

典型喀斯特山区无籽刺梨基地土壤质量评价

李婕羚^{1,2}, 李朝婵¹, 胡继伟¹, 全文选¹

(1. 贵州师范大学 贵州省山地环境信息系统与生态保护重点实验室,
贵阳 550001; 2. 贵州师范大学 喀斯特研究院, 贵阳 550001)

摘 要:以贵州省兴仁县回龙镇无籽刺梨种植基地为研究对象,综合考虑表征土壤物理、化学和生物学性质的 16 个土壤指标,利用数理统计方法确定最小数据集并评价土壤质量,同时根据划分样方所在坡位的不同,对其相应的土壤质量评价结果进行了对比分析。结果表明:(1) 研究区土壤质量评价适用的最小数据集(MDS)包括土壤有机质、pH 值、全钾、水解氮、真菌和磷酸酶;(2) 研究区上坡位、中坡位和下坡位土壤质量属于中等及以下水平,SQI 依次为 0.544,0.408,0.503;(3) 影响该地区土壤质量的重要指标为土壤有机质和土壤真菌数量。

关键词:土壤质量评价; 最小数据集; 喀斯特山区; 坡地; 无籽刺梨

中图分类号:S158.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)01-0054-07

Soil Quality Assessment of *Rosa Sterilis* S. D. Shi Planting Bases in Typical Karst Mountain Region of Guizhou, China

LI Jieling^{1,2}, LI Chaochan¹, HU Jiwei¹, QUAN Wenxuan¹

(1. Key Laboratory of Plant Physiology and Developmental Regulation of Guizhou, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Institute of China Karst, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Soil erosion and rock-desertification are severe in Guizhou. The planting base of *Rosa sterillis* which is located in Huilong Town, Xinren County, Southwest of Guizhou Province was taken as the study site. Mathematical statistics method was utilized to determine minimum data sets and soil qualities were also evaluated based on 16 soil physical, chemical and biological property indicators. According to quadrats on different slope positions, the comparative analysis of corresponding soil quality evaluation results was carried out. The results showed that: (1) the minimum data sets of soil quality assessment in 16 research areas included soil organic matter, pH Value, total potassium, hydrolyzable nitrogen and phosphatase; (2) the soil qualities of upper slope, the middle slope and lower slope were determined at intermediate and lower levels, soil quality indices were 0.544, 0.409 and 0.503, respectively; (3) the important indexes affecting soil quality were soil organic matter and soil fungi amount.

Keywords: soil quality assessment; minimum data sets (MDS); typical karst mountain region; slope; *Rosa sterilis* S. D. Shi

贵州喀斯特山区是我国水土流失以及石漠化较为严重的地区,水土流失面积高达 40% 以上,石漠化面积高达 73.8% 以上^[1],研究区兴仁县回龙镇位于贵州省石漠化分布最集中、面积最大、程度最高的黔西南州辖区,为滇黔桂石漠化片区重点治理县,同时又是国家扶贫开发工作重点县^[2],全县受石漠化影响区域(包括轻度、中度和重度石漠化区)达到其总面积

的 40% 以上^[3]。无籽刺梨(*Rosa Sterilis* S. D. Shi)系蔷薇科蔷薇属的一种浅根性果树,为贵州特有种,因其具有速生,易繁殖,经济价值高等特点被广泛引种栽种。研究区为典型的喀斯特山区,是无籽刺梨发源地,在长期种植无籽刺梨过程中,生态环境和单位面积土地的经济效益有显著提升。已有研究表明,喀斯特石漠化地区土地利用方式和人为生产经营活动方

