

DOI: 10.5846/stxb202103180720

田英, 许喆, 王娅丽, 何建龙, 王占军. 宁夏银川平原沙化土地不同人工林土壤质量评价. 生态学报, 2023, 43(4): 1515-1525.

Tian Y, Xu Z, Wang Y L, He J L, Wang Z J. Soil quality evaluation for different forest plantation of sandy land in Yinchuan Plain, Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1515-1525.

宁夏银川平原沙化土地不同人工林土壤质量评价

田 英¹, 许 喆², 王娅丽³, 何建龙¹, 王占军^{1,*}

1 宁夏农林科学院林业与草地生态研究所, 银川 750002

2 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

3 宁夏林业研究院种苗生物工程国家重点实验室, 银川 750004

摘要:沙化土地土壤贫瘠、生产力低,人工植被恢复是重要的土壤改良措施。为研究宁夏银川平原沙地不同人工林栽植对土壤的影响,以银川腹部沙地银川植物园沙化土壤恢复区的 2017 年 3 月种植的文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)和欧李(*Cerasus humilis*)人工林地作为研究对象,以邻近的长期撂荒地作为对照,对土壤质量进行了研究。2020 年 7—8 月采集土样并测定了土壤物理、化学、生物学等 20 个指标作为土壤质量评价的总数据集,方差分析筛选出差异显著性的 9 个指标作为重要数据集指标,采用主成分分析法和 Norm 值建立土壤质量评价指标最小数据集(MDS),利用线性和非线性两种评分方法计算土壤质量指数(SQI)。结果表明:与长期撂荒地相比,银川平原沙化土壤恢复区人工文冠果、欧李林地的土壤理化性质较好,土壤砂粒百分比减少、粉粒和黏粒百分比有所增加,pH 降低;有机质、全氮、全磷、全钾等主要养分指标提高,蔗糖酶、脲酶、纤维素酶等主要生物酶活性也高于撂荒地,筛选出的研究区土壤质量评价 MDS 指标为土壤粉粒百分比和全磷。2 种评价方法下,文冠果和欧李人工恢复林地的 SQI 高于撂荒地,但提高不显著($P>0.05$),人工种植 4 a 的欧李林地 SQI 高于人工种植 4 a 的文冠果林地,但差异不显著($P>0.05$)。说明与撂荒地相比,文冠果和欧李可以作为该地区土壤改良的生态恢复灌木进行栽培利用。基于不同数据集指标计算的 SQI 之间相关性显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$),最小数据集非线性(SQI-NLM)与重要数据集非线性(SQI-NLS)评价的土壤质量指数之间的相关系数最大,基于 MDS 的非线性土壤质量评价方法在研究区具有较好的适用性,能够比较准确地代表土壤质量状态。该土壤质量评价方法对银川平原沙化土地利用质量评价,以及深入开展文冠果、欧李等人工林栽培管理及该地区人工植被恢复具有一定的借鉴意义。

关键词:沙化土地;人工林;最小数据集;评价指标;土壤质量;主成分分析

Soil quality evaluation for different forest plantation of sandy land in Yinchuan Plain, Ningxia

TIAN Ying¹, XU Zhe², WANG Yali³, HE Jianlong¹, WANG Zhanjun^{1,*}

1 Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 State Key Laboratory of Seedling Bioengineering, Ningxia Forestry Institute, Yinchuan 750004, China

Abstract: Sandy land has poor soil and low productivity. Artificial vegetation restoration is an important measure for improving soil fertility and quality. *Xanthoceras sorbifolium* and *Cerasus humilis* are excellent drought-resistant ecological tree species in Northwest, China. The effects of *Xanthoceras sorbifolium* and *Cerasus humilis* plantation, which were artificially cultivated in March 2017, had been evaluated in the sandy land of Yinchuan Plain, Ningxia, China, the neighboring long-term abandoned land as the contrast. Twenty soil physical, chemical and biological indicators were

基金项目:宁夏重点研发计划项目(2020BBF02027, 2018ZWFYQ0066);自治区农业科技自主创新专项科技创新引导项目(NKYG-18-04)

收稿日期:2021-03-18; **网络出版日期:**2022-10-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nxwzhj@163.com

measured as the soil quality evaluation indicators of the total data set (TDS) in July to August 2020. Nine indicators were selected as soil quality evaluation indicators of significant data set (SDS) by variance difference significance analysis (ANOVA). The minimum data set (MDS) was constructed by principal component analysis (PCA) and the Norm value. Soil quality index (SQI) was calculated using linear (L) and non-linear (NL) scoring methods. The research results showed that the soil physical, chemical and biological properties of the *Xanthoceras sorbifolium* and *Cerasus humilis* plantation in the sandy soil restoration area of Yinchuan Plain were improved, comparing with the long-term abandoned land. The percentage of soil sand percentage (Sand) decreased, but the percentage of soil silt (Silt) and clay (Clay) increased, the pH decreased. The main soil nutrient indicators such as soil organic matter (TOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total potassium (TK) were improved, and the activities of major biological enzymes such as sucrase (SA), urease (UA) cellulase (CEA) and alkaline phosphatase (PPA) were also higher than CK. The MDS indicators for soil quality evaluation in the study area were Silt and total phosphorus (TP). Under the two evaluation methods, the soil quality indexes (SQIs) of the plantation of *Xanthoceras sorbifolium* and *Cerasus humilis* restored forest land were higher than the abandoned land, but the increase was not significant ($P>0.05$), and the soil quality index (SQI) of the *Cerasus humilis* forestland planted for 4a was higher than *Xanthoceras sorbifolium* forestland planted for 4 a ($P>0.05$). Compared with abandoned land, *Xanthoceras sorbifolium* and *Cerasus humilis* plantation can be cultivated and used as ecological restoration shrubs for soil improvement in this research area. There was significant ($P<0.05$) or extremely significant ($P<0.01$) correlation between the SQI calculated based on different data sets, the correlation coefficient between SQI-NLM and SQI-NLS was the largest. The nonlinear soil quality evaluation method based on MDS has better applicability in the study area and can represent the characteristics of soil quality more accurately. The soil quality evaluation method can be used as a reference for evaluating of sandy soil use quality in Yinchuan Plain, and for providing the reference of cultivation and management of *Xanthoceras sorbifolium* and *Cerasus humilis* plantation and the restoration of artificial vegetation in this area.

