

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.009.

王彦武, 孙浩峰, 于惠, 等. 民勤风沙区不同灌木林土壤质量综合评价[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 169-178, 186.

Wang Yanwu, Sun Haofeng, Yu Hui, et al. Comprehensive Evaluation of Soil Quality of Different Shrubs in Windy Desert Area of Minqin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 169-178, 186.

## 民勤风沙区不同灌木林土壤质量综合评价

王彦武<sup>1,2</sup>, 孙浩峰<sup>1,2</sup>, 于惠<sup>1,2</sup>, 陈爱华<sup>1,2</sup>, 高金芳<sup>1,2</sup>, 牛莉婷<sup>1,2</sup>

(1. 甘肃省水土保持科学研究所, 兰州 730020; 2. 甘肃省水利厅兰州水土保持科学试验站, 兰州 730020)

**摘要:** [目的] 研究风沙区灌木林土壤养分和生物学性质的变化特征, 定量评价不同固沙灌木林土壤质量, 对风沙区合理选择固沙树种和指导生态修复具有重要的现实意义。[方法] 在民勤风沙区选取白刺 (*Nitraria tangutorum* Bobr.)、红砂 (*Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.)、沙拐枣 (*Calligonum mongolicum* Turcz.)、膜果麻黄 (*Ephedra przewalskii* Stapf)、黄花矾松 (*Limonium aureum* (L.) Hill.) 为研究对象, 以裸沙地为对照, 测定和分析了不同固沙灌木林土壤的养分、微生物数量和酶活性差异, 采用主成分分析和土壤质量指数相结合的方法定量评价了不同固沙灌木对土壤质量的改良效果。[结果] (1) 民勤风沙区固沙灌木林土壤有机质和氮素含量较低, 磷素缺乏, 钾素含量较高, 全盐量过低; 与裸沙地相比, 研究区各固沙灌木林土壤有机质、氮素、磷素、钾素含量、微生物数量和酶活性均有所增加; 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 土层土壤养分含量均以红砂最高, 土壤微生物数量和酶活性各固沙灌木林表现趋势各不相同; (2) 各固沙灌木林随土层深度增加土壤微生物数量和酶活性变化规律各异, 土壤养分含量逐渐减小, 但各土层间差异不显著; (3) 固沙灌木林土壤养分、盐分、微生物和酶活性之间相关性密切, 土壤养分、微生物各指标间均呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ); (4) 不同固沙灌木林在不同土层对土壤质量的改良效果不同, 0—20 cm 土层综合得分排序为红砂 > 白刺 > 黄花矾松 > 沙拐枣 > 膜果麻黄 > 裸沙地, 20—40 cm 和 40—60 cm 均为红砂 > 白刺 > 沙拐枣 > 黄花矾松 > 膜果麻黄 > 裸沙地。[结论] 红砂和白刺对土壤质量的改善效果最好, 黄花矾松改善表土层土壤质量的作用大于中下层土壤。

**关键词:** 风沙区; 灌木林; 土壤质量评价; 主成分分析

中图分类号: S714.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0169-10

## Comprehensive Evaluation of Soil Quality of Different Shrubs in Windy Desert Area of Minqin

Wang Yanwu<sup>1,2</sup>, Sun Haofeng<sup>1,2</sup>, Yu Hui<sup>1,2</sup>, Chen Aihua<sup>1,2</sup>, Gao Jinfang<sup>1,2</sup>, Niu Liting<sup>1,2</sup>

(1. Gansu Institute of Soil and Water Conservation Sciences, Lanzhou 730020, China; 2. Lanzhou Test Station of Soil and Water Conservation Sciences, Department of Water Resources of Gansu Province, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to analyze the characteristics of soil nutrients and biological properties of shrubbery in windy desert area, and to quantitatively assess soil quality of different sand-fixation shrubs, which is crucial for selecting the sand-fixation shrub species and guiding the ecological restoration. [Methods] The 5 sand-fixation shrub species (*Nitraria tangutorum* Bobr., *Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim., *Calligonum mongolicum* Turcz., *Ephedra przewalskii* Stapf and *Limonium aureum* (L.) Hill.) in windy desert area of minqin were selected as the samples. The bare sandy land was set as the control, and the soil nutrient, microbial quantity and enzyme activity of 5 sand-fixation shrubs were measured and analyzed. At last the improving effects of 5 sand-fixation shrubs on soil quality were quantitatively evaluated by using principal component analysis and soil quality index. [Results] (1) For 5

收稿日期: 2023-05-30

修回日期: 2023-07-06

资助项目: 甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA683); 甘肃省科技重大专项项目(22ZD6GA055, 21ZD4FA020); 甘肃省水利科学试验研究及技术推广计划项目(22GSLK007)

第一作者: 王彦武(1982—), 男, 甘肃白银人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail: wang\_yanwu@163.com  
<http://stbcyj.paperonce.org>

sand-fixation shrubs, the contents of soil organic matter and nitrogen were low, phosphorus was deficient, potassium was high, and total salt concentration was too low. Compare with bare sandy land soil, the contents of soil organic matter, nitrogen, phosphorus and potassium, microbial quantity and enzyme activity increased. For different soil layers (0—20 cm, 20—40 cm and 40—60 cm), the soil nutrition contents of *Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim. were the highest among all shrub species. The soil microbial quantity and enzyme activity varied among all sand-fixation shrubs. (2) With the increase of soil depth, soil nutrient content gradually decreased but no significant difference between the soil layers, and the changes of soil microbial quantity and enzyme activity were different. (3) There were close correlations among soil nutrients, salt, microorganism and enzyme activity, among which soil nutrients and microorganism achieved a very significant positive correlation ( $p < 0.01$ ). (4) The improvement effect of different sand-fixation shrubs on soil quality varied in different soil layers. The sequence of 5 comprehensive scores were *Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim. > *Nitraria tangutorum* Bobr. > *Limonium aureum* (L.) Hill. > *Calligonum mongolicum* Turcz. > *Ephedra przewalskii* Stapf > bare sandy land and *Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim. > *Nitraria tangutorum* Bobr. > *Calligonum mongolicum* Turcz. > *Limonium aureum* (L.) Hill. > *Ephedra przewalskii* Stapf > bare sandy land for 0—20 cm and 20—40 cm, 40—60 cm soil layers, respectively. [Conclusion] This study suggests that *Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim. and *Nitraria tangutorum* Bobr. can best improve the soil quality in windy desert area of Minqin. *Limonium aureum* (L.) Hill. can improve the soil quality of topsoil rather than that of middle and below soil.

**Keywords:** windy desert area; shrubbery; soil quality assessment; PCA

风沙区灌木对于改善沙丘生境条件和土壤质量具有重要作用<sup>[1-2]</sup>。固沙灌木能够有效降低近地表风的动能,减小对风沙区土壤的风蚀<sup>[3]</sup>,进而促进土壤质量的改善和生态环境的修复<sup>[4]</sup>。张立欣等<sup>[5]</sup>的研究发现,不同灌木对土壤质量的影响程度不同,灌木林土壤质量的变化可以反映不同灌木保育土壤的作用及植被恢复的生态效果。罗雅曦等<sup>[6]</sup>对风沙区灌木林地土壤质量进行评价,结果表明油蒿林地土壤质量综合指数最高,能在短期内提高风沙土的土壤质量,而柠条林地、花棒林地和沙拐枣林地的固沙效果有限。何毅等<sup>[7]</sup>评价了毛乌素沙地不同固沙灌木群落的土壤质量,发现柠条×花棒混交可以显著提高土壤养分含量和微生物数量,其土壤质量评价得分也最高。固沙灌木林地的土壤养分分布特征决定了其空间分布的格局<sup>[8]</sup>,因此,不同灌木林土壤质量评价对风沙区合理选择固沙树种和指导生态修复具有重要的现实意义。

