

四子王旗草地修复试验区不同修复模式的抗风蚀试验

宣传忠¹ 陈智¹ 刘海洋¹ 宋涛¹ 薛晶¹ 梁田雨²

(1. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019)

摘要: 针对内蒙古四子王旗农牧交错区的荒漠化草地, 用移动式风蚀风洞及相关配套设备对 20% 盖度退化草地、40% 盖度带状柠条修复草地和 60% 盖度冰草修复草地进行原位测试, 研究它们的近地表风沙运动规律, 探索柠条带状配置修复和冰草喷播修复草地土壤抗风蚀的作用机理和防护效果, 从而为农牧交错区荒漠化草地的风蚀防治提供技术依据。研究表明, 在同一风速下, 草地的粗糙度由大到小依次为柠条修复草地、冰草修复草地和退化草地, 其中, 柠条修复草地的粗糙度平均值为 2.46 cm, 分别是冰草修复草地和退化草地平均粗糙度的 1.95 和 2.76 倍; 随着距地表高度的降低, 3 种草地风速均呈现减小趋势, 当风洞中心风速为 9 m/s 时, 柠条修复草地、冰草修复草地和退化草地地表在 8 cm 处的风速较之 64 cm 处的风速分别降低 82.23%、66.67% 和 61.11%。冰草修复草地与退化草地的输沙率曲线都是随高度增加呈指数函数形式单调递减, 冰草修复草地的曲线衰减更快, 而柠条修复草地的输沙率最小, 其输沙率在距地表约柠条带顶部的 30 cm 处出现极大值, 在柠条带顶部以上的输沙率才会按指数规律递减。因此, 带状配置柠条修复草地对风沙流的阻碍和改变作用差异显著, 在低覆盖度下仍达到较好的抗风蚀效果。

关键词: 风蚀; 风洞; 风速廓线; 粗糙度; 输沙率

中图分类号: S151⁺.1; S155.4⁺7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0164-07

Tests on Anti-wind Erosion in Different Restoration Modes of Desertification Grassland at Test Zone in Siziwang Banner

Xuan Chuanzhong¹ Chen Zhi¹ Liu Haiyang¹ Song Tao¹ Xue Jing¹ Liang Tianyu²

(1. College of Machine and Electronics Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

2. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China)

Abstract: In order to provide technical basis for prevention of desertification grassland in agro-pastoral ecotone in Siziwang banner, Inner Mongolia, the in-situ test was adopted to study the blown sand movement laws and explore the mechanism and protection effect of soil wind erosion for degraded grassland with 20% coverage, repaired grassland with 40% coverage of *Caragana korshinskili* gapped belt scheme plantation and 60% coverage of *Agropyron mongolicum* randomly distributed plantation, the movable wind erosion tunnel and its supplement equipment were used. The results indicated that, at the same wind speed in the wind tunnel, the descending order of soil surface roughness was *C. korshinskili* grassland, *A. mongolicum* grassland and degraded grassland. The average roughness of *C. korshinskili* grassland was 2.46 cm, which was 1.95 times of *A. mongolicum* grassland and 2.76 times of degraded grassland. With the decrease of height from the ground, all the wind speeds of three grasslands were decreased, and when wind speed was 9 m/s in wind tunnel, wind velocities at height of 8 cm were reduced by 82.23%, 66.67% and 61.11% for *C. korshinskili* grassland, *A. mongolicum* grassland and degraded grassland compared with those at height of 64 cm, respectively. The sand transport rate of

收稿日期: 2016-01-12 修回日期: 2016-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161045、41361058)和内蒙古农业大学科技创新团队项目(NDTD2013-6)

作者简介: 宣传忠(1977—),男,副教授,博士生,主要从事农业生物工程测试与技术装备研究, E-mail: 282027349@qq.com

通信作者: 陈智(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事环境控制工程及技术装备研究, E-mail: sgchenzhi@imau.edu.cn

C. korshinskili grassland was the smallest, and the sand transport rate curves of *A. mongolicum* grassland and degraded grassland were decayed in the form of exponential function along with the increase of height from ground, and the curve of degraded grassland was decayed faster. Whereas, the sand transport rate curve of *C. korshinskili* grassland had a maximum value at its top of 30 cm, and it was exponentially decayed under its top. Therefore, the *C. korshinskili* grassland had significant effects on obstructing and changing wind-sand flow, and it could still achieve good anti-erosion effect at low vegetation coverage.

