

吐鲁番市不同年限人工梭梭林防风固沙效益及其与生物量的关系

王璞¹, 孙桂丽^{1,2}, 各文婷¹, 孙红月¹, 周志欣¹

(1.新疆农业大学 林学与风景园林学院 干旱区林业生态与产业技术重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052;
2.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所 中国气象局树木年轮理化研究重点实验室/新疆树木年轮生态实验室 新疆乌兰乌苏生态与农业气象野外科学观测研究站/乌兰乌苏农业气象试验站, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: [目的] 评估不同种植年限的人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林对风沙流的防风固沙效益, 探索快速评价防风固沙效益的方法, 界定生物量—防风固沙效益的下限, 为荒漠植被恢复与重建提供科学依据。[方法] 以新疆吐鲁番市的荒漠化区域不同种植年限的人工梭梭林为研究对象, 通过野外调查、野外观测和室内分析对其各项防风固沙效益指标进行监测和分析, 对比防风固沙效益指标与生物量变化的关系。[结果] ①人工梭梭林随着营造年限的增长, 其防风效能、地表粗糙度、地表蚀积量与阻沙效能均随种植年限增加显著提升($p < 0.05$)。②人工梭梭林随着营造年限的增长, 区域内的风速廓线规律发生改变, 原生荒漠风速廓线呈现“L”形变化特征, 2年生、4年生的人工梭梭林风速廓线呈现出“J”形变化特征, 6年生、8年生、10年生的人工梭梭林风速廓线呈现出反“J”形变化特征。③人工梭梭林输沙通量随着营造年限的增加而呈现递减趋势, 并随着高度的增长也呈现递减趋势。④基于5种不同年限梭梭林, 本研究构建了生物量—防风固沙效益指标模型, 其中, 立木生物量指数与防风效益、地表蚀积量、地表粗糙度、输沙通量、阻沙效能的关系, 最佳函数模型分别为幂函数模型、幂函数模型、二次方程函数、指数函数模型、Logistic函数模型, R^2 分别为0.651, 0.962, 0.790, 0.804, 0.925。⑤若要起到良好的防风固沙效益, 人工梭梭林立木生物量指数下限需达到 4.94 kg/m^2 。[结论] 人工梭梭林种植4 a以上时, 防风固沙效益可达到稳定状态, 可采用相应模型估算评估指标。当人工梭梭林立木生物量指数 $\geq 4.94 \text{ kg/m}^2$ 时, 可稳定发挥防风固沙效益。

关键词: 不同种植年限; 人工梭梭林; 生物量; 防风固沙效益

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0109-10

中图分类号: S718.5

文献参数: 王璞, 孙桂丽, 各文婷, 等. 吐鲁番市不同年限人工梭梭林防风固沙效益及其与生物量的关系[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 109-118. Wang Pu, Sun Guili, Ge Wenting, et al. Effectiveness of wind and sand stabilization by artificial *Haloxylon ammodendron* forests of different ages in Turpan City and its relationship with biomass [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 109-118. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.039; CSTR:32312.14.stbctb.2025.03.039.

Effectiveness of wind and sand stabilization by artificial *Haloxylon ammodendron* forests of different ages in Turpan City and its relationship with biomass

Wang Pu¹, Sun Guili^{1,2}, Ge Wenting¹, Sun Hongyue¹, Zhou zhixin¹

(1.Xinjiang Key Laboratory of Forestry Ecology and Industrial Technology in Arid Areas, College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2.Field Scientific Experiment Observation Research Station on Ecology and Agrometeorology of Wulanwusu in Xinjiang/Agrometeorological Experiment Station of Wulanwusu, Xinjiang Key Laboratory of Tree-ring Ecology/Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research, Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi, Xinjiang 830002, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study were to explore the wind and sand flow prevention and stabilization

收稿日期: 2024-12-10

修回日期: 2025-03-11

采用日期: 2025-03-11

资助项目: 中国沙漠气象科学研究基金项目“极端干旱区吐鲁番市植被固碳能力估算及未来固碳潜力评估”(Sqj20240018); 中央财政林草科技示范推广项目(新[2022]TG09)

第一作者: 王璞(1999—), 男(汉族), 甘肃省武威市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。Email: 2420363908@qq.com。

通信作者: 孙桂丽(1979—), 女(汉族), 河南省兰考县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事荒漠化防治与生态恢复方面的研究。Email: sxfgl@126.com。

benefits of artificial *Haloxylon ammodendron* forests with different planting years, rapidly evaluate the wind and sand flow prevention and stabilization benefits, and define the lower limit of the biomass-anti-sand flow prevention and stabilization benefits to provide scientific basis for the restoration and reconstruction of desert vegetation. [Methods] Artificial *H. ammodendron* forests of varying planting ages in desertified areas of Turpan City, Xijiang Wei Autonomous Region, were selected as the study subjects. Field surveys, observations, and laboratory analyses were conducted to monitor windbreak and sand fixation benefit indicators. The relationships between these indicators and the changes in biomass were compared. [Results] ① The windbreak efficiency, surface roughness, surface erosion-deposition volume, and sand-blocking efficiency of artificial *Haloxylon ammodendron* forests significantly improved ($p < 0.05$) with increasing planting age. ② The wind speed profile in the region changed with the growth of artificial *H. ammodendron* forests. The wind speed profile of the primary desert showed type 'L' change characteristics, the wind speed profile of the 2 and 4-year-old artificial *H. ammodendron* forests showed type 'I' change characteristics. The wind speed contours of 6, 8, and 10-year-old planted *H. ammodendron* forests showed the opposite of type 'J' changes. ③ The sand transport flux of the planted *H. ammodendron* forest showed a decreasing trend with an increase in the establishment period and also showed a decreasing trend with an increase in height. ④ The biomass-windbreak and sand fixation efficiency index model was constructed based on five age-variant *H. ammodendron* forests, in which the best function models between the standing biomass index and the relationship between windbreak efficiency, surface erosion, surface roughness, sand transport flux, and sand blocking efficiency was the power function, the idempotent function, quadratic function, exponential function, and the *logistic* function models with R^2 values of 0.651, 0.962, 0.790, 0.804, and 0.925, respectively. ⑤ The standing biomass index of artificial *H. ammodendron* forests must reach a minimum threshold of 4.94 kg/m^2 to achieve effective windbreaks and sand fixation benefits. [Conclusion] Artificial *H. ammodendron* forests achieved stable windbreak and sand fixation benefits 4 years of planting. These benefits could be estimated using the relevant models. The forests could stably deliver windbreak and sand-fixation effects when the standing biomass index was $\geq 4.94 \text{ kg/m}^2$.