土壤质量评价可以评估不同固沙灌木对土壤质量影响的程度以及掌握土壤质量的现状和变化动态<sup>[9]</sup>。目前,土壤质量定量评价中土壤质量指数法应用最为广泛,其可以量化评估不同措施对土壤质量的影响并进行比较排序。土壤质量评价选取的指标宜为对土壤环境敏感且影响土壤功能的土壤理化指标和生物学特性因子<sup>[10]</sup>。土壤质量评价研究中由于土壤生物学指标的野外取样、运输、测试等对环境的

要求较高,生物指标选取率不高<sup>[9]</sup>。土壤生物学指标可以反映土壤质量对不同灌木的早期响应,本文将土壤生物学指标应用于土壤质量评价中,对提升土壤质量评价精度尤为重要。

白刺、红砂、沙拐枣、膜果麻黄既是民勤风沙区植被群落中优良的防风固沙灌木,也是重要的药用植物,其根系发达、耐干旱贫瘠、抗风蚀沙埋、固沙能力强。目前,学者们对不同固沙灌木土壤质量的研究绝大多数是从土壤理化性质<sup>[5,11]</sup>、土壤生物学特性<sup>[12]</sup>、固沙灌木群落稳定性<sup>[13]</sup>、土壤养分空间异质性等<sup>[2,8,14]</sup>角度进行分析,而对不同固沙灌木间土壤质量评价的研究较少<sup>[6-7,15]</sup>,尤其是有关民勤风沙区主要药用固沙灌木林改良土壤质量的效果对比和土壤质量评价方面的研究,目前还未见报道,故民勤风沙区何种灌木更有利于土壤质量的改善和沙地恢复尚有待研究。为此,本文选取民勤风沙区白刺、红砂、沙拐枣、膜果麻黄、黄花矾松为研究对象,对比分析不同灌木林地的土壤养分、微生物特性和酶活性等指标特征,采用主成分分析和土壤质量指数相结合的方法进行土壤质量综合评价并进行比较排序,以期能准确地评估相同生境下不同固沙灌木改良土壤质量的效果,解决当地生产实践中药用固沙灌木选择的困境,最终为民勤风沙区沙产业发展和生态恢复过程中固沙灌木的选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省河西走廊东北部的民勤县薛百镇,地理坐标介于东经 102°51′—103°00′,北纬 38°32′—38°34′,海拔为 1 374~1 385 m,属温带大陆干旱荒漠气候,降水量小且时空分布不均,集中在 6—9 月份,年均降水量 113.2 mm,年均蒸发量 2 644 mm 以上,多年平均风速为 2.7 m/s,多年平均气温 8.8℃,大风日数(瞬时风速≥17 m/s)42 d,无霜期约 152 d,土壤以风沙土和灰棕漠土为主。研究区固沙灌木主要有沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turcz.)、白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)、红砂(*Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.)、膜果麻黄(*Ephedra przewalskii* Stapf)等;耐旱草本植物主要有黄花矶松(*Limonium aureum* (L.) Hill.)、狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)和沙打旺(*Astragalus laxmannii* Jacq.)等。

1.2 标准样地设置

以生境条件基本相同,人为干扰因素较少为原则,在研究区采用典型抽样的方法选择白刺、红砂、沙拐枣、膜果麻黄、黄花矶松为研究样地,以裸沙地为对照样地。每块样地面积为 50 m×50 m,样地内沿对角线设 3 个 10 m×10 m 重复样区。选择的各研究样地间直线距离不超过 1.5 km,在固沙灌木生长前各样地的生境条件、土壤质量状况与裸沙地基本相同;各固沙灌木林均为同一时期造林,成林后无人为水肥管护措施,其他抚育管理措施一致,外界扰动较少,因此,成林后各样地间土壤质量的差异可以认为是由不同灌木类型造成的。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本信息

Table 1 Condition of field plots

样地编号	林地类型	高度/m	盖度/%	海拔/m	生境条件
CK	裸沙地	—	0	1374	流动沙地
I	白刺	0.46~0.58	25~30	1376	灌丛沙包
II	黄花矶松	0.20~0.30	10~20	1380	丘间地
III	红砂	0.32~0.50	28~32	1380	灌丛沙包
IV	沙拐枣	0.50~0.74	18~23	1381	丘间地
V	膜果麻黄	0.90~1.10	12~17	1385	丘间地

1.3 样品采集与分析

2021 年 11 月至 12 月,在每个样区内选择灌丛下和灌丛间有代表性的取样点 5 处,挖掘土壤剖面后分三层取样(0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm),除去石块、残根和枯落物后用四分法取 5 个样点各层的混合土样两份,一份装入无菌塑料袋带回室内风干后粉碎,用于测定土壤化学性质和土壤酶活性;一份装

入便携式冰箱在 0~4℃ 条件下保存,带回实验室后测定土壤微生物数量。

土壤有机质采用重铬酸钾容量法—稀释热法测定,土壤水溶性盐含量用电导分析法,全氮采用半微量开氏法测定,全磷用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定,全钾采用 NaOH 熔融—火焰光度法测定,碱解氮用碱解扩散法,有效磷用 0.5 mol/LNaHCO<sub>3</sub>法,速效钾用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提—火焰光度计法<sup>[16]</sup>;细菌、真菌和放线菌数量采用稀释平板法测定<sup>[17]</sup>,细菌、真菌、放线菌接种后的培养基在恒温下培养若干天后再计数,每种培养基选取 3 个浓度梯度,每种稀释度重复 3 次,微生物数量取其平均数<sup>[18]</sup>。过氧化氢酶活性采用 KMnO<sub>4</sub> 滴定法测定,脲酶活性采用苯酚钠—次氯酸钠比色法测定,蔗糖酶活性采用 3,5—二硝基水杨酸比色法测定,碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定<sup>[19]</sup>。

1.4 土壤质量综合评价方法

土壤养分、盐分、微生物及酶活性对土壤环境敏感且显著影响土壤质量,本文在研究土壤养分和生物学性质变化规律的基础上,选取这些指标进行土壤质量综合评价。为了统一各指标的量纲,需将各指标数据进行标准化处理,然后把处理后的数据进行 KOM 检验、Bartlett 球体检验和显著性检验,以验证主成分分析方法的可行性。同时,通过计算各指标特征值和方差贡献率,提取特征值大于 1 且累计方差贡献率达到 85% 左右的主成分。以主成分的方差贡献率为权重,加权计算不同固沙灌木林土壤养分和生物学指标线性组合中的系数(公式 1,2),再结合主成分的方差贡献率计算综合得分模型中的系数(公式 3),将土壤质量各指标归一化处理后计算其所占的权重并排序,最后运用土壤质量指数法对不同固沙灌木林土壤质量进行综合评价<sup>[5]</sup>。

$$F_i = W_{i1}X_1 + W_{i2}X_2 + \cdots + W_{ij}X_j \tag{1}$$

$$W_{ij} = \frac{\theta_j}{\sqrt{\lambda_i}} \tag{2}$$

$$F = a_1F_1 + a_2F_2 + \cdots + a_iF_i \tag{3}$$

式中: $F$  表示土壤质量综合评价指数; $F_i$  表示第  $i$  个主成分的得分; $X_j$  表示第  $j$  个土壤质量评价指标; $W_{ij}$  表示第  $i$  个主成分中各变量的权重; $\lambda_i$  表示第  $i$  个主成分对应的特征值; $\theta_j$  表示成分矩阵中每个变量对应的系数; $a_i$  表示第  $i$  个主成分的方差百分比。

1.5 数据统计分析

所有数据采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 19.0 进行数据统计分析,其中,基本数据分析采用 Microsoft Excel 2016 软件,多重比较(Duncan)、单因

素方差分析(One-way ANOVA)和相关性分析(Pearson)等采用 SPSS 19.0 软件。所有数值均以平均值±标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同固沙灌木林土壤化学性质差异

