

新疆托克逊县不同配置防护林的防风蚀效能

若山古丽·芒力克¹, 阿丽亚·拜都热拉¹, 蔡凯旭¹, 木合塔尔·扎热², 宋敏¹

(1.新疆农业大学 林学与风景园林学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2.新疆林业科学院, 新疆 乌鲁木齐 830092)

摘要: [目的] 对比分析不同配置防护林迎风林缘与背风林缘的防风蚀效能, 为干旱区绿洲城市防护林建设、防沙治沙以及生态环境改善工作提供理论依据。[方法] 以新疆托克逊县城郊区不同配置防护林为研究对象, 通过观测近地表风速、起沙风速、近地表粗糙度、输沙量、风沙流结构等指标, 对比研究混交林 1 (胡杨 68%+柽柳 32%)、混交林 2 (柽柳 65%+胡杨 35%)、梭梭林迎风背风林缘的防风蚀效能。[结果] 不同配置防护林的地表粗糙度、起沙风速、风速廓线、防风阻沙效能都有差异。不同配置防护林地面粗糙度从高到底依次为: 混交林 2 (0.569 cm) > 混交林 1 (0.378 cm) > 梭梭林 (0.123 cm)。起沙风速从高到低依次为: 混交林 2 (6.17 m/s) > 梭梭林 (6.02 m/s) > 混交林 1 (5.98 m/s)。防风效能从强到弱依次为: 混交林 2 > 混交林 1 > 梭梭林。阻沙效能依次为: 梭梭林 (48.2%) > 混交林 2 (45.6%) > 混交林 1 (37.1%), 各林地 0—10 cm, 10—20 cm 垂直高度上的集沙量所占比例较高。[结论] 混交林 2 有效降低不同垂直高度的风速及输沙量, 混交林 2 的防风蚀效能较高。

关键词: 不同配置防护林; 迎背风林缘; 防风蚀效能; 托克逊县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0043-05

中图分类号: S157, S727.2

文献参数: 若山古丽·芒力克, 阿丽亚·拜都热拉, 蔡凯旭, 等. 新疆托克逊县不同配置防护林的防风蚀效能[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 43-47. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.007; Manglike Ruoshanguli, Baidourela Aliya, Cai Kaixu, et al. Wind erosion effects of different shelterbelts in Toksun County, Xinjiang Wei Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 43-47.

Wind Erosion Effects of Different Shelterbelts in Toksun County, Xinjiang Wei Autonomous Region

Manglike Ruoshanguli¹, Baidourela Aliya¹, Cai Kaixu¹, Zhare Muhetaer², Song Min¹

(1.College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2.Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi, Xinjiang 830092, China)

Abstract: [Objective] The wind erosion control efficiency of windward and leeward edges of different shelterbelts was compared and analyzed, in order to provide theoretical basis for urban shelterbelt construction, sand control and ecological environment improvement in arid oasis. [Methods] Taking different shelterbelts in the suburbs of Tuokexun County, Xinjiang Wei Autonomous Region as the research area, by observing the near surface wind speed, sand driving wind speed, near surface roughness, sediment discharge, and structure of wind sand flow, a comparative study was conducted on the wind erosion control efficiency of windward and leeward edges of mixed forest 1 (68% *Populus euphratica* + 32% *Tamarix chinensis*), mixed forest 2 (65% *Tamarix chinensis* + 35% *Populus euphratica*) and *Haloxylon ammodendron* forest. [Results] The surface roughness, sand driving wind speed, wind speed profile and wind resistance efficiency of different shelterbelts were different. The roughness of different forest areas were in the decending order as: mixed forest 2 (0.569 cm) > mixed forest 1 (0.378 cm) > *Haloxylon ammodendron* forest 0.123 cm. The sand-blowing wind speed from high to low was as: mixed forest 2 (6.17 m/s) > *Haloxylon ammodendron* forest

收稿日期: 2021-06-25

修回日期: 2021-08-15

资助项目: 国家博士后基金项目“吐鲁番城郊工业区人工防护林对土壤重金属及防风蚀机理研究”(2020T130554); 国家自然科学基金项目“绿洲城市路侧树种不同器官对降尘和土壤重金属的富集及转运机理研究”(31971713)

第一作者: 若山古丽·芒力克(1995—), 女(维吾尔族), 新疆维吾尔自治区鄯善县人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。Email: 2857843747@qq.com。

