

沙地柏人工林和天然林风沙土特性研究

拓 飞¹, 董治宝², 南维鸽², 杨树俊³, 武玉叶⁴, 李 强⁵

(1.榆林市绿化委员会办公室, 陕西 榆林 719000;

2.陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119; 3.榆林职业技术学院 林学院, 陕西 榆林 719001;

4.大同市第一中学校, 山西 大同 037008; 5.榆林学院 陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西 榆林 719001)

摘 要:为了深入了解固沙植被恢复对土壤理化性质的影响,以毛乌素沙地东南缘沙地柏人工林和天然林为研究对象,通过收集灌丛下 5 个土层(0—100 cm)的土壤样品,分析其土壤颗粒组成及 8 个理化指标,探讨了沙地柏生长对风沙土特性的影响。结果表明:研究区土壤粒度组成以砂粒(体积分数 97.09%)为主,其次是粉粒和黏粒,并形成以中砂(50.26%)为主的单峰,土壤弱碱性,其养分含量整体水平低,且具有明显表层聚集现象。土壤养分含量与土壤粒度之间存在良好的相关性,表现为土壤有机质、速效钾和盐分含量与细沙物质(粒径 $<100\ \mu\text{m}$)含量呈线性正相关,与粗砂物质(100~500 μm)呈线性负相关。沙地柏生长对风沙土改良效果呈现出人工林 16 a 树龄优于 7 a 树龄,天然林地迎风坡优于背风坡。整体上,造林时间增加土壤颗粒的粗细分配趋于良好态势发展,土壤结构优化,土地荒漠化进程减缓。因此,沙地柏可作为毛乌素沙地生态恢复工程的优良灌木。

关键词:风沙土;改良效果;颗粒粒度;沙地柏

中图分类号:S152

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0080-08

Study on the Characteristics of Aeolian Sandy Soils in Plantation and Natural Stand of *Sabina vulgaris*

TA Fei¹, DONG Zhibao², NAN Weige², YANG Shujun³, WU Yuye⁴, LI Qiang⁵

(1.Yulin Greening Office, Yulin, Shaanxi 719000, China; 2.Department of Geographical Sciences,

Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 3.Forestry Institute, Yulin Vocational and Technical College,

Yulin, Shaanxi 719001, China; 4.Datong No.1 Middle School, Datong, Shanxi 037008, China; 5.Shaanxi Key

Laboratory of Ecological Restoration in Shaanbei Mining Area, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719001, China)

Abstract: To better understand the effect of vegetation restoration on the physical and chemical properties of aeolian soils, the artificial forest and natural forest of *Sabina vulgaris* in the southeast edge of Mu Us Dune field were taken as the research objects. Through collecting soil samples of 5 soil layers (0—100 cm) in the forest lands, the composition of soil particles and 8 physical and chemical indexes under the shrub were analyzed, and the improvement effect of vegetation restoration on aeolian sandy soil was discussed. The results showed that the grain size of the soil in the study area was mainly composed of sand (97.09%), followed by silt and clay; the soil was weak alkaline, and low nutrient content and obvious surface accumulation (0—40 cm); there was a good correlation between soil nutrient content and soil particle size, which showed that the contents of soil organic matter, available potassium, TOC and salinity had a linear positive correction with the content of fine sand material (mean diameter $<100\ \mu\text{m}$), whereas a negative linear relationship with the content of coarse sand material (100~500 μm) was found. Therefore, this study also demonstrated that the improvement effect of 16-year-old plantation was better than that of 7-year-old plantation, and the improvement effect of windward slope of natural stand was better than leeward slope. On the whole, with the

收稿日期:2019-08-03

修回日期:2020-06-18

资助项目:中国博士后资助项目(2017M613049);陕西省博士后资助项目(2017BSHEDZZ15);中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK201703050);德国政府贷款陕西榆林长城沿线沙地治理及生物多样性保护项目(H152041008)

第一作者:拓飞(1966—),男,陕西横山人,高级工程师,学士,主要从事造林绿化、生态恢复研究等工作。E-mail:1350471766@qq.com

通信作者:南维鸽(1979—),女,陕西兴平人,副研究员,博士,主要从事荒漠生态研究。E-mail:nanweige@snnu.edu.cn

increase of afforestation time, the distribution of soil particle size tends to be better, the soil structure is optimized and the process of land desertification is slowed down. Therefore, *Sabina vulgaris* can be used as a good shrub in ecological restoration project in Mu Us Dune field.

Keywords: aeolian soil; improvement effect; particle size parameter; *Sabina vulgaris*

近年来,毛乌素沙地系列重大生态工程取得了举世瞩目的成果,但生态修复过程中部分引种植被耗水量过高,导致地下水衰退和植被退化等问题,而沙地柏作为毛乌素沙地乡土树种彰显出优势树种的特征,再次成为人们关注的焦点^[1-2]。沙地柏(*Sabina vulgaris* Antoine)又名臭柏、叉子圆柏、新疆圆柏,属柏科匍匐灌木,高 50~100 cm,枝细而密,斜向上伸展,耐寒、耐旱、耐瘠薄,根系强壮,根基部易生不定根,固土保水力强,是干旱、半干旱地区防风固沙和水土保持的优良树种^[3-4]。沙地柏分布区形成以沙地柏占优势的单优群落^[5],其灌丛群落覆盖度可达 70%~95%,在毛乌素沙地,沙地柏是唯一的天然常绿针叶灌木,生长旺盛,百年经久不衰,镶嵌于毛乌素沙地中,形成阻止流沙的天然屏障,被誉为“沙漠卫士”^[6]。尽管沙地柏在毛乌素沙地集中成片分布总面积只有 621.7 km²,占毛乌素沙地总面积的 0.86%,但它保持了生长与水分的良好平衡,对区域的荒漠化防治和生态环境的改善发挥了极其重要的作用^[7-8]。