由表 2 可以看出,与对照裸沙地相比,研究区各固沙灌木林 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 土层土壤有机质、氮素、磷素、钾素含量均有所增加,三层土壤养分含量均以红砂最高。固沙灌木林各土层土壤有机质含量均在 3.69 g/kg 以下,仍处于较低水平,以红砂表层土壤最高,是裸沙地的 2.91 倍。各固沙灌木林土壤氮素含量较低,全氮含量变化较小,其变化范围在 0.01~0.17 g/kg,碱解氮含量变化相对较大,其变化范围在 4.81~18.28 mg/kg,可能是由于固沙灌木生长使土壤水热条件和微生物变化导致其含量不够稳定。不同固沙灌木林土壤磷素也很缺乏,

全磷含量均低于 0.35 g/kg,有效磷含量不高于 3.94 mg/kg。研究区固沙灌木林土壤钾素含量较高,全钾和速效钾含量变化范围分别在 19.25~26.96 g/kg 和 70.73~126.58 mg/kg,各固沙灌木林土壤全钾含量有一定差异,但差异不显著( $p>0.05$ ),红砂表层土壤的速效钾含量最大,且与其他固沙灌木有显著差异( $p<0.05$ ),是裸沙地的 1.10 倍。各固沙灌木林土壤水溶性盐总量低于 0.29%,说明土壤全盐量过低,可能会影响固沙灌木的生长,需要采取改良措施增加土壤有机质。各固沙灌木表层 0—20 cm 土壤的有机质、氮素、磷素、钾素含量均大于 20—40 cm 和 40—60 cm 土层,说明随着土层深度增加各固沙灌木林土壤养分含量逐渐减小,但各土层间差异不显著。在 0—20 cm 土层,各固沙灌木林土壤全氮、全磷、速效钾的含量均表现为红砂>黄花矶松>白刺>沙拐枣>膜果麻黄>裸沙地,而其他养分含量大小排序不一,说明不同固沙灌木对土壤各养分元素的改良效果不同。

表 2 不同固沙灌木林土壤养分特征

Table 2 Soil nutrient characteristics of different sand-fixing shrub forests

土壤 质量	土层 深度/cm	样地类型					
		裸沙地(CK)	白刺(I)	黄花矶松(Ⅱ)	红砂(Ⅲ)	沙拐枣(Ⅳ)	膜果麻黄(V)
全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	0—20	0.02±0.01Ac	0.09±0.04Aabc	0.14±0.07Aab	0.17±0.08Aa	0.07±0.03Abc	0.04±0.02Ac
	20—40	0.01±0.01Ac	0.06±0.03Abc	0.12±0.06Aab	0.16±0.08Aa	0.06±0.02Abc	0.02±0.01Ac
	40—60	0.01±0.01Ab	0.04±0.02Ab	0.04±0.02Ab	0.1±0.06Aa	0.05±0.02Aab	0.02±0.01Ab
全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	0—20	0.14±0.05Ab	0.26±0.08Aab	0.28±0.10Aab	0.35±0.15Aa	0.18±0.06Aab	0.17±0.09Aab
	20—40	0.13±0.06Ab	0.25±0.09Aab	0.25±0.08Aab	0.32±0.12Aa	0.16±0.08Aab	0.15±0.08Ab
	40—60	0.09±0.03Ab	0.25±0.06Aab	0.23±0.09Aab	0.30±0.16Aa	0.16±0.07Aab	0.14±0.06Aab
全钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )	0—20	20.38±3.82Aa	23.43±4.66Aa	23.19±4.51Aa	26.68±5.37Aa	20.93±3.90Aa	20.82±3.87Aa
	20—40	19.46±3.65Aa	23.4±4.08Aa	21.68±4.19Aa	26.07±5.06Aa	20.48±3.86Aa	20.76±3.74Aa
	40—60	19.25±3.43Aa	19.57±3.97Aa	21.03±4.02Aa	26.96±4.92Aa	20.03±3.21Aa	20.73±3.83Aa
碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	0—20	4.82±1.26Ab	7.94±1.63Ab	5.98±1.57Ab	18.28±4.19Aa	8.60±2.05Ab	8.95±2.28Ab
	20—40	4.81±1.38Ab	7.58±1.52Ab	5.20±1.53Ab	15.33±3.65Aa	6.19±1.67Ab	6.43±1.77Ab
	40—60	4.91±1.44Ab	7.25±1.31Ab	5.18±1.48Ab	14.95±3.09Aa	5.50±1.54Ab	5.48±1.60Ab
有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	0—20	2.04±0.38Ab	3.00±0.52Aab	2.39±0.47Ab	3.94±0.89Aa	2.64±0.49Ab	2.34±0.41Ab
	20—40	2.02±0.33Ab	2.78±0.46Aab	2.26±0.45Ab	3.39±0.61Aa	2.42±0.46Ab	2.23±0.46Ab
	40—60	2.01±0.36Ab	2.39±0.40Ab	2.23±0.43Ab	3.2±0.58Aa	2.12±0.42Ab	2.16±0.33Ab
速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	0—20	78.71±8.65Ac	96.51±9.46Abc	102.00±10.27Ab	126.58±10.86Aa	86.57±8.92Abc	82.64±7.83Ac
	20—40	72.80±8.28Ac	93.82±9.02Ab	95.16±9.87Ab	118.84±10.50Aa	83.56±8.54Abc	76.90±7.66Ac
	40—60	70.73±7.96Ac	92.35±8.99Ab	93.90±9.03Ab	117.32±10.34Aa	80.61±8.06Abc	74.89±7.58Ac
有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	0—20	1.27±0.29Ad	3.11±0.44Aab	1.91±0.38Acd	3.69±0.79Aa	2.90±0.47Aab	2.56±0.42Abc
	20—40	0.99±0.15Ad	2.53±0.32Ab	1.65±0.31ABcd	3.52±0.71Aa	1.85±0.31Bbc	1.98±0.35ABbc
	40—60	0.23±0.11Bc	1.68±0.25Bb	1.21±0.26Bb	3.37±0.65Aa	1.45±0.30Bb	1.48±0.33Bb
盐分/ %	0—20	0.03±0.02Ab	0.25±0.04Aa	0.24±0.03Aa	0.23±0.05Aa	0.05±0.02Ab	0.05±0.02Ab
	20—40	0.03±0.01Ac	0.20±0.03Ab	0.25±0.02Aa	0.27±0.04Aa	0.04±0.02Ac	0.04±0.01Ac
	40—60	0.02±0.01Ac	0.20±0.02Ab	0.21±0.02Ab	0.29±0.02Aa	0.04±0.01Ac	0.03±0.01Ac

注:同一指标同列不同大写字母表示固沙灌木在不同土层差异显著( $p<0.05$ ),同行不同小写字母表示不同固沙灌木在同一土层差异显著( $p<0.05$ )。



2.2 不同固沙灌木林土壤生物学性质差异

从表 3 可见,研究区各固沙灌木林 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 土层土壤微生物数量存在差异,与对照裸沙地相比,土壤微生物三大类群数量均显著增加。在土壤表层,细菌、放线菌数量表现为红砂>沙拐枣>白刺>膜果麻黄>黄花矾松>裸沙地,真菌数量表现为红砂>沙拐枣>黄花矾松>膜果麻黄>白刺>裸沙地,红砂土壤的细菌、放线菌、真菌与其他固沙灌木的有显著差异( $p<0.05$ ),各固沙灌木林表层土壤细菌、放线菌和真菌数量均是裸沙地的 3.72 倍以上。20—40 cm 土层,细菌、放线菌数量表现趋势与表层一致,真菌数量表现为沙拐枣>红砂>黄花矾松>白刺>膜果麻黄>裸沙地。40—60 cm 土层,各固沙灌木土壤微生物三大类群数量表现趋势各不相同。黄花矾松和膜果麻黄随着土层深度增加细菌、放线菌、真菌数量均逐渐减小,下层比表层分别减小 82.59%, 20.21%, 95.46% 和 47.58%, 7.11%,