Key words: wind erosion; wind tunnel; wind profile; roughness; sand transport rate

引言

北方内蒙古地区从东到西分布着草甸草原、典型草原、荒漠草原和荒漠,乌兰察布高原位于阴山山脉以北的内蒙古中部,是牛羊、马铃薯等农牧业生产的重要基地,该地区存在大量的农牧业交错带,是草原向荒漠过渡的最干旱草原生态区,占草地面积 10.68%。荒漠草原气候年降水量仅为 150~250 mm,夏季酷热而短促、冬季严寒干燥、生态环境异常严酷。其植物种类贫乏、草层低矮、植被稀疏,属典型的生态脆弱带,土壤养分贫瘠且半裸露并具有砾石,植被盖度一般在 5%~25%,具有发生荒漠化的潜在危险^[1-3]。草原生态恶化使得牧区经济的可持续发展受到严重制约,随着牧区进行草地分户、围栏封育、人工改良草地工作的进行,需要寻找一种合理的荒漠化草地工程修复模式,防止该地区草地的退化。

当草地的植被盖度小于 40% 时,传统研究认为其不能有效地阻止风沙流形成及固定流沙^[4]。然而,在干旱和半干旱地区,因为雨水稀少,限制了植被的覆盖度。学者研究发现在低覆盖度时,植物的不同分布格局对固定流沙和阻止风沙流形成的差异很大,即在植被低覆盖度的情况下,通过对植物的合理配置格局,不但可减少水分的竞争,还能控制土壤侵蚀的影响^[5]。柠条被广泛用于干旱、半干旱区人工沙地植被的重建中^[6],蒙古冰草是干旱草原地区生命力极强的优良牧用禾草,适合作为人工补种退化草场的草种,试验区种植柠条灌丛带和喷播蒙古冰草种子有利于对退化草地进行修复。借鉴以往林地和农作物留茬地防风蚀的研究,在低覆盖度时,行带状配置丛林也能够有效降低风速和控制风力侵蚀^[7-11]。因此,本研究利用移动式风蚀风洞及相关测量设备进行草地原位测试,对退化草地、带状配置柠条修复草地、随机喷播冰草修复草地分别进行抗土壤风蚀测试,以期为荒漠生态系统的恢复以及荒漠草原人工植被建设提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古乌兰察布市四子王旗(县)

查干补力格苏木(乡)格日勒图雅嘎查(村)的退化草地修复试验基地,如图 1 所示,地处北纬 41°48'55",东经 111°48'6",海拔 1 453 m,属典型农牧交错区。春季多风干旱,夏季昼夜温差大,降雨主要集中在 6—8 月份,年均降雨量 250 mm,土壤坚硬、透气能力差,主要为淡栗钙土,在 40~50 cm 深度出现钙积层,土壤厚度约为 1 m。试验草地类型主要为冷蒿、无芒隐子草、短花针茅的荒漠草原,植被稀疏且低矮,高度一般为 8 cm,盖度为 13%~20%,草地出现了一定程度的退化现象。该试验基地共有 3 个试验区,分别为退化草地、带状柠条配置修复草地和冰草修复草地,每个试验区的面积约为 500 m²。

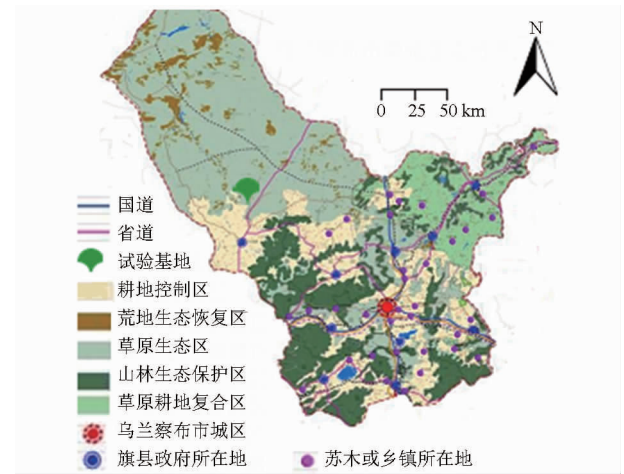


图 1 草地修复试验基地地理位置图
Fig. 1 Experiment base location for grassland restoration

2 研究设备与方法

2.1 研究设备

2.1.1 试验风洞

内蒙古农业大学自行研制了可移动式风蚀风洞,该风洞用于退化草地原位试验时的方案如图 2 所示,风蚀风洞由 30 kW 的交流风机驱动,经过整流段(包括开孔板、阻尼网和蜂窝器)、扩散段和收缩段,气流到达试验段时的中心风速可在 0~20 m/s 连续可调,横向均匀性指数不超过 1%,湍流度不超过 1.5%,试验段收缩比为 1.7,长、宽、高分别为 7.2、1.0、1.2 m 的矩形无底截面^[12-13]。该风洞通

过了中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的鉴定,在试验段可模拟与自然风梯度变化相似的风速廓线,风洞的试验段放置了风速廓线仪和旋风分离式集沙仪,用于获取风速和风蚀量等试验数据。