收稿日期:2016-05-26

修回日期:2016-06-16

资助项目:贵州师范大学研究生创新基金(研创 2015[19]);贵州省农业科技攻关项目(黔科合 NY 字[2015]3022-1 号);贵州师范大学博士科研基金

第一作者:李婕羚(1991—),女,山西忻州人,硕士研究生,研究方向为喀斯特地区生态修复与区域经济。E-mail:lijieling1203@163.com

通信作者:全文选(1984—),男,河南鲁山人,在读博士,讲师,研究方向为经济林培育。E-mail:wenzuanq@gznu.edu.cn

式及干扰程度对石漠化土壤质量的恢复和重建有明显的积极作用^[1,4]。目前,关于喀斯特地区土壤质量研究主要集中于喀斯特坡地石漠化以及水分变异规律^[5-6]和土地利用方式对土壤养分影响的研究^[7-10]。喀斯特无籽刺梨种植基地土壤质量研究主要有:土壤重金属评价^[11]、土壤肥力评价^[12]、土壤有效养分^[13]以及土壤酶与养分之间关系^[14-15],选取的评价因子较为单一。土壤质量响应于内外因素的综合影响^[16-17],喀斯特山区土壤生态环境本身十分脆弱,石漠化呈不断发展的态势,对石漠化防护和控制一直是当地生态环境研究的热点、难点。改善区域生态环境的首要因素就是了解当地的土壤环境状况,土壤质量评价是喀斯特地区土地资源可持续利用与管理的重要内容,直接关系到土壤承载力和环境恢复力^[18]。本研究基于前期对无籽刺梨种植基地土壤质量研究的基础上,以无籽刺梨发源地单一土地利用方式坡地为研究对象,筛选适当的土壤质量评价指标对不同坡位土壤质量进行评价,为研究区拟定合理的土地可持续利用措施提供借鉴。

最小数据集(MDS)是可以反映土壤质量最小的指标参数的集合,是国内外学者在土壤质量评价及监测工作中广泛应用的土壤质量评价参数选取方法^[19-22]。目前该方法已被广泛应用于不同气候区、不同土壤类型以及不同轮作类型的农田土壤质量评价^[20-23]。本研究从土壤物理指标、化学指标和生物指

标等方面选取候选指标,结合模糊数学的方法,引入 Norm 值以避免仅用因子载荷作为唯一选择标准而导致的部分因子被忽略的缺点^[24-25],构建研究区土壤评价的 MDS。不仅有利于掌握研究区土壤质量现状,也是对喀斯特土壤生态应用研究的补充,为喀斯特山区石漠化治理和水土保持提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省黔西南州兴义市兴仁县回龙镇,经纬度位置为:25°29. 244′—25°29. 602′N,105°29. 035′—105°29. 242′E,平均海拔 1 426 m,气候类型属于亚热带高原季风湿润性气候,年均温 15℃,降水量 1 178 mm。研究区土壤类型为亚热带常绿阔叶林红、黄壤地带,石灰岩母质发育,属于高原岩溶山区,裸露石山面积大。该地区是国家科技部划定的石漠化工程治理区,近年来在石漠化治理过程中,无籽刺梨的生态价值和经济价值被不断挖掘,种植规模持续扩大并形成示范效应。

1.2 样品采集

采样点位于贵州省兴仁县回龙镇,采样时间 2015 年 7 月中下旬,样地面积大约 59 000 m²,划分为 17 个 20 m×20 m 的网格,按五点混合法采集各网格土壤表层 0—20 cm 的样品,土样风干,去除植物根系、石块,研磨过筛以供分析测定。

表 1 研究区概况及基本采样信息

坡位	样方数/个	海拔/m	坡向	坡度/(°)	生境
上坡位	5	1481~1504	东南	20~22	裸岩面积较大;几无伴生种
中坡位	6	1444~1452	东南	15~20	几无裸岩;耐旱、耐瘠薄植物少许;偶有少许烟草种植
下坡位	6	1412~1430	东南	8~15	无裸岩;有人工种植的烟草

1.3 分析方法

综合考虑土壤物理、化学和生物学性质,共选取 17 个指标,包括:土壤含水量、土壤容重、土壤田间持水量、pH 值、有机质、全氮、全钾、全磷、有效磷、水解氮、速效钾、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、真菌、细菌和放线菌。其中,土壤含水量采用烘干法,土壤容重和田间持水量采用环刀法,pH 值采用玻璃电极法(水土比为 5 : 1),土壤有机质、全氮、全钾和全磷含量测定分别采用重铬酸钾氧化——外加热法、半微量凯氏定氮法、氢氧化钠熔融——火焰光度计法、高氯酸—硫酸——钼锑抗比色法,测定土壤水解氮、速效磷、速效钾分别采用碱性扩散法、HCl—H₂SO₄ 双酸浸提法、乙酸铵浸提——火焰光度法;酶活性参见《土壤酶及其研究法》^[26],微生物参见《土壤微生物生物量测定方法及其应用》^[27]。对各指标进行三次平行测定,结果取其