Keywords: different planting years; artificial *Haloxylon ammodendron* forest; biomass; windbreak and sand-fixation benefits

新疆吐鲁番市地处西北极端干旱区,年均降水量仅 16.4 mm,风沙危害严重,土地沙漠化频发,生态环境十分脆弱^[1]。营造人工防护林是防治风沙灾害的一种重要措施^[2]。梭梭(*Haloxylon ammodendron*)属于藜科梭梭属植物,具有抗旱、耐盐及防风沙的特点,广泛分布于中国新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区、甘肃省西部、宁夏回族自治区西北部等干旱荒漠区。种植梭梭林可有效抵御风沙侵蚀,改善土壤物理结构,提高土壤肥力,加快沙地成土的进程^[3]。并且梭梭可接种肉苁蓉,具有非常高的经济价值,享有“沙漠人参”之美誉,可以提高农民收入。吐鲁番市周边有大量天然和人工梭梭林,是该地区的主要防风固沙树种,也是干旱区植被生物量、碳储量的主体^[4]。人工梭梭林接种肉苁蓉技术也得到迅速发展,位居全疆前列,促进了当地的社会经济发展,实现治沙和致富并举。

近年来,部分学者^[5-8]对人工梭梭林的土壤和根系微生物群落特征、保存率及生长状况、物种多样性以及风沙运动分布等方面做了相关研究,然而,针对

极端干旱区不同种植年限下人工梭梭林防风固沙效应的研究较少,在极端干旱环境条件下,不同种植年限人工梭梭林防风固沙效益有着怎样的变化规律?地上生物量与防风固沙效益间关系如何?这些问题都亟待深入研究。基于此,本研究以吐鲁番市原生荒漠及不同种植年限的人工梭梭林为研究对象,通过野外调查、野外观测和室内分析的方法,对其风速、地表蚀积量和输沙通量进行观测,对比研究人工梭梭林防风效能、地表粗糙度、风速廓线、地表蚀积量、输沙通量、阻沙效能等指标随营造年限的变化规律及其与梭梭生长变化之间的关系,揭示不同种植年限人工梭梭林其防风固沙效益的变化规律,探讨人工梭梭林地上生物量与防风固沙效益关系,为极端干旱区沙漠化防治、生态修复以及科学合理保护梭梭荒漠植被、合理发展沙产业提供理论基础和科学依据。

1 研究区概况

试验观测地位于新疆维吾尔自治区吐鲁番市

高昌区恰特喀勒乡公相村,试验区属于典型的极端干旱区大陆性荒漠气候,试验观测区地处东经 89°11'12"—89°11'31",北纬 42°49'31"—42°49'23",年均降水量 16.4 mm,年均蒸发量 3 000 mm 以上,主要风向为偏东风,年平均风速 5.5 m/s^[9]。年均气温在 11~23℃,极端高温 50.1℃,夏季天气极端炎热,日照时间长;试验区多大风天气,最大风速可达 24.7 m/s,土壤成分主要为风沙土,少数为红壤与棕漠土。

2 数据测定与研究方法

2.1 试验布设与数据采集

选取吐鲁番市高昌区公相村内不同种植年限的人工梭梭林作为研究对象,于 2024 年 3—10 月期间

每月的大风天气下,开展对人工梭梭林的防护效益监测。在区域内选择不同种植年限的人工梭梭林,布设 6 个监测样地,分别为原生荒漠、2 年生、4 年生、6 年生、8 年生、10 年生人工梭梭林,每块样地设置 3 个样方,每块样方面积约为 900 m²,并将样方设置于样地区域中心附近,样方内梭梭树密度约为 0.18 株/m²。样地基本条件及管理措施详见表 1,其中,样地人工梭梭林前 5 a 均接种肉苁蓉,由于肉苁蓉生长需要汲取养分,故在生长季进行滴灌作业并定期施肥和除草;自第 6 a 开始,肉苁蓉接种收益不佳,因此,6 年及以上人工梭梭林不再接种肉苁蓉,故仅在春季进行滴灌作业,后期梭梭林会进行更新复壮,再进行肉苁蓉的接种。

表 1 试验样地分布和布设
Table 1 Distribution layout of sample plots

样地类型	样地坐标	海拔/m	株行距/m	是否接种肉苁蓉	抚育措施
2 年生人工梭梭林	89.19448789E,42.82273399N	—111	1×5	是	生长季进行滴灌作业 定期进行施肥和除草
4 年生人工梭梭林	89.19084867E,42.81797780N	—116	1×5	是	生长季进行滴灌作业 定期进行施肥和除草
6 年生人工梭梭林	89.19335321E,42.81975251N	—114	1×5	否	春季进行滴灌作业
8 年生人工梭梭林	89.19103130E,42.83154001N	—105	1×5	否	春季进行滴灌作业
10 年生人工梭梭林	89.19564364E,42.81871731N	—114	1×5	否	春季进行滴灌作业
原生荒漠	89.18232009E,42.83521558J	—105			

在各监测样地布设气象站、测钎、集沙仪,样地中心布设 HOBO U30 小型气象站(包括 4 个风速传感器和 1 个风向传感器),设置风杯高度为 30,50,100 和 200 cm,将仪器布设于样地中心点,仪器设置间隔 5 min 监测 1 次,显示 5 min 内的平均风速,测量总时间为 24 h,并计算 24 h 内的平均风速;利用测钎沿样地地垄前后各布设 3 根测钎,每根测钎直径约 1 cm,长度为 50 cm,在距下端 25 cm 处进行标记(此标记与地面平行),插入地下 25 cm,地上留高 25 cm,最底部标记距地表 10 cm 再次进行标记,且每隔 10 cm 做 1 次标记,每月取样 1 次;在下风向边缘布设旋转式集沙仪,布设高度为 30,50,70 和 90 cm,每层集沙口为宽 2 cm×5 cm,每月取样 1 次。

2.2 研究方法

数据统计处理主要使用 Origin 2024 和 Excel 2019 软件完成。

2.2.1 防风效益

(1) 防风效能计算公式:

$$E_h = \frac{V_{h0} - V_h}{V_{h0}} \times 100\%$$
 (1)

