

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.007.

蔡佳乐, 蒙仲举, 罗建国, 等. 两种典型防护林对查干淖尔干盐湖沙化地表土壤粒度特征的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 179-187, 196.

Cai Jiale, Meng Zhongju, Luo Jianguo, et al. Effects of Two Typical Protection Forests on Particle Size Characteristics of Surface Soil in Sandy Land in Qehan Dry Salt Lake[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 179-187, 196.

两种典型防护林对查干淖尔干盐湖沙化 地表土壤粒度特征的影响

蔡佳乐¹, 蒙仲举¹, 罗建国², 孟芮冰¹, 祁帅¹, 阿拉腾陶格苏³

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2.鄂托克前旗林业生态保护中心,
内蒙古 鄂尔多斯 016200; 3.鄂尔多斯市地质调查监测院, 内蒙古 鄂尔多斯 016200)

摘要: [目的]探究查干淖尔干盐湖附近沙化土地防护林下的土壤机械组成与生态效应,为当地的防护林建设与沙化土地治理提供科技支持。[方法]以查干淖尔干盐湖南缘沙地柽柳和梭梭两种防护林的带间、根颈和冠幅下0—20 cm的土壤为研究对象,土壤样品的机械组成用激光粒度仪测定得出,计算并分析了平均粒径、标准偏差、偏度、峰态和分形维数等粒度参数。[结果](1) 研究区土壤机械组成以砂粒为主,相较于裸沙地(CK),柽柳和梭梭(带间、根颈、冠幅下)黏粉粒总含量分别增加了5.19%, 0.59%, 20.44%和1.53%, 3.93%, 4.32%,其中在冠幅下表现最为明显。(2) 防护林下的土壤分选性较差,偏度均为正偏,向着尖窄方向发展;分形维数介于2.13~2.70,两种防护林冠幅下的分形维数均高于带间与根颈,与对照相比,防护林下土壤粒径整体向细粒趋势发展。(3) 土壤粒度频率显示防护林各位置斜率均偏低,表明两种防护林的颗粒级丰富度优于对照。[结论]各粒度参数及分维值反映两防护林对于当地沙化土壤有改良作用,柽柳防护林下土壤细粒化趋势更为明显。

关键词: 查干淖尔干盐湖; 防护林; 柽柳; 梭梭; 粒度特征

中图分类号: S152.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0179-09

Effects of Two Typical Protection Forests on Particle Size Characteristics of Surface Soil in Sandy Land in Qehan Dry Salt Lake

Cai Jiale¹, Meng Zhongju¹, Luo Jianguo², Meng Ruibing¹, Qi Shuai¹, Alatengtaoges³

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,
Hohhot 010018, China; 2.Otokqian Banner Forestry Ecological Protection Center, Ordos, Inner Mongolia 016200,
China; 3.Ordos Geological Survey and Monitoring Institute, Ordos, Inner Mongolia 016200, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate the soil mechanical composition and ecological effect under the protection forest of sandy land near Qehan Dry Salt Lake, and to provide scientific and technological support for local protection forest construction and sandy land management. [Methods] The soil samples of 0—20 cm were collected in inter-belt, root neck and under canopy of two protection forests, *Tamarix chinensis* and *Haloxylon ammodendron* on the southern edge of Qehan Dry Salt Lake. The mechanical composition of soil samples was measured by laser particle sizer. And the average particle size, standard deviation, skewness, peak state and fractal dimension were calculated and analyzed. [Results] (1) The soil mechanical composition is mainly composed of sand particles, compared to bare sand (CK), the total contents of clay and silt increased by 5.19%, 0.59%, 20.44% and 1.53%, 3.93%, 4.32% in *Tamarix chinensis* and *Haloxylon ammodendron* (inter-belt, root neck and under canopy), respectively, with the most pronounced performance under canopy. (2) Soil sort ability was poor under shelterbelts, with a positive

收稿日期: 2023-06-21

修回日期: 2023-08-25

资助项目: 国家自然科学基金(4206070150); 内蒙古科技攻关项目(2022YFDZ0027)

第一作者: 蔡佳乐(1998—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化治理。E-mail: 1528821545@qq.com

通信作者: 蒙仲举(1980—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: mengzhongju@126.com

<http://stbcjy.paperonice.org>

skewness towards a narrower tip; the fractal dimensions was between 2.13 ~ 2.70, higher under both shelterbelt canopies than between strips and root necks, and the overall particle size tended towards finer particles compared to CK. (3) Soil particle size frequencies revealed low slopes at all locations in the shelterbelts, indicating that the particle size class richness of both shelterbelts was better than those in the control. [Conclusion] The particle size parameters and sub-dimensional values reflect the improvement of the local sandy land by the two protected forests, with the trend of fine-grained soil under the red willow protection forest more obvious.

Keywords: Qehan Dry Salt Lake; protective forest; *Tamarix chinensis*; *Haloxylon ammodendron*; granularity features

干旱草原与半干旱草原过渡带生态环境脆弱,植被种类有限,附近土壤受风蚀侵蚀严重,土地沙化严重^[1]。防护林作为一种有效的抗风蚀手段,一直在干旱半干旱地区发挥着重要的作用^[2](如防风固沙、改善小气候、涵养水源和减少污染等)。土地沙化的主要手段就是风的吹蚀,而防护林能有效降低风沙流活动中风速,并将一部分颗粒物进行截留,在冠幅下形成堆积^[2];防护林地庇护范围内的粉粒、黏粒含量较沙害严重地区高,可向沙害严重地区补给细颗粒物,从而促进土壤的良性演化^[3]。防护林还增加了地表的粗糙程度,减少风速、挟沙量和输沙率^[4-5]。林下截留堆会改变原有地貌结构,并且影响林下土壤沉积物的特征,而沉积物中包含的地理与环境信息多年来一直被大量学者讨论与研究。

土壤粒度特征作为土壤和沉积物最基本的特征之一,是土壤剖面或沉积物中颗粒组分的分布和配比。粒度参数变化受多种因素影响,如风力作用、水流搬运和沉积环境等,因而其可用于解释颗粒的运移情况,判断沉积环境的演变过程,并在土地荒漠化研究中得到广泛应用^[6]。土壤粒度参数通常是指平均粒径、标准偏差、偏度和峰态等指数^[7];随着研究方法的不断深入和更新,土壤粒度的分形维数已经成为一种新的描述土壤结构特征的有效方法。分形维数越高则表示土壤中黏、粉粒的含量越高,黏粒不仅能够促进团聚体的形成,还能使土壤结构更加稳定,提高土壤的抗侵蚀能力^[7-8]。研究发现防护林在干旱区与半干旱区对于生态环境的防护作用以及防护林树种下的土壤对环境的稳定性具有指示作用。