74.92%, 其余各固沙灌木随土层深度增加土壤微生物数量变化规律各异。

不同固沙灌木林土壤酶活性存在差异,研究区各固沙灌木 0—20 cm 土层土壤酶活性均高于裸沙地,其中,过氧化氢酶和蔗糖酶活性以红砂最高,分别是裸沙地的 3.00 倍和 9.40 倍;红砂土壤的蔗糖酶活性与其他固沙灌木的有显著差异( $p<0.05$ );脲酶活性以沙拐枣最高,是裸沙地的 3.15 倍;磷酸酶活性以白刺最高,是裸沙地的 3.61 倍。20—40 cm, 40—60 cm 土层,各固沙灌木林土壤酶活性表现趋势各不相同,其中,过氧化氢酶活性表现为红砂>膜果麻黄>黄花矾松>白刺>沙拐枣>裸沙地;蔗糖酶活性表现为红砂最高,沙拐枣次之,裸沙地和黄花矾松最小;磷酸酶活性表现为红砂最高,白刺次之;脲酶活性土壤中层与下层表现趋势不同。各固沙灌木林脲酶、蔗糖酶、磷酸酶活性随土层深度增加呈不同变化规律,过氧化氢酶活性除膜果麻黄外均随土层深度增加而减小。

表 3 不同固沙灌木林土壤微生物数量与酶活性  
Table 3 Soil microbial quantity and enzyme activity of different sand-fixing shrub forests

土壤 质量	土层 深度/cm	样地类型					
		裸沙地(CK)	白刺(I)	黄花矾松(Ⅱ)	红砂(Ⅲ)	沙拐枣(Ⅳ)	膜果麻黄(V)
细菌/ ( $\times 10^5$ CFU $\cdot$ g $^{-1}$ )	0—20	1.47 $\pm$ 0.38Ad	9.04 $\pm$ 2.43Ac	6.72 $\pm$ 1.66Ac	25.10 $\pm$ 4.87Aa	15.58 $\pm$ 3.93Ab	7.23 $\pm$ 1.99Ac
	20—40	0.42 $\pm$ 0.09Bc	8.18 $\pm$ 2.17Ab	4.89 $\pm$ 1.05Abc	21.09 $\pm$ 4.21Aa	17.91 $\pm$ 4.04Aa	5.06 $\pm$ 1.08ABbc
	40—60	0.23 $\pm$ 0.05Bd	8.92 $\pm$ 2.35Ac	1.17 $\pm$ 0.27Bd	23.99 $\pm$ 4.30Aa	14.46 $\pm$ 3.36Ab	3.79 $\pm$ 0.86Bd
放线菌/ ( $\times 10^4$ CFU $\cdot$ g $^{-1}$ )	0—20	1.01 $\pm$ 0.36Ac	13.11 $\pm$ 3.27Ab	3.76 $\pm$ 0.88Ac	32.21 $\pm$ 5.57Aa	17.98 $\pm$ 4.05Ab	6.05 $\pm$ 1.68Ac
	20—40	0.92 $\pm$ 0.21Ac	16.61 $\pm$ 3.35Ab	3.2 $\pm$ 0.75Ac	36.77 $\pm$ 5.83Aa	18.72 $\pm$ 4.28Ab	5.97 $\pm$ 1.60Ac
	40—60	1.28 $\pm$ 0.39Ac	19.38 $\pm$ 4.76Ab	3.00 $\pm$ 0.62Ac	30.89 $\pm$ 5.09Aa	16.4 $\pm$ 3.81Ab	5.62 $\pm$ 1.54Ac
真菌/ ( $\times 10^3$ CFU $\cdot$ g $^{-1}$ )	0—20	0.01 $\pm$ 0.01Ad	1.47 $\pm$ 0.37Acd	4.41 $\pm$ 0.99Ab	7.58 $\pm$ 2.16Aa	4.42 $\pm$ 1.06Ab	3.15 $\pm$ 0.61Abc
	20—40	0.02 $\pm$ 0.01Ad	2.28 $\pm$ 0.43Ac	2.52 $\pm$ 0.34Bbc	3.5 $\pm$ 0.77Bab	3.66 $\pm$ 0.84Aa	1.71 $\pm$ 0.48Bc
	40—60	0.01 $\pm$ 0.01Ad	2.21 $\pm$ 0.48Ab	0.20 $\pm$ 0.08Ced	3.00 $\pm$ 0.62Ba	0.36 $\pm$ 0.10Bed	0.79 $\pm$ 0.13Cc
过氧化氢酶/ (ml $\cdot$ g $^{-1}\cdot$ h $^{-1}$ )	0—20	0.03 $\pm$ 0.01Ab	0.07 $\pm$ 0.02Aab	0.09 $\pm$ 0.04Aa	0.09 $\pm$ 0.05Ba	0.03 $\pm$ 0.01Ab	0.06 $\pm$ 0.02Aab
	20—40	0.01 $\pm$ 0.01Ac	0.06 $\pm$ 0.03Abc	0.07 $\pm$ 0.03Abc	0.27 $\pm$ 0.09Aa	0.03 $\pm$ 0.02Abc	0.10 $\pm$ 0.04Ab
	40—60	0.01 $\pm$ 0.01Ab	0.06 $\pm$ 0.02Ab	0.06 $\pm$ 0.03Ab	0.27 $\pm$ 0.08Aa	0.02 $\pm$ 0.01Ab	0.08 $\pm$ 0.03Ab
脲酶/ (mg $\cdot$ g $^{-1}\cdot$ d $^{-1}$ )	0—20	0.65 $\pm$ 0.27Ac	1.27 $\pm$ 0.35Abc	1.56 $\pm$ 0.38Aab	1.77 $\pm$ 0.47Aab	2.05 $\pm$ 0.39Aa	2.01 $\pm$ 0.48Aab
	20—40	0.87 $\pm$ 0.31Abc	1.47 $\pm$ 0.39Ab	0.73 $\pm$ 0.22Bc	2.33 $\pm$ 0.53Aa	0.92 $\pm$ 0.36Bbc	0.93 $\pm$ 0.28Bbc
	40—60	0.87 $\pm$ 0.35Ab	1.79 $\pm$ 0.42Aa	0.99 $\pm$ 0.31ABb	1.58 $\pm$ 0.45Aab	0.87 $\pm$ 0.41Bb	1.6 $\pm$ 0.36ABab
蔗糖酶/ (mg $\cdot$ g $^{-1}\cdot$ d $^{-1}$ )	0—20	1.31 $\pm$ 0.39Ac	6.32 $\pm$ 2.06Ab	2.94 $\pm$ 1.63Abc	12.31 $\pm$ 3.81Ba	4.48 $\pm$ 1.03Bbc	7.16 $\pm$ 2.58Ab
	20—40	0.89 $\pm$ 0.29Ad	5.74 $\pm$ 1.85Abcd	2.44 $\pm$ 1.55Acd	27.38 $\pm$ 4.79Aa	10.64 $\pm$ 3.07Ab	6.39 $\pm$ 2.41Abc
	40—60	1.04 $\pm$ 0.24Ad	3.3 $\pm$ 1.12Acd	0.72 $\pm$ 0.49Ad	16.39 $\pm$ 4.02Ba	9.33 $\pm$ 2.92ABb	6.50 $\pm$ 2.66Abc
磷酸酶/ (mg $\cdot$ g $^{-1}\cdot$ d $^{-1}$ )	0—20	2.42 $\pm$ 0.30Ab	8.74 $\pm$ 2.72Aa	4.15 $\pm$ 0.79Bb	8.44 $\pm$ 2.51Aa	2.57 $\pm$ 0.36Ab	2.67 $\pm$ 0.48Ab
	20—40	1.17 $\pm$ 0.15Bc	7.99 $\pm$ 2.18Ab	7.01 $\pm$ 1.95Ab	14.37 $\pm$ 3.66Aa	1.59 $\pm$ 0.20Bc	0.32 $\pm$ 0.08Bc
	40—60	1.97 $\pm$ 0.24Ac	6.03 $\pm$ 1.83Ab	1.29 $\pm$ 0.20Cc	13.92 $\pm$ 3.58Aa	0.32 $\pm$ 0.12Cc	0.77 $\pm$ 0.37Bc