通讯作者: 阿丽亚·拜都热拉(1986—), 女(维吾尔族), 新疆维吾尔自治区托克逊县人, 博士, 副教授, 主要从事城市生态, 荒漠化防治方面的研究。Email: aliya@xjau.edu.cn。

(6.02 m/s) > mixed forest 1 (5.98 m/s). The effects of wind erosion control were in the descending order as: mixed forest 2 > mixed forest 1 > *Haloxylon ammodendron* forest. The sand-blocking efficiency was as: *Haloxylon ammodendron* forest (48.2%) > mixed forest 2 (45.6%) > mixed forest 1 (37.1%), the sand-collecting capacity of 0—10 cm and 10—20 cm vertical height was higher. [Conclusion] The mixed forest 2 could effectively reduce the wind speed and sediment transport at different vertical heights, and the mixed forest 2 had higher wind erosion control efficiency.

Keywords: different shelterbelts; windward and leeward forest margins; wind erosion control effects; Toksun County

新疆维吾尔自治区吐鲁番市托克逊县位于中国西北干旱区新疆东南部,以“风城”而出名,每年大风日数 84 d,春夏季刮风日数较多且集中,年均蒸发量远大于降水量,气候极其干旱,生态环境恶劣^[1]。在每年的风季大小交通事故频发,严重影响当地居民的生命及财产安全。根据托克逊县气象台报道,2021 年 4 月 22 日发生大风天气(风速达到 10—12 级),往年同时时间段^[2]发生的灾害性大风天气中风速达到 11—13 级风,瞬时风速 30 m/s。风蚀过程中大量的沙尘颗粒物离开土壤表面悬浮到空气中,从而出现沙尘天气^[3-4]。城郊植被通过增加地表摩擦力,有效降低风速,削减风蚀强度^[5-7]。研究^[8]认为,人工防护林建设在防风治沙中效果显著。不同地区的气候条件和土壤性质存在差异,因此在适地适树的基础上,利用不同配置方式来得到更大的防风阻沙效能是目前防风阻沙预防危害的较好选择^[9-10]。植物的防风阻沙功能分为垂直方向和水平方向两种^[11]。马士龙^[12]在植被覆盖度对土壤风蚀的影响机理研究中发现粗糙度与风速成负相关关系;查同刚^[13]研究表明宁夏地区农田防护林覆盖度 35%~45%时防风效能最佳,同时具有降温增湿及提高土壤含水量的效能;也有学者^[14]认为植被覆盖度达到 50%时能有效控制风蚀。增加植被覆盖度能达到降温增湿的目的,也能有效提高地表粗糙度,从而提高地表土壤抗风蚀能力。近年来托克逊县的植被覆盖度有所提高。在春夏大风天气中托克逊县内的风蚀和扬尘状况有所好转,但城郊工业区、克尔碱、小草湖等区域状况依然很严重。如何准确选用防风蚀效能较强的城郊绿化植被,合理配置并提高其防风阻沙能力已成为亟待解决的科学问题。对于新疆而言,有关这方面的研究主要集中在塔克拉玛干沙漠边缘城郊防护林的防风阻沙能力及其合理配置方面,位于吐鲁番市城郊活化沙丘附近防护林的现状评价及功能分析方面没有较系统的研究成果。本研究以新疆吐鲁番市托克逊县城郊防护林为研究对象,通过对比分析不同配置防护林迎风林缘与背风林缘的防风蚀效能,给该地区生态建设及防沙治沙提供建议,为改善生态环境方面提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为托克逊县南侧,托克逊县位于新疆维吾尔自治区中东部,天山南麓,吐鲁番盆地西部(87°14′05″—89°11′08″E,41°21′14″—43°18′11″N),三面为山地环绕,北边高东边低,0 m 等高线穿过县城中心,向东渐低,东部最低为-125 m。吐鲁番市托克逊县属于典型大陆性暖温带荒漠气候,极端性最高温度 48 ℃,年均气温 13.8 ℃,降水量 5.7 mm,蒸发量 3 171.9 mm,是中国降雨量最少的地方。托克逊县素有“风城”之称,年均风速 8 m/s,年均大风天数为 84 d,春夏季刮风频繁,尤其是春天,这两季刮风天数占 70%,秋季占 25%,冬季占 5%。据托克逊县安全生产监督管理局 2017 年数据显示,该县共有森林资源 105 400 hm²,森林覆盖率 4%。