本文以内蒙古锡林郭勒盟中北部阿巴嘎旗查干淖尔干盐湖南缘沙化严重的地区为研究区,选取当地具有代表性的两防护林树种怪柳(*Tamarix chinensis*,简称CL)与梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge 简称SS)作为研究对象,分别取CL与SS的带间、地表近树干部分(简称为根颈^[9])和枝叶茂盛的冠幅下土壤为研究对象,取0—2 cm,2—5

cm,5—10 cm,10—20 cm 土层的土壤进行对比分析,同时将附近典型沙化土地相同深度的土壤作为对照(简称CK),通过对两种不同防护林下的土壤粒度参数和分形维数进行分析,并结合具体的位置与树种,探讨沉积物土壤粒度组成在不同防护林树种、位置下的变化规律,并对易风蚀的土壤进行判别分析,以期查干淖尔干盐湖附近防护林的防风固沙效益提供可靠的数据支持,同时为相关部门的防护林种植种类的配置决策提供理论参考。

1 研究区概况

研究区位于锡林郭勒草原中查干淖尔干盐湖(43°24'10"N,114°50'30"E)的南部,行政区隶属于内蒙古自治区锡林郭勒盟阿巴嘎旗,研究区南部为浑善达克沙地,北接阿巴嘎熔岩台地^[10],是处于草原与沙地过渡带的一处封闭湖泊。气候属于中温带半干旱大陆性季风气候,干燥少雨;年平均气温 1.3 °C,气温的日较差和年较差较大,年平均降雨量 280 mm,且主要集中在6月、7月、8月(占全年降雨量的69.4%)^[11];年平均风速为 3.3 m/s,全年风向以西风为主,6—8月为东北风,春秋两季干旱且多风,夏季降雨量充足,冬季寒冷干燥;土壤类型以风沙土为主,部分地区含有栗钙土、棕钙土和草甸土。地带性植被主要分布为羊草(*Leymus chinensis*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam)、怪柳和白刺(*Nitraria tangutorum* Bobrov)。

2 研究方法

2.1 样品采集

试验于2022年7月进行,选择查干淖尔干盐湖南缘严重沙化样地进行土样采集工作,采样前后1周无降雨,样地面积 50 m×50 m,地势比较平坦。选取CL与SS两种典型防护林进行取样,林龄5 a,株距为5 m,防护林带间平均距离为2 m。其中CL防护林的平均冠幅为3~4 m,平均株高为2~3 m;SS防护林的平均冠幅为2.5~3.5 m,平均株高为2.5~3.0 m,CK为典型沙

化土地,无植被且无牲畜踩踏。分别在CK,CL和SS的根颈、冠幅下和带间对土样进行采集,采样时先将地面的杂物去除,使用取土器平行于地表采集深度0—2 cm表层土样与2—5 cm土样,随后用内径5 cm的环刀将5—10 cm和10—20 cm的土壤样品取出,共计84份样品,对其土壤粒度组成进行测量。

2.2 样品的测定

采集回来的土放置在通风良好的实验室自然风干,在去除杂质后,用2 mm筛子筛出粒度大于2 000 μm 的粗颗粒,再加入超纯水和 H_2O_2 溶液,静置24 h去除有机质。待烧杯内液体再无气泡产生时,取适量样品置于烘箱中,加热至干燥。用以将残留的 H_2O_2 溶液全部挥发。将待测样品放入静置装置,加水 and 10%的HCl溶液,用以溶解碳酸盐类物质,静置24 h后用滴管移出上清液。用pH计测试样品的pH值,将蒸馏水以适当的比例加入到pH计中,直到pH值接近中性。最后利用Analysette 22 Micro Tec Plus型号激光粒度仪对土壤粒度组成测定。

2.3 土壤粒度累积频率间平均距离的计算

土壤粒度累积频率的平均距离(d)的测量可以有效地反映出样地之间不同土样的质量差异,这也为土壤粗化程度的判断提供了有力的理论支持。

$$d = \sqrt{\sum (p - \bar{p})^2 / (K - 1)} \quad (1)$$

式中: d 为土壤粒度累积频率分布间平均距离; p 为某种样地土壤粒度累积频率; \bar{p} 为4种样地土壤粒度累积频率平均值; $(K - 1)$ 为自由度, $K = 3$ 。

2.4 土壤粒度参数模型

以美制土壤粒度组成为划分依据^[12]:黏粒($< 2 \mu\text{m}$)、粉粒($2 \sim 50 \mu\text{m}$)、极细砂($50 \sim 100 \mu\text{m}$)、细砂($100 \sim 250 \mu\text{m}$)、中砂($250 \sim 500 \mu\text{m}$)、粗砂($500 \sim 1\,000 \mu\text{m}$)、极粗砂($1\,000 \sim 2\,000 \mu\text{m}$)和砾石($> 2\,000 \mu\text{m}$)。筛选输出土壤颗粒累计体积分数为5%,10%,16%,25%,50%,75%,84%,90%,95%所对应的颗粒直径以备后期计算使用。

采用Udden-Wenworth粒级标准,根据Kumdein的算法进行对数转化,分别将先前输出的各土壤颗粒累积体积分数对应的颗粒直径转换为 Φ 值^[13],以便于后续的计算工作,转换公式为:

$$\Phi = -\log_2 D \quad (2)$$

式中: D 为土壤颗粒直径。

依据Folk-Ward图解法计算平均粒径(d_0)、标准偏差(σ_0)、偏度(SK)与峰态(K_g)等土壤粒度参数^[14]。利用激光粒度仪测定土壤不同粒径的体积含量并利用粒径体积分布表征土壤分形模型来计算分形维数^[15-16],计算公式为:

$$d_0 = \frac{1}{3}(\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}) \quad (3)$$

$$\sigma_0 = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \quad (4)$$

$$SK = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (5)$$

$$K_g = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (6)$$

$$\left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{V(r < R_i)}{V_T} \quad (7)$$

式中: D 为分形维数; R_i 为测量的土壤粒径; R_{\max} 为最大颗粒的直径; $V(r < R_i)$ 为小于测量粒径(R_i)的土壤粒径体积百分含量; V_T 为土壤各粒级体积的总体积百分含量。

2.5 统计分析

采用Excel 2021和Origin 2023软件对数据进行整理、分析以及图表的绘制,使用SPSS 25软件对数据进行单因素方差分析,数据表现形式为:平均值±标准值;以及LSD多重检验。

3 结果与分析

3.1 不同防护林树种下土壤颗粒机械组成

由表1可知,研究区土壤粒度组成以砂粒为主,CL和SS两种防护林带间、根颈和冠幅下砂粒的平均百分含量相较于CK分别减少5.19%,0.59%,20.44%和1.53%,3.93%,4.32%。通过进一步分析发现,两防护林冠幅下粗砂与极粗砂的含量比对照显著减少($p < 0.05$),经测量两防护林冠幅下的极细砂含量极少($p < 0.05$),SS树下的中砂含量显著高于CL树下,且SS带间的中砂含量显著低于根部与冠幅下两部位($p < 0.05$),CL冠幅下的细砂含量最少,同SS冠幅下存在显著差异($p < 0.05$);细砂与极细砂的含量同样是CL的冠幅下含量少于其他部位($p < 0.05$)。各位置粉粒的含量除CL冠幅下显著高于其他位置外($p < 0.05$),其他位置的粉粒含量差异性较小($p > 0.05$);CL冠幅下的黏粒含量显著高于其他位置($p < 0.05$),除CK外其他位置黏粒的含量差异不明显($p > 0.05$)。总体来看,土壤粒度含量表现为冠幅下的粗砂与极粗砂的含量较CK有所减少,粉粒与黏粒的总体含量增加,细砂的总体含量减少,粒径的平均占比向着更细的趋势发展。