Key Words: sandy land; plantation; minimum data set; evaluation indicators; soil quality; principal component analysis

土壤是陆地生态系统重要的组成部分,是维持动植物生存和发展的重要载体^[1],也是植物正常生长的基础^[2]。沙化是当前土壤环境面临的全球性生态问题。宁夏地处我国西北内陆,是我国沙化最严重的省(区)之一^[3]。降水严重不足、水土流失严重、植被稀疏、土地裸露,可耕作层浅,养分空间分布不均,是导致沙化土地土壤质量降低,生产力弱的重要因素^[4-5]。近 20 年生态保护工程实施以来,通过人工造林、退耕还林、飞播造林、封山育林等生态恢复措施,沙化土地质量改善取得了一些成果,但乡土优良的生态恢复植物缺乏、人工恢复模式单一、植被恢复土壤质量的评价与管理等研究基础薄弱。因此,加强对沙化土地恢复区不同恢复模式,尤其人工林地土壤恢复治理的效果监测研究,对于适宜的生态恢复树种选择、模式建立,促进沙化土地生态恢复具有重要指导意义^[6]。

土壤质量的高低可以反映土壤管理水平和生产能力。土壤结构复杂,功能丰富,科学而准确地对土壤质量进行研究十分必要^[7]。单一的土壤指标评价不能全面准确的表征土壤综合特征,指标过多又费时费力^[4]。近年来,国内外研究者对土壤质量评价方法进行了大量研究,模糊数学、降维等模型方法不断引入到生态恢复区、人工林地、混合林地等不同时空尺度的土壤质量研究中^[8-9]。土壤质量指数(SQI)法是目前土壤质量评价较客观和实用的方法^[10]。国外在农田、林地可持续管理中广泛使用 SQI 法评价土壤质量^[11-12],李鹏飞等^[13]利用主成分分析(PCA)分析,基于最小数据集(MDS)对黄土高原矿区复垦区 SQI 研究结果显示,不同年限的植被恢复模式下复垦土地土壤质量均有所提升。罗雅曦等^[14]对宁夏盐池风沙区油蒿(*Artemisia arbuscula*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙拐枣(*Caligonum mongolicum*)、柠条(*Caragana korshinskii*)4 种人工固沙灌丛林地土壤质量研究结果发现流动沙地扎设草方格营造油蒿林能在短期内提高风沙土壤综合质量。赵娜等^[15]研究了不同退耕年限刺槐林土壤理化性质演变特征和土壤质量综合指数,表明刺槐人工林土壤质量指数随着退耕年限的增加逐渐提高。刘昊等^[16]以湖南省宁远县不同森林类型林地土壤为研究对象,利用因

子分析和判别分析筛选修订最小数据集,计算土壤指数,表明针叶林地的土壤质量显著低于阔叶林与针阔混交林,在针叶林中间种植当地常见阔叶树种能提高林地土壤质量,防止土壤退化。

目前,对土壤质量评价已有的研究多集中于传统、常规乔木林地或灌木林地,研究对象也多为不同土地利用与管理方式、不同土壤类型、不同自然植被恢复模式、不同森林生态系统等^[17-20]。对于宁夏平原沙化土地人工林地恢复模式下的土壤质量评价研究较少。文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)、欧李(*Cerasus humilis*)均是近年来在我国西北、东北、华北等地干旱半干旱地区生态治理、园林绿化普遍选用的生态经济树种,其本身具有优良的抗旱、抗寒、耐盐、耐贫瘠特性,但普遍重种植、轻研究,对于其能否作为优良人工林植被恢复树种进行利用,其生长对土壤物理、化学、生物学性质的影响和生态适应性如何一直缺乏研究基础,能够发挥其抗逆性,在土壤环境改善中发挥长期效应,对于科学合理地选择沙地恢复人工林类型,构建人工林恢复模式等均具有重要的科学研究和实际意义。因此,本研究以银川典型沙地人工栽培 4 a 的文冠果、欧李人工种植地为研究对象,综合土壤物理、化学和生物学特征,运用数学分析方法筛选适合的土壤质量评价指标,通过 SQI 计算,对不同人工林地土壤质量进行评价,以期为该地区土壤质量改善、植被恢复树种选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于宁夏回族自治区银川市金凤区良田镇银川植物园内(38°28'N,107°22'E),地处银川腹部沙地,有流动沙丘分布,属于宁夏沙漠化的分布区,天然植被为荒漠草地。海拔 1115 m,属典型的温带大陆性气候,降水少,日照充足,蒸发量大,相对湿度 45%—66%,年均降水量 180 mm,大部分降水集中在 7—9 月,风沙大,冬春季尤其多发大风天气,年均气温 10℃左右,1 月最低-15℃,7 月最高 27.9℃,昼夜温差大,≥10℃年积温在 3000 左右。蒸发量为 1885 mm。主要土壤类型为固定风沙土^[21],较为贫瘠,0—40 cm 土壤 pH 值约 9、有机质约 2 g/kg。

1.2 土样样品采集与测定

本研究选择了研究区内人工种植的欧李和文冠果两种造林类型,以相邻的撂荒地作为对照。其中欧李地为人工种植 4 a 的丛生型灌木林地,统一株行距 0.8 m×1.2 m 种植,文冠果地为人工种植 4 a 的小乔木林地,统一株行距 1 m×1.5 m 种植。撂荒地为一一直未开垦的荒地。样地基本信息见表 1。土壤样品采集时间为 2020 年 7—8 月果实采收后不再进行人工补水 20 d 以上,并避开降雨,即在任何水分补充 20 d 以上时进行采样,以避免水分的淋溶作用,采样深度 0—20、20—40 cm,每个采样点采用五点采样法,形成一个混合样品。将土壤样品装入塑料自封袋内,4℃冰桶保存,并迅速带回实验室。经过去除植物凋落物、根系、石子等杂质,过 2 mm 筛后将每份土样分成两份,一份 4℃保存用于土壤酶活性测定,另一份阴干用于土壤理化性质测定。

表 1 样地基本情况表

Table 1 Information of sample plots

样地类型 Sample type	物种 Species	株高 Height /cm	造林年限 Planting age/a	冠幅 Canopy/cm		郁闭度/% Canopy density
				东-西 East-West	南-北 South-North	
小乔木林地 Dungarunga forest	文冠果 <i>Xanthoceras sorbifolium</i>	150.32	4	46.43	53.23	30.54
灌木林地 Shrub forest	欧李 <i>Cerasus humilis</i>	80.39	4	65.64	62.19	70.48
撂荒地 Abandoned land	-	-	-	-	-	-

土壤含水量采用烘干法。容重和孔隙度采用环刀法^[22]。pH 采用水土比 1:1 电极法,EC 采用电导法^[22]。颗粒组成采用马尔文激光粒度分析法。有机质采用 K₂Cr₂O₇容量法,全氮采用凯氏定氮法,全磷采用 NaOH 碱溶-钼锑抗比色法,全钾采用 NaOH 熔融法测定,速效氮采用 NaOH 碱解法,速效磷采用 NaHCO₃浸提-钼锑