土壤是控制生态系统生态过程的关键生态因子,是植物生存的主要环境因子,与植被的恢复演替协调发展。土壤是植被生长最重要的载体,在植被恢复生态系统中,土壤和植被相互依存,植被影响土壤演化,土壤制约植被生长,二者相互联系、协同发展^[9-10],而土壤质量直接影响着植被的生长发育,可作为判定植被恢复生态效应的重要依据^[11-12],因此,沙地柏人工林和自然林灌丛下风沙土质量可反映植被恢复与土壤环境的互动效应。目前关于沙地柏研究多集中在扦插育苗和引种栽培、树种自身的抗旱性、耗水性、根系等生理特性和生态功能^[13-15],也有研究指出沙地柏灌丛下具有明显的成土过程^[7,16],关于沙地柏林下风沙土的特性及演变特征鲜有报道。鉴于此,本文选取毛乌素沙地东南缘沙地柏的人工林地和天然林地,研究林下土壤颗粒组成及养分含量,以期阐明沙地柏生长过程对风沙土质量改良的影响,旨在为区域进一步防沙治沙和植被生态修复提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于陕西省神木沙地柏自然保护区(38°13′—39°27′N, 109°40′—110°54′E),总面积 7 666

hm²,沙地柏灌丛林面积为 2 200 hm²,地处毛乌素沙地东南缘,平均海拔 1 200 m,境内多固定和半固定沙丘,属大陆性半干旱气候。冬春干旱多大风少,年均气温 7.6℃,年均降雨量 394.7 mm,降雨多发生在夏季,多年平均蒸发量为 2 484.5 mm,土壤以风沙土和黄绵土为主^[16-17]。沙地柏是当地乡土灌木,目前天然林和人工林并存。本试验自然林位于神木市大保乡内,人工林地位于自然保护区 5 km 范围内。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集

于 2018 年 5 月,在研究区选择具有典型代表性的沙地柏天然林和人工林样地各 2 块,在缓坡地,随机布置 3 个重复样地,样地间距至少 100 m,每块样地大小为 10 m×10 m,每块样地内对角线法采集 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm 土层样品各 3 份。同一样区不同样点相同土层的样品均匀混合后放入样品袋中,带回实验室,去除植物根系、碎石等杂质,自然风干后,分析土壤颗粒组成和基本性状指标(表 1)。本试验人工林地种植初期无灌溉和施肥措施。

表 1 试验样地概况

样地编号	林龄	坡向	郁闭度	结皮	样地面积
P ₇	人工造林 7 a	迎风坡	0.15	无结皮	10 m×10 m
P ₁₆	人工造林 16 a	迎风坡	0.26	6.69 mm	10 m×10 m
NW	天然林	迎风坡	0.85	6.25 mm	10 m×10 m
NL	天然林	背风坡	0.80	4.27 mm	10 m×10 m

2.2 粒度测定

2018 年 7 月对风沙土样采用激光衍射仪(Laser Diffraction, LD)进行实验室分析。称取 2 g 风干沙样置于 500 ml 的烧杯中,采用过氧化氢溶液和热处理除去有机质,稀盐酸和热处理除去碳酸钙胶结物,然后将六偏磷酸钠加入促使土粒分散,预处理完毕后,采用马尔文激光粒度仪(Mastersizer-2000, Malvern Instruments Ltd.)进行土壤颗粒粒径分布分析。

土壤有机质采用重铬酸钾氧化法测定;土壤有效氮采用碱解法测定;土壤速效钾采用火焰光度计测定;土壤速效磷采用 Olsen 法测定;土壤阳离子交换量(CEC)采用 1 mol/L NaOAC 法测定;土壤 pH 值

采用电位法测定;土壤盐分采用电导法—土壤盐分速测仪测定;土壤全氮采用凯氏蒸馏法测定。

2.3 数据分析处理

土壤粒级按照 USDA 制标准划分:黏粒(0~2 μm)、粉粒(2~50 μm)、极细砂(50~100 μm)、细砂(100~250 μm)、中砂(250~500 μm)、粗砂(500~1 000 μm)和极粗砂(1 000~2 000 μm),作为土壤粒度组成和粒度体积分数计算依据。此外,粒级的划分还采用 Udden-Wentworth 粒级划分法,获取粒度参数,其沉积物粒径单位用 Φ 值表示^[18],系统输出土壤颗粒体积分数为 1%,5%,10%,16%,25%,50%,75%,84%,90%,95%,99% 所对应的沙粒粒径,试验采用 Krumbein 对数转换法计算, $\Phi = -\ln d$,其中 $d(\text{mm})$ 为土壤粒径。平均粒径 $M_z > 5 \Phi$ 为中粉砂($M_z < 31 \mu\text{m}$), $4 \sim 5 \Phi$ 为粗粉砂($31 \sim 63 \mu\text{m}$), $3 \sim 4 \Phi$ 为极细砂($63 \sim 125 \mu\text{m}$), $2 \sim 3 \Phi$ 为细砂($125 \sim 250 \mu\text{m}$), $1 \sim 2 \Phi$ 为中砂($250 \sim 500 \mu\text{m}$), $0 \sim 1 \Phi$ 为粗砂($500 \sim 1 000 \mu\text{m}$), $M_z < 0 \Phi$ 为极粗砂($M_z > 1 000 \mu\text{m}$)。4 个主要粒度参数采用 Folk-Ward 提出的计算方法求解^[19-20],并使用其相应的粒度参数分级标准,各参数计算公式如下:

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

$$\sigma = \frac{1}{4}(\Phi_{84} - \Phi_{16}) + \frac{1}{6.6}(\Phi_{95} - \Phi_5) \quad (2)$$

$$SK = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (3)$$

$$K_G = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (4)$$

式中: M_z 为土壤颗粒平均粒径; Φ_x 为土壤粒度频率累计为 $x\%$ 所对应的土壤粒度 Φ 值; σ 为分选系数;SK 为偏度; K_G 为峰度。

采用 Excel 2010, SPSS 24.0 和 Sigmaplot 12.5 软件对数据进行计算、统计分析及制图。

3 结果与分析

3.1 沙地柏天然林和人工林的土壤粒度特征

3.1.1 土壤颗粒组成 土壤颗粒组成大都继承了母质的一定特征,并综合了环境变化的影响,因此能较好地揭示土壤演变过程。由表 2 可知,研究区沙地柏林下土壤颗粒组成中砂粒含量最高(97.09%),粉粒次之(2.74%),黏粒最少(0.17%),而砂粒中以中砂为主(50.26%),其次细砂(23.57%)和粗砂(21.03%),再次极细砂(2.09%)和极粗砂(0.18%)。比较不同林地土壤粒级,黏粒含量是 16 a 林地(0.18%)>7 a 林地(0),天然林

迎风坡(0.17%)>背风坡(0),粉粒含量 16 a 林地(5.51%)>7 a 林地(0.33%),天然林迎风坡(4.04%)>背风坡(1.09%),极细砂粒含量 16 a 林地(4.42%)>7 a 林地(0.44%),天然林迎风坡(2.70%)>背风坡(1.02%),细砂含量 16 a 林地(22.43%)<7 a 林地(30.36%),天然林迎风坡(15.72%)<背风坡(25.77%),粗砂粒 16 a 林地(21.32%)>7 a 林地(15.4%),天然林迎风坡(25.33%)>背风坡(22.07%),中砂含量 16 a 林地(46.21%)<7 a 林地(53.37%),天然林迎风坡(51.88%)>背风坡(49.60%)。总之,16 a 林地土壤黏粒、粉粒、极细砂粒含量和粗砂粒含量均大于 7 a 林地,而 16 a 林地土壤细砂粒和中砂粒含量均小于 7 a 林地;天然林地,迎风坡土壤黏粒、粉粒和极细砂粒含量均大于背风坡,迎风坡土壤细砂粒小于背风坡。各土层均表现为(图 1):垂直剖面上随土层深度增加,土壤粉粒含量减少,砂粒含量增加。

3.1.2 土壤粒度参数 本研究采用 Folk 等^[19]提出的沉积物粒度参数计算方法,粒径 2Φ 和 1Φ 分别对应 250,500 μm 。研究中样地土壤平均粒径 16 a 林地(1.67 Φ)与 7 a 林地(1.66 Φ)无差异,天然林迎风坡(1.53 Φ)<背风坡(1.61 Φ)。垂直剖面上,土壤平均粒径没有显著变化(图 2),分选系数表示颗粒大小均匀程度的参数,沙地柏林下土壤粒度的分选系数均大于 0.60,各林地土壤颗粒大小均匀,但 7 a 林地和天然林背风坡分选较差,天然林迎风坡分选中等,16 a 林地土壤分选较好。偏度衡量粒度分布的对称程度,16 a 林地土壤偏度均值为 -0.31,属于负偏,7 a 林地土壤偏度均值为 -0.04,属于近对称,天然林迎风坡土壤偏度均值为 -0.22,属于负偏,背风坡偏度均值为 -0.08,属于近对称。显而易见,16 a 林地和天然林迎风坡林地土壤粒度呈现细偏,7 a 林地和天然林背风坡土壤粒度分布均匀,分选较好至中等。峰度衡量粒度频率曲线尖锐程度参数,反映频率曲线中粒度分布集中分散状况。16 a 林地土壤颗粒峰度均值为 1.39,呈现窄尖,7 a 林地峰度均值 0.94,属于中等正态,天然林迎风坡土壤颗粒峰度均值为 1.31,呈现窄尖,背风坡峰度均值为 0.99,属于中等正态,表明 16 a 林地和迎风坡土壤颗粒物细化趋势,7 a 林地和背风坡土壤粒度分布集中,风蚀、沉积环境稳定。

本试验结果表明,研究区沙地柏林下土壤粒径较粗,以中砂为主、分选稀疏有较大区别、偏度近于对称分布至负偏、峰度中等至窄。16 a 林龄土层细粒物质所占比重增加,土壤粒度粗细分配朝向细化趋势,天然林地迎风坡土壤表现出粗细颗粒分化。