注:同一指标同列不同大写字母表示固沙灌木在不同土层差异显著( $p<0.05$ ),同行不同小写字母表示不同固沙灌木在同一土层差异显著( $p<0.05$ )。

2.3 固沙灌木林各土壤质量评价指标间的相关性

研究区固沙灌木林土壤养分、盐分、微生物和酶活性之间相关性密切(表 4),具体表现为土壤养分、微生物

各指标之间均呈极显著正相关关系( $p<0.01$ ),相关系数达到 62.3%以上;土壤盐分与土壤细菌、真菌、脲酶、蔗糖酶的相关性不显著,与其他土壤质量指标均显著正相关

( $p < 0.05$ ), 相关系数达到 49.6% 以上; 土壤酶活性与土壤养分、细菌、放线菌呈显著正相关关系 ( $p < 0.05$ ), 相关系数达到 47.00% 以上。可以看出, 土壤养分含量、微生物数量和酶活性是评价土壤质量的主要指标, 固沙灌木林土壤质量各指标间相互影响, 相互促进, 使得固沙灌木林土壤养分不断积累, 微生物群落逐渐稳定, 土壤质量逐步改善。

## 2.4 不同固沙灌木林土壤质量综合评价

对标准化后的土壤质量各指标数据进行 KMO 检验、Bartlett 球体检验和显著性检验可知, KOM 值等于 0.673, Bartlett 球体检验结果为 373.114, Sig 值为 0.000, 表明各指标具有相关性, 数据适合主成分分析。将不同固沙灌木林 15 个土壤质量指标进行主成分分析, 提取特征值大于 1 且累计方差贡献率达到 85% 的主成分 3 个, 并得到主成分各因子负荷量、特征值与方差贡献率(表 5), 可知前 3 个主成分累积方差贡献率达到 88.67%, 这 3 个主成分可反映出全部 15 个土壤质量指标的信息。第一主成分方差贡献率为 73.28%, 其中全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质等负荷量有较高的正值, 可代表土壤养分的信息。第二主成分方差贡献率为 8.91%, 值最高的是细菌, 可反映土壤微生物多样性的信息。第三主成分方差贡献率为 6.68%, 过氧化氢酶的值最高, 主要反映土壤酶活性的信息。根据不同固沙灌木林土壤质量指标特征值和成分矩阵得出土壤质量评价 3 个主成分方程  $F_1, F_2, F_3$ , 再由 3 个主成分方程计算各主成分

得分并得出土壤质量评价综合得分方程  $F$ , 最后结合主成分的方差贡献率计算综合得分并排序(表 6), 可知不同固沙灌木林在不同土层对土壤质量的改良效果不同, 0—20 cm 土层综合得分排序为 III > I > II > IV > V > CK, 20—40 cm 和 40—60 cm 均为 III > I > IV > II > V > CK。可以看出, 与裸沙地相比, 不同固沙灌木均能提高风沙区土壤的质量, 但其改良程度存在差异。在 0—60 cm 土层, 黄花矶松改善表层土壤质量的作用明显大于中下层土壤, 红砂和白刺对土壤质量的改善效果最好。

$$F_1 = 0.261X_1 + 0.271X_2 + 0.283X_3 + 0.280X_4 + 0.286X_5 + 0.287X_6 + 0.272X_7 + 0.227X_8 + 0.256X_9 + 0.266X_{10} + 0.226X_{11} + 0.236X_{12} + 0.201X_{13} + 0.239X_{14} + 0.263X_{15}$$

$$F_2 = -0.199X_1 - 0.319X_2 - 0.14X_3 + 0.183X_4 + 0.055X_5 - 0.205X_6 + 0.15X_7 - 0.54X_8 + 0.33X_9 + 0.277X_{10} + 0.176X_{11} - 0.07X_{12} + 0.298X_{13} + 0.292X_{14} - 0.224X_{15}$$

$$F_3 = -0.26X_1 - 0.148X_2 + 0.067X_3 + 0.01X_4 - 0.118X_5 - 0.086X_6 - 0.094X_7 + 0.008X_8 - 0.036X_9 + 0.121X_{10} - 0.576X_{11} + 0.526X_{12} - 0.092X_{13} + 0.413X_{14} + 0.269X_{15}$$

$$F = 0.733F_1 + 0.089F_2 + 0.067F_3$$

式中:  $X_1 - X_{15}$  分别代表全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、盐分、细菌、放线菌、真菌、过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶、磷酸酶。

表 4 固沙灌木林土壤质量指标的相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix of soil quality index of sand-fixing shrub forest

指标	全氮	全磷	全钾	碱解氮	有效磷	速效钾	有机质	盐分	细菌	放线菌	真菌	过氧化氢酶	脲酶	蔗糖酶	磷酸酶
全氮	1.000														
全磷	0.880 **	1.000													
全钾	0.825 **	0.863 **	1.000												
碱解氮	0.710 **	0.742 **	0.869 **	1.000											
有效磷	0.792 **	0.834 **	0.907 **	0.940 **	1.000										
速效钾	0.898 **	0.966 **	0.926 **	0.856 **	0.898 **	1.000									
有机质	0.719 **	0.757 **	0.838 **	0.855 **	0.899 **	0.790 **	1.000								
盐分	0.767 **	0.930 **	0.765 **	0.540 *	0.658 **	0.862 **	0.574 *	1.000							
细菌	0.680 **	0.628 **	0.723 **	0.842 **	0.819 **	0.741 **	0.800 **	0.409	1.000						
放线菌	0.636 **	0.683 **	0.736 **	0.868 **	0.854 **	0.769 **	0.794 **	0.496 *	0.939 **	1.000					
真菌	0.776 **	0.667 **	0.634 **	0.724 **	0.752 **	0.710 **	0.740 **	0.420	0.732 **	0.623 **	1.000				
过氧化氢酶	0.571 *	0.648 **	0.794 **	0.711 **	0.621 **	0.719 **	0.642 **	0.637 **	0.580 *	0.659 **	0.326	1.000			
脲酶	0.470 *	0.522 *	0.501 *	0.661 **	0.604 **	0.533 *	0.701 **	0.349	0.535 *	0.620 **	0.610 **	0.512 *	1.000		
蔗糖酶	0.587 *	0.528 *	0.708 **	0.777 **	0.701 **	0.642 **	0.704 **	0.380	0.800 **	0.851 **	0.442	0.808 **	0.557 *	1.000	
磷酸酶	0.721 **	0.821 **	0.858 **	0.760 **	0.794 **	0.843 **	0.734 **	0.828 **	0.618 **	0.734 **	0.441	0.806 **	0.504 *	0.683 **	1.000