3.2 不同防护林树种、不同土层深度土壤粒度组成

3.2.1 平均粒径 由表2可知,对照的平均粒径为0.93 Φ ;CL带间、根颈与冠幅下的平均粒径的平均值分别为0.21 Φ ,0.34 Φ ,2.38 Φ ;SS带间、根颈与冠幅

下的平均粒径的平均值为 0.53Φ , 0.79Φ , 0.82Φ 。对照的平均粒径除 CL 冠幅下外均高于其他位置,且两树种的平均粒径都表现为:CK<带间<根颈<冠幅

下,冠幅下的 Φ 值变大表示细粒含量显著增加($p<0.05$),增幅表现为:冠幅下>根颈>带间>CK。CL 冠幅下的平均粒径增幅相比较梭梭较大。

表 1 不同树种、土层深度土壤粒度组成

Table 1 Soil particle composition of different soil depths under tree species

%

土壤 类型	土层 深度/cm	黏粒	粉粒	砂粒				
				极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂
对照	0—2	0.75±0.12Cb	1.73±0.11ABb	0.28±0.01BCc	0.95±0.04Ac	11.58±0.65ABCc	64.73±0.68ABCa	19.92±0.80BCa
	2—5	0.58±0.04Cc	1.29±0.08Cb	0.29±0.03BCc	1.19±0.07Ac	12.24±0.75Cc	66.04±2.22Ca	18.29±2.12ABa
	5—10	1.11±0.06Ba	3.27±0.42ABa	1.19±0.06Ba	8.86±0.45Ab	50.02±1.12Ba	32.83±1.39ABb	2.73±0.80Bb
	10—20	0.75±0.07Db	3.39±0.48BCa	0.99±0.0CDB	11.04±0.24Aa	46.33±0.22Db	32.69±0.43CDB	4.81±0.17Bb
怪柳带间	0—2	4.45±0.77DEa	10.15±0.58Ba	0CDEb	0Ad	0BCDd	30.34±2.31BCb	54.70±1.27DEa
	2—5	0.57±0.33Ca	1.90±1.02Cb	0.39±0.17Cb	2.61±0.21Bb	10.40±1.17Ca	52.52±0.48BCa	31.47±0.95Bb
	5—10	3.54±3.23BCa	6.83±4.37Bab	0.07±0.01Cb	0.87±0.47Ac	1.92±0.19Cc	52.97±3.54Ba	34.10±3.71BCb
	10—20	1.99±0.93BCa	4.22±0.72BCb	0.70±0.27BCa	4.27±0.21Aa	5.99±0.36Cb	55.10±0.70Ca	27.64±1.60Bc
怪柳根颈	0—2	1.37±0.42Ba	3.14±0.44Ca	0.01±0.02Cb	0.69±0.10Cc	2.65±0.46Cc	61.07±0.92Cb	30.90±1.35Aa
	2—5	2.01±2.04Ba	5.10±4.10Ba	1.66±1.11Aa	6.98±0.86Ba	5.65±1.03Bb	47.24±4.71Bc	31.18±1.91Ba
	5—10	0.52±0.13Aa	1.29±0.09Da	0.51±0.13Bab	2.17±0.66Db	12.51±0.40Ca	68.43±0.87Aa	14.50±0.27Ac
	10—20	0.52±0.13Ba	1.29±0.09Ca	0.51±0.02Db	2.17±0.07Eb	2.59±0.14Bc	61.12±1.19CDB	28.13±1.38Ab
怪柳冠幅下	0—2	6.00±2.43Bb	18.13±4.51Ca	0B	0.00±0Cb	0.01±0.01Bb	40.46±5.13Ba	35.23±1.92Aab
	2—5	5.46±1.08Db	13.15±0.95Ca	0A	0.04±0.02Fb	1.58±0.33DEa	42.45±0.34Ba	37.06±2.06EFa
	5—10	5.07±2.42Bb	15.49±4.20Ea	0D	1.13±0.66Ea	1.36±0.37Ea	39.56±4.44Aa	37.13±2.94Ca
	10—20	10.92±0.92Ba	20.39±3.24Da	0E	0.06±0.08Fb	0.90±0.57Ca	36.45±1.22Ea	31.09±0.64Ab
梭梭带间	0—2	3.46±2.54BCa	8.00±4.62Ea	0Dc	0.55±0.24Ec	10.75±0.37Cc	45.69±3.84Bb	31.39±3.66Aa
	2—5	0.66±0.08Bb	1.72±0.01Cb	0.18±0.05Db	0.91±0.15Ebc	8.48±0.35Cd	62.50±2.11Aa	25.44±2.28Eb
	5—10	0.68±0.10Ab	1.44±0.06Eb	0.28±0.07Db	1.38±0.01Eb	14.40±1.04Db	64.29±1.13Ba	17.47±0.44Cc
	10—20	0.86±0.15Aab	2.20±0.14Eb	1.06±0.08Fa	10.10±0.47Ga	34.88±1.52Ca	39.38±2.00Dc	11.47±0.75Bd
梭梭根颈	0—2	4.33±3.14Aa	9.22±5.08Da	0.01±0.02Ac	0.62±0.47BCd	12.67±0.84Bd	44.56±5.48Bb	28.41±1.44CDa
	2—5	0.87±0.21Ab	1.94±0.15BCb	0.47±0.04DEb	3.70±0.19Db	27.29±0.99Ab	50.14±1.20BCab	15.49±0.38Bb
	5—10	2.20±0.29Dab	7.19±1.34Bab	1.10±0.12Aa	14.04±0.41Ca	45.19±2.12Aa	27.43±4.84Dc	2.85±3.03Bc
	10—20	0.89±0.22Cb	1.98±0.17Bb	0.57±0.02Ab	2.60±0.22Cb	21.01±1.42Cc	55.14±0.65Ba	17.73±1.29Bb
梭梭冠幅下	0—2	1.02±0.19Db	2.76±0.21Ab	0.75±0.08Cc	4.10±0.14Bc	40.66±1.84Ca	36.84±1.51Cb	13.78±1.26Eb
	2—5	3.68±1.95Da	9.60±3.09Ba	0Bd	0.31±0.24Ad	2.67±0.24Cd	54.92±3.20Da	28.61±3.70BCa
	5—10	1.52±0.2Db	3.31±0.29Ab	1.06±0.09Bb	5.20±0.11Ab	23.75±0.90Bc	55.30±1.01Da	9.83±1.92Cbc
	10—20	2.55±0.44Fab	5.73±0.52Bb	2.50±0.09Ba	15.93±0.24Aa	37.30±0.25Db	28.18±2.63Cc	7.77±2.69Ec