表 2 不同类型沙地柏林地土壤颗粒组成分层特征

处理	土层/cm	粒配组成/%						
		黏粒	粉粒	极细砂粒	细砂粒	中砂粒	粗砂粒	极粗砂粒
		(0~2 μm)	(2~50 μm)	(50~100 μm)	(100~250 μm)	(250~500 μm)	(500~1000 μm)	(1000~2000 μm)
P ₇	0—20	0	0.52±0.47	0.36±0.36	26.42±5.31	52.53±2.08	20.07±6.15	0
	20—40	0	0.29±0.50	0.40±0.37	29.75±3.77	54.08±5.46	15.48±3.28	0
	40—60	0	0.24±0.41	0.31±0.25	32.96±2.35	51.96±3.43	14.43±4.93	0
	60—80	0	0.33±0.58	0.45±0.74	35.32±5.98	53.45±9.52	10.60±2.42	0
	80—100	0	0.35±0.41	0.34±0.46	27.33±4.56	55.05±2.52	16.93±4.81	0
P ₁₆	0—20	0.16±0.14	6.39±1.83	3.83±0.76	23.59±4.35	45.93±1.61	19.94±5.49	0.06±0.11
	20—40	0.17±0.19	5.71±2.82	3.68±1.88	23.85±5.37	46.66±3.46	19.83±6.50	0
	40—60	0.18±0.39	5.41±6.49	4.69±4.05	19.39±5.90	45.58±6.60	24.51±10.07	0.14±0.25
	60—80	0.19±0.14	5.04±1.41	4.42±0.68	22.36±1.85	46.56±2.01	21.33±1.06	0
	80—100	0.21±0.07	5.01±0.74	4.41±0.72	22.94±1.69	46.34±0.90	20.99±1.23	0
NW	0—20	0.21±0.18	5.99±3.49	4.76±2.95	18.5±6.75	46.46±6.64	23.86±7.80	0.12±0.20
	20—40	0.20±0.17	4.15±2.07	2.73±1.68	16.93±5.05	49.91±5.68	25.98±3.09	0
	40—60	0.18±0.18	3.96±2.97	2.23±1.69	15.90±1.97	55.02±7.65	22.61±3.37	0
	60—80	0.14±0.24	3.66±3.92	2.44±2.20	14.13±5.95	51.44±6.58	27.97±6.96	0.12±0.19
	80—100	0.10±0.17	2.44±4.23	1.35±2.33	13.16±10.00	56.55±10.45	26.23±13.27	0.07±0.12
NL	0—20	0.05±0.09	2.44±2.18	1.31±0.96	27.00±3.07	49.99±3.00	19.21±2.53	0
	20—40	0	1.27±1.15	1.10±0.97	22.85±16.14	46.22±3.23	26.68±17.88	1.89±3.24
	40—60	0	0.70±0.33	0.81±0.39	25.15±11.68	49.89±2.83	23.29±17.88	0.16±0.18
	60—80	0	0.53±0.13	0.78±0.73	23.25±10.17	51.27±2.16	23.99±10.10	0.18±0.29
	80—100	0	0.49±0.62	1.11±0.92	30.6±12.89	50.61±3.91	17.19±10.29	0

