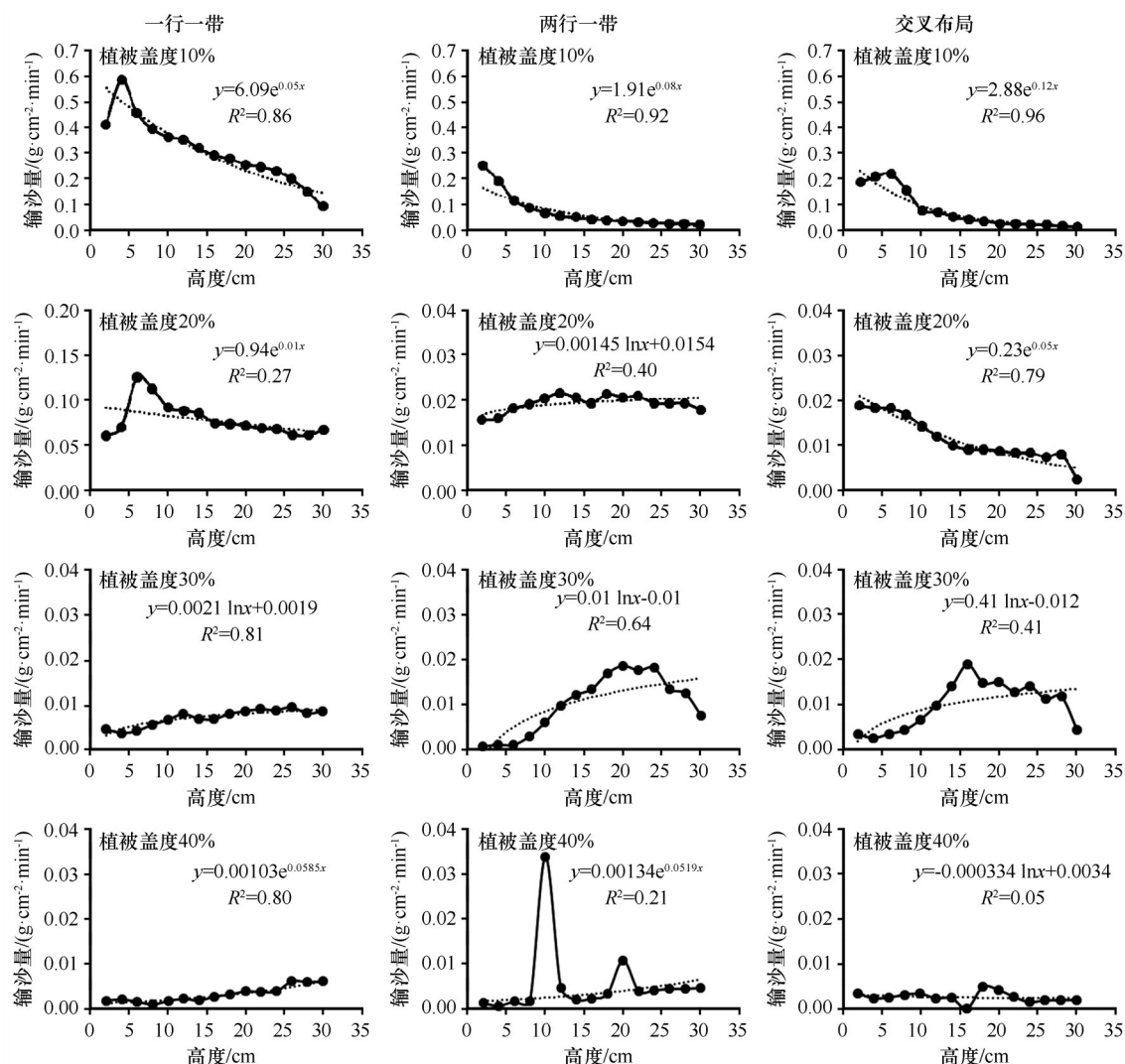


图3 3种布局下沙打旺不同植被盖度的风沙流结构分布

Fig.3 Distribution of wind and sand flow structure of *Astragalus adsurgens* with different vegetation coverage under three layouts