注:大写字母表示不同防护林树种下沉积物在同一高度差异显著($p<0.05$);小写字母表示同一防护林树种下沉积物在不同高度差异显著($p<0.05$)。下同。

3.2.2 标准偏差 由表 2 可知,对照的平均标准偏差为 0.72;CL 各位置(带间、根颈、冠幅下)不同土层高度的平均标准偏差分别为 1.33, 0.89, 3.35;SS 各位置(带间、根颈、冠幅下)不同土层高度的平均标准偏差分别为 0.96, 1.24, 1.33。其中,CL 冠幅下的标准偏差较带间与根颈有较大幅度的提升($p<0.05$),SS 冠幅下的标准偏差较带间与根部的差异性较小($p>0.05$)。本研究计算发现对照较两防护林树种的各部位标准偏差低,分选性较差;充分反映出在风沙侵蚀活动下土壤粒径的复杂性、差异性与不确定性,防护林的冠幅能够有效降低风沙活动与气流对土壤的分选作用,并且防护林的枝叶能够有效拦截风沙活动中空中的沙土。

3.2.3 偏度 偏度是指非正态粒度分布下的偏斜程度,可以敏感地反映土壤粒径的微量变化,负偏表示为粗偏,正偏为细偏^[15]。由表 2 可知,本研究所有的偏度均为正偏,意味着因搬运能力弱,粗粒物质不足,平均值向中位数的较细方向移动。偏度的范围处于 0.02~0.90,不同树种、位置和深度的正偏值不同,在怪柳的冠幅下偏度值达到最大且稳定均为 0.90,以上数据计算结果表明,该研究区未沙化土地首先被风蚀,细粒物质随风沙流运动,最终被防护林截留下来,并在下方形成沉积物。

3.2.4 峰态 峰态是表示粒度分布在平均粒度两侧集散程度的参数,可对土壤颗粒频率分布曲线峰形的

宽窄陡缓程度进行判断^[17],一般来说,峰态尖锐程度越高,表明样品粒径分布更加集中,也说明一些颗粒沉积物在生态环境改造之前就已经直接进入了本研究的环境中。通过图 1 可知,依据福克峰态划分等级标准,对照的颗粒度峰值为 1.09~1.63,对照各土层的峰态都处于窄与很窄之间;CL 带间的颗粒度峰值为 1.69~8.86,频率分布曲线整体位于很窄水平之上;CL 根颈的颗粒度峰值为 1.28~4.50,其中 5—10 cm 土层频率分布曲线属于窄,其余土层的频率分布曲线水平均在很窄及之上;CL 冠幅下的颗粒度峰值为 0.55~6.82,只有 10—20 cm 土层频率分布曲线属于很宽,其余 3 层土

层频率分布曲线均属于极窄;SS 带间的颗粒度峰值为 0.96~4.34,从表层到底部颗粒度峰值依此降低,频率分布曲线分别属于极窄、很窄、窄和中等(近正态);SS 根颈的颗粒度峰值为 0.97~3.22,2—5 cm 与 10—20 cm 频率分布曲线属于中等(近正态),0—2 cm 属于极窄,5—10 cm 属于很窄;SS 冠幅下的颗粒度峰值为 1.10~5.96,0—2 cm 土层频率分布曲线属于中等(近正态),2—5 cm 属于极窄,5—10 cm 土层与 10—20 cm 土层属于很窄。CL 的带间与冠幅下的尖窄程度明显高于 CL 根颈、SS 的带间、根颈和冠幅下,在 CL 的冠幅下有明显的粒径级别。

表 2 不同防护林树种下土壤粒度特征
Table 2 Soil particle size characteristics under different shelter forest species

树种/位置	土层深度/cm	平均粒径/ Φ	标准偏差	偏度	峰态	分形维数
CK	0—2	0.37±0.02Db	0.56±0.02Cb	0.27±0.01 Ea	1.17±0.03Bbc	2.21±0.03Aa
	2—5	0.39±0.02Cb	0.53±0.01Bb	0.21±0Da	1.09±0.03Dc	2.16±0.01Ab
	5—10	1.21±0.04Ca	0.87±0.0Da	0.23±0.03 Ea	1.63±0.14Ba	2.22±0.01Aa
	10—20	1.73±0.01Ca	0.92±0.06Da	0.12±0.04 Eb	1.33±0.12Bb	2.16±0.01Ab
CL 带间	0—2	0.05±0.67Ca	1.59±0.87BCa	0.05±0.90BCa	8.86±1.75Aa	2.60±0.03Ba
	2—5	0.27±0.02Da	0.67±0.05Ca	0.47±0.03CDa	1.69±0.27Bc	2.18±0.11Ac
	5—10	0.12±1.31Ba	1.52±1.39Ba	0.54±0.27Ba	7.34±2.35Aab	2.53±0.15Bab
	10—20	0.38±0.09Ca	1.47±0.42BCa	0.66±0.09Ca	4.97±2.35Abc	2.40±0.09Bbc
CL 根部	0—2	0.13±0.02Cb	0.56±0.11Bb	0.35±0.05BCbc	2.09±0.51Aab	2.37±0.05Aa
	2—5	0.60±0.25Ca	1.67±0.65Ba	0.76±0.09Ca	4.50±0.30Aab	2.40±0.17Aa
	5—10	0.44±0.01Da	0.57±0.01Cb	0.29±0.01 Ec	1.28±0.02Bb	2.13±0.04Ab
	10—20	0.18±0.01Cb	0.77±0.25Cab	0.44±0.09Cb	3.04±0.02Aa	2.32±0.05Bab
CL 冠幅下	0—2	2.38±0.36Aa	3.34±0.35Aa	0.90±0.12Aa	5.46±3.79Aab	2.62±0.07Aab
	2—5	2.16±0.19Ca	3.18±0.17Ba	0.90±0Da	6.82±0.54Aa	2.60±0.03Cab
	5—10	2.22±0.92ABa	3.21±0.74ABa	0.90±0.04Ba	5.86±3.51Aab	2.59±0.06ABb
	10—20	2.75±0.03Ba	3.68±0.04Aa	0.90±0Ca	0.55±3.51Db	2.70±0.01Ba
SS 带间	0—2	0.46±1.15BCa	1.76±1.05BCa	0.72±0.12Ca	4.34±1.09Aa	2.50±0.14ABa
	2—5	0.26±0.02 Ea	0.54±0.01Cb	0.32±0Db	1.38±0.02Bb	2.21±0.02Ab
	5—10	0.43±0.02Da	0.59±0.01Cb	0.29±0.01 Eb	1.15±0.02Bb	2.18±0.02Ab
	10—20	0.95±0.03Ba	0.93±0.02Bb	0.14±0.03Cc	0.96±0.02Bb	2.18±0.02Ab
SS 根部	0—2	0.55±1.17BCa	1.85±1.08ABCa	0.70±0.12Ca	3.22±0.40Aa	2.54±0.16ABa
	2—5	0.66±0.02Da	0.77±0.02Cb	0.23±0.03 Eb	0.97±0.03Bb	2.20±0.03Ab
	5—10	1.42±0.02Da	1.58±0.02Cb	0.40±0.03 Eb	2.75±0.03Bb	2.35±0.01Aab
	10—20	0.55±0.04Da	0.73±0.03Cb	0.31±0.03 Eb	1.07±0.03Bb	2.22±0.04Ab
SS 冠幅下	0—2	0.85±0.03Ca	0.88±0.05Cb	0.02±0.03Dc	1.10±0.08Bc	2.22±0.03Ac
	2—5	0.32±1.23Ca	1.65±0.99BCa	0.64±0.19Ca	5.96±0.46Aa	2.53±0.07Ba
	5—10	0.76±0.03Da	0.99±0.03Cb	0.39±0 Eb	1.80±0.19Bb	2.30±0.02Aab
	10—20	1.36±0.03Da	1.78±0.04Cab	0.35±0.03 Eb	2.27±0.19Bb	2.37±0.03Ab