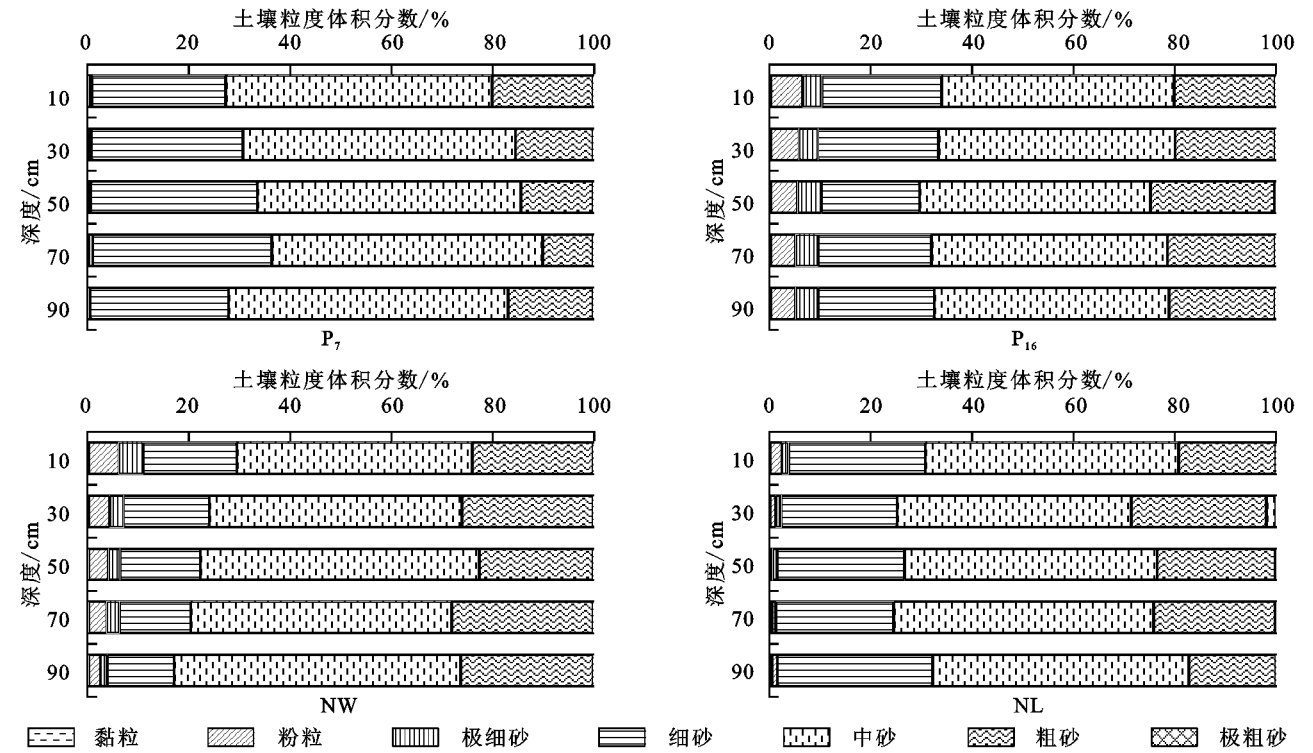


图 1 沙地柏林下土壤粒度组成

3.2 土壤性状特征

土壤有机质是衡量土壤质量的重要指标之一,不

仅含有植物生长所需要的各种营养元素,还对土壤物理、化学和生物学性质有着深刻的影响。土壤有效

氮、速效钾、速效磷是表征土壤肥力质量的主要指标,含有植物生长必需的3大营养元素。本试验土壤养分数据见表3,不同沙地柏林下0—100 cm土壤有机质含量为2.22~8.08 g/kg,表现为16 a林地(6.82 g/kg)>7 a林地(3.12 g/kg),迎风坡(5.64 g/kg)>背风坡(2.98 g/kg);不同样地土壤有效氮平均含量为17.70~21.18 mg/kg,16 a林地(21.19 mg/kg)>7 a林地(19.68 mg/kg),天然林迎风坡(20.74 mg/kg)>背风坡(17.70 mg/kg);土壤速效钾平均含量为22.59~

49.96 g/kg,表现为16 a林地(49.96 mg/kg)>7 a林地(22.59 mg/kg),迎风坡(47.33 mg/kg)>背风坡(24.79 mg/kg);土壤速效磷平均含量为0.85~1.25 mg/kg,表现为16 a林地(0.92 mg/kg)>7 a林地(0.85 mg/kg),迎风坡(1.25 mg/kg)>背风坡(1.07 mg/kg)。土壤全氮含量为0.04~0.07 g/kg;CEC含量为12.89~13.18 cmol/kg;pH值为7.50~7.60,土壤呈弱碱性;盐分含量为0.10~0.20 g/kg,低于0.3%,土壤属于非盐渍土。

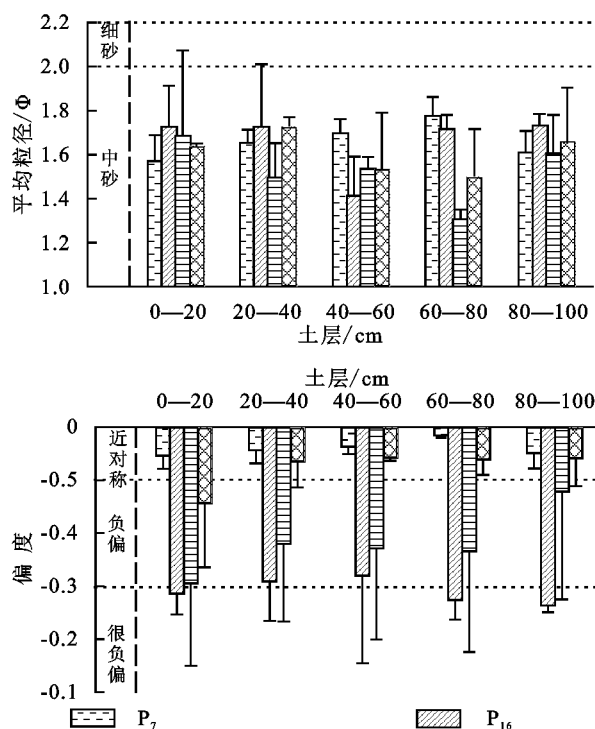
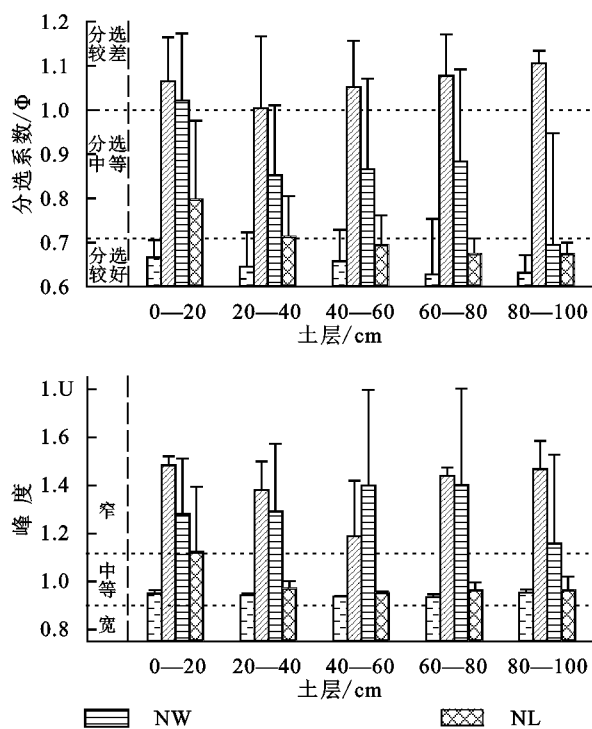


图2 沙地柏林下土壤粒度参数

总而言之,沙地柏16 a林地土壤有机质、有效氮、速效钾和速效磷含量普遍高于7 a林地,而自然林各养分指标普遍迎风坡高于背风坡。土壤有机质、有效氮、速效钾和有效磷在土壤剖面上均先增加再降低,而土壤有机质、有效氮和速效钾在0—40 cm土层显著高于60—100 cm土层($p<0.05$),土壤速效磷、CEC、盐分、全氮含量和pH值在不同林地及不同土层均没有差异,表明土壤中部分养分具有表层聚集特征。