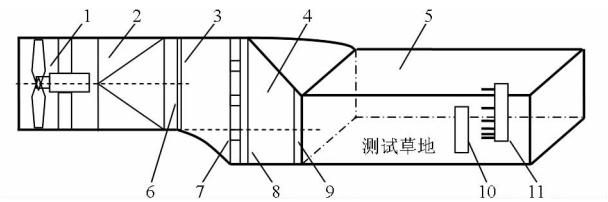


图2 移动式风蚀风洞的试验方案

Fig. 2 Experimental scheme of movable wind erosion tunnel
1. 风机段 2. 整流段 3. 扩散段 4. 收缩段 5. 试验段 6. 多孔板 7. 蜂窝器 8. 阻尼网 9. 平行棒栅 10. 集沙仪 11. 风速廓线仪

2.1.2 风速廓线仪

风速廓线的测量使用研制的无线风速廓线仪,由机架、6个热膜风速传感器和变送器,ZigBee无线网络数据发送终端、电池电源组成,如图3所示,计算机中的风速廓线数据处理软件可得到平均风速、风速振动曲线和风速廓线拟合方程等^[14]。风速廓线仪中热膜风速传感器在垂直方向按指数坐标排列固定,距地面高度分别为2、4、8、16、32、64 cm。试验时将风速廓线仪安放在距风洞出口180 cm、距风洞内侧壁30 cm处。

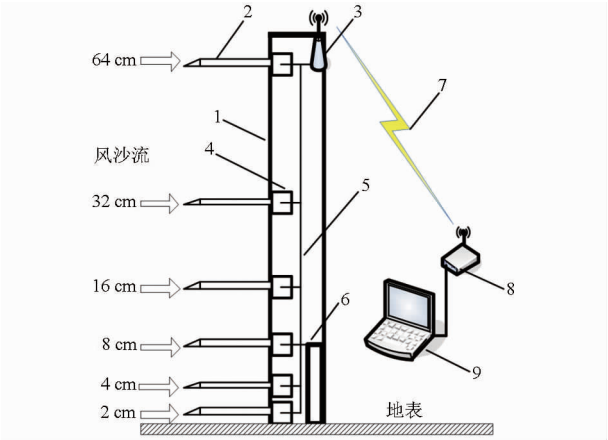


图3 无线风速廓线仪

Fig. 3 Wireless wind speed profiler

1. 支架 2. 热膜风速传感器 3. ZigBee 终端 4. 传感变送器
5. 导线 6. 锂电池 7. ZigBee 无线网络 8. ZigBee 协调器
9. 计算机(数据处理系统)

2.1.3 旋风分离式集沙仪

风蚀量数据的采集采用设计的旋风分离式集沙仪,如图4所示,集沙仪由防护罩、支撑底座、气流管、旋风分离器和集沙盒等组成。集沙仪支架上分布8个集沙单元,高度10 cm的下层为主要集沙区,在3 cm和6 cm位置上各放置1个集沙单元,10 cm以上的梯度上的每个集沙单元相距10 cm,集沙单

元的矩形气流管口高为3 cm、宽为1.5 cm,风沙流的方向与气流管的截面正交可收集到8个不同高度的风蚀沉积物^[15-16]。风洞试验时,集沙仪放置在风洞中心距出口120 cm处,收集的土壤风蚀物由精度为千分之一的天平称量。

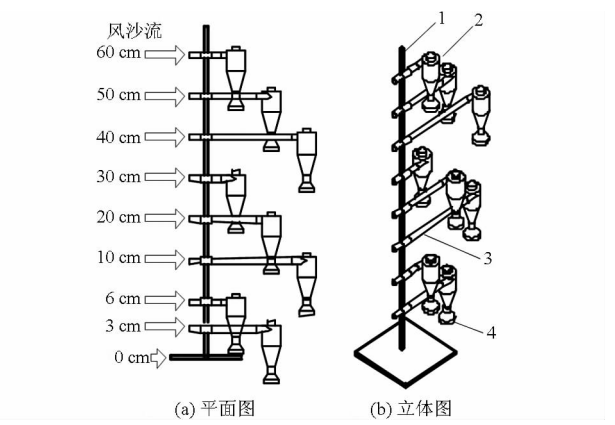


图4 旋风分离式集沙仪

Fig. 4 Whirl separation type sand sampler

1. 支架 2. 旋风分离器 3. 气流管 4. 集沙盒

2.2 研究方法

目前,有关植被对土壤风蚀影响的研究大都是通过室内风洞模拟试验或野外观测来完成的。室内风洞试验在取样时会造成对原地表土的扰动,且土样规模小,风蚀作用时间短,缺乏磨蚀作用;野外观测受自然条件的限制与影响,研究问题的随机性较强,缺乏一般性,很难实现同一地表在不同风速吹蚀或不同地表在同一风速吹蚀下相关数据的获取。故这两种方法都有一定的局限性,本文采用移动风蚀风洞对试验区修复草地进行原位测试研究。