1.2 试验样地的布设

根据托克逊县南侧城郊防护林配置结构,防护林树种、防护林长势、林地地势地貌,选取相对一致、树木年龄相同的林地。每片防护林的面积相等,长宽为 940 m×560 m。不同配置防护林包括混交林 1:胡杨(占 68%)+怪柳(占 32%);混交林 2:怪柳(占 65%)+胡杨(占 35%);梭梭林。

在每片林地沿着中轴线,垂直风向,打两个(大小为 30 m×30 m)标准样方(减少 3 种防护林的相互干扰林地迎风面边缘,林地背风面边缘各打一个样方)。对每个样方进行每木检尺,不同样地及植被状况详见表 1。

1.3 野外观测

野外试验于 2020 年 3—5 月,2021 年 3—5 月分两段进行,3 种不同防护林地为研究对象,在不同防护林地迎风林缘,背风林缘,在紧挨着迎背风林缘边行树木的位置设置了观测点、布设 QN-FS 风速廓线仪,计算林地粗糙度,同步用 QN-FS 风速风向仪观测近地表风速及风向,风杯观测高度分别 10,50,80,120,160 和 200 cm,每次观测时间为 1 h,每隔 2 s 采样 1 次,每 30 s 记录 1 次,不同林地大风情况下总观测时间为不少于 8 h。在每个风速廓线仪布设的位

置同时布设 QN-JSY 不同高度多通道组合式集沙仪(集沙仪高度为 130 cm,5 层 10 个集沙口,每个集沙口大小为 5 cm×5 cm),对不同垂直高度的流沙运动进行观测,把多通道集沙仪直立安装试验样地,每个

通道系好布袋子。集沙量观测时间为 8 h,采完样后不同垂直高度集沙通道集的沙样分开装到自封袋带回实验室称重。为了保证试验数据的准确度多次重复测量风速及集沙量,最后取平均值。

表 1 各林地概况

样地类型	植被状况	样地地表状况
混交林 1	株行距 2 m×3.5 m;胡杨均高 2.76 m,均冠幅 2.05×1.63,主干高 56 cm;柽柳均高 1.38 m,均冠幅 1.36×1.28;长势良好	行间地表裸露,分布杂草,林分盖度 17%
混交林 2	株行距 2 m×3.5 m;胡杨均高 3.08,均冠幅 1.87×1.76,主干高 71 cm;柽柳均高 1.68,均冠幅 2.05×1.86 m;长势良好	行间地表裸露,分布杂草,林分盖度 21%
梭梭林	株行距 1.5 m×3.5 m,平均高 1.72 m,均冠幅 1.0×0.9 m,长势良好	行间地表裸露,无杂草,林分盖度 13%

1.4 计算方法

(1) 风速标准化的计算参照文献[3]的方法,计算公式为:

$$U'(z) = \frac{U_{\text{迎风边缘}}(t_0, Z=2 \text{ m})}{U_{\text{迎风边缘}}(t, z=2 \text{ m})} \times U(t, z) \quad (1)$$

式中: $U'(z)$ 是任意测点高度的标准化风速(m/s); $U(t, z)$ 表示为 t 时段 z 高度的风速(m/s); $U_{\text{迎风边缘}}(t_0, z=2 \text{ m})$ 表示为林地迎风边缘 t_0 时刻 2 m 高的风速(m/s); $U_{\text{迎风边缘}}(t, z=2 \text{ m})$ 为林地迎风边缘 t 时刻 2 m 高的风速(m/s)。

(2) 防风效能的计算参照文献[7]的方法,计算公式为:

$$E = \frac{U_{\text{迎风边缘}} - U}{U_{\text{迎风边缘}}} \quad (2)$$

式中: E 表示某一位置的防风效能(%); $U_{\text{迎风边缘}}$ 为表示林地迎风边缘不同位置的平均风速(m/s); U 表示林地不同位置的平均风速(m/s)。

(3) 输沙通量的计算公式参照文献[3]的方法,计算公式为:

$$Q_t = \frac{Q}{s \cdot t} \quad (3)$$

式中: Q_t 为输沙通量[g/(cm²·min)]; Q 为输沙量(g); s 为集沙面积(cm²); t 为收集持续时间(min)。

(4) 阻沙效能的计算参照文献[3]的方法,计算公式为:

$$E' = \frac{Q_{\text{迎风边缘}} - Q}{Q_{\text{迎风边缘}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: E' 表示为阻沙效能; $Q_{\text{迎风边缘}}$ 为林地迎风边缘的输沙量; Q 为林地输沙量(g)。