平均值。

1.4 数据分析

试验数据采用 SPSS 19. 0 对兴仁县回龙镇无籽刺梨种植基地土壤各项指标进行正态性检验、LSD 分析等;运用主成分分析计算各土壤指标在所有特征值≥1 的主成分(PC)上的载荷,据此将同一 PC 中载荷≥0. 5 的土壤指标分为一组,若某土壤指标同时在两个 PC 中载荷均大于 0. 5,则将该参数归并入与其他参数相关性较低的一组;通过公式(1)分别计算各组指标的 Norm 值,选取每组中 Norm 值在最高总分值 10%范围内的指标,进一步分析每组中所选取指标间的相关性,若高度相关($r>0. 5$)则确定分值最高的指标进入 MDS,从而获得最终的 MDS。

$$N_{ik}=\sqrt{\sum_{i=1}^k(u_{ik}^2\lambda_k)}$$

(1)

式中:Norm 值越大,解释综合信息的能力越完全,用 N_{ik}

表示; N_{ik} 为第 i 个变量在特征值 >1 的前 k 个主成分上的综合载荷; u_{ik} 为第 i 个变量在前 k 个主成分上的载荷; λ_{ik} 为第 i 个变量在前 k 个主成分上的特征值。

土壤质量评价采用土壤质量评价分值来计算:

$$SQI=\sum_{i=1}^nW_i\times N_i\tag{2}$$

式中: W_i 为权重,是主成分分析中第 i 个指标所在 PC 的方差贡献率与特征值大于 1 的所有 PC 的方差贡献率总和比值,数值在 0~1.0 之间; N_i 为各指标隶属度,隶属度函数一般分为升型和降型两种,最小数据集集中各指标根据其对土壤质量的正负效应确定相应的函数类型,各指标的最小值和最大值分别为函数的转折点 x_1 和 x_2 。

升型隶属函数公式:

$$f(x)=\begin{cases}0.1 & x\leq x_1 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1<x<x_2 \\ 1.0 & x\geq x_2\end{cases}\tag{3}$$

降型隶属函数公式:

$$f(x)=\begin{cases}0.1 & x\geq x_2 \\ 0.9(x_2-x)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1<x<x_2 \\ 1.0 & x\leq x_1\end{cases}\tag{4}$$

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质和生物学性质的统计特征

研究区根据各网格所处位置的不同,分为上、中、下三个坡位,土壤物理指标选取土壤含水量、土壤容重和土壤田间持水量;养分指标选取 pH 值、有机质、全氮、全钾、全磷、有效磷、水解氮和速效钾;生物指标选取蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、真菌、细菌和放线菌。由表 2 可知,土壤物理性质在种植基地上坡位土壤含水量明显低于中、下坡位($p<0.05$),下坡位土壤容重显著大于上坡位和中坡位($p<0.05$),各坡位田间持水量无显著差异;在土壤化学性质方面,pH 值、有机质、全氮、全钾、有效磷和速效钾在各坡位均无显著差异,中坡位和下坡位的全磷含量显著高于上坡位,下坡位的水解氮含量显著高于中坡位和上坡位($p<0.05$);在土壤生物指标方面,各坡位脲酶活性均存在显著性差异,其他各指标均无显著性差异。

2.2 土壤质量评价最小数据集的构建

用拟选取的 17 个指标做因子分析,结果显示为非正定矩阵,因此无法得到 KOM 值和 Bartlett 球形检验。将土壤含水量指标剔除,定义 X_1-X_{16} 依次为土壤容重、土壤田间持水量、pH 值、有机质、全氮、全

钾、全磷、有效磷、水解氮、速效钾、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、真菌、细菌和放线菌,并进行因子分析,检验结果显示, $KMO=0.316$, $Sig.=0.002$ 小于显著水平 0.05,较适合做主成分分析。