式中: E_h 为高度(h)在 30,50,100,200 cm 处的防风效

能; V_{h0} 为代表对照原生荒漠高度为 h_0 处平均风速(m/s); V_h 代表风杯高度为 h 处的平均风速(m/s)。

(2) 地表粗糙度计算公式:

$$\lg Z_0 = \frac{\lg Z_2 - \lg Z_1 \times \frac{u_1}{u_2}}{1 - \frac{u_1}{u_2}}$$
 (2)

式中: Z_0 为地表粗糙度(cm); Z 为代表下垫面高度, $Z_1=30$ cm, $Z_2=200$ cm; u_1 为同一时刻 $Z_1=30$ cm 高度处的风速(m/s); u_2 为同一时刻 $Z_2=200$ cm 高度处的风速(m/s)。

(3) 风速廓线计算公式:

$$U_z = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right)$$
 (3)

对同一高度,同一时段风速进行平均,再用均值进行回归分析:

$$U_z = A + B \ln Z$$
 (4)

式中: U_z 为高度(z)在 20,50,100,200 cm 处的风速; A,B 为回归系数,

摩阻速度计算公式为:

$$u_* = k \cdot b$$
 (5)

式中: $k=0.4$; b 为回归系数。

2.2.2 固沙阻沙效益

(1) 地表蚀积量计算公式为:

$$A = Z \cdot S \times 1\,000 \cos \theta \quad (6)$$

式中: A 为土壤侵蚀体积(m^3); Z 为侵蚀厚度(m); S 为水平投影面积(m^2); θ 为坡面坡度($^\circ$)。

(2) 输沙通量计算公式为:

$$Q_t = \frac{Q}{s \cdot t} \quad (7)$$

式中: Q_t 为输沙通量 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]; Q 为集沙仪各层沙样质量(kg); s 为进沙口面积(m^2); t 为收集持续时间(h)。

(3) 阻沙效果计算公式:

$$E_z = \frac{Q_d - Q_z}{Q_d} \times 100\% \quad (8)$$

式中: E_z 为群落样地的阻沙效果($\%$); Q_d, Q_z 分别代表对照样地和梭梭样地各高度单位时间内总输沙率。

2.2.3 立木生物量指数 通过实地调查,测量各样方内所有梭梭树的株高、基径、冠幅、保存率等指标,计算其平均株高、平均地径、平均冠幅、保存率等指标,选定各样地标准株,并查阅文献,选取适合该地区的人工梭梭林的生长回归方程,并估算出各样地标准株的生物量,该值作为本文各样地立木生物量指数估算的基础。

标准株生物量的估算^[10]

$$W = \frac{1.302\,5 \times (D^2 \cdot H)^{0.942\,3}}{1\,000} \quad (9)$$

式中: W 为生物量(kg); D 为梭梭树基径(cm); H 为梭梭树高(cm)。

该公式计算出生物量 R^2 可达到 0.999 2, 根据公式(9)计算出不同种植年限的梭梭单株生物量。

为区别于单株生物量,设林网生物量 W_w , 则林网生物量应为单株生物量 W 与总株数的乘积,而总株数又为单位带长拥有的株数与带长的乘积,再乘以保存率,再乘行数,则林网生物量通用计算公式为:

$$W_w = \frac{W \cdot M \cdot K \cdot \rho}{L} \quad (10)$$

式中: W_w 为林网生物量(kg); W 为单株生物量(kg); M 为林带带长(m); K 为行数; ρ 为林带保存率($\%$); L 为株距(m)。

基于此,本文提出立木生物量指数(W_l)即防风固沙林网单位面积上所拥有的活立木生物量,其计算方法为单株生物量与林网总株数的乘积,其值大小与林带结构关系密切,该参数可用作防护林的经营和管理,以提高防风效益。

$$W_l = \frac{W \cdot M \cdot K \cdot \rho}{L \cdot M \cdot O} \quad (11)$$

式中: W_l 为立木生物量指数(kg/m^2); O 为行距(m)。

2.3 防风固沙效益模型选择

由立木生物量指数建立防风固沙效益模型,研究选取 6 种常用的模型构建人工梭梭林区域的防风固沙指标基础模型,以 5 种防风固沙效益指标,防风效能(E_h)、地表粗糙度(Z_0)、地表蚀积量(A)、输沙通量(Q_t)、阻沙效果(E_z)作为因变量,立木生物量指数(W_l)为自变量。将不同种植年限区域内的生物量数据与各项防风固沙效益指标建立模型,并通过决定系数(R^2)及平均绝对误差(MAE)对模型的精度进行检验。计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (12)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (13)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (14)$$

式中: y_i 为植物地上生物量的实测值(g); $\hat{y}_i$ 为植物地上生物量的估测值(g); $\bar{y}$ 为植物地上生物量的实测平均值(g); n 为样本数。

3 结果与分析

3.1 防风固沙效益

3.1.1 防风效能 由图 1 可以看出,不同种植年限人工梭梭的防风效能随着种植年限增长逐渐提升。2 年生、4 年生、6 年生、8 年生、10 年生的人工梭梭林的防风效能分别可达到 66%, 77%, 86%, 83%, 89%。其中,6 年生、8 年生、10 年生的人工梭梭林防风效能变化趋势基本相似,防风效能也大致相同,表明随着种植年限的增加,在一定范围内,防风效能的提升并不像之前那样显著,而是逐渐趋于稳定。

随空间高度的变化,不同种植年限人工梭梭林防风效能呈现不同变化趋势。2 年生的人工梭梭林在离地表 30~50 cm 的高度范围内,防风效能随高度的增加而明显增加,在距离地表 50 cm 以上时,防风效能有所降低,其防风作用主要集中在 0~50 cm,防风效能平均可达 78.5%;4 年生的梭梭林在距离地表 0~100 cm 的高度内,随着高度的增加有明显增加,在距离地表 100 cm 以上,防风效能有所降低,但仍具有良好的防风效能,防风作用主要集中在 0~100 cm,防风效能平均可达 82%;6 年生、8 年生、10 年生梭梭林防风效能规律基本类似,在距离地表 100 cm 高度