(5) 近地表风速为零的高度,表现地表对气流的摩阻力。粗糙度的计算参照文献[15]的方法,计算公式为:

$$\lg z_0 = \frac{\lg u_2 - \lg u_1 \times \frac{u_2}{u_1}}{1 - \frac{u_2}{u_1}} \quad (5)$$

式中: z_0 为地表粗糙度; u_1, u_2 分别为同一时刻任意不同两个高度处的风速。

2 结果与分析

2.1 风速廓线与粗糙度

不同林地内风速的垂直变化特征如图 1 所示。在不同林地的风速廓线拟合曲线图可以看出,风速随着距地表垂直高度的增加而增大。各林地垂直高度 10 cm 的风速明显降低,表明地表及地表面的植物和风速之间产生摩擦,导致风速降低;对混交林 1 而言,10—50 cm 高度的风速降低不明显,该区主要为胡杨林,枝下高 50 cm 以上;50—160 cm 都保持增加趋势。混交林 2 各垂直高度的风速削弱高于其他林地。林地植被加强地表粗糙度,从而气流受到地表的阻挡和削弱,地表对摩擦阻力随距地表垂直高度的增加而变小。根据风速廓线计算,不同林地地表粗糙度分别是混交林 1 为 0.378 cm,混交林 2 为 0.569 cm,梭梭林 0.123 cm,各林地粗糙度高到低依次为:混交林 2>混交林 1>梭梭林。随着地表粗糙度增高,林地削弱风速能力增强。

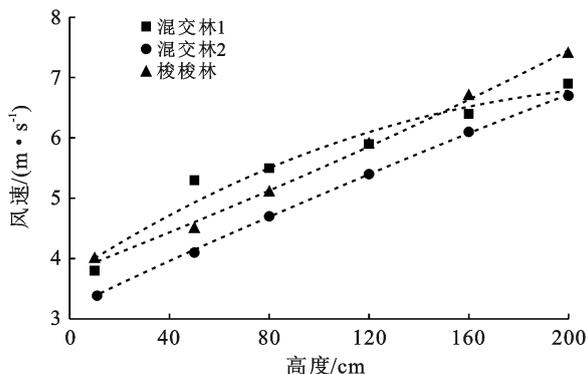


图 1 研究区不同林地风速廓线

2.2 起沙风速与防风效能比较

起沙风速是大气边界层的气流运动过程中,风速

达到一定程度后地表的沙粒得到动力,同时脱离地表开始运动及形成扬尘现象,地表沙粒进入运动状态的那么一瞬间的风速称起沙风速^[16]。观测发现混交林 1 的起沙风速为 5.98 m/s,混交林 2 的起沙风速为 6.17 m/s,梭梭林的起沙风速为 6.02 m/s。不同配置林地防风蚀效能比较详见表 2。防风效能各不同垂

直高度均表现为:混交林 2>混交林 1>梭梭林;各林地不同垂直高度的风速统一随着距地表垂直高度的增加而增大,背风林缘的风速均低于迎风林缘的风速,防风效能随着距地表垂直高度的增加而减少。植物高度、冠幅、形态、植被覆盖度、林地土壤地质等多种因素都影响林地防风效能。

表 2 不同林地风垂直风速变化特征及防风效能

观测高度/cm	混交林 1			混交林 2			梭梭林		
	迎风边缘/ (m·s ⁻¹)	背风边缘/ (m·s ⁻¹)	防风效能/%	迎风边缘/ (m·s ⁻¹)	背风边缘/ (m·s ⁻¹)	防风效能/%	迎风边缘/ (m·s ⁻¹)	背风边缘/ (m·s ⁻¹)	防风效能/%
10	5.7	3.9	31.6	4.8	2.9	39.6	5.1	3.8	25.4
50	6.7	4.8	28.4	5.5	3.4	38.1	6.3	4.8	23.8
80	7.8	5.5	29.5	6.4	4.0	37.5	6.7	5.2	22.4
120	8.5	6.1	28.2	6.9	4.5	34.8	7.6	6.3	17.1
160	9.7	7.1	26.8	7.5	5.3	29.3	8.2	7.1	13.4
200	11.2	9.2	17.8	8.1	6.4	21.0	9.3	8.2	11.8