表 1 一行一带布局下不同植被盖度下的沙打旺风沙流结构分布
Table 1 Distribution of sand flow structure of *Astragalus adsurgens* under different vegetation coverage under layout of one line

分类	高度/ cm	植被盖度 10%		植被盖度 20%		植被盖度 30%		植被盖度 40%	
		输沙量 /(g·cm ⁻² ·min ⁻¹)	占比 /%	输沙量 /(g·cm ⁻² ·min ⁻¹)	占比 /%	输沙量 /(g·cm ⁻² ·min ⁻¹)	占比 /%	输沙量 /(g·cm ⁻² ·min ⁻¹)	占比 /%
低层	2	0.409	8.87	0.060	5.10	0.002	2.69	0.002	3.67
	4	0.587	12.74	0.070	5.93	0.002	2.86	0.002	4.26
	6	0.455	9.87	0.125	10.61	0.002	2.41	0.001	3.13
	8	0.394	8.55	0.112	9.56	0.002	2.77	0.001	1.83
	10	0.362	7.85	0.091	7.78	0.003	4.77	0.002	3.50
中层	12	0.353	7.66	0.088	7.50	0.004	5.97	0.002	4.52
	14	0.318	6.89	0.085	7.24	0.004	5.28	0.002	3.72
	16	0.289	6.28	0.074	6.31	0.005	6.97	0.003	5.69
	18	0.277	6.01	0.074	6.27	0.007	9.10	0.003	6.61
	20	0.255	5.54	0.071	6.06	0.006	8.49	0.004	8.17
高层	22	0.245	5.32	0.068	5.81	0.007	9.55	0.004	7.87
	24	0.229	4.97	0.068	5.75	0.008	11.39	0.004	8.17
	26	0.199	4.31	0.061	5.21	0.007	10.39	0.006	13.15
	28	0.147	3.18	0.061	5.17	0.006	8.71	0.006	12.71
	30	0.091	1.97	0.067	5.69	0.006	8.64	0.006	13.00
合计		4.609	100	1.176	100	0.072	100	0.046	100

层输沙量不断增加,最大输沙量的高度层不断上移,直至风蚀输沙量极小时,各层输沙量分布规律变化不显著。

当植被盖度为 10% 时,近地层的输沙量占比为 47.87%,中层的输沙量占比为 32.38%,高层的输沙量占比为 19.76%;当植被盖度为 20% 时,近地层的输沙量占比为 38.97%,中层的输沙量占比为 33.38%,高层的输沙量占比为 27.65%;植被盖度为 30% 时,近地层的输沙量占比为 15.50%,中层的输沙量占比为 35.81%,高层的输沙量占比为 48.68% (表 1)。这表明随着植被盖度增大,风沙流结构呈现低层输沙量减少,中高层呈增大趋势,最大输沙量的高度层从 4 cm 上升到 24 cm,表明植被盖度增加对地表(低层)风力侵蚀具有一定的防护作用。另外可发现不同植被布局下的风沙流结构差异不大,风沙流结构的分布主要受植被盖度的影响。

至风蚀输沙量极小时,各层输沙量分布变化不规律,不仅表现为高层输沙量大于低层也存在低层输沙量大于高层。如表 1 中(一行一带布局)当植被

盖度为 40% 时,低层的输沙量为 16.39%,中层的输沙量为 28.71%,高层的输沙量为 54.90%,表现为中高层的输沙量大于底层;当两行一带布局时,表现为中层输沙量较大;当交叉布局时,底层输沙量大于高层(图 3)。

2.3 单宽输沙率变化趋势

随着植被盖度增加,输沙率呈减小趋势,且符合指数递减规律, R^2 均大于 0.9,至植被盖度达到 30% 时,输沙率变化较小(图 4)。从表 2 可知,随植被盖度增大,无论植被布局是一行一带、两行一带还是交叉布局,单宽输沙率均呈减小趋势。当沙打旺盖度到达约 30% 时,3 种布局下的输沙率均是极小的,由此可以认为沙打旺的最佳防风蚀的盖度为约 30%。