(1)测试草地的基本特征

根据研究区的风蚀和气候特征,风洞试验在草地土壤风蚀最严重的春季进行,试验时间为2015年4月,此时的草地尚未返青,以枯草为主,试验期间地表深度5 cm,土壤含水率为2.1%,环境温度为6.5℃,气压为823 kPa。

(2)试验布置及测试方案

将移动式风洞分别放置在3个试验区,如图5所示,分别为20%覆盖度的退化草地、40%覆盖度的带状柠条配置修复草地(柠条带平均高度为30 cm,行、间距均为120 cm)和60%覆盖度的冰草修复草地,3种不同草地地表的风洞试验用净风进行吹蚀测试。考虑到试验选取的风速与研究区自然风速应有一致性,并且研究区的起沙风速均值约为6 m/s,故试验设定6、9、12、15、18 m/s共5种风洞中心风速,分别对3个试验区草地地表进行连续吹蚀1 h,对每种草地地表的风洞试验分别进行4次,取数据的平均值作为测得的风速和收集的土壤风蚀量。

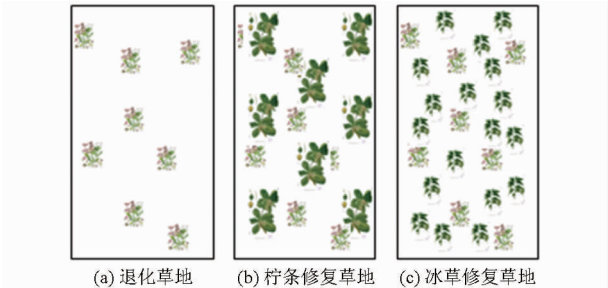


图 5 草地修复模式示意图

Fig. 5 Schematics of grassland restoration modes

(3) 数据处理方法

风速廓线是衡量风速沿高程分布规律一个重要指标,近地表的风速随高度按对数规律分布,不同修复模式的草地会改变风速廓线的变化规律。

粗糙度为近地表平均风速为零的位置高度,是描述草地地表对气流阻抗的重要参数,草地覆盖度的增大和带状配置柠条均能增加草地地表的粗糙度,使得修复草地的抗风蚀能力提高,从而能有效地控制风沙流^[17]。在风洞流场接近中性大气边界层下,地表粗糙度计算方法为

$$Z_0 = e^{\frac{U_1 \ln Z_2 - U_2 \ln Z_1}{U_1 - U_2}} \tag{1}$$

式中 $Z_1、Z_2$ ——地表面上任意 2 个不同高度,cm
 $U_1、U_2$ ——同一时刻 $Z_1、Z_2$ 2 个高度上的风速,m/s

输沙率是指风沙流在一定高度的单位断面在单位时间内输运的沙量,又称风蚀搬运强度,是衡量草地风蚀程度的重要指标^[18-20]。分别通过风洞和旋风分离式集沙仪对 3 种草地进行土壤抗风蚀的原位测试,得出输沙率随高度和风速的分布规律。

3 结果与分析

3.1 风速廓线分析

由于荒漠化草地的不同修复模式,使得草地下垫面发生改变,从而削弱和阻挡了气流的正常流动,气流的能量分布发生变化,试验草地的风速廓线也将发生改变^[21-22]。由于风速的变化具有随机性,风速廓线仪的 6 个测量点的风速大小是随时间脉动的,因此,风蚀风洞对修复草地进行原位测试时,可

用 2 min 的平均风速作为测量值。

研究表明,随着距地表高度的降低,退化草地(图 6a)、带状柠条配置修复草地(图 6b)与冰草修复草地(图 6c)风速均呈现减小趋势。盖度为 60% 的冰草修复草地与盖度为 20% 的退化草地的风速廓线值较为相近,这与春季冰草植被枯萎紧贴地表,冰草修复后地表盖度对风速的影响并不显著。但带状柠条修复草地的风速随高度的降低变化较为明显。当风洞中心风速为 9 m/s 时,带状柠条修复草地、冰草修复草地和退化草地地表在 8 cm 处的风速较之 64 cm 处的风速分别降低 82.23%、66.67% 和 61.11%;当风速为 12 m/s 时,分别降低 83.34%、65.83% 和 60.00%。可见,带状柠条修复草地即使在较低的植被覆盖度下,其对气流的削弱与阻挡效果也非常明显,这是由于草地上的带状配置柠条使气流场发生了改变,柠条带阻挡了一部分气流,从柠条带中通过的气流减少,风速降低,被阻挡的气流被迫抬升,加大了柠条带上层的风速,穿梭在柠条带中间的气流与带状柠条发生摩擦,风动量减小,风速进一步降低,可见带状柠条对地表土壤起到保护作用,在抑制土壤风蚀过程中起重要作用。