抗比色法,速效钾采用 NH_4OAc 浸提-FP640 型火焰光度计法测定^[23]。采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶、纤维素酶活性,磷酸苯二钠比色法测定碱性磷酸酶活性,苯酚钠-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性^[24]。

1.3 总数据集和最小数据集的构建

将测定的 20 个指标作为总数据集指标,对每个指标进行单因素方差分析 (One-ANOVA),选择具有显著差异的作为重要数据集 (SDS) 指标。对数据进行标准化处理后进行 PCA 分析,并结合 Norm 值,确定进入 MDS 指标。MDS 指标选择原则如下:提取特征值 ≥ 1 的主成分,将指标载荷大于 0.5 的分为一组。如果某一指标在不同主成分中的载荷均大于 0.5,则将其并入与其他指标相关性较低的一组。计算各组指标的 Norm 值,选取每组中 Norm 值在该组中最大 Norm 值的 10% 范围内的指标。如同一组中保留多个指标,则使用 Pearson 相关系数确定是否需要保留每个指标,如指标间相关系数小于 0.5,则所有指标均可保留,如各指标在主成分内显著相关 ($r > 0.5$),则选择 Norm 值最高的指标进入 MDS^[13,25]。

Norm 值的计算公式如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^k (u_{ik}^2 e_k)} \quad (1)$$

式中 N_{ik} 表示第 i 个指标在特征值大于 1 的前 k 个主成分的 Norm 值; u_{ik} 表示第 i 个指标在第 k 个主成分的载荷; e_k 为第 k 个主成分的特征值。

1.4 土壤质量评分模型的构建

指标确定后,使用线性和非线性评分函数法将各指标转换为 0—1 之间的值。根据土壤质量的敏感性,将指标分为两种类型。如果该指标与土壤质量正相关,适用于“越多越好”的评分模型,相反,则适用于“越少越好”的评分模型^[25]。

线性评分模型:

$$S_L = \frac{x - L}{H - L} \quad (2)$$

$$S_L = 1 - \frac{x - L}{H - L} \quad (3)$$

式中 S_L 代表线性评分 (0—1), x 代表指标实测值, L 代表指标最低值, H 代表指标最高值。方程 (3) 为“越多越好”型指标评分函数,方程 (4) 为“越少越好”型指标评分函数。非线性评分模型:

$$S_{NL} = \frac{a}{1 + (x/x_0)^b} \quad (4)$$

式中, S_{NL} 是介于 0—1 之间的土壤指标得分, a 为最大得分, 在这里被确定为 1, x 是土壤实测指标值, x_0 为相应的指标平均值, b 为方程的斜率, “越多越好”类型为 -2.5, “越少越好”类型为 2.5。

1.5 指标权重与 SQI 计算

主成分分析法计算各指标的权重 (权重等于各指标的公因子方差占有所有指标公因子方差之和的比例)^[26]。根据方程 (5) 计算 SQI:

$$\text{SQI} = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i \quad (5)$$

式中 S_i 代表指标得分, n 为指标数量, W_i 代表指标权重值, SQI 越高表示土壤质量越高。

1.6 数据处理

数据统计分析与作图全部采用 SPSS 22.0、Excel 2010, 应用 SPSS 22.0 对数据进行相关性分析、方差分析、主成分分析。

2 结果与分析

2.1 银川沙化土地恢复区人工林地土壤性质比较

各样地各土壤指标特性值如表 2 所示。从物理指标来看, 欧李和文冠果 2 种人工林地的土壤含水量、粉

粒、黏粒均显著高于撂荒地 ($P<0.05$)。欧李地的粉粒百分比最高,砂粒百分比最低,分别为 13.34% 和 72.83%,黏粒百分比略高于文冠果林地,但差异不显著 ($P>0.05$)。欧李地和文冠果地的 pH 值均显著低于撂荒地 ($P<0.05$),电导率则相反,均显著高于撂荒地 ($P<0.05$),但文冠果地和欧李地之间差异不显著 ($P>0.05$)。有机质、全氮、全磷、全钾等主要养分指标中,除了文冠果地的土壤有机质与撂荒地差异不显著外 ($P>0.05$),其余均是欧李地和文冠果地均显著高于撂荒地 ($P<0.05$)。铵态氮、硝态氮、速效磷、速效钾含量之间差异不显著 ($P>0.05$)。从生物酶活性指标来看,欧李地土壤中的脲酶活性、碱性磷酸酶活性、蔗糖酶活性和纤维素酶活性均最高,但只有纤维素酶活性显著高于文冠果地和撂荒地 ($P<0.05$)。

通过方差分析,首先从总数据集(TDS)的 20 个指标中选择具有显著性差异 ($P<0.05$) 的指标有含水量、砂粒、粉粒、黏粒、pH、电导率、有机质、全氮、全磷、全钾、纤维素酶等 11 个。其次,根据土壤质量综合指标敏感度分级标准^[27],变异系数 $\geq 100\%$ 为高度敏感、100%—40%为中度敏感、40%—10%为低度敏感,变异系数 $\leq 10\%$ 为不敏感,可知土壤容重、砂粒、总孔隙度、pH 值 4 个指标变异系数低,均不敏感,不适宜做为土壤质量评价指标。因此将敏感程度分级与方差分析结合,最终筛选出含水量、粉粒、黏粒、电导率、有机质、全氮、全磷、全钾、纤维素酶 9 个指标进入土壤质量评价重要数据集 SDS。

表 2 土壤指标特性值(平均值 $\pm$ 标准误差)Table 2 Statistical characteristic value of soil indicators (Mean $\pm$ SD)