2.3 输沙量及阻沙效能比较

风蚀是加强土地荒漠化的主要原因,一般输沙量表示地表土壤的蚀积状况。植被覆盖度、植被密度、植物形态、长势、植物所在的土壤条件都会影响输沙量。不同配置防护林的输沙量及风沙流结构决定防护林的阻沙效能。

由表 3 可知,各林地迎风边缘的集沙量高于林地背风边缘的集沙量,阻沙效能依次为:梭梭林(48.2%)>混交林 2(45.6%)>混交林 1(37.1%);0—10 cm,10—20 cm 垂直高度的集沙量明显高于 20—50 cm 高度的集沙量,随着高度的增加阻沙量成减少趋势。

表 3 不同林地平均输沙量、风沙流结构及阻沙效能

林地类型	输沙量/ g	输沙通量/ (g·cm ⁻² ·min ⁻¹)	各层输沙量所占比例/%					阻沙效能/%
			0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm	40—50 cm	
混交林 1 迎风边缘	97	0.20	34.6	26.1	19.6	13.0	6.5	0
混交林 1 背风边缘	61	0.12	40.0	30.1	17.7	10.0	2.1	37.1
混交林 2 迎风边缘	57	0.11	41.4	26.3	17.5	8.8	6.0	0
混交林 2 背风边缘	31	0.06	38.0	29.0	22.0	11.0	0	45.6
梭梭林迎风边缘	56	0.12	41.2	25.0	19.1	13.2	1.5	0
梭梭林背风边缘	29	0.06	39.0	28.2	23.4	8.3	1.1	48.2

注:2 m 高度的风速为 8.9~11.2 m/s。

3 讨论

由于地表植被的影响,风速廓线发生位移,这个跟植被高度和植被覆盖度有密切相关的关系^[17-19]。研究^[20]表明相同风速下,植被盖度对近地表风速及沙尘有显著性影响。本研究中 3 种防护林均建造于 2015 年,起初均为裸沙地造林。结合表 1 各林地概况,混交林 1 和混交林 2 的树种同样,但种植比例不一样,高度和地表覆盖度也有所差异,混交林 1 为胡杨(68%)+柽柳(32%),胡杨的平均高度为 2.76 m,柽柳的平均高度为 1.38 m;混交林 1 的林分植被覆盖度为 17%。混交林 2 为柽柳(65%)+胡杨(35%),柽

柳均高度为 1.68 m;胡杨均高度为 3.08 m,混交林 2 的林分植被覆盖度为 21%。梭梭林均高度为 1.72 m,林分覆盖度为 13%。从图 1 可知,不同林地对风速廓线的差异。林分覆盖度越高,林地地表粗糙度越高,风与地表之间的摩擦力增大,影响林地风速廓线。冯泽深等学者在不同配置格局灌木林对风蚀影响的研究中发现,枝条茂密,盖度高,树高较高的沙柳林对风速降低作用比枝条密度低,盖度低,树高较低的柠条降低风速作用更好^[21]。学者尚润阳表明^[22]人工林的防风阻沙作用与其枝株密度、盖度、高度都有关,密植灌木林的防风阻沙作用优于疏枝灌木林。本试验结果于学者周鑫^[23]的研究结果相对一致,混交林 2 的植株

较高、枝条茂密、地表盖度大,从而地表粗糙度较高,对风速廓线的影响明显。

植被因子在一定程度的影响起沙风速,边凯^[24]表明绿洲内部起沙风频率比沙漠—绿洲过渡带降低 1/2 左右。还有一些学者^[25-28]在研究中发现各防护林及草地都对风速有影响。3 种不同防护林的起沙风速为高到低依次为:混交林 2>梭梭林>混交林 1>;起沙风速越高表明林地抗风蚀能力越强。因树种组成的不同,不同配置防护林的防风固沙效益有所差异^[15],不同防护林地的防风效能依次为:混交林 2>混交林 1>梭梭林,距地表不同垂直高度上各防护林的防风效能随林地树种的形态特征而有所变化;以上表明植被形态、覆盖度、林地土壤性质都对防风效能,起沙风速、粗糙度有影响而且具有关联性。