3.2 粗糙度分析

根据式(1)可以计算出草地不同修复模式下的粗糙度,由修复草地的风速廓线分析可知,近地表 2~40 cm 间的风速梯度变化较大,可代表修复草地的特征,因此,选择 4 cm 和 32 cm 2 个高度的风速来计算地表粗糙度,在试验风洞中心风速变化范围为 6~18 m/s 时,地表粗糙度结果如表 1 所示。

由表 1 可知,在同一风速下,草地的粗糙度由大到小依次为柠条修复草地、冰草修复草地和退化草地,说明草地不同修复模式改变了近地表气流流场,并且随着试验风速的增大,草地地表粗糙度逐渐减小,其中,40% 植被覆盖度的柠条修复草地和 60% 盖度冰草修复草地的地表粗糙度比较稳定,柠条修复草地粗糙度的平均值为 2.46 cm,分别是冰草修复草地和退化草地平均粗糙度的 1.95、2.76 倍,故带状柠条修复的草地对土壤风蚀的防治效果较好,对荒漠化草地地表保护能力较强。

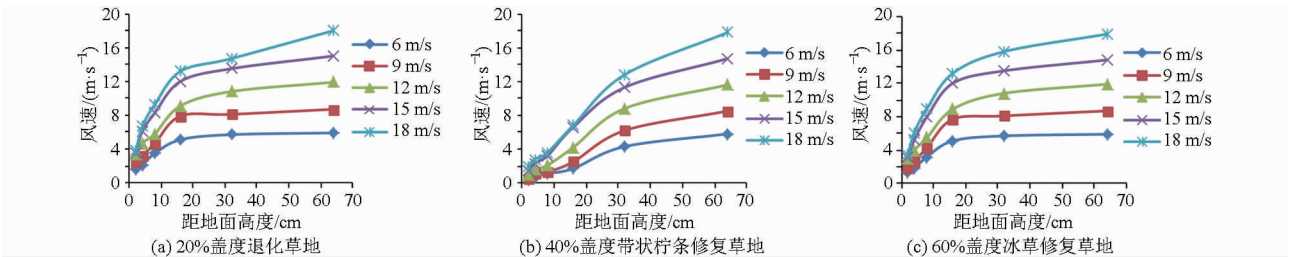


图 6 3 种不同草地风速廓线

Fig. 6 Wind speed profiles of three grassland surfaces

表 1 不同风速下的地表粗糙度

风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	地表粗糙度/cm		
	退化草地	柠条修复草地	冰草修复草地
6	1.19	2.67	1.53
9	1.03	2.55	1.41
12	0.81	2.52	1.18
15	0.72	2.35	1.09
18	0.70	2.23	1.08
平均值	0.89	2.46	1.26

3.3 风沙流结构分析

草地的风沙流结构受风速、草地修复模式和可风蚀颗粒含量等因子影响,是指风沙流中搬运的沙粒在垂直高度上的变化规律和分布特征^[23-25]。

3.3.1 输沙率随高度的分布

通过风洞试验观测,不同草地修复模式 0 ~ 60 cm 高度内的输沙率存在明显差异。在风洞风速设置为 12 m/s 时,3 种草地的输沙率随高度的分布如表 2 所示,退化草地的输沙率在三者中最大,为 4.95 g/($\text{cm}^2\cdot\text{h}$),冰草修复草地的输沙率次之,为 2.56 g/($\text{cm}^2\cdot\text{h}$),柠条修复草地最小,为 1.15 g/($\text{cm}^2\cdot\text{h}$)。退化草地输沙率分别是冰草修复草地和柠条修复草地输沙率的 1.93 倍和 4.30 倍。因此,当风沙流速相同时,60% 覆盖度的冰草修复草地较退化草地可平均降低输沙率 62.33%;而植被盖度为 40% 的柠条修复草地的输沙率仅为退化草地的 23.23%,即带状柠条配置修复草地可减少流沙输送量 76.77%,因此,覆盖度为 40% 的柠条修复草地的抗风蚀效果较好。计算不同高度层的输沙率百分比,可以发现 95% 以上的风沙流活动发生在距地表 40 cm 高度以下,距地表高度 60 cm 以上的输沙率为零。

退化草地和冰草修复草地的输沙率差异是由植被覆盖引起的,当草地植被覆盖度较高时,高覆盖的冰草修复草地起到隔离风沙流与沙面地表的作用,同时,冰草植被削弱了草地地表的风力,增大了沙粒的起动风速,冰草的根系对草原地表的沙层也有一