表 2 不同坡位土壤物理、化学和生物性质

属性	土壤指标	上坡位	中坡位	下坡位
物理	土壤含水量/%	16.76a	22.98b	25.40b
	土壤容重/(g·cm ⁻³)	1.09a	1.25a	1.52b
	土壤田间持水量/%	46.68a	37.52a	43.07a
	pH 值	7.12a	7.06a	6.60a
	有机质/(g·kg ⁻¹)	33.94a	24.30a	27.28a
化学	全氮/(g·kg ⁻¹)	1.79a	1.84a	1.48a
	全钾/(g·kg ⁻¹)	9.98a	8.65a	11.40a
	全磷/(g·kg ⁻¹)	0.25a	0.41b	0.44b
	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	3.65a	6.43a	6.87a
	水解氮/(mg·kg ⁻¹)	80.94a	55.78a	114.67b
生物	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	7.97a	8.89a	9.95a
	蔗糖酶/mg	0.94a	1.10a	1.11a
	脲酶/(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	39.87a	33.81b	25.40c
	磷酸酶/(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	1.81a	1.45a	1.53a
	真菌/10 ⁵ g	2.66a	2.15ab	1.69b
	细菌/10 ⁷ g	3.11a	2.75ab	2.22b
	放线菌/10 ⁶ g	2.45a	2.05a	1.88a

注:表内同行数字后不同英文字母表示差异达到显著水平, $p\leq0.05$ 。

主成分分析结果表明,前 5 个主成分特征值均大于 1,累计贡献率为 87.33%,根据前述方法将各指标划分为 5 组(表 3),研究区的土壤质量评价指标筛选结果为:脲酶、真菌、有机质、pH 值、全钾、水解氮和磷酸酶。其中脲酶和真菌同属于 PC_1 ,水解氮和磷酸酶属于 PC_5 ,相关分析结果显示(表 4),研究区 X_{12} 与 X_{14} 显著相关($p<0.01$),由上述两指标 Norm 值比较结果可知: $N_{X14}>N_{X12}$,故, X_{14} 进入 MDS; X_9 与 X_{13} 之间无显著相关关系,故两者均进入 MDS。最终,研究区土壤质量评价 MDS 保留了有机质、pH 值、全钾、水解氮、真菌和磷酸酶 6 个指标。

2.3 土壤质量评价

有机质、pH 值、全钾、水解氮、真菌和磷酸酶 6 个指标进入 MDS,因各指标的量纲不同,本研究在对 该研究区土壤进行质量评价之前选取隶属度函数对 MDS 进行标准化处理。在喀斯特山区,由于特殊的地理环境造成水土流失、石漠化严重,土壤性质对环境的变化较为敏感,研究区土壤养分变异较大和生物活性指标不足,直接影响了土壤的总体质量,淋溶作用较强的地方其盐基性也强,从而影响其 pH 值,降低土壤质量^[28-31]。因此,上述 6 个指标中,有机质、全钾、水解氮、真菌和磷酸酶属于正效应指标,pH 值属于负效应指标。按照各指标分属函数及权重(表 5),

结合公式(2)计算不同坡位土壤质量评价结果,上坡位、中坡位和下坡位土壤质量评价分值分别为0.544±0.065,0.408±0.055,0.503±0.053(图 1)。不同坡位土壤质量存在一定的差异,上坡位、下坡位土壤质量均处于中等水平;上坡位土壤质量优于下坡位,中坡位土壤质量最低,土地质量总体偏低。

表 3 土壤因子主成分分析及 Norm 值计算结果

项目	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	PC ₅	分组	Norm 值
合计	4.8196	3.3859	2.3126	1.681	1.187	—	—
方差%	31.7313	21.2239	14.4408	10.3328	7.3972	—	—
累积%	30.1228	54.4812	67.7358	77.9231	87.3317	—	—
主成分载荷矩阵							
X ₁	−0.841	0.180	−0.351	0.220	−0.053	1	1.94
X ₂	0.255	0.757	0.185	−0.171	0.265	2	1.55
X ₃	−0.498	−0.392	0.671	−0.072	0.114	3	1.62
X ₄	0.255	0.863	−0.182	−0.065	−0.083	2	1.69
X ₅	0.092	0.659	0.313	0.465	0.098	2	1.42
X ₆	0.128	−0.454	0.137	0.775	−0.084	4	1.32
X ₇	−0.791	0.313	0.221	0.068	−0.137	1	1.85
X ₈	−0.430	−0.169	−0.587	−0.035	−0.263	3	1.33
X ₉	−0.324	−0.011	−0.435	0.450	0.598	5	1.27
X ₁₀	−0.215	−0.606	0.419	0.215	0.184	2	1.38
X ₁₁	−0.584	−0.191	0.459	−0.501	0.039	1	1.60
X ₁₂	0.872	−0.102	0.071	0.023	−0.224	1	1.92
X ₁₃	0.570	−0.346	−0.244	−0.326	0.552	5	1.60
X ₁₄	0.853	−0.313	−0.017	0.043	0.117	1	1.94
X ₁₅	0.658	−0.189	0.143	0.139	−0.380	1	1.55
X ₁₆	0.247	0.594	0.527	0.176	0.133	2	1.45