3.2.5 分形维数 研究区内不同树种不同位置的分形维数见图 1,对照的分形维数平均值为 2.19;CL 带间、根颈和冠幅下的分形维数平均值分别为 2.43, 2.31, 2.63;SS 带间、根颈和冠幅下的分形维数平均值分别为 2.42, 2.33, 2.36。

由图 1 可以看出,裸沙地的分形维数最低,且两树种根颈的分形维数平均值都比带间与冠幅下两部

位要低,而 CL 冠幅下的分形维数平均值要明显高于其他 6 个部位,这是由于分形维数的大小与黏粒、粉粒呈正相关关系,与砂粒呈负相关^[18],由于研究区内种植柽柳防护林后,当风速达到起沙风速后,风会携带沙物质在空中运动,其中一部分会被防护林拦截下来,从而堆积在防护林冠幅下,分形维数较根部有所提升。

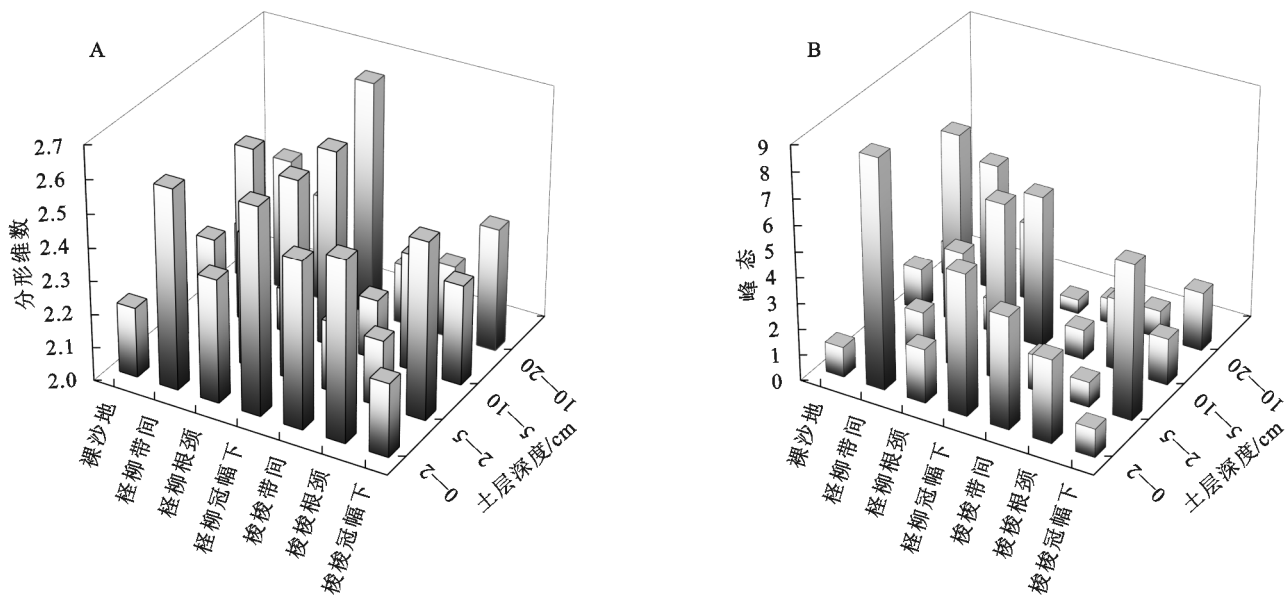


图 1 不同位置、高度的峰态与分形维数

Fig. 1 Peak state and fractal dimension at different positions and heights

3.2.6 防护林下土壤颗粒频率分布曲线 土壤颗粒频率分布曲线能够较好地反映土壤粒径大小、偏度和峰度等方面的信息。此外,还可通过曲线的波峰与陡峭程度判断颗粒的沉积动力及物源情况^[19]。分别以CK,CL(带间、根颈、冠幅下)和SS(带间、根颈、冠幅下)7处位置的0—2 cm,2—5 cm,5—10 cm,10—20 cm土层土壤粒径平均值制作颗粒频率分布曲线。由图2可知,各土层差异较为明显,0—2 cm与2—5 cm差异较明显呈现单峰态,5—10 cm与10—20 cm差异不显著且呈双峰态。0—2 cm与2—5 cm土层各位置波峰集中在800~900 μm 处,5—10 cm与10—20 cm波峰处于400 μm 与900 μm 处,在400 μm 处陡峭程度表现为对照最陡,在900 μm 处则可以发现两树种的根颈最为陡峭。两防护林树种冠幅下的粗粒物质含量明显较低,在900 μm 处陡峭程度较为平缓。

累积频率分布曲线可以反映土壤颗粒的粒径分布情况,累积频率曲线越陡峭,表明颗粒分布越均匀。分析图2发现,各土层CL冠幅下的细粒物质含量明显高于对照与其他部位,在0—2 cm土层表现最明显;且0—2 cm与2—5 cm土层的陡峭程度相较于其他两土层陡,表明上两层比下两层土壤颗粒分布均匀,颗粒组成更细。0—2 cm与2—5 cm土层累积频率曲线开始时比较平缓,但在约400 μm 处突然变得陡峭且迅速升高,表明这两土层的颗粒物质大多集中在400 μm 范围内,而在5—10 cm与10—20 cm土层则在600 μm 处变得陡峭。结合表2中CL冠幅下的标准偏差较大,表明CL冠幅下较对照与其他部位土壤颗粒分选性较好,细粒多且分布均匀,CL冠幅的拦截性较好,抗风蚀能力更强。