3.3 土壤粒度与土壤性状指标的相关性

由表4可知,土壤有机质、速效钾、盐分、pH值与黏粒、粉粒、极细砂含量呈显著($p<0.05$)和极显著正相关性($p<0.01$),与细砂粒、中砂粒呈显著和极显著负相关性,土壤有机质、速效钾、pH值、盐分与粗砂粒、极粗砂粒含量没有显著关系,且土壤全氮、有效氮、速效磷、CEC与土壤各粒度也没有显著相关性。由此可见,较细沙物质(粒径 $<100\ \mu\text{m}$)含量的增加能够提高土壤质量,而细砂粒和中砂粒($100\sim500\ \mu\text{m}$)含量增加则会导致土壤质量下降。



4 讨论

沙地柏林下土壤粒度集中分布在砂粒区间,体积分形维数为94%~99%,其次是粉粒和黏粒,土壤粒度频率分布以中砂($250\sim500\ \mu\text{m}$)为主形成单峰曲线。本研究土壤平均粒径 $1.31\sim1.78\ \Phi$,显著低于Yang等^[21]报道的裸地平均粒度($2.31\ \Phi$),研究中砂含量($250\sim500\ \mu\text{m}$)为46.21%~53.37%明显高于Yang等^[21](29.82%)和齐雁冰^[22](31.66%)研究结果,这可能与我们的测定方法(激光衍射法可能低估黏粒、粉粒含量)^[23]或者与土壤风化、侵蚀、搬运、沉积等有关^[24-25]。土壤颗粒平均粒径在林龄16 a和7 a没有显著差异,但林龄16 a土壤中细粒物质含量显著增加,砂粒含量显著减少,颗粒偏度负偏、峰度较窄,林龄7 a土壤偏度近对称、峰度中等,这显然与沙地柏生长、土壤颗粒中黏粒、粉粒含量增加有关,其原因可能是沙地柏通过降低风速阻碍地面表层细粒物质吹蚀,或通过拦截地表大气中悬浮的粉尘粒子

所致^[15-16]。天然林迎风坡土壤中的黏粒和粉粒含量均高于背风坡,粒度分布集中,迎风坡土壤颗粒负偏、峰度较窄,背风坡土壤颗粒偏度近对称、峰度值中等,表明天然林土壤颗粒迎风坡呈现粗细颗粒分化,并朝细化趋势发展,证实了沙地柏的固沙作用还受地形影响。而土壤各粒度参数呈现天然林的土壤劣于 16 a 人工林地土壤,这主要可能与天然林边缘土壤收集有关,天然林蔓延的新枝拓展的区域,林龄较小,导致土壤依旧遭受较强的风蚀筛选。此外,背风坡 0—20 cm 土壤粒度参数与 20—100 cm 有所不同,0—20 cm 土壤分选系数中等,细偏,峰度尖窄,表明背风坡表层土壤颗粒存在细化趋势。

表 3 沙地柏林下土壤养分含量

样地 代码	土层/cm	土壤养分含量							
		有机质/ (g·kg ⁻¹)	有效氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	pH 值	盐分/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)
P ₇	0—20	4.81	19.57	26.67	0.84	13.08	7.47	0.06	0.06
	20—40	3.25	19.40	22.29	1.21	13.31	7.51	0.11	0.05
	40—60	2.40	17.31	22.66	0.95	12.43	7.57	0.09	0.05
	60—80	2.22	22.71	20.74	0.48	13.78	7.48	0.16	0.07
	80—100	2.91	19.40	20.56	0.75	12.31	7.47	0.08	0.05
P ₁₆	0—20	6.51	16.95	63.76	1.47	13.80	7.49	0.13	0.06
	20—40	8.08	26.91	50.96	0.81	12.50	7.47	0.18	0.04
	40—60	6.99	23.61	35.48	1.13	13.35	7.57	0.24	0.07
	60—80	6.34	19.42	39.87	0.06	13.62	7.57	0.17	0.05
	80—100	6.16	19.03	59.76	1.11	12.61	7.58	0.27	0.05
NW	0—20	7.04	19.06	75.26	1.13	12.36	7.66	0.13	0.06
	20—40	4.62	18.20	52.50	1.31	13.63	7.68	0.17	0.06
	40—60	5.48	15.03	31.08	1.17	12.52	7.49	0.09	0.05
	60—80	5.17	16.43	38.34	1.48	13.59	7.62	0.19	0.05
	80—100	5.86	19.76	39.49	1.17	12.36	7.55	0.13	0.07
NL	0—20	2.92	18.55	29.63	1.00	12.43	7.57	0.09	0.06
	20—40	4.28	22.75	21.22	1.24	13.69	7.55	0.13	0.07
	40—60	2.91	26.57	21.05	1.15	12.76	7.55	0.12	0.06
	60—80	2.41	19.57	30.73	1.03	13.36	7.50	0.06	0.05
	80—100	2.39	16.27	21.31	0.96	13.48	7.55	0.08	0.04