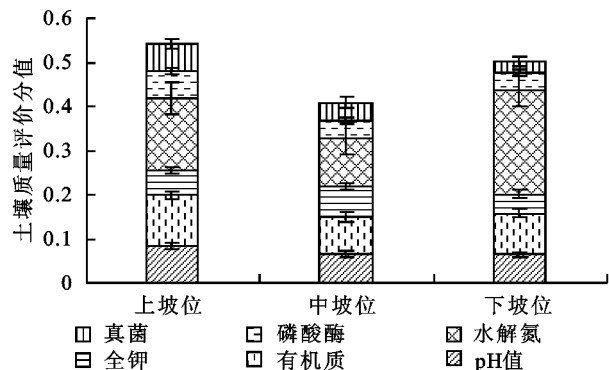
表 4 同一主成分因子中多个高载荷变量因子相关性分析

PC ₁	X ₁₂	X ₁₄	PC ₅	X ₉	X ₁₃
X ₁₂	1	0.723 * *	X ₉	1	0.078
X ₁₄	0.723 * *	1	X ₁₃	0.078	1

注: * * 表示 $p<0.01$ 。

表 5 土壤质量评价指标权重及其隶属函数

指标	权重系数	所属函数	
pH 值	0.17	$f(x)=\begin{cases} 0.1 & x\geq x_{7.53} \\ 0.9(x_{7.53}-x)/(x_{7.53}-x_{5.37})+0.1 & x_{5.37}<x<x_{7.53} \\ 1.0 & x\leq x_{5.37} \end{cases}$	$x\geq x_{7.53}$
			$x_{5.37}<x<x_{7.53}$
			$x\leq x_{5.37}$
有机质	0.24	$f(x)=\begin{cases} 0.1 & x\leq x_{6.21} \\ 0.9(x-x_{6.21})/(x_{71.27}-x_{6.21})+0.1 & x_{6.21}<x<x_{71.27} \\ 1.0 & x\geq x_{71.27} \end{cases}$	$x\leq x_{6.21}$
			$x_{6.21}<x<x_{71.27}$
			$x\geq x_{71.27}$
全钾	0.12	$f(x)=\begin{cases} 0.1 & x\leq x_{5.3} \\ 0.9(x-x_{5.3})/(x_{16.64}-x_{5.3})+0.1 & x_{5.3}<x<x_{16.64} \\ 1.0 & x\geq x_{16.64} \end{cases}$	$x\leq x_{5.3}$
			$x_{5.3}<x<x_{16.64}$
			$x\geq x_{16.64}$
真菌	0.36	$f(x)=\begin{cases} 0.1 & x\leq x_{1.3} \\ 0.9(x-x_{1.3})/(x_{3.31}-x_{1.3})+0.1 & x_{1.3}<x<x_{3.31} \\ 1.0 & x\geq x_{16.64} \end{cases}$	$x\leq x_{1.3}$
			$x_{1.3}<x<x_{3.31}$
			$x\geq x_{16.64}$
水解氮	0.09	$f(x)=\begin{cases} 0.1 & x\leq x_{21.66} \\ 0.9(x-x_{21.66})/(x_{174.14}-x_{21.66})+0.1 & x_{21.66}<x<x_{174.14} \\ 1.0 & x\geq x_{174.14} \end{cases}$	$x\leq x_{21.66}$
			$x_{21.66}<x<x_{174.14}$
			$x\geq x_{174.14}$
磷酸酶	0.09	$f(x)=\begin{cases} 0.1 & x\leq x_{1.01} \\ 0.9(x-x_{1.01})/(x_{2.23}-x_{1.01})+0.1 & x_{1.01}<x<x_{2.23} \\ 1.0 & x\geq x_{2.23} \end{cases}$	$x\leq x_{1.01}$
			$x_{1.01}<x<x_{2.23}$
			$x\geq x_{2.23}$