范围内,防风效能随着高度的增加变化较小,防风效能较高,平均效能可达 93%,但在 100~200 cm 高度以内,防风效能均有轻微下降,不过仍然具有良好的防风效能,平均值均可达到 74%。表明不同种植年限的人工梭梭林对近地面防风作用有着不同程度的影响。在 2~4 年生的种植年限阶段,可能是受人工梭梭林自身植被高度与冠幅等因素的限制(梭梭生长垂直高度约为 1.0 m),在垂直高度 1.0 m 以下区域,植被较为密集,能有效阻挡近地面气流,极大地削弱风速,所以在相对较低高度呈现出较高的防风效能。但随着高度上升,由于植被高度的限制,空间渐趋开阔,植被密度也逐渐降低,对气流的阻挡作用相应减弱,防风效能也就随之下降;在 6~8 年生的种植年限阶段,人工梭梭林株高、冠幅、构型等因素不再发生显著变化,整体趋于稳定,所以在 100~200 cm 范围防风固沙效益不再显著变化。

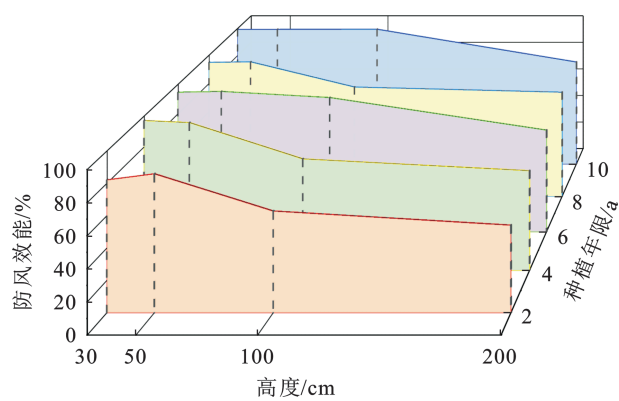


图 1 不同种植年限的梭梭林不同高度的防风效能的对比
Fig.1 Comparison of wind protection efficiency of *Haloxylon ammodendron* forests with different planting ages and heights

3.1.2 地表粗糙度 从表 2 中可以看出,随着种植年限的增长,人工梭梭林地表粗糙度逐渐提高,原生荒漠的地表粗糙度平均值为 0.18 cm,而经过 2 年生、4 年生、6 年生、8 年生、10 年生人工梭梭林的地表粗糙度均值分别为 73.15, 102.69, 108.29, 124.27 和 124.38 cm。显而易见,随着人工梭梭林种植年限的增加,地表粗糙度呈现出明显的增长趋势,在营造 2 年生以后相较于原生荒漠便有较为显著的提升,在营造 4 年生后,继续呈现出增长趋势,此时,已具有良好的防风效益,特别是在营造 8 a 生后,人工梭梭林群落结构稳定,地表粗糙度开始趋于平衡不再显著提升($p>0.05$)。由方差分析结果可知,不同年份人工梭梭林地表粗糙度均显著大于未改造原生荒漠地表粗糙度($p<0.05$),并且 4 年生、6 年生的梭梭林地表粗糙度也大于 2 年生的地表粗糙度,而 8 年生、

10 年生的梭梭林地表粗糙度则显著大于 4 年生的地表粗糙度。表明随着种植年限的增加,人工梭梭林在地表粗糙度方面的变化特征及其对环境产生的影响。

表 2 不同种植年限梭梭林地表粗糙度
Table 2 Surface roughness of *Haloxylon ammodendron* forests of different planting ages

样地类型	地表粗糙度/cm
原生荒漠	0.18±0.11 ^c
2 年生人工梭梭林	73.15±23.02 ^b
4 年生人工梭梭林	102.69±32.94 ^{ab}
6 年生人工梭梭林	108.29±35.49 ^{ab}
8 年生人工梭梭林	124.27±24.36 ^a
10 年生人工梭梭林	124.38±39.29 ^a

注:①地表粗糙度数据为平均值±标准差;②显著性水平为 0.05。

3.1.3 风速廓线 由图 2 可知,不同种植年限的人工梭梭林在垂直方向上的气流影响作用下,风速廓线变化规律发生了变化,其变化趋势也表现出差异性。原生荒漠的风速廓线形状特征为“L”形。而 2 年生和 4 年生的人工梭梭林风速廓线形状特征表现出斜“J”形的风速廓线。6 年生、8 年生和 10 年生的人工梭梭林风速廓线形状特征则显示为反“J”形变化趋势。2 年生、4 年生的人工梭梭林,在 0~50 cm 高度区间,2 年生和 4 年生的人工梭梭林表现出较强的风速降低效果,降幅显著;而在 50~100 cm 高度区间,风速降低效果仍显著,但降幅有所减少,并逐渐趋近于原生荒漠的风速。100~200 cm 高度区间内,风速的增幅加大,显示出快速回归至对照风速的趋势。对于 6 年生、8 年生和 10 年生的人工梭梭林,在 0~100 cm 高度区间内,风速基本保持稳定,而在 100~200 cm 区间,风速增幅增大,保持了良好的稳定性趋势。这表明随着种植年限的增加,人工梭梭林在垂直方向上对风速的调节能力逐渐增强,能够更好地适应不同高度的气流环境。

3.1.4 地表蚀积量 由图 3 可知,原生荒漠的地表蚀积量约为-21.24 m³,而在人工梭梭林种植 2 年后,株前平均地表蚀积量约为-11.4 m³,株后平均地表蚀积量约为-11.8 m³,总平均地表蚀积量显著减少至-10.27 m³,整体呈现侵蚀形态。随着梭梭林的生长,4 年生的人工梭梭林株前平均地表蚀积量约为-8.13 m³,株后平均地表蚀积量约为-6.93 m³,总平均地表蚀积量进一步减少至-7.53 m³。然而,当人工梭梭林种植达到 6 a 时,株前平均地表蚀积量约为-1.6 m³,株后平均地表蚀积量约为-1.67 m³,总平均地表蚀积量出现正值,为 0.33 m³,并且这个趋势持

续到了 8 和 10 a 的种植周期,株前平均地表蚀积量分别约为 3.53 和 6.33 m^3 ,株后平均地表蚀积量约为 5.4 和 7.4 m^3 ,总平均地表蚀积量分别增加到 4.46 和 6.86 m^3 ,表明随着人工梭梭林的成长,地表开始由侵蚀转为堆积,土壤稳定性得到显著提升。具体来看,2 年生的人工梭梭林在地表蚀积量方面相对于原始荒漠减少了 48.06% ,而 4 年生的减少幅度为 64.54% ;到了 6 a 时,减少幅度急剧增加至 101.16% ,标志着土壤侵蚀的转变点。在 8 年生和 10 年生的人工梭梭林中,可以观察到持续的土壤堆积效果,这对于改善生态环境和促进可持续发展具有重要意义。