2.4 风蚀抑制效率

从表 3 中发现,植被盖度由 10% 增大到 20% 时,风蚀抑制效率明显增大,尤其一行一带增幅达

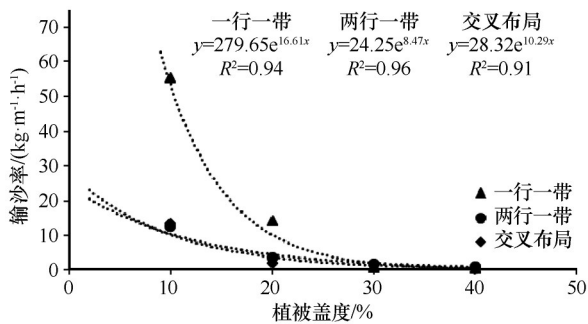


图 4 3 种布局下植被盖度与输沙率关系

Fig.4 Relationship between vegetation coverage and sediment transport rate under three layouts

表 2 3 种布局下不同植被盖度下输沙率 (kg·m⁻¹·h⁻¹)

Table 2 Sediment transport rates under different vegetation coverage under three layouts (kg·m⁻¹·h⁻¹)

植被盖度 /%	植被布局		
	一行一带	两行一带	交叉布局
10	55.31	12.60	13.43
20	14.11	3.60	2.03
30	0.86	1.64	1.76
40	0.55	0.97	0.46

注：沙打旺高度 10 cm，来流风速 9 m·s⁻¹。

42%，当植被盖度由 20% 增大到 30% 时，两行一带和交叉布局风蚀抑制效率增加不显著，但一行一带布局下风蚀抑制效率增幅达 38%，当植被盖度由 30% 增大到 40% 时，3 种布局下的风蚀抑制效率变

表 4 3 种布局下不同植被盖度下的空气动力学粗糙度

Table 4 Aerodynamic roughness under different vegetation coverage under three layouts

植被布局	植被盖度/%	高度/cm					拟合函数	b	a	z' ₀ /cm	z ₀ /cm
		1	5	10	20	30					
一行一带	10	2.87	5.36	6.67	8.57	10.31	y=3.2437x+14.046	3.24	14.05	1.2564	1.32
	20	4.83	5.46	5.81	7.23	10.07	y=3.678x+13.975	3.68	13.98	2.1779	2.24
	30	1.11	2.11	3.48	7.10	10.09	y=5.9326x+17.009	5.93	17.01	5.6267	5.69
	40	0.84	0.86	2.59	6.71	9.78	y=6.4724x+17.397	6.47	17.40	6.7425	6.80
两行一带	10	5.24	6.10	6.74	7.82	9.54	y=2.4401x+12.195	2.44	12.20	0.6153	0.68
	20	1.13	1.61	3.19	6.60	9.50	y=6.63x+17.35	6.63	17.35	5.7722	5.83
	30	1.20	1.48	2.19	6.39	9.55	y=5.6588x+16.081	5.66	16.08	7.2429	7.30
	40	0.54	0.71	1.40	6.02	9.54	y=7.3276x+18.15	7.33	18.15	8.3400	8.40
交叉布局	10	5.22	6.01	6.70	7.76	9.46	y=2.411x+12.083	2.41	12.08	0.6060	0.67
	20	2.82	3.60	4.72	7.43	10.27	y=4.9216x+15.867	4.92	15.87	3.9197	3.98
	30	1.52	2.23	3.14	6.75	10.06	y=6.1828x+17.192	6.18	17.19	6.1400	6.20
	40	1.70	1.28	2.10	5.79	9.63	y=6.6864x+17.244	6.69	17.24	7.5252	7.59

表 3 不同植被盖度的风蚀抑制效率 (%)

Table 3 Wind erosion inhibition efficiency of different vegetation coverage (%)

植被盖度 /%	植被布局		
	一行一带	两行一带	交叉布局
10	17.55	72.44	72.83
20	59.60	89.33	92.84
30	97.31	92.71	94.54
40	98.55	96.55	98.34

化均不显著，这表明沙打旺的最佳防风蚀盖度为 30%，植被盖度为 30% 时，3 种布局下的风蚀抑制效率均能达到 90% 以上。同时也可以发现两行一带和交叉布局的风蚀抑制效率强于一行一带，尤其当植被盖度小于 30% 时更为显著。