注:堆叠图代表 MDS 中各变量加权得分的综合值;误差栏表示总指数的标准偏差值。

图1 无籽刺梨种植基地不同坡位土壤质量评价

3 讨论与结论

土壤质量现状在土地利用方式一致的情况下,是土壤物理、化学和生物因素共同作用的结果。不同坡位间土壤质量差异性往往还受环境因素和随机因素的影响,单纯地考虑某些指标要素很难充分说明实际问题,需结合研究区特殊性分析。

3.1 不同坡位对土壤物理化学指标的影响

表2显示,研究区上坡位有机质、全钾和水解氮3项指标均优于中坡位,其中上坡位有机质含量最高,全钾和水解氮含量下坡位优于上坡位。研究区当前生态环境状况为上坡位裸岩率较高,植被覆盖率较低,该现象在岩溶地区较为普遍。岳跃民等通过典范对应分析(CCA)综合研究喀斯特地区土壤性质和环境因子之间的关系表明:由于喀斯特地区脆弱的生态环境,土地利用方式是影响土壤性质的主要因素,裸岩率等次之^[32]。结合岩溶坡地地表水文过程原理,地表岩石裸露的过程也是土壤和养分物质在石面的侵蚀并在缝隙和石槽中沉积的过程,加之裸岩区域土体较少,作物生长受到限制,相对于被土壤覆盖区域,生物量的移出相对较小。侵蚀和移出的双重作用可能造成岩石裸露高的地段土壤养分偏高^[28]。

研究区中、下坡位由于人为干扰,土壤的水、热、汽状况发生较大的变化,土壤有机质分解加剧,含量明显降低,反过来又影响到土壤的理化性质^[33]。无籽刺梨种植地上坡位人为干扰小,所以其土壤田间持水量、土壤容重和土壤有机质含量均优于中坡位和下坡位。该结果与前人研究一致。另外,土壤有机质分解加快过程中,常伴随着相对强烈的碳、氮矿化作用,释放出的速效氮等有效养分可以补充植物生长需求,可能是导致下坡位水解氮含量明显高于中坡位和上坡位的主要原因^[34]。土壤钾主要源于土壤母质,

可溶性钾随着地表水由较高地段流向较低地段并在较低地段积累,较低坡位土层较厚,植被的丰富度也较优,加强了对钾的固定,从而表现出有中坡位开始随坡位自上而下的变化全钾呈增加趋势^[35]。种植基地土壤 pH 值由下坡位至上坡位呈递增趋势,可能由于地势高的地方淋溶作用较强,因而盐基性也较强^[28],导致上坡位土壤 pH 值较高;种植地区表层根系生物量和枯枝落叶层分解也是造成 pH 值发生变化的原因,由于中、下坡位较上坡位表层有较多的根系分布,根系呼吸产生的 CO_2 ,根分泌的有机酸和 H^+ 及凋落物分解过程产生的酸性物质致使土壤 pH 值降低^[35]。

3.2 不同坡位对土壤生物学指标影响

土壤微生物和土壤酶是土壤生态系统的重要组成部分,参与土壤中许多重要的生物化学过程和物质循环,如枯落物分解、土壤养分的固定和释放、直接参与土壤营养元素有效化的过程、催化土壤中众多生物化学反应等,是土壤肥力的重要指标。

研究区真菌数量和磷酸酶活性均呈由下坡位至上坡位递增的趋势。在林业中,真菌与植物相互共生作用,为植物提供养分,使植物能耐受干旱或贫养的条件^[36-37]。研究表明,土壤有机质较为丰富、结构疏松,为真菌活动提供了良好的营养和通气条件,表层土壤与空气热交换,其土壤热值状况比下层好,利于真菌生长繁殖。在土壤生态系统中,磷酸酶能转化有机磷为无机磷,酶活性与有机质^[38]、土壤容重、微生物数量及区系有密切关系,土壤有机质含量较高、容重较小以及较多的微生物数量可以使土壤通气状况较好,酶活性增强^[39]。本研究的实际与前人研究结果相符。