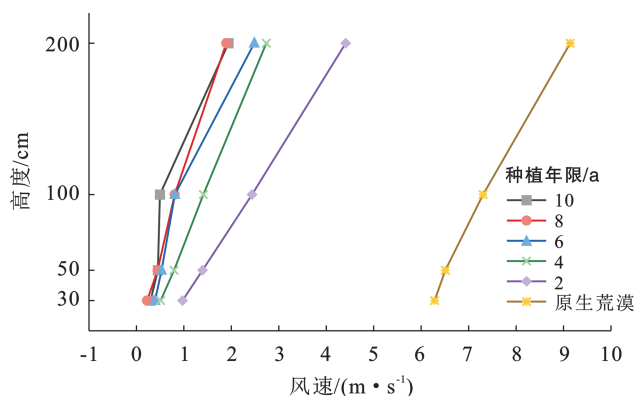


图 2 不同种植年限梭梭林不同高度的风速廓线的对比

Fig.2 Comparison of wind velocity profiles of *Haloxylon ammodendron* forests with different planting years and heights

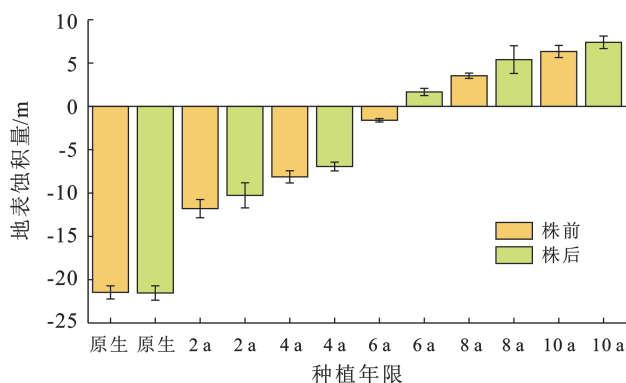


图 3 不同种植年限梭梭林地表蚀积量

Fig.3 Surface erosion volume of *Haloxylon ammodendron* forests with different planting years

3.1.5 输沙通量 根据图 4 分析可以发现,在不同的监测点位上,输沙通量随着高度的升高而逐渐降低。通过比较不同梭梭林输沙通量发现,原生荒漠的输沙通量平均为 $1.55 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,显著高于经过不同年份人工梭梭林的输沙通量,其顺序为 2 年生、4 年生、6 年生、8 年生、10 年生的人工梭梭林,分别为 $0.178, 0.063, 0.047, 0.032$ 和 $0.030 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而人工梭梭林的输沙通量相较于原生荒漠分别降低了

$88.53\%, 95.95\%, 96.93\%, 97.9\%, 98.07\%$ 。这表明人工梭梭林在降低输沙通量方面具有显著的效果。值得注意的是,当人工梭梭林的营造年限达到 4 a 及以上时,其输沙通量之间的变化并不明显,呈现出一种相对稳定的状态。这意味着在人工梭梭林生长到一定年限后,其对输沙通量的调节作用已经趋于稳定,不会再随着年限的增加而出现大幅波动。说明人工梭梭林在治理风沙、减少输沙方面的重要作用并随着生长年限形成的稳定生态功能。

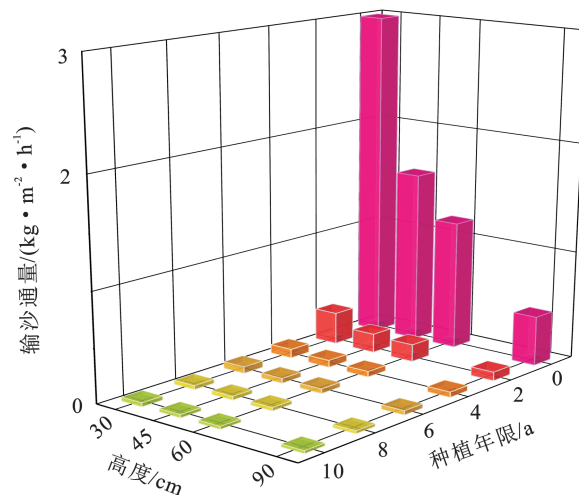


图 4 不同种植年限梭梭林不同高度输沙通量

Fig.4 Sand transport flux of different planting years and heights of *Haloxylon ammodendron* forests

3.1.6 阻沙效能 据图 5 可知,不同年限的人工梭梭林的阻沙效能随着高度的增加而逐渐减少,整体变化呈现相同趋势,阻沙效能在相同高度上表现为: $10 \text{ a} > 8 \text{ a} > 6 \text{ a} > 4 \text{ a} > 2 \text{ a}$,其平均阻沙效能为 $86.33\%, 94.25\%, 95.3\%, 96.92\%, 97.4\%$ 。在 30 cm 的高度,最高的阻沙效能可达 98.75% ,而最低的也达到 90.13% 。4 年生及以上的人工梭梭林,其阻沙效能均超过了 97% 。在 45 cm 的高度,最高阻沙效能为 98.15% ,最低为 88.92% 。60 cm 高度处,最高阻沙效能为 97.79% ,而最低为 86.5% 。90 cm 的高度,最高的阻沙效能为 94.88% ,最低为 82.33% 。这表明人工梭梭林在阻沙方面具有显著的效果,能够有效地减少风沙的流动,对环境起到良好的保护作用,充分说明人工梭梭林具有显著的生态效益,能够为生态环境的改善做出重要的贡献。

3.2 立木生物量指数

3.2.1 立木生物量指数同防风固沙效益相关性分析 针对立木生物量指数与防风固沙效能指标展开相关性分析。由图 6 可知,立木生物量指数与防风效能之间存在正相关关系,相关系数为 0.67 ,说明立木生物量指数的增长可促使防风效能的增强;同时,立

木生物量指数与地表蚀积量之间同样存在正相关关系,相关系数为 0.91,即立木生物量指数的增加导致地表蚀积量的相应增加;立木生物量指数与地表粗糙度也呈现出正相关关系,相关系数为 0.72,即立木生物量指数的增加使得地表粗糙度也随之增大;此外,立木生物量指数与阻沙效能也呈正相关关系,相关系数为 0.52,表明立木生物量指数的上升会提高阻沙效能。另一方面,立木生物量指数与输沙通量呈现出负相关关系,相关系数为-0.51,表明立木生物量指数的增加会减少输沙通量。基于以上研究发现,以立木生物量指数(W_l)作为自变量,以各项防风固沙效益指标作为因变量,利用立木生物量指数(W_l)与各项防风固沙效益指标构建了干旱区植被地上生物量—防风固沙效益模型。