输沙量一定程度上反映林地土壤地质,输沙量是近地表土壤在外力作用下搬运的重量;植被形态、覆盖度、林地土壤性质都对输沙量有影响;各林地背风边缘的输沙量都比林地迎风边缘的输沙量,同时 0—10,10—20 cm 高度的输沙量较多;随距地表垂直高度的增加而输沙量减少。混交林 2 在 40—50 cm 高度的输沙量为 0,阻沙效能也较好,其跟林地覆盖度、树高、粗糙度有关。梭梭林的防风效能最差但阻沙效能最好,因为梭梭林种植密度较高。这一研究结果与郭树江^[29],董治宝等^[30]学者研究植被覆盖度对风沙流输沙量的影响结果相对一致。

4 结论

(1) 不同配置防护林的风速廓线、地表粗糙度、起沙风速都存在差异。怪柳(65%) + 胡杨(35%)的混交林粗糙度、起沙风速以及防风效能均高于其他防护林,防土壤风蚀效果最好。

(2) 集沙量在 0—10,10—20 cm 垂直高度上占比较高,阻沙效能依次为:梭梭林(48.2%)>怪柳(65%) + 胡杨(35%)的混交林(45.6%)>胡杨(68%) + 怪柳(32%)的混交林(37.1%),梭梭林对于距地表高度 20 cm 以下的防护效果较好。

(3) 通过比较防护林迎风林缘与背风林缘防风蚀特征,背风林缘输沙量明显低于迎风林缘输沙量,说明防护林起到很好的防御效果。

[参 考 文 献]

[1] 库尔班尼萨·吐尔逊.极端干旱区县域生态文明建设指标体系研究[D].新疆乌鲁木齐:新疆大学,2019.
 [2] 葛洪燕.托克逊县 2012 年 4 月 22 日大风天气过程分析[J].新疆农垦科技,2013,36(8):57-58.
 [3] 杨越,吴才武,武智勇,等.冀北坝上地区 3 种人工灌木林

地防风蚀效果的比较[J].水土保持学报,2020,34(1):54-57,63.

- [4] 周建忠.土壤风蚀及保护性耕作减轻沙尘暴的试验研究[D].北京:中国农业大学,2004.
 [5] 刘红,王卫,郝彦莉,等.基于风蚀模型的河北省土壤风蚀风险评价[J].水土保持通报,2016,36(2):12-17,349.
 [6] Zhang C, McBean E A. Estimation of desertification risk from soil erosion: A case study for Gansu Province, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2016,30(8):2215-2229.
 [7] 王翔宇.不同配置格局沙蒿灌丛防风阻沙效果研究[D].北京:北京林业大学,2010.
 [8] 王强强,唐进年,杨自辉,等.不同配置固沙林的防风阻沙效果[J].西北林学院学报,2020,35(3):177-184.
 [9] Le Houérou H N. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid Mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: A review [J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2000,14(1):3-14.
 [10] 王强强,唐进年,杨自辉,等.不同配置固沙林的防风阻沙效果[J].西北林学院学报,2020,35(3):177-184.
 [11] 饶良懿,朱金兆.防护林空间配置研究进展[J].中国水土保持科学,2005,3(2):102-106.
 [12] 马士龙.植被覆盖对土壤风蚀影响机理的研究[D].北京:北京林业大学,2006.
 [13] 查同刚,孙向阳,于卫平,等.宁夏地区农田防护林结构与小气候效应[J].中国水土保持科学,2004,2(4):82-86.
 [14] 冯泽深,高甲荣,崔强,等.灌木林优化配置格局对土壤风蚀的影响[J].干旱区资源与环境,2010,24(1):179-183.
 [15] 屈志强.植物配置对土壤风蚀影响的研究[D].北京:北京林业大学,2007.
 [16] 王晓东,岳德鹏,刘永兵.土壤风蚀与植被防护研究[J].西部林业科学,2005,34(2):108-112.
 [17] 杨钦.河北坝上不同土地利用方式的风蚀研究[D].河北石家庄:河北师范大学,2017.
 [18] Lyu Xin, Li Xiaobing, Wang Hong, et al. Soil wind erosion evaluation and sustainable management of typical steppe in Inner Mongolia, China [J]. Journal of Environmental Management, 2021,277:111488.
 [19] 贾丽娜.几种不同灌木矮林防风阻沙效能对比研究[D].北京:北京林业大学,2010.
 [20] 汪季.乌兰布和沙漠东北缘植被抑制沙尘机理的研究[D].北京:北京林业大学,2004.
 [21] 冯泽深,高甲荣,崔强.灌木林优化配置格局对土壤风蚀的影响[J].干旱区资源与环境,2010,24(1):179-183.
 [22] 尚润阳.地表覆盖对土壤风蚀影响机理及效应研究[D].北京:北京林业大学,2007.
 [23] 周鑫,田丽慧,张登山,等.青海湖沙区不同植被防风固沙效益研究[J].干旱区资源与环境,2018,32(8):180-185.