注: \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关, \* 表示在 0.05 水平上显著相关。

表 5 不同固沙灌木林土壤质量因子负荷量、权重、特征值与贡献率

Table 5 Load capacity, weights, eigenvalue and contribution rate of the soil quality factors in different sand-fixing shrub forests						
指标	第一主成分		第二主成分		第三主成分	
	负荷量	权重	负荷量	权重	负荷量	权重
全氮	0.864	0.068	−0.230	0.058	−0.260	0.092
全磷	0.899	0.070	−0.369	0.092	−0.148	0.053
全钾	0.938	0.073	−0.162	0.040	0.067	0.024
碱解氮	0.929	0.073	0.211	0.053	0.010	0.003
有效磷	0.948	0.074	0.063	0.016	−0.118	0.042
速效钾	0.953	0.075	−0.237	0.059	−0.086	0.030
有机质	0.903	0.071	0.174	0.043	−0.094	0.033
盐分	0.754	0.059	−0.624	0.156	0.008	0.003
细菌	0.849	0.066	0.382	0.095	−0.036	0.013
放线菌	0.881	0.069	0.320	0.080	0.121	0.043
真菌	0.748	0.059	0.203	0.051	−0.576	0.204
过氧化氢酶	0.782	0.061	−0.081	0.020	0.526	0.186
脲酶	0.668	0.052	0.345	0.086	−0.092	0.032
蔗糖酶	0.793	0.062	0.337	0.084	0.414	0.146
磷酸酶	0.873	0.068	−0.259	0.065	0.269	0.095
特征值		10.992		1.336		1.002
贡献率/%	73.280		8.910		6.679	
累计贡献率/%	73.280		82.190		88.869	

表 6 不同固沙灌木林各主成分得分及综合得分

Table 6 Principal component scores and comprehensive scores of different sand-fixing shrub forests							
林地类型	编号	土层/cm	主成分得分			综合得分	排名
			第一主成分	第二主成分	第三主成分		
红砂	Ⅲ	0—20	6.45	0.53	−2.11	4.63	2
白刺	I		1.38	−1.17	0.01	0.91	4
黄花矾松	Ⅱ		0.78	−1.63	−1.41	0.33	6
沙拐枣	Ⅳ		0.29	1.86	−1.39	0.28	7
膜果麻黄	V		−0.72	1.33	−0.44	−0.44	9
裸沙地	CK	20—40	−3.4	−0.35	0.44	−2.5	16
红砂	Ⅲ		6.82	0.51	1.85	5.17	1
白刺	I		0.85	−0.59	−0.09	0.57	5
沙拐枣	Ⅳ		−0.81	1.51	−0.42	−0.49	10
黄花矾松	Ⅱ		−0.42	−2.27	−0.5	−0.55	11
膜果麻黄	V	40—60	−2.11	0.6	0.51	−1.46	13
裸沙地	CK		−3.89	−0.04	0.27	−2.84	17
红砂	Ⅲ		5.57	−0.32	1.78	4.18	3
白刺	I		−0.18	−0.2	−0.19	−0.17	8
沙拐枣	Ⅳ		−2	0.99	0.46	−1.35	12
黄花矾松	Ⅱ		−1.94	−1.68	0.09	−1.57	14
膜果麻黄	V		−2.38	0.85	0.64	−1.62	15
裸沙地	CK		−4.28	0.07	0.49	−3.10	18

3 讨论

3.1 不同固沙灌木林土壤质量变化

土壤有机质和养分是土壤肥力质量的基础,而土壤微生物和酶的分解和转化作用参与了土壤中各种生物化学过程,所以通过测定不同固沙灌木土壤养分含量及生物学指标的变化规律,可以分析固沙灌木对土壤质量的影响过程<sup>[20]</sup>。固沙灌木对土壤质量的改

善具有显著促进作用<sup>[5]</sup>,固沙植被的生长增加了风沙区地表粗糙度,改变了土壤的机械组成,使得土壤中黏粒含量增加<sup>[21]</sup>,土壤容重、孔隙度和保水能力改善,土壤养分储量不断增加<sup>[22]</sup>,有利于促进植被的生存和生长。随着固沙灌木生长环境的改善,进入土壤的枯落物、残根和根系分泌物增多,经过土壤微生物和酶的分解转化,使得土壤肥力不断累积,为微生物和酶及其他物种生长发育提供了有利的生存环

境<sup>[23]</sup>。本研究表明,不同固沙灌木林地土壤养分和生物学特性较裸沙地均有不同程度的增加,但不同灌木对土壤养分和生物学性质的改善效果存在明显差异,这可能与灌木根系分泌物、凋落物类型以及灌木自身的生理代谢不同有关<sup>[5]</sup>。土壤微生物数量与土壤养分含量相关,在养分高的土壤中细菌的数量较高,可以彻底分解土壤有机质,使木质素和纤维素含量下降,不利于真菌群落的生长;在养分较低的土壤中,细菌生长繁殖受到抑制,真菌的数量呈上升趋势,而放线菌由于菌丝体产生的孢子可以适应低氧的环境使其得以生存<sup>[24]</sup>。本研究中,有机质含量高的白刺林土壤细菌数量较高,真菌数量较低,放线菌数量表现趋势与细菌一致,而有机质含量低的黄花矶松土壤真菌数量相对较高,细菌和放线菌数量较低,这与上述土壤养分与微生物数量间相互关系的研究结果一致。本研究区表层土壤有机质、全氮、全磷含量处于较低水平,分别在 1.27~3.69, 0.02~0.17, 0.14~0.35 g/kg,均低于中国北方典型风沙区表层土壤的均值 21.03, 1.20, 0.80 g/kg<sup>[25]</sup>,主要是由于干旱少雨和风沙吹蚀的恶劣环境使得固沙灌木凋落物和根系分泌物较少,微生物数量和酶活性较低,有机质分解缓慢所致。各固沙灌木林随土层深度增加养分含量逐渐减小,微生物数量和酶活性变化规律各异,说明固沙灌木改善土壤质量受灌木类型、土层深度和微生物种类等因素共同影响。

### 3.2 不同固沙灌木林土壤质量评价

土壤质量评价是判别生态系统是否达到生态平衡和进行土地可持续管理的重要方式<sup>[6]</sup>,由于土壤质量评价中选取的指标不同,土壤质量评价方法也没有统一标准<sup>[7]</sup>,其定量评价方法主要有土壤质量动力学方法<sup>[26]</sup>、多变量指标克立格法<sup>[27]</sup>、土壤相对质量法<sup>[28]</sup>、土壤质量综合评分法<sup>[29]</sup>、土壤质量指数法<sup>[30]</sup>、物元法<sup>[31]</sup>、灰色关联分析法<sup>[32]</sup>、人工神经网络法<sup>[33]</sup>和 TOPSIS 法等<sup>[34]</sup>,各评价方法有各自的适用范围和优缺点,其中,土壤质量指数法应用最广泛,可以很好地评估管理措施对土壤质量的影响,适合于土壤的可持续管理<sup>[9]</sup>。本研究中土壤质量综合评价采用主成分分析和土壤质量指数相结合的方法进行,其不仅可以量化评估不同固沙灌木对土壤质量的影响程度,也能比较不同固沙灌木改良土壤质量的效果。土壤质量评价指标间的相互影响及协调促进效应能够综合反映土壤肥力质量和对脆弱生境的适应能力<sup>[6]</sup>。当前,土壤质量评价选取的指标主要为有机质、氮、磷、钾、容重、pH 等理化指标,而作为土壤对管理措施变化早期响应的土壤微生物和酶活性等指

标则选取较少<sup>[9]</sup>,本研究在常规理化指标的基础上新增了细菌、真菌、放线菌、脲酶、蔗糖酶、磷酸酶、过氧化氢酶等生物类指标,以便评价结果能更真实地反映不同固沙灌木林土壤的综合质量。本研究选取民勤风沙区不同固沙灌木林的 15 个土壤质量指标进行主成分分析,第一主成分可以解释土壤质量指标信息的 73.28%,说明所选取的土壤质量评价指标在土壤质量综合评价中均起着重要作用<sup>[5]</sup>。土壤质量评价选择的指标越全面越能反映真实的土壤质量状况,但指标过多会造成数据获取成本的增加,减少土壤质量评价指标,构建评价指标最小数据集<sup>[35]</sup>,以最少评价指标获取最优评价结果是今后固沙灌木土壤质量评价主要的研究方向之一。