表 4 土壤各粒级含量与土壤性状的相关性

土壤性状指标	黏粒	粉粒	极细砂粒	细砂粒	中砂粒	粗砂粒	极粗砂粒
有机质	0.743**	0.792**	0.747**	−0.558**	−0.460*	0.398	−0.038
全氮	−0.068	−0.048	−0.053	0.244	−0.057	−0.238	0.053
有效氮	0.010	0.098	0.143	0.073	−0.370	−0.058	0.259
速效磷	0.027	−0.073	−0.123	−0.355*	−0.156	0.410	0.202
速效钾	0.583**	0.632**	0.642**	−0.408*	−0.357*	−0.259	−0.205
pH 值	0.411*	0.462*	0.510**	−0.490*	−0.408*	0.517	0.063
盐分	0.767**	0.711**	0.735**	−0.325*	−0.606**	−0.244	−0.012
CEC	−0.189	−0.193	−0.088	0.150	−0.097	−0.014	0.269

注: * 表示差异显著水平($p<0.05$), ** 表示差异显著水平($p<0.01$)。

参考全国第 2 次土壤普查土壤肥力状况分级标准,研究区土壤肥力属于 5~6 级,土壤养分含量极低。但与神木裸地风沙土相比(表 5),沙地柏灌丛土壤有机质、有效钾含量显著高于文献报道,而速效磷、全氮和 pH 值含量均低于文献报道^[26-27],其 CEC 含量高于齐雁冰^[22]研究结果(5.77 cmol/kg),表明沙地柏生长过程,风沙土已有明显的 C 的累积和有效 K 的积累,土壤养分得到改善,土壤肥力有所提升,而磷素和氮素与前人研究的

差异,可能与氮素、磷素的消耗有关^[17]。随土层深度增加,各养分指标含量先增加再降低,土壤有机质、有效氮和速效钾在 0—40 cm 土层显著高于 60—100 cm 土层 ($p<0.05$),显示了土壤养分存在表层聚集现象,主要是由于沙地柏遮荫降低沙漠表层土壤温度,促进有机物质富集。此外,野外样品收集时观测到不同林地土壤结皮厚度见表 1,也证实了浅层土壤质地得到良好的改善。天然林迎风坡养分含量高于背风坡;人工林地则随造林时间增加,养分含量增加,土壤碳储量显著提高,这与众学者在榆林沙地柏林地研究结果一致^[28-30]。一般沉积物中细沙物质含量增加伴随土

表 5 榆林裸地土壤养分含量

有机质/ (g·kg ⁻¹)	有效氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	pH 值	全氮/ (g·kg ⁻¹)	参考文献	地点
3.87	33.10	35.00	3.67	8.12	0.28	齐雁冰 ^[22]	神木市
1.00	42.70	43.00	2.25	6.40	0.01	Yang 等 ^[21]	靖边县
1.12	6.97	23.70	1.78	9.42	0.08	王彦武 ^[26]	榆阳区

综合分析土壤的颗粒组成和土壤养分,发现土壤细粒物质所占比重增加,土壤结构得到优化,随造林时间增加,效果愈明显;沙地柏林下土壤存在较明显的优势粒径级别,且颗粒的粗细分配趋于良好趋势发展,生态环境趋于好转^[34-35];在沙丘迎风坡和背风坡,其固沙作用也存在一定的差异,这与目前众多学者研究结果一致^[36-37]。本研究也印证了沙漠地区沙地柏与土壤质量间存在正向互作效应,即植被生长促进细粒物质含量增加,增加土粒养分含量、改善风沙土质量,进而反推植被生长,加速土壤演变。

5 结 论

沙地柏灌丛下土壤颗粒以中砂为主,弱碱性,土壤养分含量总体水平低,且具有明显 0—40 cm 聚集特征。灌丛下土壤有机质、速效钾、盐分含量和 pH 值与土壤颗粒(粒径<100 μm)含量显著线性正相关,而与土壤颗粒(100~500 μm)含量显著线性负相关。由此推断,100 μm 粒径成为该区域土壤各粒径体积分形维数的分界值。随沙地柏生长灌丛下土壤中细沙粒物质和养分含量增加,土壤碱性减弱,其天然林地迎风坡土壤质量优于背风坡,人工林地造林时间增加,土壤颗粒的粗细分配趋于良好态势发展,土壤结构优化,土地荒漠化进程减缓,因此,沙地柏可作为毛乌素沙地防风固沙及生态恢复工程的优良灌木。

参考文献:

[1] 赵国平,高荣,朱建军,等.榆林市六十年治沙研究与实

壤养分含量增加^[31-32],本研究中土壤黏粒、粉粒、极细砂粒径<100 μm,细砂和中砂粒径为 100~500 μm,土壤有机质、速效钾、盐分含量和 pH 值与土壤颗粒(粒径<100 μm)呈显著线性正相关,而与土壤颗粒(100~500 μm)呈显著线性负相关,这与伊利河谷研究的结论一致^[33],由此可见,细颗粒物质能够锁住土壤中的 C 和 K,并增加土壤的盐分含量,而 100 μm 粒径成为该区域土壤各粒径体积分形维数的分界值,此结果不同于贾晓红等^[11]学者研究结果:50 μm 粒径为土壤各粒径质量分形维数的分界值,关于二者间的关系还需进一步深入研究。

践[J].陕西林业科技,2018,46(6):42-47.

[2] 赵晓彬,朱建军,李军保,等.半干旱区沙地矿区植被恢复技术研究[J].陕西林业科技,2019,47(2):30-35.

[3] 王红霞,张燕,王慧杰.沙地柏优良抗旱品系选育[J].内蒙古林业,2015(3):10-11.

[4] 王林和.沙地柏:干旱半干旱区植被建设的优良树种[C].呼和浩特:内蒙古自治区科学技术协会,2003.