综上，沙打旺的最佳防风蚀盖度为 30%，能抑制近地表 20 cm 以内 90% 的输沙量。

2.5 空气动力学粗糙度

以表 4 中一行一带布局为例，植被盖度从 20% 增大到 30%，粗糙度 z₀ 增加了 3.45 cm，植被盖度从 30% 增大到 40% 时粗糙度 z₀ 增加了 1.11 cm，表明 z₀ 增长率减弱，在两行一带和交叉布局中均呈现一致规律。

从图 5 可发现，3 种植被布局（一行一带、两行一带和交叉布局）下，z₀ 均随植被盖度的增大而增大，

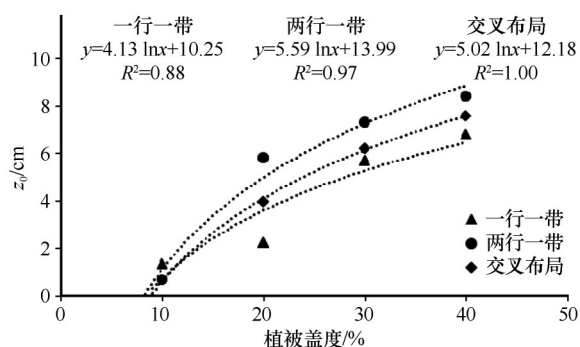


图5 3种布局下植被盖度与空气动力学粗糙度(z_0)的关系

Fig.5 Relationship between vegetation coverage and aerodynamic roughness (z_0) under three layouts

且两者的变化规律符合对数函数形式(图5),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区植被条件和下垫面空气动力学粗糙度的关系进行科学的研究,找出植被盖度和下垫面粗糙度的最佳结合点,提出防止风蚀发生的植被最佳密度配置模式,从而有效地解决防止风蚀与植被生物量最小之间的矛盾。以本文沙打旺为例,植被盖度达到约30%时,空气动力学参数(z_0)的增长率极小,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%,这与上述输沙率得出一致的结论,即当沙打旺植被盖度为30%时,其输沙率是较小的,且能抑制近地表20 cm以内90%的输沙量。

同时也发现,两行一带和交叉布局的空气动力学粗糙度(z_0)整体上大于一行一带,这表明两行一带和交叉布局比一行一带抗风蚀效果更好。这与上述风蚀量和风蚀抑制效率结果一致。

3 讨论

植被盖度对风沙流的影响已有丰富的研究成果。植被盖度是控制风蚀的主要因素,植被盖度对风速及风沙流结构分布具有显著影响,增加植被覆盖密度可以降低风速,减少风沙输移通量^[8-10],较高的植被盖度可以减弱湍流强度和湍流动能,并且导致风速垂直剖面的水平风速和垂直风速变化降低^[7],风速在植被上层的某些高度可能会出现反弹现象^[22],风沙流主要是在近地表运行,最大输沙量的高度层不断上移^[17-18]。MacDonald等^[27]已经证

实,空气动力学粗糙度随植被密度增加而增长率减少,这一过程还意味着一旦空气动力学粗糙度达到最大值,风沙累积量趋于稳定^[7]。本研究在前人研究基础上,发现与上述结果一致性的结论,从现场实验数据中发现,植被盖度与下垫面粗糙度的变化趋势符合对数函数趋势,这暗示其 z_0 增长率逐渐减小并最终趋向零,因此随着植被盖度增大,下垫面空气动力学粗糙度有一个极值,这表明地表粗糙度和植被生物量都存在极限值的限制,找到植被盖度和地表粗糙度之间的最佳平衡点,是实现植被恢复与半干旱区环境挑战的至关重要锚点。