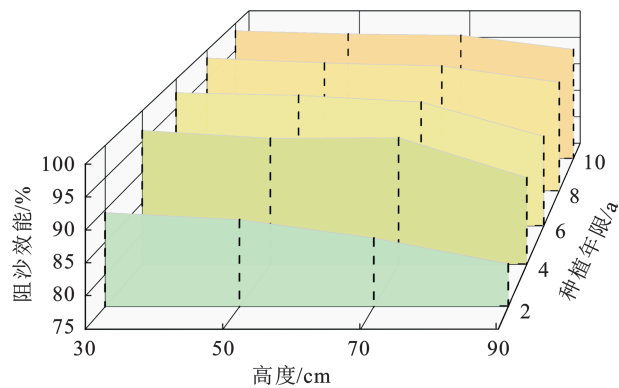


图 5 不同种植年限梭梭林不同高度阻沙效能
Fig.5 Sand blocking efficiency of different planting years and heights of *Haloxylon ammodendron* forests

3.2.2 立木生物量指数同防风固沙效益指标模型建立 使用立木生物量指数(W_l)与各项防风固沙效益指标来构建干旱区植被地上生物量—防风固沙效益模型,以立木生物量指数(W_l)为自变量,防风固沙效益指标为因变量,运用线性函数、对数函数、二次方程函数、幂函数、指数函数和 Logistic 函数 6 种常见模型构建研究区防风固沙效益指标估测模型。最后选

取平均相对误差、均方根误差和总体预测精度作为检验指标。

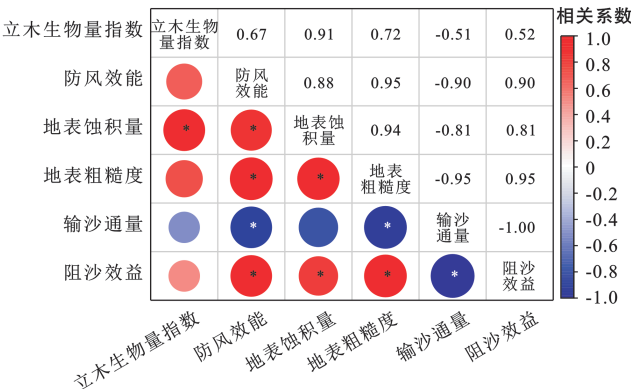


图 6 立木生物量指数与防风固沙效益相关性
Fig.6 Correlation between standing tree biomass index and benefits of wind prevention and sand fixation

将立木生物量指数与各项防风固沙效益指标进行函数模型拟合,选择决定系数最高的函数模型,作为描述立木生物量指数与各项防风固沙效益之间关系的最佳模型(表 3)。由表 3 可知,在立木生物量指数与防风效能、地表蚀积量关系的函数模型拟合过程中,幂函数模型决定系数最高, R^2 分别为 0.651 和 0.790,因此,选择幂函数模型作为描述立木生物量指数与防风效能、地表蚀积量之间关系的最佳模型;在立木生物量指数与地表粗糙度关系的函数模型拟合过程中,二次方程函数模型决定系数最高, R^2 为 0.962,因此,选择二次方程函数模型作为描述立木生物量指数与地表粗糙度之间关系的最佳模型;在立木生物量指数与输沙通量关系的函数模型拟合过程中,指数函数模型决定系数最高, R^2 为 0.804,因此,选择指数函数模型作为描述立木生物量指数与输沙通量之间关系的最佳模型;在立木生物量指数与阻沙效能关系的函数模型拟合过程中,Logistic 函数模型决定系数最高, R^2 为 0.925,因此,选择 Logistic 函数模型作为描述立木生物量指数与阻沙效能之间关系的最佳模型。

表 3 立木生物量指数与防风固沙效益指标拟合结果

Table 3 Summary of biomass index of fitting standing tree to indexes of wind and sand control benefits					
指标类型	函数类型	拟合方程	R^2	RMSE	MAE
防风效能	幂函数模型	$y = 0.743x^{0.708}$	0.650 55	0.055	0.043 5
地表粗糙度	二次方程函数模型	$y = -2.51x^2 + 37.72x + 0.22$	0.790 18	46.77	35.50
地表蚀积量	幂函数模型	$y = 12.982x^{0.322} - 21.24$	0.962 72	3.55	3.14
输沙通量	指数函数模型	$y = 1.705e^{-9.548x}$	0.804 48	0.051 4	0.043 4
阻沙效能	Logistic 函数模型	$y = \frac{(0.866\ 6 - 0.965\ 5)}{1 + \left(\frac{x}{0.690\ 6}\right)^{4.533\ 7}} + 0.965\ 5$	0.925 34	0.009 9	0.008 2

注:RMSE,MAE 分别为均方根误差和平均绝对误差。

3.3 立木生物量指数—防风固沙效益

生物量用于描述树木生长过程中的干物质产量,其干物质的质量大小直接影响树木立木表面积的大小,而立木表面积是影响梭梭防风固沙效益的重要因素,因此,生物量与防风效益存在密切关系,需要深入探索。建立生物量与防风固沙效益的关系,目的就在于同步估算防护林的生物量产量、防风效益,开展立木生物量指数—防风固沙效益评估,这对全面评价防护林综合效益具有重要意义。探究立木生物量指数与各项防风固沙效益的关系,具体方法是将防风固沙效益作为多项防风固沙效益指标,通过估算单位面积林网生物量开展相关研究。当防

风固沙效益接近或达到合理值时,与之对应的立木生物量指数,便成为了防风固沙林在该特定参数下的下限。也就是说,当立木生物量指数达到这个下限值时,此时的防护林能够充分发挥出良好的防风效益。

由表 4 可知,当立木生物量指数达到 4.94 kg/m^2 时,防风效能为 85.9%,地表蚀积量为 0.333 m^3 ,呈现堆积状态,地表粗糙度为 102.29 cm ,输沙通量为 $0.047 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,阻沙效能为 95.7%,人工梭梭林的防风固沙效益表现为良好状态,所以认为若要起到良好的防风固沙效益,人工梭梭林立木生物量指数下限需达到 4.94 kg/m^2 。

表 4 立木生物量指数与防风固沙效益

Table 4 Biomass index and effectiveness of standing trees of wind and sand stabilization