4 讨论

研究区土地受风蚀影响较重,在风沙运动过程中地表细粒物质流失,从而导致土壤物质的机械组成中粗粒物质的含量增加,地表粗化明显。防护林作为一种有效的抗风蚀手段,在受风蚀侵害严重的地区建设防护林体系在全国乃至全世界被广泛采用^[3]。研究区内的两种防护林树种(柽柳、梭梭)均为人工种植的优势种。由于两树种的冠幅大小、叶片密度与冠幅的离地高度等都有一定差异,其防风固沙效益也表现出一定的差异性,以及树下沉积物颗粒的粗细程度也有一定的差异。种植防护林后能够有效提高沙粒起沙风速,降低地表的风蚀程度^[20]。

两防护林树种从根部到冠幅下的细粒物质含量均逐步提升,土壤的微小孔隙体积占比越高,土壤的复杂程度越高,土壤的分形维数越大,表明土壤的沙化程度降低。根部的分形维数小是由于根部的叶片较少,加上树干垂直于地面,与地面形成的夹角,提高了根部风速,致使根部受风蚀影响较其他两个部位更明显。本研究发现,柽柳的防风固沙效益较梭梭树较为明显,树下沉积物细粒物质的含量更高。冯泽深等^[21]研究发现不同配置格局灌木林对风蚀影响的研究中发现,枝叶茂密,植被覆盖度高,树高较高的树种对风速降低作用比枝叶密度较低,植被覆盖度低,树高较低的树种防风固沙效益更好。原因是降低了风速,当风沙流吹过时风速减弱,风沙流携带的细粒物质沉积下来致使树下细物质的含量增加。若山古丽·芒力克等^[22]研究发现相比较柽柳而言梭梭灌丛之间的间隙较大,密集程度较弱。人工梭梭林为

行带式种植,带间及株间空隙较大。此外,梭梭树下的枝条较少,尽管能够降低低空风速,但阻风能力有限,地表仍有风蚀表现。相较于本研究结果,王国华等^[23]研究发现随着梭梭树种种植的年代增长,梭梭的冠幅在种植的前 20 年间冠幅呈增长趋势。研究

发现梭梭树下的细粒物质以及各项指标的峰值不如怪柳树那样增幅明显,但由以上结果可以看出梭梭树下粒度特征的各项数值趋近于稳定,表明梭梭自身的性质比较稳定,耐受性与抗干扰能力较强,受环境影响因素较小。

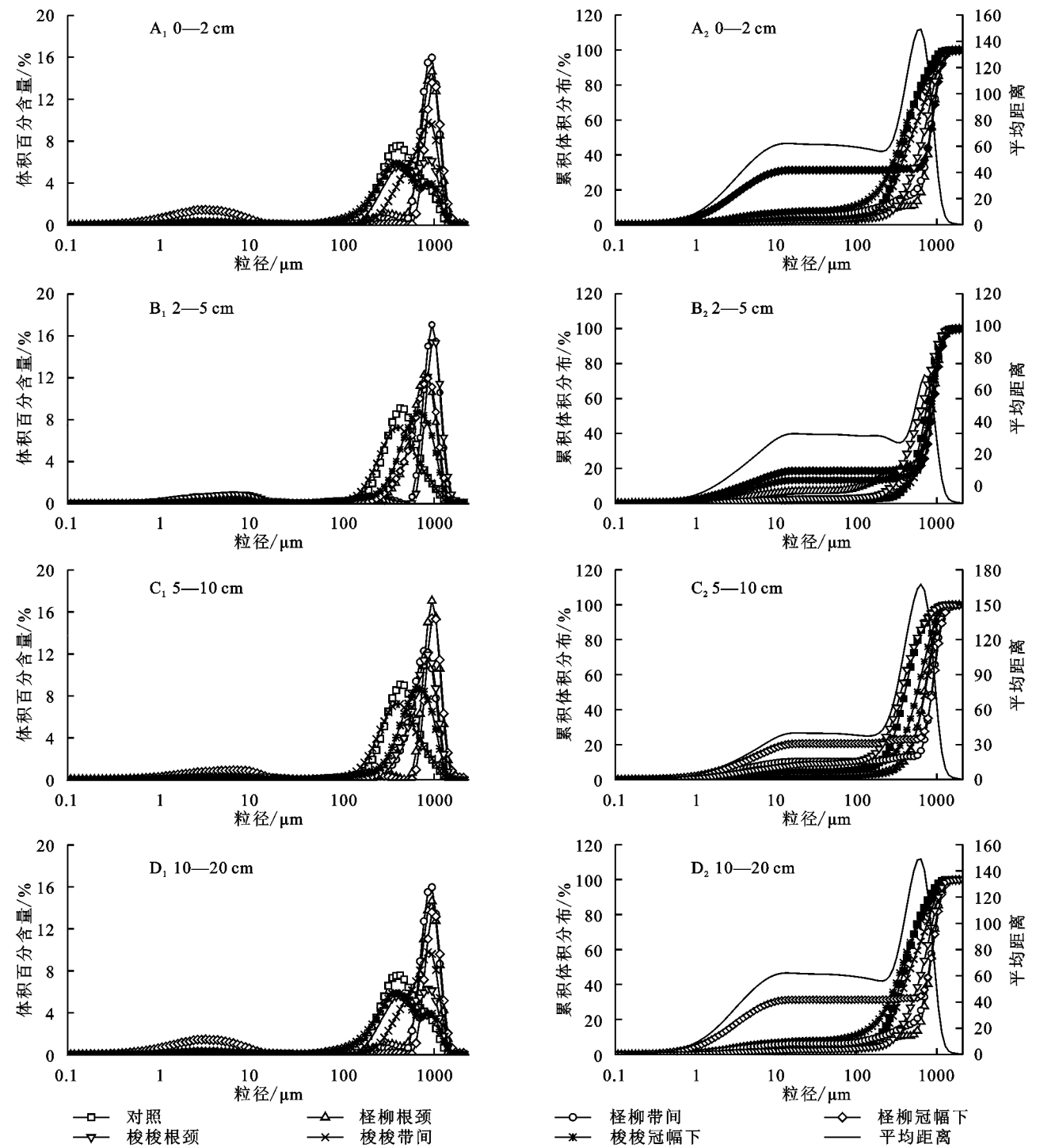


图 2 不同土层颗粒频率分布曲线

Fig. 2 Frequency distribution curves of particles in different soil layers

相同年龄规格的防护林树种,枝叶越密集、冠幅越大,降低风速效果越明显防风固沙效果越显著^[24]。从表 1 可知,两树种的冠幅下黏粒、粉粒平均含量明

显高于其他两部位($p<0.05$),极细砂与细砂的含量显著偏低($p<0.05$)。随着颗粒径级变大,中砂含量显著偏低($p<0.05$),颗粒更粗的粗砂、极粗砂等含量