表 2 3 种不同草地随高度分布的输沙率

高度/cm	输沙率/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)		
	退化草地	柠条修复草地	冰草修复草地
3	1.632	0.108	0.907
6	1.365	0.152	0.612
10	1.016	0.154	0.426
20	0.427	0.241	0.246
30	0.284	0.276	0.138
40	0.162	0.144	0.172
50	0.061	0.078	0.056
60	0	0	0
合计	4.947	1.153	2.557

定的固结作用,所以 60% 盖度的冰草修复草地输沙率得到了降低。带状柠条修复草地的输沙率还与一定高度的柠条枝叶阻挡风沙流有关,可以进一步降低输沙率。因此,在特定的风速下,草地不同修复模式对风沙流的结构影响非常大,通过改变荒漠化草地下垫面形式可削弱或抑制风沙流强度。

3.3.2 输沙率随风速的变化

试验风洞的中心风速在 6 ~ 18 m/s 变化时,3 种草地地表的风沙流垂直高度上的输沙率随风速的变化如图 7 所示,总体来看,3 种草地的输沙率均随风速的增大而增加,特别是在 15 m/s 和 18 m/s 的高风速时输沙率增幅更加明显。

由图 7a、7c 可知,60% 盖度冰草修复草地与 20% 盖度退化草地的输沙率对比,其曲线都是随高度增加呈指数函数形式进行单调递减,但冰草修复草地的曲线衰减更快。冰草修复草地土壤植物根系较多,而且枯死的枝条叶片也增加了土壤有机质的含量,土壤有机质加速了土壤表层抗风蚀团聚体的形成,颗粒之间聚合力较强,提高了修复草地的抗风蚀能力。带状配置柠条修复草地的输沙率最小,其土壤抗风蚀效果最佳,但输沙率在距地表约柠条顶部的 30 cm 处出现极大值,在柠条带顶部以上的输沙率才会按指数规律递减,这是由于带状配置柠条对风沙流进行了抬升,使得最大输沙率出现在柠条带顶部的位置,另外,柠条枝叶与风沙流中的土壤颗

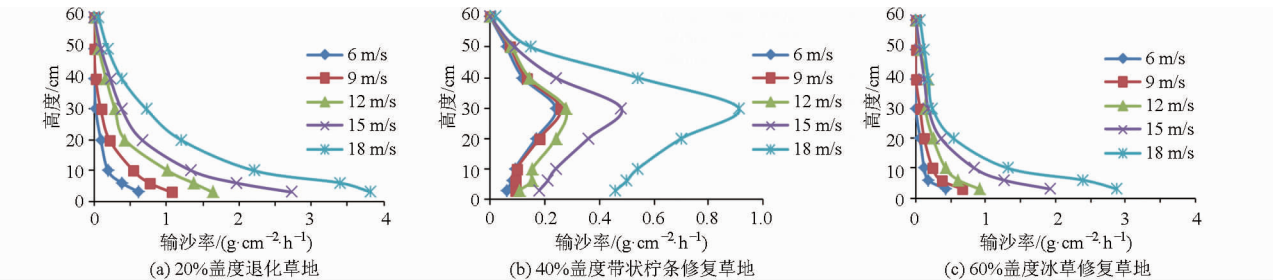


图 7 不同风速下 3 种不同草地的风沙流结构

Fig. 7 Structure of drifting sand flux for three grassland surfaces at different wind speeds

粒发生碰撞,使得土壤颗粒运动轨迹发生改变,穿透柠条带的为一些粒径较小的风蚀物,因此,40%覆盖度的带状配置柠条修复草地的抗风蚀效果较好。

4 结论

(1)在同一风速下,草地的粗糙度由大到小依次为柠条修复草地、冰草修复草地和退化草地,其中,柠条修复草地的粗糙度平均值为 2.46 cm,分别是冰草修复草地和退化草地平均粗糙度的 1.95 倍和 2.76 倍。

(2)随着距地表高度的降低,3 种草地风速均呈现减小趋势。当风洞中心风速为 9 m/s 时,柠条修复草地、冰草修复草地和退化草地地表在 8 cm 处的风速较之 64 cm 处的风速分别降低 82.23%、66.67% 和 61.11%,柠条修复草地对气流的消弱与阻挡效果非常明显。

(3)3 种草地 95% 以上的风沙流活动发生在距地表 40 cm 高度以下,其输沙率均随风速的增大而增加。冰草修复草地与退化草地的输沙率曲线都是随高度增加呈指数函数形式进行单调递减,冰草修复草地的曲线衰减更快,而柠条修复草地的输沙率最小,其输沙率在距地表约柠条顶部的 30 cm 处出现极大值,在柠条带顶部以上的输沙率才会按指数规律递减。