单一指标的高低并不能代表整体土壤养分质量的高低<sup>[7]</sup>,本研究中各固沙灌木林不同土层土壤养分、微生物数量和酶活性各指标变化趋势各异,对土壤质量的改善效果难以评价,故利用主成分分析进行土壤质量综合评价。从评价结果看,红砂的综合得分最高,白刺次之,对土壤质量的改善效果最好。红砂、白刺匍匐生长,增加了地表粗糙程度,致使拦截风沙流后细沙物质沉积于灌丛下方,逐渐形成椭圆形灌丛沙堆<sup>[14]</sup>,随着灌丛沙堆的生长发育,凋落物及生物排泄物被微生物分解后增加了沙堆土壤的养分含量和生物多样性,使其自身及其他生物生存的微环境得到显著改善<sup>[36]</sup>。本研究中黄花矶松改善表层土壤质量的作用明显大于中下层土壤,这可能与黄花矶松的根系分泌物和种子萌发主要在 0—20 cm 层有关。综上,在裸沙地的恢复治理中,可以探索灌丛和草本植物混交的方式改善土壤质量的空间分布,利用结构致密的优势灌丛为草本植物提供保护,防止表层土壤的风蚀并将养分聚集于灌丛下方,进而促进灌丛沙堆的“肥岛”效应以达到固定流沙的目的。黄花矶松、红砂、白刺、膜果麻黄、沙拐枣是民勤风沙区优良的固沙植物,黄花矶松花萼、红砂叶、白刺果、沙拐枣根、麻黄碱等均可入药,是重要的药用植物,对 5 种具有药用价值的固沙灌木进行土壤质量综合评价,评价方法和指标选取可为风沙区灌木林土壤质量评价提供借鉴,评价结果对风沙区生态恢复过程中固沙灌木的选择具有实践指导意义。

## 4 结论

(1) 民勤风沙区固沙灌木林土壤有机质和氮素含量较低,磷素缺乏,钾素含量较高,全盐量过低;0—60 cm 各土层土壤养分含量均以红砂最高,土壤微生物数量和酶活性各固沙灌木表现趋势各不相同;随土



层深度增加,土壤微生物数量和酶活性变化规律各异,土壤养分含量逐渐减小,但各土层间差异不显著。

(2) 固沙灌木林土壤养分、盐分、微生物数量和酶活性之间相关性密切,土壤养分、微生物各指标间均呈极显著正相关关系( $p < 0.01$ )。

(3) 不同固沙灌木林在不同土层对土壤质量改良的效果不同,0—20 cm 土层综合得分排序为Ⅲ>Ⅰ>Ⅱ>Ⅳ>Ⅴ>CK,20—40 cm 和 40—60 cm 均为Ⅲ>Ⅰ>Ⅳ>Ⅱ>Ⅴ>CK,表明红砂和白刺对土壤质量的改善效果最好,黄花矾松改善表层土壤质量的作用大于中下层土壤。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘宇娇,王国华.河西走廊荒漠绿洲过渡带沙丘不同生境沙拐枣种群扩张特征研究[J].中国农学通报,2020,36(6):42-47.  
Liu Y J, Wang G H. Calligonum mongolicum in different habitats of sand dunes in the desert-oasis ecotone of Hexi corridor: Population expansion characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020,36(6):42-47.
- [2] 赵朋波,邱开阳,谢应忠,等.毛乌素沙地南缘不同固沙灌木下土壤养分的空间异质性[J].草地学报,2021,29(9):2040-2048.  
Zhao P B, Qiu K Y, Xie Y Z, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients under different sand-fixing shrubs in southern Mu us sandy land, China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021,29(9):2040-2048.
- [3] 王彦武,罗玲,张峰,等.民勤县绿洲边缘固沙林防风蚀效应研究[J].西北林学院学报,2018,33(4):64-70.  
Wang Y W, Luo L, Zhang F, et al. Windbreak effect of sand-fixation forest on the edge of oasis in minqin[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018,33(4):64-70.
- [4] 常海涛,刘任涛,刘佳楠,等.草方格造林固沙过程中土壤性质变化及分形特征:以腾格里沙漠东南缘为例[J].水土保持学报,2018,32(6):58-65,165.  
Chang H T, Liu R T, Liu J N, et al. Change of soil properties and related fractal features during forestation and sand fixation by straw checkerboard: A case study in southeast edge of Tengger desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(6):58-65,165.
- [5] 张立欣,段玉玺,王博,等.库布齐沙漠不同人工固沙灌木林土壤微生物量与土壤养分特征[J].应用生态学报,2017,28(12):3871-3880.  
Zhang L X, Duan Y X, Wang B, et al. Characteristics of soil microorganisms and soil nutrients in different sand-fixation shrub plantations in Kubuqi desert, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(12):3871-3880.
- [6] 罗雅曦,刘任涛.宁夏风沙区不同人工固沙灌丛林土壤质量评价[J].水土保持研究,2019,26(5):60-67.  
Luo Y X, Liu R T. Evaluation on soil quality of different sand-binding shrub plantations within straw checkerboard in the desertified area of Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(5):60-67.
- [7] 何毅,邱开阳,苏云,等.毛乌素沙地南缘不同固沙灌木群落土壤质量评价[J].草业科学,2022,39(10):2005-2015.  
He Y, Qiu K Y, Su Y, et al. Soil quality and its evaluation under different sand-fixing shrubs in the southern edge of Mu us sandy sand[J]. Pratacultural Science, 2022,39(10):2005-2015.
- [8] 邓丽媛,胡广录,周川,等.荒漠绿洲过渡带不同固沙植物根区土壤养分空间分布特征[J].西北林学院学报,2022,37(5):17-23.  
Deng L Y, Hu G L, Zhou C, et al. Spatial distribution characteristics of the soil nutrients in root zones with different sand fixing plants in the transition zone of desert oasis[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022,37(5):17-23.
- [9] 李鑫,张文菊,郭磊,等.土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J].中国农业科学,2021,54(14):3043-3056.  
Li X, Zhang W J, Wu L, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021,54(14):3043-3056.
- [10] Takoutsing B, Weber J, Aynekulu E, et al. Assessment of soil health indicators for sustainable production of maize in smallholder farming systems in the highlands of Cameroon[J]. Geoderma, 2016,276:64-73.
- [11] 付鹏程,胡广录,巩伟,等.河西走廊沙漠—绿洲过渡带固沙植物根区土壤物理性质及持水特性[J].土壤通报,2021,52(4):811-820.  
Fu P C, Hu G L, Gong W, et al. Soil physical properties and water retention characteristics of the sand-fixing plant root zone in the desert-oasis transition area of Gansu corridor[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021,52(4):811-820.
- [12] 石万里,王辉,马维伟.沙区植被恢复对土壤微生物量及活性的影响[J].中国沙漠,2017,37(3):507-513.  
Shi W L, Wang H, Ma W W. Effects of vegetation restoration on soil microbial biomass and activity in desert area[J]. Journal of Desert Research, 2017,37(3):507-513.
- [13] 陈蕴琳,侯倩倩,王国华,等.晋西北丘陵风沙区坡面尺度下不同固沙植物群落稳定性分析[J].西北植物学报,2022,42(2):326-338.  
Chen Y L, Gou Q Q, Wang G H, et al. Stability evaluation of different sand-fixing plant communities in hilly sandy area of northwest Shanxi[J]. Acta Botanica