指标 Indicators	灌木林地 Shrub forest	小乔木林地 Dungarunga forest	撂荒地 Abandoned land	变异系数 Coefficient of variation/%	敏感程度 Sensitivity
	欧李 <i>Cerasus humilis</i>	文冠果 <i>Xanthoceras sorbifolia</i>			
含水量 WC/%	13.73 $\pm$ 2.42a	14.08 $\pm$ 1.08a	2.86 $\pm$ 0.41b	59.89	中
容重 BD/(g/cm ³)	1.43 $\pm$ 0.05a	1.36 $\pm$ 0.03a	1.39 $\pm$ 0.03a	5.36	不敏感
砂粒 Sand/%	72.83 $\pm$ 1.76c	78.23 $\pm$ 1.22b	90.77 $\pm$ 0.86a	9.97	不敏感
粉粒 Silt/%	13.34 $\pm$ 1.48a	9.65 $\pm$ 0.94b	3.87 $\pm$ 0.61c	50.48	中
黏粒 Clay/%	13.83 $\pm$ 1.11a	12.12 $\pm$ 0.67a	5.36 $\pm$ 0.68c	36.67	低
总孔隙度 STP/%	46.20 $\pm$ 1.93a	48.89 $\pm$ 1.12a	47.45 $\pm$ 0.92a	5.83	不敏感
pH	8.30 $\pm$ 0.05b	8.41 $\pm$ 0.06b	8.68 $\pm$ 0.04a	2.62	不敏感
电导率 EC/(mS/cm ³)	91.70 $\pm$ 4.43a	90.18 $\pm$ 5.81a	51.70 $\pm$ 7.02b	29.05	低
有机质 TOC/(g/kg)	22.50 $\pm$ 1.22a	16.54 $\pm$ 1.15b	13.44 $\pm$ 2.25b	30.40	低
全氮 TN/(g/kg)	0.70 $\pm$ 0.07a	0.61 $\pm$ 0.08a	0.28 $\pm$ 0.05b	47.55	中
全磷 TP/(g/kg)	0.75 $\pm$ 0.03a	0.71 $\pm$ 0.04a	0.48 $\pm$ 0.03b	22.35	低
全钾 TK/(g/kg)	0.35 $\pm$ 0.02a	0.21 $\pm$ 0.01b	0.11 $\pm$ 0.01c	41.64	中
铵态氮 Ammonia N/(mg/kg)	4.61 $\pm$ 0.31a	5.24 $\pm$ 0.63a	4.54 $\pm$ 0.36a	24.34	低
硝态氮 Nitrate N/(mg/kg)	2.36 $\pm$ 0.41a	1.82 $\pm$ 0.40a	2.82 $\pm$ 0.61a	59.64	中
速效磷 AP/(mg/kg)	6.54 $\pm$ 0.17a	6.98 $\pm$ 0.22a	7.35 $\pm$ 0.92a	17.33	低
速效钾 AK/(mg/kg)	201.25 $\pm$ 11.41a	265.83 $\pm$ 43.58a	240.00 $\pm$ 36.88a	47.05	中
脲酶 UA/(mg/g)	4.89 $\pm$ 0.82a	2.85 $\pm$ 0.60a	3.55 $\pm$ 0.33a	56.05	中
碱性磷酸酶 PPA/(mg/g)	2.19 $\pm$ 0.21a	1.59 $\pm$ 0.45a	1.72 $\pm$ 0.26a	35.66	低
蔗糖酶 SA/(mg/g)	2.89 $\pm$ 0.28a	2.74 $\pm$ 0.24a	2.55 $\pm$ 0.23a	18.14	低
纤维素酶 CEA/(mg/g)	1.53 $\pm$ 0.02a	1.15 $\pm$ 0.12b	0.94 $\pm$ 0.10b	23.58	低

WC: Soil water content; BD: Bulk density; EC: Soil electric conductivity; STP: Total soil porosity; 砂粒: Sand Percentage of soil sand; 粉粒: Silt Percentage of soil silt; 黏粒: Clay Percentage of soil clay; TOC: Organic matter; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; TK: Total potassium; 铵态氮: Ammonia N; 硝态氮: Nitrate N; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium; UA: Urease activity; PPA: Phosphatase activity; SA: Sucrase activity; CEA: Cellulase activity; 不同小写字母表示显著差异水平 ($P<0.05$)

2.2 土壤质量评价指标最小数据集的构建

对筛选的 SDS 的 9 个指标进行主成分分析,选择特征值大于 1 的主成分。结果显示前两个主成分的方差累计贡献率为 77.559%,说明前两个主成分的解释能力较强。将所有指标分为两组,根据 Norm 值计算并得到以下 MDS 初选指标:全磷、黏粒、含水量、粉粒、全钾(表 3),再通过相关性分析(表 4)可知,第一组和第二组中各指标均显著正相关,因此,分别选择各组中 Norm 值最大的全磷、粉粒作为 MDS 指标。

表 3 各指标载荷矩阵和 Norm 值
Table 3 Load matrix and Norm value of each indicator

指标 Indicators	PC1	PC2	分组 Grouping	Norm	最小数据集 MDS
电导率 EC	0.849	-0.081	1	1.073	
全磷 TP	0.833	0.385	1	1.212	是
黏粒 Clay	0.824	0.393	1	1.206	
含水量 WC	0.779	0.397	1	1.153	
全氮 TN	0.738	0.305	1	1.055	
有机质 TOC	-0.031	0.834	2	0.472	
粉粒 Silt	0.604	0.745	2	1.121	是
全钾 TK	0.562	0.713	2	1.054	
纤维素酶 CEA	0.539	0.664	2	1.000	
特征值 Eigenvalue	5.896	1.084	-	-	-
方差贡献率 Variance contribution rate/%	65.517	12.043	-	-	-
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	65.517	77.559	-	-	-

MDS: 最小数据集 Minimum data set

表 4 土壤质量评价指标相关系数矩阵
Table 4 Correlation coefficient matrix of soil quality evaluation indicators

	含水量 WC	粉粒 Silt	黏粒 Clay	有机质 TOC	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	纤维素酶 CEA	电导率 EC
含水量 WC	1.000								
粉粒 Silt	0.778 **	1.000							
黏粒 Clay	0.795 **	0.762 **	1.000						
有机质 TOC	0.322	0.529	0.251	1.000					
全氮 TN	0.461	0.592	0.727 *	0.344	1.000				
全磷 TP	0.800 **	0.877 **	0.796 **	0.200	0.670 *	1.000			
全钾 TK	0.706 *	0.869 **	0.783 **	0.507	0.584	0.688 *	1.000		
纤维素酶 CEA	0.643 *	0.817 **	0.677 *	0.372	0.620 *	0.737 **	0.720 *	1.000	
电导率 EC	0.653 *	0.399	0.564	0.153	0.649 *	0.569	0.411	0.281	1.000

* * $P<0.01$; * $P<0.05$

2.3 基于最小数据集的土壤质量评价

根据 PCA 分析得到各个数据集指标的公因子方差,计算出指标权重(表 5)。通过线性评分模型:公式(2)、(3),非线性评分模型:公式(4),分别将 TDS、SDS、MDS 指标转换为 0—1 之间的分值。其中,土壤 pH、电导率、容重、砂粒、黏粒 5 个指标反映了土壤的酸碱度和通透性,符合“越少越好”型函数,本试验测定的其余指标均是重要的土壤结构和养分指标,符合“越多越好”型函数。计算出各指标得分后,根据公式(5)的加权法计算基于不同数据集的 SQI。