- [7] 杨翠霞,张成梁,刘禹伯,等.矿区废弃地近自然生态修复规划设计[J].江苏农业科学,2017,45(17):269-272.
- [8] 王晓春,蔡体久,谷金锋.鸡西煤矿矸石山植被自然恢复规律及其环境解释[J].生态学报,2007,27(9):3744-3751.
- [9] 许丽,丰菲,刘莹,等.煤矸石山植物物种多样性与土壤化学因子的关系:以灵武矿区生态修复初期为例[J].煤炭科学技术,2020,48(4):97-104.
- [10] 姚丽霞,王进鑫,党倩楠,等.西北干旱荒漠区排矸平台不同配置与保育模式重建植被生态能值分析[J].生态学报,2020,40(23):8729-8742.
- [11] 郜超,张继平,石长春,等.干旱区排矸场植物配置模式评价:以神华宁煤集团羊场湾煤矿排矸场为例[J].陕西林业科技,2021,49(2):36-41.
- [12] 杨宇平,许丽,丰菲,等.基于植被重建的宁东矿区煤矸石山立地类型及其特征[J].水土保持通报,2020,40(3):202-207.
- [13] 闫凤飞.基于 Fourier 分析的煤炭开采对植被的影响范围研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
- [14] 郑雯丹.宁夏灵武市植被覆盖动态变化及驱动力因素分析[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [15] 布仁图雅,姜慧敏.3种重要值计算方法的比较分析[J].环境与发展,2014,26(6):64-67.
- [16] 李淑君,李国旗,王磊,等.荒漠草原区不同林龄柠条林物种多样性研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(6):82-87.
- [17] 宿少锋,薛杨,林之盼,等.海南省文昌市废弃钛矿区物种多样性特征与环境因子的关系[J].水土保持通报,2020,40(4):155-162.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [19] Christiane R, Jens S, Annett L, et al. A functional trait-based approach to understand community assembly and diversity-productivity relationships over 7 years in experimental grasslands [J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2013, 15(3): 139-149.
- [20] 李学斌,张义凡,陈林,等.荒漠草原典型群落土壤粒径和养分的分布特征及其关系研究[J].西北植物学报,2017,37(8):1635-1644.
- [21] 毕银丽,李向磊,彭苏萍,等.露天矿区植物多样性与土壤养分空间变异性特征[J].煤炭科学技术,2020,48(12):205-213.
- [22] Zouhaier N. Effects of exotic and endogenous shrubs on understory vegetation and soil nutrients in the South of Tunisia [J]. Journal of Arid Land, 2015,7(4):481-487.
- [23] 贾荣,兰登明,郭威星,等.宁夏东北部典型荒漠草原植物群落与土壤养分特征[J].生态环境学报,2020,29(3):483-488.
- [24] 李亚,王辉,魏怀东,等.甘肃引黄灌区典型天然群落分布特征[J].防护林科技,2013,31(10):1-2,12.

(上接第 47 页)

- [24] 边凯,高君亮,辛智鸣,等.乌兰布和沙漠东北缘绿洲防护林体系防风阻沙能力研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),2021,42(1):48-53.
- [25] 尚润阳.地表覆盖对土壤风蚀影响机理及效应研究[D].北京:北京林业大学,2007.
- [26] 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: the Journal of the British Geomorphological Group, 1998,23(1):69-82.
- [27] 王晓艺,苏正安,马菁,等.基于风蚀模型的张家口市风力侵蚀时空分布特征[J].草业科学,2020,37(7):1405-1415.
- [28] 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.
- [29] 郭树江,杨自辉,王强强,等.青土湖干涸湖底风沙区植被特征与地表输沙量关系[J].水土保持研究,2021,28(1):19-24.
- [30] 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,1996,16(4):437-443.