- Boreali-Occidentalia Sinica, 2022, 42(2):326-338.
- [14] 李小平, 魏亚娟, 党晓宏, 等. 红砂灌丛沙堆土壤粒度组成及养分积累特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3):933-942.
- Li X L, Wei Y J, Dang X H, et al. Soil mechanical composition and soil nutrient content of *Reaumuria soongorica* nebkhas[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3):933-942.
- [15] 董茜, 王根柱, 庞丹波, 等. 喀斯特区不同植被恢复措施土壤质量评价[J]. 林业科学研究, 2022, 35(3):169-178.
- Dong Q, Wang G Z, Pang D B, et al. Soil quality evaluation of different vegetation restoration measures in Karst area[J]. Forest Research, 2022, 35(3):169-178.
- [16] 鲍士丹. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999:25-199.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:25-199.
- [17] 程丽娟, 薛泉宏. 微生物学试验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司, 2000:63-68.
- Cheng L J, Xue Q H. Experimental technique in microbiology technology[M]. Xi'an: World Publishing Corporation, 2000:63-68.
- [18] 杨文博. 微生物学试验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004:217-218.
- Yang W B. Laboratory experiments in microbiology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004:217-218.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986:274-331.
- Guan S Y. Soil enzyme and their research method[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986:274-331.
- [20] 闫德仁, 张胜男, 黄海广, 等. 沙地樟子松人工林土壤养分和酶活性变化研究[J]. 西部林业科学, 2019, 48(3):10-15.
- Yan D R, Zhang S N, Huang H G, et al. Changes of soil nutrients and enzyme activities for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land[J]. Journal of West China Forestry Science, 2019, 48(3):10-15.
- [21] 王彦武, 罗玲, 张峰, 等. 河西绿洲荒漠过渡带梭梭林土壤保育效应[J]. 土壤学报, 2019, 56(3):749-762.
- Wang Y W, Luo L, Zhang F, et al. Soil conservation effect of *Haloxylon ammodendron* bushes in Hexi oasis-desert ecotone[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(3):749-762.
- [22] Li D F, Shao M A. Soil organic carbon and influencing factors in different landscapes in an arid region of northwestern China[J]. Catena, 2014, 116:95-104.
- [23] 罗永清, 赵学勇, 李美霞. 植物根系分泌物生态效应及其影响因素研究综述[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12):3496-3504.
- Luo Y Q, Zhao X Y, Li M X. Ecological effect of plant root exudates and related affecting factors: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(12):3496-3504.
- [24] 戴雅婷, 侯向阳, 闫志坚, 等. 库布齐沙地两种植被恢复类型根际土壤微生物和土壤化学性质比较研究[J]. 生态学报, 2016, 36(20):6353-6364.
- Dai Y T, Hou X Y, Yan Z J, et al. Soil microbes and the chemical properties of the rhizosphere and non-rhizosphere soil under two types of vegetation restoration in the Hobq sandy land of inner mongolia, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20):6353-6364.
- [25] 孙小东, 宁志英, 杨红玲, 等. 中国北方典型风沙区土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(6):1209-1218.
- Sun X D, Ning Z Y, Yang H L, et al. The stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in soil in typical desertified regions, north China[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(6):1209-1218.
- [26] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality: In defining soil quality for a sustainable environment[M]. Madison: Soil Science Society of America Publication Inc., 1994:3-21.
- [27] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, 26(3):901-913.
- Liu Z F, Fu B J, Liu G H, et al. Soil quality: concept, indicators and its assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3):901-913.
- [28] Fu B J, Liu S L, Chen L D, et al. Soil quality regime in relation to land cover and slope position across a highly modified slope landscape [J]. Ecological Research, 2004, 19(1):111-118.
- [29] Larson W E, Pierce F J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management: In defining soil quality for a sustainable environment[M]. Madison: Soil Science Society of America Publication Inc., 1994:37-51.
- [30] 王飞, 李清华, 林诚, 等. 福建冷浸田土壤质量评价因子的最小数据集[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5):1461-1468.
- Wang F, Li Q H, Lin C, et al. Establishing a minimum data set of soil quality assessment for cold-waterlogged paddy field in Fujian province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(5):1461-1468.
- [31] 余健, 房莉, 仓定帮, 等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5):260-266.
- Yu J, Fang L, Cang D B, et al. Evaluation of land eco-security in Wanjiang district base on entropy weight and matter element model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5):260-266.

- prospects[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020,37(1):17-23.
- [15] Ding W F, Li M. Effects of grass coverage and distribution patterns on erosion and overland flow hydraulic characteristics [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016,75(6):477.
- [16] Li J W, Luo B L, Wei X H, et al. Transportation of fine particles controlled by particles flocculation is a key feature of soil erosion on gentle slope land [J]. *Catena*, 2023,232:107382.
- [17] 沈子雅,程金花,管凝,等.模拟降雨条件下灌草配置对坡面侵蚀泥沙颗粒分布的影响[J].*农业工程学报*, 2022,38(11):125-133.
- Shen Z Y, Cheng J H, Guan N, et al. Effects of shrub-herb arrangements on the distribution of sediment particles eroded from slopes under simulated rainfall conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(11):125-133.
- [18] Bai Y H, Zha X, Chen S F. Effects of the vegetation restoration years on soil microbial community composition and biomass in degraded lands in Changting County, China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2020,31(4):1295-1308.
- [19] 张鑫,李博,祖艳群,等.滇池流域 4 种典型次生林径流养分输出特征及机理[J].*水土保持学报*, 2014,28(5):37-42.
- Zhang X, Li B, Zu Y Q, et al. Characteristics and mechanism of nutrient output from surface runoff of secondary forest in Dianchi Lake watershed, Yunnan Province of southwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014,28(5):37-42.
- [20] 常琚枫,刘莹,李陈,等.农田氮磷流失特征及影响因素研究[J].*中国农学通报*, 2023,39(15):69-75.
- Chang J F, Liu Y, Li C, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in farmland and the influencing factors[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023,39(15):69-75.
- [21] 张广杰,巢林,张伟东,等.亚热带森林土壤理化性质的异质性和最佳取样量[J].*应用生态学报*, 2018,29(7):2139-2148.
- Zhang G J, Chao L, Zhang W D, et al. Heterogeneity and optimal sampe size of soil physicochemical properties in subtropical forest [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018,29(7):2139-2148.
- [22] Herman J, Moorhead D, Berg B. The relationship between rates of lignin and cellulose decay in aboveground forest litter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008,40(10):2620-2626.
- ~~~~~
- (上接第 178 页)
- [32] 唐柄哲,何丙辉,闫建梅.川中丘陵区土地利用方式对土壤理化性质影响的灰色关联分析[J].*应用生态学报*, 2016,27(5):1445-1452.
- Tang B Z, He B H, Yan J M. Gray correlation analysis of the impact of land use type on soil physical and chemical properties in the hilly area of central Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016,27(5):1445-1452.
- [33] 杨先野,付强,王宝华,等.三江平原土壤质量变化评价的模糊神经网络模型构建及应用[J].*水土保持研究*, 2008,15(3):54-57.
- Yang X Y, Fu Q, Wang B H, et al. Construction and application of fuzzy neural networks model in evaluation on the soil quality changes of Sanjiang plain[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008,15(3):54-57.
- [34] 解雪峰,濮励杰,朱明,等.基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价[J].*环境科学*, 2019,40(12):5484-5492.
- Xie X F, Pu L J, Zhu M, et al. Assessment of soil quality in coastal tidal flat reclamation areas based on MDS-TOPSIS model [J]. *Environmental Science*, 2019,40(12):5484-5492.
- [35] 张宇恒,王忠诚,王亚楠,等.基于最小数据集沂蒙山区不同治理模式下的土壤质量评价[J].*水土保持研究*, 2023,30(1):241-247.
- Zhang Y H, Wang Z C, Wang Y N, et al. Soil quality evaluation with different treatment models in Yimeng mountainous area based on minimum data set [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(1):241-247.
- [36] 孙特生,李文彦,刘继亮.黑河中游荒漠绿洲人工梭梭土壤养分特征[J].*干旱区资源与环境*, 2017,31(5):179-185.
- Sun T S, Li W Y, Liu J L. Soil nutrient characteristics of Haloxylon ammodendron plantation in a desert-oasis region in the middle reaches of Heihe river basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017,31(5):179-185.