TDS 的 SQI 计算方法为:SQI-LT 或 SQI-NLT=含水量 $\times$ 0.053+砂粒 $\times$ 0.054+粉粒 $\times$ 0.053+黏粒 $\times$ 0.053+pH $\times$ 0.041+电导率 $\times$ 0.053+有机质 $\times$ 0.042+全氮 $\times$ 0.045+全磷 $\times$ 0.047+全钾 $\times$ 0.049+纤维素酶 $\times$ 0.048+速效磷 $\times$ 0.052+速效钾 $\times$ 0.051+铵态氮 $\times$ 0.048+硝态氮 $\times$ 0.053+总孔隙度 $\times$ 0.055+容重 $\times$ 0.055+脲酶 $\times$ 0.053+蔗糖酶 $\times$ 0.045+碱性磷酸酶 $\times$ 0.050。

SDS 的 SQI 计算方法为:SQI-LS 或 SQI-NLS=含水量 $\times$ 0.110+粉粒 $\times$ 0.132+黏粒 $\times$ 0.120+电导率 $\times$ 0.104+有机质 $\times$ 0.100+全氮 $\times$ 0.091+全磷 $\times$ 0.121+全钾 $\times$ 0.118+纤维素酶 $\times$ 0.105。

MDS 的 SQI 计算方法为:SQI-LM 或 SQI-NLM=粉粒 $\times$ 0.500+全磷 $\times$ 0.500。

表 5 土壤质量评价各数据集指标权重值
Table 5 Weight value of each data set of soil quality evaluation

指标 Indicators	总数据集 TDS		重要数据集 SDS		最小数据集 MDS	
	公因子方差 Communality	权重 Weight	公因子方差 Communality	权重 Weight	公因子方差 Communality	权重 Weight
含水量 WC	0.952	0.053	0.765	0.110		
砂粒 Sand	0.964	0.054				
粉粒 Silt	0.945	0.053	0.920	0.132	0.834	0.500
黏粒 Clay	0.940	0.053	0.835	0.120		
pH	0.730	0.041				
电导率 EC	0.957	0.053	0.728	0.104		
有机质 TOC	0.752	0.042	0.697	0.100		
全氮 TN	0.809	0.045	0.638	0.091		
全磷 TP	0.843	0.047	0.842	0.121	0.834	0.500
全钾 TK	0.875	0.049	0.825	0.118		
纤维素酶 CEA	0.853	0.048	0.731	0.105		
速效磷 AP	0.930	0.052				
速效钾 AK	0.917	0.051				
铵态氮 Ammonia N	0.851	0.048				
硝态氮 Nitrate N	0.957	0.053				
总孔隙度 STP	0.988	0.055				
容重 BD	0.985	0.055				
脲酶 UA	0.941	0.053				
蔗糖酶 SA	0.809	0.045				
碱性磷酸酶 PPA	0.893	0.050				

TDS: 总数据集 Total data set; SDS: 重要数据集 Significant data set; MDS: 最小数据集 Minimum data set

由图 1 可知,基于 TDS、SDS、MDS 三个数据集的线性和非线性评分方法得到的不同林地类型 SQI 差异不

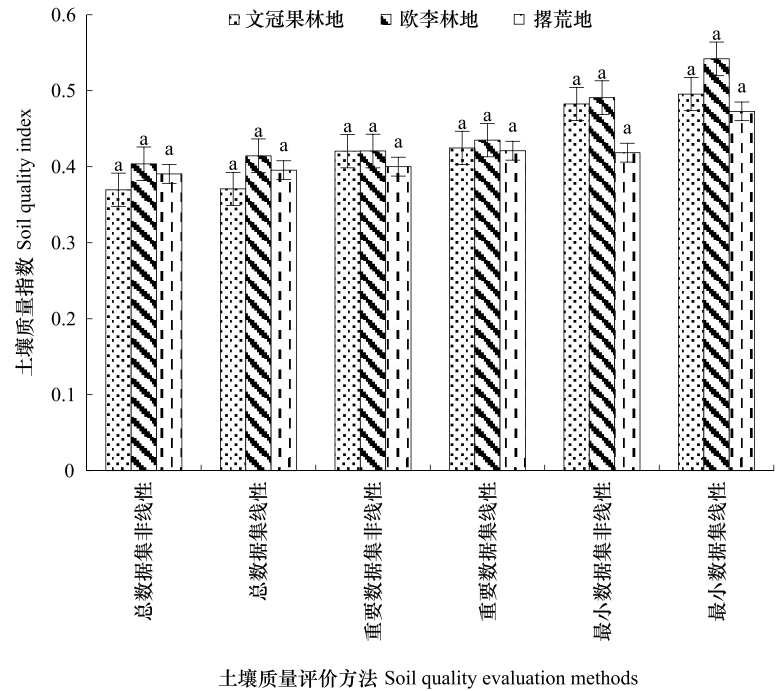


图 1 不同林地类型土壤质量指数
Fig.1 Soil quality index of different forest land types

相同字母表示差异不显著($P<0.05$); 误差线为标准误差值

显著($P>0.05$)。无论线性还是非线性评分方法,基于总数据集 TDS 计算的 SQI 值大小均是欧李地>撂荒地>文冠果地,而基于重要数据集 SDS 和最小数据集 MDS 计算的 SQI 在不同林地类型中的变化情况一致,SQI 值大小排序均为欧李地>文冠果地>撂荒地,说明与撂荒地相比,人工种植文冠果和欧李均提高了土壤质量。在线性和非线性模型中,TDS 和 SDS、SDS 和 MDS 之间的 SQI 相关系数均是非线性高于线性,基于 TDS、SDS、MDS 三个不同数据集计算的 SQI 均是基于 TDS 计算的 SQI 值最小,基于 MDS 的 SQI 值最大。因此,相比于线性方法,基于 MDS 的非线性评分方法得到的 SQI 变化区间和变异系数较大,说明该方法对 SQI 的变化更敏感。Pearson 相关性分析结果表明,6 个 SQI 之间均彼此显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关(表 6),验证了基于 MDS 的 SQI 与基于 SDS 和 TDS 的 SQI 所反映的土壤质量大小一致,其中 SQI-NLM 与 SQI-NLS 之间的相关系数最大,为 0.688,进一步由图 2 所示的 SQI-NLM 与 SQI-NLS 之间的拟合效果可见,最小数据集 MDS 指标可以较好地代替重要数据集 SDS 指标。

表 6 两种评分方法下不同 SQI 相关性
Table 6 Correlation of different SQI under two scoring methods