在带间与根部显著高于冠幅下($p < 0.05$)。两树种在测量取样时均为枝叶茂盛时期,孔隙度密集且细小,部分气流携沙穿过孔隙,此时的气流强度会被削弱极易发生沉积。而怪柳的枝叶茂密程度相比较梭梭而言更加茂盛,孔隙度更小,所以怪柳树下的沉积物更多。但由表1也可以发现,梭梭虽然冠幅下的细粒含量不如怪柳^[25],但其极细砂、细砂与中砂的含量在带间与根部的含量要明显高于怪柳;以上研究结果表明,研究区取两树种优点进行科学配比种植可能拥有更好的效益^[26-27];杨越等^[28]研究发现在近地面高度,乔灌木混交林的防风固沙效益要明显高于单一树种的防护林;并且混交防护林的输沙量也要小于单一树种的防护林。

近年来,查干淖尔干盐湖附近的旅游业与畜牧业较旺盛,大量游客的涌入与畜牧业大力发展为当地的生态带来了很大的压力。作为典型的干旱半干旱过渡地带,伴随着全球气温的升高、降水量降低,气候向暖干旱方向发展,导致当地出现草地退化甚至沙化面积变大的现象;地表细物质减少极易被吹蚀,同时植被的退化也会加剧土壤中水分的蒸发,土体变干且蓬松,再次受到外力破坏(如踩踏)会形成应力缺口,导致侵蚀深度的进一步加深。研究区梭梭树下的分形维数较小,土壤中粗粒物质的含量也明显高于怪柳,粗砂与极粗砂为优势颗粒。原因是成年后的梭梭底部树干枝条少,容易有生物进去觅食进行踩踏,而怪柳则底部枝条茂盛。因此当地有关部门在发展旅游业与畜牧业的同时也应该适当的规划旅游的路线与放牧用地,既保护土地的同时又提高了土地利用率。

5 结论

(1) 研究区土壤粒度分布较集中,以砂粒为主。梭梭和怪柳冠幅下的砂粒百分含量相对于CK均有所减少,怪柳冠幅下砂粒含量分别比带间以及根颈少12.81%,15.56%,梭梭冠幅下砂粒含量分别比带间以及根部少4.82%,2.94%。

(2) 防护林冠幅下沉积物的分选性均低于带间、根颈与对照;偏度向着正偏方向发展;峰态向着尖窄发展;冠幅下沉积物的分形维数不同程度地增加,表现为冠幅下>带间>根颈>对照。种植防护林后土壤整体向着细粒化的趋势发展,且在风沙活动较强的地区更为显著。

(3) 结合土壤的粒径组成、粒度特征和分形维数,对土壤粒度的细粒化发展及固沙效益表现为怪柳>梭梭>裸沙地。研究区内的防护林体系已初具防护效益,由防护林形成的不同于当地环境背景的

特殊生境特征,对于当地的生产发展具有极其重要的作用。

参考文献(References):

- [1] 尚白军,吴书普,周智彬,等.新疆莫索湾垦区150团防护林防护效益分析[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(5):45-52.
Shang B J, Wu S P, Zhou Z B, et al. Analysis on protection benefit of shelterbelt in Regiment 150 of Mosuowan, Xinjiang[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(5):45-52.
- [2] 李应罡,徐新文,李生字,等.沙漠公路防护林乔木状沙拐枣的平茬效益分析[J].干旱区资源与环境,2008,22(8):196-200.
Li Y G, Xu X W, Li S Y, et al. Analysis on the cutting benefit of *Calligonum arborescens* in shelterbelt along the Tarim Desert highway[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008,22(8):196-200.
- [3] 丁延龙,汪季,胡生荣,等.吉兰泰盐湖风沙防护林体系建立35a以来防沙效益评估[J].中国沙漠,2019,39(5):111-119.
Ding Y L, Wang J, Hu S R, et al. Shelter effect of the forest shelterbelt system around Jilantai salt lake after 35y's running[J]. Journal of Desert Research, 2019,39(5):111-119.
- [4] 纪平,邵全琴,王敏,等.中国三北防护林工程第二阶段生态效益综合评价[J].林业科学,2022,58(11):31-48.
Ji P, Shao Q Q, Wang M, et al. Monitoring and assessment of ecological benefits of the shelter forest program in the three-north region during 2001—2020[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022,58(11):31-48.
- [5] Cheng J, Zhang Y, Wang H N, et al. Sand-fixation plantation type affects soil phosphorus transformation microbial community in a revegetation area of Horqin Sandy Land, Northeast China[J]. Ecological Engineering, 2022,180:106644.
- [6] 张正偲,董治宝.土壤风蚀对表层土壤粒度特征的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(12):86-89.
Zhang Z C, Dong Z B. The effect of wind erosion on the surface particle size[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012,26(12):86-89.
- [7] 丁延龙,高永,蒙仲举,等.希拉穆仁荒漠草原风蚀地表颗粒粒度特征[J].土壤,2016,48(4):803-812.
Ding Y L, Gao Y, Meng Z J, et al. Particle size characteristics of wind erosion surface soil in the desert steppe[J]. Soils, 2016,48(4):803-812.
- [8] 祁帅,汪季,党晓宏,等.3种低立式沙障内表层沉积物粒度特征研究[J].干旱区研究,2021,38(3):875-881.
Qi S, Wang J, Dang X H, et al. Grain size characteristics of surface sediments in three low vertical sand barriers