种植年限/a	立木生物量指数/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	防风效能/ %	地表蚀积量/ m^3	地表粗糙度/ cm	输沙通量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	阻沙效能/%
2	0.225	66.1	-110.333	73.151	0.178	87.0
4	0.991	76.6	-75.333	102.688	0.063	94.4
6	4.942	85.9	0.333	108.292	0.047	95.7
8	7.926	82.7	44.667	124.270	0.032	97.2
10	10.700	89.2	68.667	124.383	0.030	97.4

4 讨论

4.1 不同年限人工梭梭林防风固沙效益对比

本研究发现,人工梭梭林随着种植年限的增加,其防风效能整体呈现逐渐增大趋势;在垂直高度上,2年生人工梭梭林的防风作用主要集中在距离地表 $0 \sim 50 \text{ cm}$;4年生人工梭梭林防风作用主要集中在 $0 \sim 100 \text{ cm}$;而6年生、8年生、10年生的人工梭梭林防风作用在距离地表 100 cm 高度范围内表现最佳,不过,这些林分在 $100 \sim 200 \text{ cm}$ 高度处的防风效能略有下降,但仍具有较好的防风效能。植物群落对垂直气流的影响改变了风速廓线的变化规律,原生荒漠呈现 L 形风速廓线,2年生、4年生的人工梭梭林呈现出 I 形变化特征,6年生、8年生、10年生的人工梭梭林风速廓线呈现出反 J 形变化特征,这些变化主要由人工梭梭林中树木的冠幅和株高决定,其中冠幅影响了林内的密度和通风情况,而株高则决定了风速减弱的高度范围。李鹏等^[11]对乌兰布和沙漠东北缘的人工梭梭林的研究结果发现随着人工梭梭林种植年限的增长,其内部梭梭树构型发生变化,使得梭梭林区域的地表粗糙度和风速廓线发生变化,从而导致防风固沙效益发生变化。随着营造年限的增加,对区域内梭梭林总体而言,其对近地表风速的减弱作用得到了增强,并且在垂直高度方面,随着梭梭的生

长,其防护效果将进一步提升,这与本文中防风效能、风速廓线相吻合。

本研究发现在营造 2 a 以后与原生荒漠便具有显著的差异,在营造 4 a 后便具有良好的防风效益,而在经过 8 a 的生长后,人工梭梭林的地表粗糙度趋于稳定,未再发现显著变化。这表明一旦人工梭梭林的年限达到 8 a,其生长速度和构型变化将不再对地表粗糙度产生显著影响。在同等风速条件下,地表粗糙度随着植被覆盖度的增加而发生变化^[12-13]。这一变化趋势与本研究的观察结果相吻合,其中地表粗糙度随着植被覆盖度的提高呈现出递增的趋势,其主要原因是随着人工梭梭林种植年限的延长,其结构发生了变化,导致了该区域植被覆盖度的增加,进而影响了林内的密度以及整体风速,相较于未经人为干预的原生荒漠地表,5 种不同年限的梭梭林地表粗糙度均显示出显著的差异。

在众多研究中,已经证实植物对减缓近地表风速具有显著影响,这一特性不仅有助于固定沙土,还能促使风沙动力系统中的沙粒向下沉积^[14-16]。例如,植物的高度和它们的生长周期对地表积累的沙粒数量有着直接影响,这一点在相关研究^[17]中得到了印证。在本研究中,随着营造年限的增长,输沙通量呈现出递增的趋势。这一变化可能归因于风速的减小、流动结构的改变以及植被覆盖度的增加,这些因

素共同作用下,使得单一种植物及其形成的植被群落能够有效地减缓沙土流动,实现了防沙与固沙的目的。不同年限的梭梭林对风速的降低和沙土流动的阻碍作用有着明显的影响,这一点与其他研究者的发现相一致,即风沙流的输沙通量和阻沙效能随着高度的增加呈现指数级的递减^[18]。

4.2 不同年限人工梭梭林生物量指数与防风固沙效益指标模型

赵英铭^[4]对内蒙古自治区磴口县的农田防护林的研究结果表明,乔木立木生物量指数与防风效益关系密切,与林带疏透度呈负相关关系,最终模拟出生物量与防风效益指标立木疏透度之间的模型,并计算出在防风效益良好情况下,林带立木疏透度的下限值,以此评价区域防护林的生物量、碳储量上升潜力。本研究选择梭梭林立木生物量指数与各项防风固沙效益指标进行了相关性分析,通过所表现出的相关性,进行不同模型方程的拟合,选取最优模型,利用人工梭梭林立木生物量指数和该地区原始荒漠基础气象数据,即可快速估算出区域内的各项防风效益指标,并快速评价该区域的防风固沙效益。同时还可以在防风固沙良好的情况下,计算出该地区的生物量、碳储量的下限,来评价区域的生物量、碳储量潜力。

5 结论

(1) 随着种植年限增加,人工梭梭林的防风效能、地表粗糙度、地表蚀积量及阻沙效能均呈显著上升趋势($p < 0.05$)。防风效能方面,2年生、4年生的人工梭梭林的防风作用主要集中在距离地表0~50 cm;6年生、8年生、10年生的人工梭梭林防风作用在距离地表100 cm高度范围内极佳,但在100~200 cm高度范围内,防风效能均有所下降;地表粗糙度也在逐渐提高营造2年后便具有显著效果,营造年限到达8年以后,梭梭林的地表粗糙度达到最大值,之后不再显著增加并趋于稳定;地表蚀积量在2年生、4年生的人工梭梭林区域呈现出风蚀状态,6年生、8年生、10年生的人工梭梭林区域呈现出堆积状态。不同种植年限的阻沙效能整体变化呈现相同趋势,呈现出随种植年限增加而逐年增强的趋势。

(2) 人工梭梭林随着营造年限的不断增长,对区域内的风速廓线规律产生了显著影响,原生荒漠风速廓线呈现“L”形变化特征,2年生、4年生的人工梭梭林风速廓线呈现出斜“1”形变化特征,6年生、8年生、10年生的人工梭梭林风速廓线呈现出反“J”形变化特征。

(3) 人工梭梭林输沙通量随着营造年限的增加而呈现递减趋势,这种趋势在不同高度上也有所体现。具体而言,不同种植年限人工梭梭林减少输沙通量方面表现为:10 a > 8 a > 6 a > 4 a > 2 a。

(4) 基于5种不同年限的梭梭林构建了生物量—防风固沙效益指标模型,其中,立木生物量指数与防风效益、土壤蚀积量、地表粗糙度、输沙通量、阻沙效能的之间关系,最佳函数模型分别为幂函数模型、幂函数模型、二次方程函数、指数函数模型、Logistic函数模型, R^2 分别为0.651,0.962,0.790,0.804,0.925。