	SQI-NLT	SQI-LT	SQI-NLS	SQI-LS	SQI-NLM	SQI-LM
SQI-NLT	1.000					
SQI-LT	0.710 **	1.000				
SQI-NLS	0.589 **	0.526 **	1.000			
SQI-LS	0.537 **	0.478 *	0.756 **	1.000		
SQI-NLM	0.403 *	0.432 *	0.688 **	0.476 *	1.000	
SQI-LM	0.435 *	0.507 **	0.460 *	0.488 **	0.719 **	1.00

SQI-NLT: 总数据集非线性 Non-linear scoring-total data set; SQI-LT: 总数据集线性 Linear scoring-total data set; SQI-NLS: 重要数据集非线性 Non-linear scoring-significant data set; SQI-LS: 重要数据集线性 Linear scoring-significant data set; SQI-NLM: 最小数据集非线性 Non-linear scoring-minimum data set; SQI-LM: s 最小数据集线性 Linear scoring-minimum data set

3 讨论

3.1 不同人工林地土壤质量评价指标

人工植被恢复是控制沙化土地水土流失、提高土壤肥力的有效措施。土壤质量评价受到土壤自身特性、土地利用和管理方式、小气候环境等诸多因素影响,土壤的演变和恢复是一个随时间波动且漫长的过程,与土壤的结构和养分状况密切相关^[2, 6]。建立科学合理的土壤评价指标体系是土壤质量评价的关键。但土壤指标众多,不能通过一个或几个指标的高低简单判断土壤质量的优劣,必须根际实际综合考虑。一般对土壤性质的研究认为土壤指标过多反而会影响土壤特性,从而模糊了土壤间的差异,但指标过少,则会降低土壤质量指数对土壤质量变化的敏感性^[16]。土壤质量评价最小数据集 MDS 是目前应用较广的评价指标筛选方法,极大地节约了评价成本。大部分研究所选的指标涵盖了土壤结构、养分、生物学特性等各个方面^[7, 13, 28]。本研究从总数据集 TDS 的 9 个指标中进一步优化选择的最小数据集 MDS 指标有土壤粉粒百分比和全磷含量,这两个指标均是土壤结构和养分重要的表征指标。银川腹部沙地土壤较为贫瘠、砂粒较多、粉粒很少,土壤的保水性非常差,大量的砂粒导致水肥利用效率低,植被生长受到抑制,土壤质量改善缓慢,这是沙化土地质量下降的主要表现^[29]。

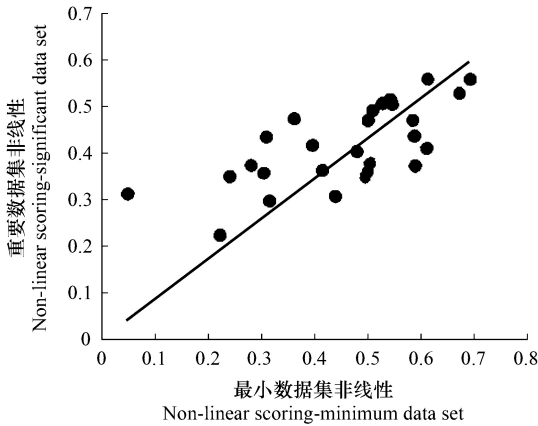


图 2 非线性评分方法下 MDS 和 SDS 之间的拟合趋势

Fig.2 Fitting trends between SQI-NLM and SQI-NLS

SQI-NLS:重要数据集非线性;SQI-NLM:最小数据集非线性

拓飞等^[30]对毛乌素沙地人工种植沙地柏对沙土的特性研究结果表明,研究区土壤粒度组成以砂粒为主,土壤养分含量整体水平低,并在土壤表层聚集,土壤有机质、速效钾和盐分含量与细砂物质(粒径 $<100\ \mu\text{m}$)含量呈线性正相关,与粗砂物质($100\text{—}500\ \mu\text{m}$)呈线性负相关,随着造林年限的增加,土壤颗粒的粗细分配趋于良好,土壤结构优化,所以认为沙地柏可以作为毛乌素沙地生态恢复的优良灌木。林帅等^[31]对鄂尔多斯地区毛乌素沙地杨柴(*Hedysarum mongolicum*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙柳(*Salix cheilophila*)等西北地区主要典型人工林地土壤肥力研究,表明土壤全磷、全氮含量较低,是沙区林地土壤肥力的主要限制因子。刘江等^[32]对库布齐沙漠北缘杭锦旗段柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙柳(*Salix cheilophila*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)和杨柴(*Hedysarum mongolicum*)4种人工灌木林土壤质量评价研究表明,人工灌木林营造改善了土壤理化特征和生物学性质,显著提高了流沙地土壤肥力,其中有机质、速效氮、磷、钾等含量显著高于对照流沙地,各人工灌木林地土壤酶活性均高于流沙地,柠条林地和沙柳林地的建植对土壤酶活性影响较大,但综合土壤肥力表征指数而言,营造柠条林对沙地土壤改良效果最佳。前人大量研究已证实人工植被恢复可以有效提高土壤持水能力和养分,起到改良土壤的作用^[1,17,33]。欧李和文冠果等人工林地的土壤酶活性均高于撂荒地,主要由于林内植被根系的生长、凋落物的分解增加了土壤有机碳的输入^[34—36],尤其文冠果地土壤有机质含量显著高于欧李和撂荒地,说明在一定程度上促进了土壤结构向稳定性转变,土壤中大颗粒的砂粒占比有效减少,而粉粒、黏粒百分比有所增加,说明土壤结构向好转变。这一结论也在前人研究中得到证实^[16, 33]。