Meng等^[28]应用野外实地测试,主要植被是青冈嵩草(*Koeleria glauca*)、羊草(*Leymus chinensis*)和克氏针茅(*Stipa krylovii*),得出草原有效控制风蚀所需的临界植被覆盖度大于60%。本结论与上述结论差异大。主要原因是羊草(*Leymus chinensis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)属于典型草原植被,是禾本科,其形态直立、叶平展,茎秆相对纤细且柔软,且地上部分透风率大,本研究的沙漠植被沙打旺(豆科)茎秆硬度大、茎多数或数个丛生,羽状复叶,地上部分透风率小,根系更粗壮发达,因而抗风蚀性能更强。野外不同研究区的土壤环境也存在差异性,也会导致其结果的差异性。未来的研究可探索干旱区不同植被的最佳防风蚀配置密度,可更精准地指导该区域防风治沙。

从不同盖度下的配置方式来看,本文得出两行一带比一行一带布局对风蚀影响更强烈。这与前人的研究结果在乔灌尺度得到的结论一致。如Liu等^[7]得出二排防护林比单排防护林的风速降低效果更好。如杨文斌等^[29]、徐高兴等^[30]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。主要原因可能是两行一带布局中,两行植被之间的距离较窄,可以快速形成两次的抵挡和拦截体系,形成较强的遮挡效果,使得风沙在两行植被之间的速度下降,沉积物得以沉淀,从而减轻了风蚀。加之两行一带布局植被的根系和叶面积也更集中,有利于土壤固结,促使抗风蚀性的提高。

另外,野外移动风洞实验具有更高的真实性和代表性,可以更好地模拟自然环境,但也面临天气依赖、实验影响因素复杂、数据分析难、样地扰动等方面的挑战。因此,加强复杂问题的室内风洞研究与野外风洞实践验证仍然是风沙物理学发展的当

务之急^[22]。

4 结论

当植被盖度较小时,风沙流结构的分布曲线遵循指数函数分布规律,随着植被盖度增大,该曲线不再遵循指数变化规律,其形态变化差异大。

随着植被盖度增大,输沙总量呈减小趋势,且近地层的输沙量不断减少,高层输沙量呈增大趋势,最大输沙量的高度层不断上移,直至风蚀输沙量极小时,各层输沙量分布规律变化不显著。相比植被布局,风沙流结构分布受植被盖度影响更大。

在3种植被布局(一行一带、两行一带和交叉布局)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,其增长率随植被盖度的增大而逐渐减小并最终趋于零,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。以沙打旺为例,植被盖度达到约30%时,其空气动力学参数(Z_0)的增长率也较小,且能抑制地表20 cm以内90%的输沙量,由此认为沙打旺控制土壤风蚀的最佳盖度约为30%。

参考文献:

- [1] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M]. London, UK: Methuen, 1941: 170-172.
- [2] Dong Z B, Lv P, Zhang Z C, et al. Aeolian transport in the field: a comparison of the effects of different surface treatments [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: D09210.
- [3] Dong Z B, Gao S, Fryrear D W. Drag coefficients, roughness length and zero-plane displacement height as disturbed by artificial standing vegetation [J]. Journal of Arid Environment, 2001, 49: 485-505.
- [4] Burri K, Gromke C, Lehning M, et al. Aeolian sediment transport over vegetation canopies: a wind tunnel study with live plants [J]. Aeolian Research, 2011, 3(2): 205-213.
- [5] Leenders J K, Boxel J H V, Sterk G. The effect of single vegetation elements on wind speed and sediment transport in the Sahelian zone of Burkina Faso [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32(10): 1454-1474.
- [6] Abulaiti A, Kimura R, Kodama Y. Effect of flexible and rigid roughness elements on aeolian sand transport [J]. Arid Land Research and Management, 2017, 31: 111-124.
- [7] Liu J Q, Kimura R J, Miyawaki M, et al. Effects of plants with different shapes and coverage on the blown-sand flux and roughness length examined by wind tunnel experiments [J]. Catena, 2021, 197: 104976.
- [8] Miri A, Dragovich D, Dong Z B. Vegetation morphologic and aerodynamic characteristics reduce aeolian erosion [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 12831.
- [9] Miri A, Dragovich D, Dong Z B. The response of live plants to airflow: implication for reducing erosion [J]. Aeolian Research, 2018, 33: 93-105.
- [10] Miri A, Dragovich D, Dong Z B. Wind-borne sand mass flux in vegetated surfaces: wind tunnel experiments with live plants [J]. Catena, 2019, 172: 421-434.
- [11] Kinugasa T, Sagayama T, Gantsetseg B, et al. Effect of simulated grazing on sediment trapping by single plants: a wind-tunnel experiment with two grassland species in Mongolia [J]. Catena, 2021, 202: 105262.
- [12] Suter-Burri K, Gromke C, Katherine C. Leonard, et al. Spatial patterns of aeolian sediment deposition in vegetation canopies: observations from wind tunnel experiments using colored sand [J]. Aeolian Research, 2013, 8: 65-73.
- [13] Bhutto S L, Miri A, Zhang Y, et al. Experimental study on the effect of four single shrubs on aeolian erosion in a wind tunnel [J]. Catena, 2022, 212: 106097.
- [14] Dong Z B, Liu X P, Wang X M. Aerodynamic roughness of gravel surfaces [J]. Geomorphology, 2002, 43: 17-31.
- [15] Dong Z B, Liu X P, Wang H T, et al. Aeolian sand transport: a wind tunnel model [J]. Sedimentary Geology, 2003, 161: 71-83.
- [16] 董治宝, 陈渭南, 董光荣, 等. 植被对风沙土风蚀作用的影响 [J]. 环境科学学报, 1996(4): 437-443.
- [17] 邢恩德, 马少薇, 郭建英, 等. 植被盖度对典型草原区地表风沙流结构及风蚀量影响 [J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 331-334.
- [18] 余沛东, 陈银萍, 李玉强, 等. 植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响 [J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 29-36.
- [19] Zhang J M, Yu X X, Jia G D, et al. Determination of optimum vegetation type and layout for soil wind erosion control in desertified land in North China [J]. Ecological Engineering, 2021, 171: 106383.
- [20] 朱震达. 中国沙漠、沙漠化、荒漠化及其治理的对策 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999: 108-136.
- [21] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 61-69.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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: 中国社会科学出版社, 2016: 1767-1768.
- [25] 李超. 土壤根系含量对风蚀影响的风洞模拟研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
- [26] 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.
- [27] MacDonald R W, Griffiths R F, Hall D J. An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays [J].

- Atmospheric Environment, 1998, 32: 1857–1864.
- [28] Meng Z J, Dang X H, Gao Y, et al. Wang, M. Interactive effects of wind speed, vegetation coverage and soil moisture in controlling wind erosion in a temperate desert steppe, Inner Mongolia of China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10: 534–547.
- [29] 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, 38(7): 2998–3007.
- [30] 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.

The influence of vegetation coverage on the wind sand flow structure and sediment transport rate

Bai Ziyi, Dong Zhibao, Nan Weige, Xiao Fengjun, Li Chao, Shao Tianjie,

Kong Lingling, Liu Xiaokang, Liang Aiming, Chi Zheng

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

Abstract: Soil wind erosion is an important threat to the global ecological and environmental security of arid and semi-arid area. Vegetation can effectively reduce the risk of soil wind erosion by reducing wind speed and capturing soil particles. At present, people's understanding of the optimal pattern and coverage of vegetation controlling soil wind erosion still needs to be deepened. With the help of a mobile wind tunnel in the field, this article measured the response of surface sediment transport rate and wind sand flow structure to the coverage of herbaceous plants (*Astragalus adsurgens*). The results show that: (1) When the vegetation coverage is small, the distribution curve of wind sand flow structure follows the exponential function distribution law. With the increase of vegetation coverage, the curve shape appears differentiation. (2) Vegetation coverage can effectively reduce the intensity of soil wind erosion and raise the height of sand transport. (3) The surface aerodynamic roughness and vegetation coverage follow a logarithmic function variation law, and their growth rate gradually decreases and eventually approaches zero with the increase of vegetation coverage. There is a threshold phenomenon in the aerodynamic roughness of the underlying surface. (4) The optimal coverage of *Astragalus adsurgens* for controlling soil wind erosion is about 30%, which can effectively suppress about 90% of wind erosion below a height of 20 cm.

Key words: vegetation coverage; wind sand flow structure; aerodynamic roughness; *Astragalus adsurgens*; mobile wind tunnel