[5] 张国盛.毛乌素沙地臭柏生态生理特性及其群落稳定性[D].北京:北京林业大学,2004.

[6] Ning L, Liu C X, He W M, et al. Interactions of the indigenous evergreen shrub *Sabina vulgaris* with coexisting species in the Mu Us sandland[J]. J. Plant Ecol., 2012,6(1):48-56.

[7] 何文明.毛乌素沙地臭柏植物资源的动态变化及原因分析[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2007.

[8] Li X, Zhu Y F, Yang ZH, et al. Research on the sustainable development in the desertification prevention in northwest China: innovative management of vegetation planting sequence along the southwest margin of Mu Us Sandy Land[C]. International Conference on Smart Grid & Electrical Automation. Oshawa, Ontario, Canada: IEEE Computer Society, 2017.

[9] 宋西德,张永,周锋利,等.臭柏的特性研究进展[J].西北林学院学报,2003,18(4):63-66.

[10] 关其格,浩必斯嘎拉图,杨越,等.毛乌素沙地南缘人工恢复植被对沙地土壤理化性质的影响[J].安徽农业科学,2013,41(34):13217-13220.

[11] 贾晓红,李新荣,李元寿.干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J].地理研究,2007,26(3):518-525.

- [12] 李新荣,周海燕,王新平,等.中国干旱沙区的生态重建与恢复:沙坡头站 60 年重要研究进展综述[J].中国沙漠,2016,36(2):247-264.
- [13] 赵秀莲,夏新莉,尹伟伦,等.不同苗龄沙地柏抗旱生理特性比较研究[J].西北植物学报,2013,33(12):2513-2520.
- [14] 温国胜,吉川贤,张国盛,等.干旱胁迫条件下臭柏的生长[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2004,25(1):5-10.
- [15] 李为萍,史海滨,胡敏.沙地柏根系径级对根土复合体抗剪强度的影响[J].土壤通报,2012,43(4):934-937.
- [16] 张国盛,刘海东,张小红,等.毛乌素沙地天然臭柏灌丛地的土壤特性[J].干旱区资源与环境,2004,18(3):137-143.
- [17] 魏璐,韦雷.神木县不同土类的土壤肥力特征[J].城市地理,2017(10):195-197.
- [18] 杨军怀,董治宝,南维鸽,等.毛乌素沙地东南缘樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工林土壤粒度特征[J].中国沙漠,2018,38(4):815-822.
- [19] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. J. Sediment. Res., 1957,27(1):3-26.
- [20] 董治宝,苏志珠,钱广强,等.库姆塔格沙漠风沙地貌[M].北京:北京科学出版社,2011.
- [21] Yang Y, Sun H, Han Y J, et al. Effects of artificial vegetation restoration on soil physicochemical properties in southern edge of Mu Us Sandy Land[J]. Agri. Sci. Techno.(En.), 2014,15(4):648-652,69.
- [22] 齐雁冰.陕北农牧交错带荒漠化土壤发生特性与演变机制研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
- [23] 杨金玲,李德成,张甘霖,等.土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J].土壤学报,2008,45(3):413-419.
- [24] 邵天杰,赵景波,董治宝.巴丹吉林沙漠沙山粒度组成与沙山地貌分带[J].山地学报,2013,31(4):434-441.
- [25] Su Y Z, Zhao H L, Zhao W Z, et al. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification[J]. Geoderma, 2004,122(1):43-49.
- [26] 王彦武.榆林毛乌素沙地固沙林地土壤质量演变机制[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [27] 杨越,哈斯,孙保平,等.毛乌素沙地南缘不同植被恢复类型的土壤养分效应[J].中国农学通报,2012,28(10):1708-1712.
- [28] 张晓娜,蒙仲举,黄昕,等.荒漠草原不同植被覆盖下土壤粒度组成与速效养分特征[J].内蒙古林业科技,2018,44(1):37-40.
- [29] Wei M H, Xin S Z. Responses of an evergreen shrub *Sabina vulgaris* to soil water and nutrient shortages in the semi-arid Mu Us Sandy Land in China[J]. J. Arid Environ., 2003,53(3):307-316.
- [30] 王丽梅,张谦,白利华,等.毛乌素沙地 3 种人工植被类型对土壤颗粒组成和固碳的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):88-94.
- [31] 刘树林,王涛,屈建军.浑善达克沙地土地沙漠化过程中土壤粒度与养分变化研究[J].中国沙漠,2008,28(4):611-616.
- [32] 李海东,沈渭寿,邹长新,等.雅鲁藏布江山南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征[J].生态学报,2012,32(16):4981-4992.
- [33] 桑巴叶,朱玉伟,刘康.伊犁河谷不同森林模式下土壤的养分特征和粒径组成[J].水土保持学通报,2017,37(5):328-332.
- [34] 胡婵娟,郭雷.植被恢复的生态效应研究进展[J].生态环境学报,2012,21(9):1640-1646.
- [35] Nan W G, Liu S Q, Yang S J, et al. Changes of *Sabina vulgaris* growth and of soil moisture in natural stands and plantations in semi-arid northern China[J]. Global Ecol. Conser., 2020,21(3):1-10.
- [36] Zhan Y, Cao C Y, Han X S, et al. Soil nutrient and microbiological property recoveries via native shrub and semi-shrub plantations on moving sand dunes in North-east China [J]. Ecol. Eng., 2013,53:1-5.
- [37] 贾晓红,李新荣,王新平,等.流沙固定过程中土壤性质变异初步研究[J].水土保持学报,2003,17(4):46-50.