- ers[J]. *Arid Zone Research*, 2021,38(3):875-881.
- [9] 中国农业百科全书编辑部.中国农业百科全书:果树卷[M].北京:中国农业出版社,1993.
Chinese Agricultural Encyclopedia Editorial Department. *Encyclopedia of Chinese Agriculture: Fruit tree*[M]. Beijing: China Agriculture Press,1993.
- [10] 江南,王永,董进,等.内蒙古查干淖尔湖 2000 a 以来气候环境演变的沉积记录[J].地质通报,2016,35(6):953-962.
Jiang N, Wang Y, Dong J, et al. Sedimentary record of environmental evolution since ca 2000 cal yr BP ago in Qehan Lake, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016,35(6):953-962.
- [11] Han L J, Liu D W, Cheng G S, et al. Spatial distribution and genesis of salt on the saline playa at Qehan Lake, Inner Mongolia, China[J]. *CATENA*, 2019, 177:22-30.
- [12] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等.生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):115-120.
Gao G L, Ding G D, Zhao Y Y, et al. Effects of biological soil crusts on soil particle size characteristics in Mu Us sandland[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014,45(1):115-120.
- [13] 丁国栋.风沙物理学[M].2 版.北京:中国林业出版社,2010.
Ding G D. *Aolian Physics*[M]. 2nd Edition. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.
- [14] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957,27(1):3-26.
- [15] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993,38(20):1896-1899.
- [16] Luo Y X, Liu R T, Zhang J, et al. Soil particle composition, fractal dimension and their effects on soil properties following sand-binding revegetation within straw checkerboard in Tengger Desert, China [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2019,30(2):525-535.
- [17] 张世熔,邓良基,周倩,等.耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J].土壤学报,2002,39(2):221-226.
Zhang S R, Deng L J, Zhou Q, et al. Fractal dimensions of particle surface in the plowed layers and their relationships with main soil properties[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002,39(2):221-226.
- [18] 买尔旦·阿不都卡德,阿丽亚·拜都热拉,孙桂丽,等.塔克拉玛干沙漠西南缘城郊防护林防护效益:以叶城县为例[J].东北林业大学学报,2022,50(10):55-60.
Merdan · Abdukadir, Aliya · Baidurela, Sun G L, et al. Protection benefits of the suburban shelterbelt in the southwestern margin of the Taklimakan Desert: A case study of Yecheng County[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022,50(10):55-60.
- [19] 罗松英,全晓文,陈碧珊,等.湛江湾红树林湿地沉积柱粒度特征及沉积动力分析[J].现代地质,2021,35(3):647-656.
Luo S Y, Quan X W, Chen B S, et al. Grain size characteristics and sedimentary dynamics of sedimentary column of mangrove wetland in Zhanjiang Bay [J]. *Geoscience*, 2021,35(3):647-656.
- [20] 党晓宏,魏亚娟,蒙仲举,等.乌兰布和沙漠东北缘不同下垫面降尘特征研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(5):1122-1133.
Dang X H, Wei Y J, Meng Z J, et al. Characteristics of dustfall on different underlying surfaces in the northeast UlanBuhe Desert[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020,28(5):1122-1133.
- [21] 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.
Feng Z S, Gao J R, Cui Q, et al. Influence of shrub optimal configuration pattern on soil wind erosion[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010,24(1):179-183.
- [22] 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):43-47,56.
Manglike Ruoshanguli, Baidourela Aliya, Cai K X, 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):43-47,56.
- [23] 王国华,陈蕴琳,缙倩倩.荒漠绿洲过渡带不同年限雨养梭梭(*Haloxylon ammodendron*)对土壤水分变化的响应[J].生态学报,2021,41(14):5658-5668.
Wang G H, Chen Y L, Gou Q Q. Responses of *Haloxylon ammodendron* with different plantation ages to changes of soil moisture in a desert-oasis ecotone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(14):5658-5668.
- [24] 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.
Zhou X, Tian L H, Zhang D S, et al. Study on wind-prevention and sand-fixing benefits of different vegetation on the east coast dune of Qinghai Lake[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(8):180-185.

- improved sparrow search algorithm for predicting runoff using historical meteorological and runoff data as input[J]. *Journal of Hydrology*, 2023,625:129977.
- [19] 柳利利,韩磊,高阳,等.宁夏河东沙区刺槐和丝绵木水分利用策略[J].*生态学报*,2023,43(2):812-825.
- Liu L L, Han L, Gao Y, et al. Water use strategies of *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* in the east sandy land of the Yellow River in Ningxia, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(2):812-825.
- [20] Magliano P N, Whitworth-Hulse J I, Baldi G. Interception, throughfall and stemflow partition in drylands: Global synthesis and meta-analysis [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,568:638-645.
- [21] Wang D, Wang L, Zhang R. Measurement and modeling of canopy interception losses by two differently aged apple orchards in a subhumid region of the Yellow River Basin [J]. *Agricultural Water Management*, 2022,269:107667.
- [22] 庞维华,孙雅婕,刘建军.不同类型园林植物群落冠层的截留能力研究[J].*水土保持通报*,2022,42(4):49-55.
- Pang W H, Sun Y J, Liu J J. Canopy interception ability of different types of garden plant communities[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(4):49-55.
- [23] 董玲玲,康峰峰,韩海荣,等.辽河源 3 种林分降雨再分配特征及其影响因素[J].*水土保持学报*,2018,32(4):145-150.
- Dong L L, Kang F F, Han H R, et al. Traits and influencing factors of rainfall redistribution in three types of forest in Liaoheyuan [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,32(4):145-150.
- [24] 张建国,闫美杰,杜盛.连续降雨条件下黄土丘陵区两典型林分降雨分配特征研究[J].*水土保持研究*,2016,23(5):158-163,168.
- Zhang J G, Yan M J, Du S. Characteristics of rainfall partitioning in two typical forests under continuous rainfall in the Loess Hilly Region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016,23(5):158-163,168.
- [25] 王甜甜,朱林,赵学琳,等.三种典型固沙灌木的降雨再分配特征[J].*干旱区资源与环境*,2021,35(8):100-107.
- Wang T T, Zhu L, Zhao X L, et al. Rainfall redistribution characteristics of three typical sand-fixing shrubs [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021,35(8):100-107.
- [26] Deng J F, Yu Y F, Shao J, et al. Rainfall interception using the revised Gash analytical model for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in a semi-humid region of NE China [J]. *Ecological Indicators*, 2022,143:109399.
- [27] Herbst M, Rosier P T W, McNeil D D, et al. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008,148(11):1655-1667.
- [28] Limousin J M, Rambal S, Ourcival J M, et al. Modelling rainfall interception in a Mediterranean *Quercus ilex* ecosystem: Lesson from a throughfall exclusion experiment [J]. *Journal of Hydrology*, 2008,357(1/2):57-66.
- [29] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, northwestern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015,527:1084-1095.

(上接第 187 页)

- [25] 闫海龙,张希明,许浩,等.塔里木沙漠公路防护林 3 种植物光合特性对干旱胁迫的响应[J].*生态学报*,2010,30(10):2519-2528.
- Yan H L, Zhang X M, Xu H, et al. Photosynthetic characteristics responses of three plants to drought stress in Tarim Desert Highway shelterbelt [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010,30(10):2519-2528.
- [26] 马成忠,邓继峰,丁国栋,等.不同初植密度樟子松人工林对毛乌素沙地南缘土壤粒度特征的影响[J].*水土保持学报*,2017,31(1):230-235.
- Ma C Z, Deng J F, Ding G D, et al. Effects of different planting densities of Mongolian pine on the soil particle size characteristics in southern Mu Us desert [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017,31(1):230-235.
- [27] 张莹花,康才周,刘世增,等.沙地云杉(*Picea mongolica*)农田防护林带不同配置模式的防风效果[J].*中国沙漠*,2017,37(5):859-866.
- Zhang Y H, Kang C Z, Liu S Z, et al. Windbreak effect of *Picea mongolica* farmland shelterbelt with different configuration [J]. *Journal of Desert Research*, 2017,37(5):859-866.
- [28] 杨越,杨依天,武智勇,等.冀北坝上地区农田防护林防风固沙效应研究[J].*西北林学院学报*,2020,35(4):167-172.
- Yang Y, Yang Y T, Wu Z Y, et al. Studies on wind break and sand fixation effects of farmland shelterbelt in Bashang area of northern Hebei [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020,35(4):167-172.