(4)柠条修复草地对风沙流的阻碍和改变作用差异显著,在柠条带高度以内,能迅速降低近地表风速,削弱气流对地表土壤的风蚀动能,在干旱和半干旱的荒漠化草地由于受水分条件限制,需要保持土壤水分与植被盖度的供需平衡,因此,低覆盖度的带状配置柠条修复草地在减少水分需求的同时,达到了较好的抗风蚀效果。

参 考 文 献

- 郭碧云,张广军. 基于 GIS 和 Markov 模型的内蒙古农牧交错带土地利用变化[J]. 农业工程学报,2009,25(12):291-298.
GUO Biyun, ZHANG Guangjun. Land use change in farming-pastoral region of Inner Mongolia based on GIS and Markov models[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12):291-298. (in Chinese)
- 孙悦超,陈智,赵永来,等. 阴山北麓农牧交错区草地土壤风蚀测试[J]. 农业机械学报,2013,44(6):143-147.
SUN Yuechao, CHEN Zhi, ZHAO Yonglai, et al. Test of grassland soil erosion of farming-pastoral zone in northern foot of Yinshan Mountains[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6):143-147. (in Chinese)
- GONG Guoli, LIU Jiyan, SHAO Quanqin, et al. Sand-fixing function under the change of vegetation coverage in a wind erosion area in northern China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2014, 5(2):105-114.
- 杨红艳,王晶莹,杨文斌. 行带式柠条林合理带间距的研究[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(7):210-214.
YANG Hongyan, WANG Jingying, YANG Wenbin. Selection of suitable distance between *Caragana korshinskii* kom shelterbelts[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(7):210-214. (in Chinese)
- 杨文斌,卢琦,吴波,等. 低覆盖度不同配置灌丛内风流结构与防风效果的风洞实验[J]. 中国沙漠,2007,27(5):791-796.
YANG Wenbin, LU Qi, WU Bo, et al. Wind tunnel experiment on wind flow structure and windbreak effect within low-covered shrubs under different arrangements[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(5):791-796. (in Chinese)
- 屈志强,刘连友,吕艳丽. 沙生植物构型及其与抗风蚀能力关系研究综述[J]. 生态学杂志,2011,30(2):357-362.
QU Zhiqiang, LIU Lianyou, LÜ Yanli. Psammophyte architecture and its relations with anti-wind erosion capability: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(2):357-362. (in Chinese)
- 高函,吴斌,张宇清,等. 行带式配置柠条林防风效益风洞试验研究[J]. 水土保持学报,2010,24(4):44-47.
GAO Han, WU Bin, ZHANG Yuqing, et al. Wind tunnel test of wind speed reduction of *Caragana korshinskii* coppice[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4):44-47. (in Chinese)
- 姜丽娜,杨文斌,卢琦,等. 低覆盖度行带式固沙林对土壤及植被的修复效应[J]. 生态学报,2013,33(10):3192-3204.
JIANG Li'na, YANG Wenbin, LU Qi, et al. The effect of low-covered sand-fixing forest belts on restoration of the soil and vegetation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10):3192-3204. (in Chinese)
- FUNK R, ENGEL W. Investigations with a field wind tunnel to estimate the wind erosion risk of row crops[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 145:224-232.
- TOURE A A, RAJOT J L, GARBA Z, et al. Impact of very low crop residues cover on wind erosion in the Sahel[J]. CATENA, 2011, 85(3):205-214.
- JIA Honglei, WANG Gang, GUO Li, et al. Wind erosion control utilizing standing corn residue in northeast China[J]. Soil & Tillage Research, 2015, 153:112-119.
- 孙悦超,麻硕士,陈智,等. 植被盖度和残茬高度对保护性耕作农田防风蚀效果的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(8):156-159.
SUN Yuechao, MA Shuoshi, CHEN Zhi, et al. Effect elements research on anti-wind erosion of conservation tillage farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8):156-159. (in Chinese)
- CHEN Zhi, CUI Hongmei, WU Pei, et al. Study on the optimal intercropping width to control wind erosion in north China[J]. Soil & Tillage Research, 2010, 110(2):230-235.