3.2 不同人工林地土壤质量

植物的生长离不开为其提供基本生长环境和养分的土壤,而植被在土壤质量恢复过程中也起着关键作用,主要通过根系生长、枯落物的累积和分解等过程与土壤产生互作,有利于土壤恢复的同时促进植被自身生长^[37—38]。张智勇等^[20]在陕北黄土区退耕还林(草)过程中研究发现,降水量、植被类型以及二者的交互作用对土壤指标影响显著。次生植被演替可以改变土壤的功能和质量。基于PCA分析筛选出土壤有机碳、粉砂、速效磷、速效钾、土壤厚度和土壤水分是MDS最具代表性的指标。SQI比较结果表明,次生林的SQI值最高,灌草次之,农田最低,说明了人工造林带来的植被演替对土壤理化性质有着显著影响,进而影响了土壤质量^[39]。然而植被演替是个漫长的生态系统更新恢复过程。Barua等^[40]研究了长期人工种植茶园的土壤质量,认为土层较深、养分含量、排水良好的土壤有利于茶树生长,但较为敏感的指标pH在15 a才能达到稳定,15—30 a的土壤总氮显著升高,可用氮在30—45 a才能达到稳定,而土壤有机碳的恢复则需要45—60 a的连续种植。在广大生态脆弱区,人工植被恢复是较为有效的生态环境改善措施。在晋西北地区研究者们为了探究不同土地管理方式对土壤质量的影响,对不同土地利用方式的质量情况进行了评价,结果表明苜蓿和免耕2种土地管理方式能够显著提高该地区表层土壤养分,并增加土壤酶活性,人工种植苜蓿地土壤质量有所改善^[41]。本研究发现,在同样土壤较为脆弱的银川平原沙化地区,人工营造4 a的文冠果和欧李林地的土壤质量高于撂荒地,说明在土地沙化地区选择文冠果、欧李等抗逆性较强的小乔木或灌木树种进行土壤改良,在保证良好植株生长适应性的基础上,通过植被恢复促进土壤改良是正确的选择,也是十分必要的。文冠果、欧李均是我国西北干旱半干旱地区抗旱、耐寒、耐瘠薄等抗逆能力非常强的树种^[42—43],已被国家林草局列为生态造林先锋树种,近年来在黄土丘陵区水土保持、矿山修复、荒漠地区植被恢复中应用的较多。王鹏飞等^[44]对山西省柳林县黄土丘陵沟壑区人工造林5 a的欧李地土壤质量研究表明,欧李灌丛下土壤pH和全氮、全磷、全钾、速效磷等土壤养分,以及蔗糖酶、碱性磷酸酶等土壤酶活性均高于相同栽培条件下的5 a生油松林地。关炳昌^[45]对山西矿区不同植被恢复模式对土壤有机碳的研究表明,“圆柏+文冠果+欧李”配置模式有利于不同深度土壤有机碳固定。但还未见在西北沙地有关欧李土壤改良方面的研究报道。

在植被恢复区,不同形态特征的不同类型人工林的抗风、固沙、保持水土等生态功能不同^[19,46]。本试验区欧李地的SQI高于文冠果地,分析原因可能与根系和地上生物量积累有关。小乔木型文冠果的株高、地径虽然较高,但文冠果为直根系,对土壤水肥的需求更高,而分蘖能力强、水平根系生长迅速、矮化丛生型的欧李

灌丛的冠幅和郁闭度较高,灌丛形成快,能够更好地拦截地表风力对浅层土壤的破坏,加上土壤浅层致密的根系分布,更有利于积累粉粒^[19,47],提高土壤持水力,改善土壤结构,因此其 SQI 较高。但本试验两种人工林地 SQI 与撂荒地之间差异不显著,虽然通过物理、化学、生物学等共计 20 个常见土壤性质指标的测定,两种人工林地和撂荒地相比,在土壤含水量、总孔隙度、pH、EC 等物理性质,全氮、磷、钾等养分含量,以及纤维素酶活性等指标均存在一定的显著差异,但利用不同评分方法,基于不同数据集得到的土壤质量指数之间均没有显著差异,也证实了土壤性质的复杂性以及不能单一的或者仅凭个别指标界定土壤质量的高低。分析原因除了与该地区长期土壤贫瘠、养分含量较低等客观自然因素有关外,与人工种植的文冠果和欧李及其林下植被生长年限较短有着直接的关系。在土壤环境较差的条件下,人工文冠果和欧李种植相比撂荒地在短期内对土壤较为敏感的酸碱度、含水量、酶活性等指标产生了影响,但这种影响并没有对土壤结构和质量发挥足够的作用,促使土壤养分提高、环境改善。植被的演替及其对土壤的影响还需长期观测,从植被-土壤相互作用角度深入探索。

4 结论

研究通过 PCA 分析结合 Norm 值优化筛选出的银川平原沙化土地文冠果、欧李和撂荒地三种类型土壤质量评价最具代表性的 MDS 指标为粉粒百分比和全磷含量。较大程度地减少了土壤质量评价的工作量。并利用线性与非线性两种评分方法,基于不同数据集进行了 SQI 计算,结果表明该试验区文冠果和欧李人工林地的 SQI 高于撂荒地,基于 MDS 的非线性土壤质量评价方法更适用于研究区三种类型土壤质量评价。在银川平原沙化土地进行文冠果和欧李人工林营造,在一定程度上有利于土壤质量提高。本研究对银川平原沙化土地进行文冠果、欧李等人工林栽培管理及类似地区人工植被恢复具有一定的借鉴意义。人工林营造和植被恢复需要长期跟踪,沙化土壤改良也不会短期内见效,植株生长除了土壤环境外,还受到气候因子、林下草本等植被特性的影响,对于文冠果、欧李等新型生态经济树种的栽培和应用还处于研究初级阶段,今后可从不同林龄、不同土层深度、结合生长环境因子等多角度开展深入研究。

参考文献 (References):

- [1] Rattan L. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 2015, 7(5): 5875-5895.
- [2] 张桃林. 守护耕地土壤健康 支撑农业高质量发展. *土壤*, 2021, 53(1): 1-4.
- [3] Li J Y, Yang X C, Jin Y X, Yang Zh, Huang W G, Zhao L N, Gao T, Yu H D, Ma H L, Qin Z H, Xu B. Monitoring and analysis of grassland desertification dynamics using Landsat images in Ningxia, China. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 138(6): 19-26.
- [4] 李白云, 李慧, 郭鑫年, 孙娇, 梁锦秀, 龙怀玉, 周涛. 基于最小数据集的宁夏耕地土壤质量评价. *江苏农业科学*, 2021, 49(9): 195-201.
- [5] 罗雅曦, 刘任涛, 张静, 常海涛. 腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 525-535.
- [6] Bünenmann E K, Bongiorno G, Bai Z, Creamer RE, Brussaard L. Soil quality—a critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 105-125.
- [7] Es H V. Soil health assessment approaches and the Cornell Framework. *Egu General Assembly Conference*, 2016.
- [8] Yu P J, Liu S W, Zhang L, Li Q, Zhou D W. Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China. *Science of the Total Environment*, 2018, 616-617: 564-571.
- [9] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 刘益军, 姜义宝, 杨旭. 基于聚类及 PCA 分析的红壤耕地耕层土壤质量评价指标. *农业工程学报*, 2018, 34(7): 155-164.
- [10] Leeuwen J P V, Creamer R E, Cluzeau D, Debeljak M, Rutgers M. Modeling of soil functions for assessing soil quality: soil biodiversity and habitat provisioning. *Frontiers in Environmental Science*, 2019, 7:00113.
- [11] Adebo B O, Aweto A O, Ogedengbe K. Assessment of soil quality under different agricultural land use systems: a case study of the Ibadan farm settlement. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2020, (5): 89-104.
- [12] Panday D, Ojha R B, Chalise D, Saurav D, Bikesht T. Spatial variability of soil properties under different land use in the Dang district of Nepal. *Cogent Food and Agriculture*, 2019, 5(1): 1600460.
- [13] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 张燕江, 崔勇兴, 朱世雷. 基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价. *农业工程学报*, 2019, 35(16): 265-273.