(5) 界定了人工梭梭林在特定参数条件下的生物量下限,若要起到良好的防风固沙效益,人工梭梭林立木生物量指数下限需达到4.94 kg/m²。

参考文献(References)

- [1] 郑旭,张倪斌,孙桂丽,等.吐鲁番市高昌区不同固沙植物的防风固沙效益[J].东北林业大学学报,2024,52(7):44-50.
Zheng Xu, Zhang Nibin, Sun Guili, et al. Wind prevention and sand-fixation benefits of different sand-fixing plants in Gaochang District, Turpan City [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(7): 44-50.
- [2] 宋政梅.吐鲁番市防风治沙造林模式[J].干旱区研究,2012,29(1):181.
Song Zhengmei. Afforestation model of wind prevention and sand control in Turpan City [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(1): 181.
- [3] 李昱达,王国华,赵丽娜,等.荒漠绿洲边缘不同种植年限人工梭梭林土壤和根系微生物群落特征[J].应用生态学报,2025,36(1):39-49.
Li Yuda, Wang Guohua, Zhao Lina, et al. Characteristics of soil and root microbial communities of *Haloxylon ammodendron* plantation of different ages in the margin of a desert oasis [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(1): 39-49.
- [4] 赵英铭.内蒙古磴口县新疆杨农田防护林带生物量和碳储量研究[D].北京:中国林业科学研究院,2020.
Zhao Yingming. Study on biomass and carbon storage of Xinjiang poplar farmland protection forest belt in Dengkou County, Inner Mongolia [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020.
- [5] 高利颖,王海兵,廖承贤,等.阿拉善戈壁区人工梭梭林保存率及生长状况研究[J].干旱区资源与环境,2024,38(6):159-165.
Gao Liying, Wang Haibing, Liao Chengxian, et al. Characteristics of preservation rate and growth state of artificial *Haloxylon ammodendron* shrub in Alxa Gobi area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(6): 159-165.

- [6] 宋达成, 马全林, 刘世权, 等. 民勤黏土沙障—人工梭梭林物种多样性及土壤水分变化特征[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 618-628.
- Song Dacheng, Ma Quanlin, Liu Shiquan, et al. Species diversity in Minqin clay sand barrier-artificial *Haloxylon ammodendron* plantations and the characteristics of soil moisture changes [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 618-628.
- [7] 刘虎俊, 袁宏波, 王多泽, 等. 两种不同配置灌木林防风固沙效益[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 63-66.
- Liu Hujun, Yuan Hongbo, Wang Duoze, et al. Benefits of windbreak and sand fixation from two kinds of shrubs [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 63-66.
- [8] 崔健, 高君亮, 乔靖然, 等. 乌兰布和沙漠公路“麦草沙障—梭梭”的防护效益[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 250-259.
- Cui Jian, Gao Junliang, Qiao Jingran, et al. Research on the protective benefits of the ‘wheat grass sand barrier *Haloxylon ammodendron*’ on the Ulanbuh desert highway [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 250-259.
- [9] 郑夏明, 李星苇, 孙桂丽, 等. 荒漠地区不同种植年限梭梭林接种肉苁蓉的效益比较[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(13): 143-148.
- Zheng Xiaming, Li Xingwei, Sun Guili, et al. Comparison of benefits of inoculation with *Cistanche* in different habitat years of *Haloxylon ammodendron* forests in desert areas [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(13): 143-148.
- [10] 艾沙江~吾斯曼. 新疆 12 种荒漠灌丛生物量及碳储量研究[D]. 新疆 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012.
- Aishajiang Wusiman. Study on biomass and carbon stock of 12 desert scrub species in Xinjiang [D]. Urumqi, Xinjiang: Xinjiang University, 2012.
- [11] 李鹏, 高永, 赵青, 等. 乌兰布和沙漠东北缘人工梭梭林防风效能分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 34-39.
- Li Peng, Gao Yong, Zhao Qing, et al. Windbreak effectiveness of *Haloxylon ammodendron* on northeast edge of Ulan Buh desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 34-39.
- [12] 吴晓旭, 邹学勇, 王仁德, 等. 毛乌素沙地不同下垫面的风沙运动特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 828-835.
- Wu Xiaoxu, Zou Xueyong, Wang Rende, et al. Aeolian movement characteristics over different underlying surfaces in Mu Us sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(4): 828-835.
- [13] 何清, 缪启龙, 张瑞军, 等. 塔克拉玛干沙漠肖塘地区空气动力学粗糙度分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1011-1016.
- He Qing, Miao Qilong, Zhang Ruijun, et al. Analysis on aerodynamic roughness in Xiaotang in the Taklimakan Desert [J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(6): 1011-1016.
- [14] 邢媛媛, 王永东, 雷加强. 草地灌丛化对植被与土壤的影响[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5): 1157-1163.
- Xing Yuanyuan, Wang Yongdong, Lei Jiaqiang. Influences of bush encroachment on vegetation and soil [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5): 1157-1163.
- [15] 吴汪洋, 张登山, 田丽慧, 等. 高寒沙地植物的沙堆形态特征及其成因分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 713-721.
- Wu Wangyang, Zhang Dengshan, Tian Lihui, et al. Morphologic features and forming causes of plant sand-piles in alpine sand land [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 713-721.
- [16] 张奕, 肖辉杰, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙区典型灌木防风阻沙效益[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(1): 87-96.
- Zhang Yi, Xiao Huijie, Xin Zhiming, et al. Wind prevention and sand resistance of typical shrubs in Ulan Buh Desert [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(1): 87-96.
- [17] 钟卫, 孔纪名, 杨涛. 植被沙障对近地表风沙流特征影响的风洞实验[J]. 干旱区研究, 2009, 26(6): 872-876.
- Zhong Wei, Kong Jiming, Yang Tao. Wind tunnel test about the effect of vegetation sand-barrier on wind-blown sand flow near ground surface [J]. Arid Zone Research, 2009, 26(6): 872-876.
- [18] 高函, 张宇清, 吴斌, 等. 柠条林防风阻沙效益模拟研究初报[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 175-180.
- Gao Han, Zhang Yuqing, Wu Bin, et al. Simulating efficiency of wind-speed reduction and sand-break of *Caragana korshinskii* coppice [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(4): 175-180.