- 14 陈智,郭旺,宣传忠,等.热膜式无线风速廓线仪[J].农业机械学报,2012,43(9):99-102,110.
CHEN Zhi, GUO Wang, XUAN Chuanzhong, et al. Wireless hot-film wind speed profiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9):99-102,110. (in Chinese)
- 15 赵满全,王金莲,刘汉涛,等.集沙仪结构参数对集沙效率的影响[J].农业工程学报,2010,26(3):140-145.
ZHAO Manquan, WANG Jinlian, LIU Hantao, et al. Effects of configuration parameters of sand sampler on sand collection efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3):140-145. (in Chinese)
- 16 黄炎,赵满全.基于数值模拟与风洞试验的旋风分离式集沙仪优化设计[J].农业工程学报,2015,31(16):50-56.
HUANG Yan, ZHAO Manquan. Optimization design of performance test of cyclone separator sand sampler based on numerical simulation and wind erosion tunnel experiment[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16):50-56. (in Chinese)
- 17 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.
ZHAO Yonglai, MA Shuoshi, CHEN Zhi, et al. Variational rule of aerodynamic roughness under crop stubble coverage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):118-122. (in Chinese)
- 18 邹春霞,申向东,李彰俊.阴山北麓农牧交错带裸露耕地土壤风蚀物垂直分布规律[J].农业工程学报,2010,26(1):123-128.
ZOU Chunxia, SHEN Xiangdong, LI Zhangjun. Topsoil sediment distribution along height above bare tillage land in agro-pastoral ecotone of northern foot of Yinshan mountain[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1):123-128. (in Chinese)
- 19 王岩,张立峰,刘玉华,等.地表覆被因子对华北寒旱区土壤抗风蚀力的影响[J].水土保持学报,2013,27(1):65-70.
WANG Yan, ZHANG Lifeng, LIU Yuhua, et al. Effect of farmland surface cover factors on the ability of soil anti-erosion in cold and arid region of north China[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2013, 27(1):65-70. (in Chinese)
- 20 王仁德,肖登攀,常春平,等.改进粒度对比法估算单次农田风蚀量[J].农业工程学报,2014,30(21):278-285.
WANG Rende, XIAO Dengpan, CHANG Chunping, et al. Estimation on farmland soil loss by single wind erosion using improved particle-size distribution comparison method[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21):278-285. (in Chinese)
- 21 周海燕,王瑛珏,樊恒文,等.宁夏中部干旱带砂田抗风蚀性能研究[J].土壤学报,2013,50(1):41-49.
ZHOU Haiyan, WANG Yingjue, FAN Hengwen, et al. Wind tunnel test of wind erosion resistance of gravelly farmland in the arid zone of central Ningxia[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1):41-49. (in Chinese)
- 22 HONG S W, LEE I B, SEO I H, et al. Measurement and prediction of soil erosion in dry field using portable wind erosion tunnel[J]. Biosystems Engineering, 2014, 118(1):68-82.
- 23 宋涛,陈智,麻乾,等.分流对冲式集沙仪设计与性能试验[J].农业机械学报,2015,46(9):173-177,197.
SONG Tao, CHEN Zhi, MA Qian, et al. Design and performance experiment of shunt-hedging sand sampler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):173-177,197. (in Chinese)
- 24 王萍,王燕.民勤荒漠-绿洲过渡带不同下垫面条件的土壤风蚀特征[J].农业工程学报,2012,28(11):138-145.
WANG Ping, WANG Yan. Characteristics of aeolian sediment under different underlying surfaces in oasis-desert transitional region of Minqin[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11):138-145. (in Chinese)
- 25 LÜ Ping, DONG Zhibao. The status of research on the development and characteristics of mass-flux-density profiles above wind-eroded sediments: a literature review[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 71(12):5183-5194.

(上接第100页)

- 40 BALDOCCHI D, FALGE E, GU L, et al. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(11):2415-2434.
- 41 CHAVEZ J L, HOWELL T A, COPELAND K S. Evaluating eddy covariance cotton ET measurements in an advective environment with large weighing lysimeters[J]. Irrigation Science, 2009, 28(1):35-50.
- 42 EVETT S, WARRICK A, MATTHIAS A. Wall material and capping effects on microlysimeter temperatures and evaporation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(2):329-336.
- 43 TODD R, EVETT S, HOWELL T, et al. Soil temperature and water evaporation of small steel and plastic lysimeters replaced daily[J]. Soil Science, 2000, 165(11):890-895.
- 44 刘国水,刘钰,蔡甲冰,等.农田不同尺度蒸散量的尺度效应与气象因子的关系[J].水利学报,2011,42(3):284-289.
LIU Guoshui, LIU Yu, CAI Jiabing, et al. Study on scale effect of farmland evapotranspiration and relationship with meteorological factors[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(3):284-289. (in Chinese)
- 45 AUBINET M, GRELLE A, IBROM A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology[J]. Advances in Ecological Research, 2000, 30(1):113-175.
- 46 BLANKEN P D. Turbulent flux measurements above and below the overstory of a boreal aspen forest[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1998, 89(1):109-140.
- 47 LEE X, HU X. Forest-air fluxes of carbon, water and energy over non-flat terrain[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 103(2):277-301.