- [14] 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. 水土保持研究, 2019, 26(5): 60-67.
- [15] 赵娜, 孟平, 张劲松, 陆森, 程志庆. 华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价. 应用生态学报, 2014, 25(2): 351-358.
- [16] 刘昊, 杨董琳. 不同森林类型林地土壤质量评价研究. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(4): 607-614.
- [17] Moffat A J. Indicators of soil quality for UK forestry. Forestry, 2003, 76(5): 547-568.
- [18] Nakajima T, Lal R, Jiang S. Soil quality index of a crosby silt loam in central Ohio. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 323-328.
- [19] Li Q X, Jia Z Q, Liu T, Feng L L, He L X Z. Effects of different plantation types on soil properties after vegetation restoration in an alpine sandy land on the Tibetan Plateau, China. Journal of Arid Land, 2017, 9(2): 200-209.
- [20] 张智勇, 刘广全, 艾宁, 刘长海, 宗巧鱼, 郝宝宝, 刘姣. 吴起县退耕还林后主要植被类型土壤质量评价. 干旱区资源与环境, 2021, 35(2): 81-86.
- [21] 张秀珍, 刘秉儒, 詹硕仁. 宁夏境内 12 种主要土壤类型分布区域与剖面特征. 宁夏农林科技, 2011, 52(9): 48-50, 63.
- [22] Liu X, Zhang G C, Gary C, Wang Y Q, Huang C H. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China. Geoderma, 2009, 154: 123-130.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [25] Zhou Y, Ma H B, Xie Y Z, Jia X Y, Su T T, Li J P, Shen Y. Assessment of soil quality indexes for different land use types in typical steppe in the loess hilly area, China. Ecological Indicators, 2020, 118: 106743.
- [26] 陈正发, 史东梅, 金慧芳, 姜义宝, 何伟, 夏建荣. 基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价. 农业工程学报, 2019, 35(3): 256-267.
- [27] 卜耀军, 朱清科, 包耀贤, 赵维军, 赵彦敏, 张宏芝. 陕北黄土区微地形土壤质量指标变异性及敏感性. 水土保持学报, 2014, 28(3): 153-157.
- [28] Nehrani S H, Askari M S, Saadat S, Delavar M A, Taheri M, Holden N M. Quantification of soil quality under semi-arid agriculture in the northwest of Iran. Ecological Indicators, 2020, 108: 105770.
- [29] 杨梅焕, 曹明明, 朱志梅, 邱海军. 毛乌素沙地东南缘沙漠化过程中土壤理化性质分析. 水土保持通报, 2020, 30(2): 169-172.
- [30] 拓飞, 董治宝, 南维鸽, 杨树俊, 武玉叶, 李强. 沙地柏人工林和天然林风沙土特性研究. 水土保持学报, 2021, 28(2): 80-87.
- [31] 林帅, 闫伟, 贾学文, 闫海霞, 刘泽昊, 白淑兰. 毛乌素沙地不同林型下土壤肥力综合评价. 北方园艺, 2019, 15: 91-98.
- [32] 刘江, 袁勤, 张立欣, 代香荣, 刘向阳, 丁茹, 叶丽娜. 库布齐沙漠北缘不同人工灌木林地土壤肥力质量状况. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 46-53.
- [33] 李洁, 滑磊, 任启文, 孙杰肖, 马香玲. 冀西北 3 种植被恢复类型土壤理化性质差异及肥力评价. 生态环境学报, 2020, 29(8): 1540-1546.
- [34] 郑明新, 黄钢, 彭晶. 不同生长期多花木兰根系抗拉拔特性及其根系边坡的稳定性. 农业工程学报, 2018, 34(20): 175-182.
- [35] 王忠禹, 刘国彬, 王兵, 汪建芳, 肖婧, 李兆松. 黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性. 生态学报, 2019, 39(7): 2416-2425.
- [36] 文志, 赵赫, 刘磊, 王丽娟, 欧阳志云, 郑华, 李彦旻. 基于土地利用变化的热带植物群落功能性状与土壤质量的关系. 生态学报, 2019, 39(1): 371-380.
- [37] Chen C, Liu W, Jiang X, Wu J N. Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: Implications for land use. Geoderma, 2017, 299: 13-24.
- [38] Giweta M. Role of litter production and its decomposition, and factors affecting the processes in a tropical forest ecosystem: a review. Journal of Ecological and Environment, 2020, 44(8): 339-360.
- [39] Zhang Y H, Xu X L, Li Z W, Xu C H, Luo W. Improvements in soil quality with vegetation succession in subtropical China karst. Science of the Total Environment, 2021, 775: 145876.
- [40] Baruah N, Medhi B K, Swami S, Thakuria R K, Borkotoki B. Soil quality index as affected by temporal long term tea cultivation in Jorhat District of Assam. Journal of Environmental Biology, 2020, 41(6): 1685-1695.
- [41] 刘爽, 王雅, 刘兵兵, 刘海龙, 刘勇. 晋西北不同土地管理方式对土壤碳氮、酶活性及微生物的影响. 生态学报, 2019, 39(12): 4376-4389.
- [42] 梁维坚. 中国果树科学与实践. 西安: 陕西科学技术出版社, 2015.
- [43] 李金峰, 刘林, 薛丽萍, 孙雁君, 杜俊杰, 王鹏飞. 黄土丘陵沟壑区欧李人工林对坡面土壤分形特征及可蚀性的影响. 水土保持通报, 2017, 37(2): 21-26.
- [44] 王鹏飞, 贾璐婷, 杜俊杰, 张建成, 穆霄鹏, 丁伟. 黄土丘陵沟壑区欧李栽植对土壤质量改良作用的评价. 草业学报, 2017, 26(3): 65-74.
- [45] 关炳昌, 刘家豪, 朱宇恩, 李华. 矿区恢复植被配置模式对土壤碳库与生物多样性的影响. 山西大学学报(自然科学版). 2020, 43(1): 196-205.
- [46] Bochet E, Rubio J L, Poesen J. Modified topsoil islands within patchy Mediterranean vegetation in SE Spain. Catena, 1999, 38(1): 23-44.
- [47] Luo Y Q, Zhao X Y, Andr n O, Zhu Y C, Huang W D. Artificial root exudates and soil organic carbon mineralization in a degraded sandy grassland in northern China. Journal of Arid Land, 2013, 6(4): 423-431.