3.3 基于最小数据集土壤质量评价

综合考虑土壤评价方法的建立需遵循客观、合理和科学的要求,根据前人经验,本研究选择容易测定并且具有代表性的土壤容重、含水率和田间持水量作为土壤质量评价的物理性质指标;化学指标选取对土壤质量、健康和作物生产力产生巨大影响的土壤 pH 值、有机质、全量氮、磷、钾以及有效氮、磷、钾;生物学指标的选取主要选择与土壤 C, N, P 素有明显关系的蔗糖酶、脲酶、磷酸酶3种生物化学指标以及真菌、细菌和放线菌3种生物学指标。基于上述指标研究典型喀斯特山地无籽刺梨种植基地土壤质量对地形因素的响应,并进行土壤质量评价。所选17个土壤评价指标中可能因为某些变量与其他变量相关性太高

导致数据不符合因子分析。已有研究表明,土壤田间持水量的高低反映土壤本身蓄水能力的大小^[40],用以表征土壤物理性质比较客观,不受季节性降雨因素影响,是土壤水分研究的重要参数^[41]。利用水文学模型作水量平衡计算、作物生长状况评估、土壤水分与溶质运移动力学、模拟时均需用到这个参数^[41]。因此,将土壤含水量指标剔除。检验结果显示,KMO和Sig.值均符合因子分析。通过主成分分析和Norm值筛选出适应于该地区土壤评价的最小数据集,指标分别为有机质、pH值、全钾、水解氮、真菌和磷酸酶。土壤有机质、全钾、水解氮和磷酸酶可以反映研究区土壤中C、K、N、P素的基本状况和有效养分的转化能力^[42],pH值的大小是衡量土壤质量的重要指标^[28,35],真菌数量对植物的养分和水分都有良好的促进作用^[36-37],上述MDS包括影响土壤评价的主要指标、植物生长所需主要养分指标和生物影响因素,可实现较为客观、全面的评价。由土壤质量评价公式(SQI)计算各坡位评价分值分别为:上坡位(0.544)>下坡位(0.503)>中坡位(0.408)。根据MDS中各坡位土壤评价指标(表2)和各指标在土壤质量评价中所占权重(表5),结合土壤质量评价结果可知,有机质含量和真菌数量是限制其土壤质量的主要因素。

此外,研究区位于贵州黔西南石漠化较为典型的地区,所处地区喀斯特山区裸岩率较高,石漠化防治和水土保持是实现和发展无籽刺梨经果林产业重要的目标。在无籽刺梨种植管理过程中,根据地形的变化采取适宜的管护措施,并结合有效的生态建设工程措施,调控种植地因地形因素产生的土壤质量差异,才能够发挥无籽刺梨在水土保持和石漠化治理方面的潜力,充分改善当地土壤质量,为实现喀斯特地区土地资源的改良和可持续利用提供范例。鉴于本文研究时间较短,今后还应开展长期的土壤质量监测,同时考虑坡地坡度、坡向、水文过程、土壤微量元素等因素,以提高喀斯特山区土壤质量评价的普遍适用性。

参考文献:

- [1] 苏孝良. 贵州喀斯特石漠化与生态环境治理[J]. 地球与环境, 2005, 33(4): 20-28.
- [2] 邓家富. 黔西南州石漠化治理的主要做法及成功模式[J]. 中国水土保持, 2014(1): 4-23.
- [3] 刘云慧, 龙俐, 谷晓平, 等. 贵州省黔西南地区石漠化空间分布特征分析[J]. 贵州气象, 2008, 32(1): 3-6.
- [4] 龙健, 邓启琼, 江新荣, 等. 贵州喀斯特石漠化地区土地利用方式对土壤质量恢复能力的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3188-3195.
- [5] 周梦维, 王世杰, 李阳兵. 石漠化景观生态优化途径初探: 以贵州清镇王家寨小流域为例[J]. 中国岩溶, 2007, 26(2): 91-97.
- [6] 张志才, 陈喜, 石鹏, 等. 贵州喀斯特峰丛山体土壤水分分布特征及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 803-807.
- [7] 段正锋, 傅瓦利, 甄晓君, 等. 岩溶区土地利用方式对土壤有机碳组分及其分布特征的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 109-114.
- [8] 刘涛泽, 刘丛强, 张伟, 等. 喀斯特地区坡地土壤可溶性有机碳的分布特征[J]. 中国环境科学, 2009, 29(3): 248-253.
- [9] 李新爱, 肖和艾, 吴金水, 等. 喀斯特地区不同土地利用方式对土壤有机碳、全氮以及微生物生物量碳和氮的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1827-1831.
- [10] 杨珊, 何寻阳, 苏以荣, 等. 岩性和土地利用方式对桂西北喀斯特土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1596-1602.
- [11] Yang H, Hu J W, Huang X F, et al. Risk assessment of heavy metals pollution for *Rosa sterilis* and soil from planting bases located in karst areas of Guizhou Province[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 700: 475-481.
- [12] 杨皓, 胡继伟, 黄先飞, 等. 喀斯特地区金刺梨种植基地土壤肥力研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 50-55.
- [13] 杨皓, 胡继伟, 黄先飞, 等. 喀斯特山区金刺梨种植基地土壤有效养分含量状况研究[J]. 河南农业科学, 2015, 44(7): 53-56, 72.
- [14] Li J L, Yang H, Shi X D, et al. Correlations between enzymes and nutrients in soils from the *Rosa sterilis* S. D. Shi planting bases located in karst areas of Guizhou Plateau, China [C] // Wang Yeping, Zhao Jianhua. Information Advances in Energy, Environment and Materials Science Proceedings of the International Conference on Energy, Environment and Materials Science, Guangzhou, 2015.
- [15] 杨皓, 范明毅, 李婕玲, 等. 喀斯特山区无籽刺梨种植基地土壤酶活性与肥力因子的关系[J]. 山地学报, 2016, 34(1): 28-37.
- [16] 贡璐, 张海峰, 吕光辉, 等. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 4136-4143.
- [17] 贡璐, 张雪妮, 吕光辉, 等. 塔里木河上游典型绿洲不同土地利用方式下土壤质量评价[J]. 资源科学, 2012, 34(1): 120-127.
- [18] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1843-1848.

- [19] 刘金山,胡承孝,孙学成,等. 基于最小数据集和模糊数学法的水旱轮作区土壤肥力质量评价[J]. 土壤通报, 2012,43(5):1145-1150.
- [20] Govaerts B, Sayre K D, Deckers J. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico[J]. Soil and Tillage Research, 2006,87(2):163-174.
- [21] D'Hose T, Cougnon M, De Vlieghe A. et al. The positive relationship between soil quality and crop production; A case study on the effect of farm compost application [J]. Applied Soil Ecology, 2014,75:189-198.
- [22] Liu Z J, Zhou W, Shen J B, et al. Soil quality assessment of acid sulfate paddy soils with different productivities in Guangdong Province, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014,13(1):177-186.
- [23] 刘金山,胡承孝,孙学成,等. 基于最小数据集和模糊数学法的水旱轮作区土壤肥力质量评价[J]. 土壤通报, 2012,43(5):1145-1150.
- [24] 李桂林,陈杰,孙志英,等. 基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定[J]. 生态学报, 2007,27(7):2715-2724.
- [25] Li G L, Chen J, Sun Z Y, et al. Establishing a minimum data set for soil quality assessment based on soil properties and land use change(In Chinese)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007,27(7):2715-2724.
- [26] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [27] 吴金水,林启美,黄巧云,等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京:气象出版社,2006.
- [28] 张伟,陈洪松,王克林,等. 种植方式和裸岩率对喀斯特洼地土壤养分空间分异特征的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(7):1459-1463.
- [29] Dunj6G, Pardini G, Gispert M. Land use change effects on abandoned terraced soils in a Mediterranean catchment, NE Spain[J]. Catena, 2003,52(1):23-37.
- [30] 贡璐,张雪妮,冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价[J]. 土壤学报,2015,52(3):682-689.
- [31] 岳跃民,王克林,张伟. 基于典范对应分析的喀斯特峰丛洼地土壤—环境关系研究[J]. 环境科学,2008,29(5):243-249.
- [32] 李孝良,陈效民,周炼川,等. 西南喀斯特石漠化过程中土壤有机质组分及其影响因素[J]. 山地学报,2010,28(1):56-62.
- [33] 黄昌勇,李保国,潘根兴,等. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [34] 杨光,丁国栋,常国梁,等. 黄土高原不同退耕还林地森林植被改良土壤特性研究[J]. 水土保持研究,2006,13(3):204-207.
- [35] 邱虎森,苏以荣,黎蕾,等. 典型喀斯特高原坡地土壤养分分布及其影响因素[J]. 土壤,2013,45(6):985-991.
- [36] Vandenkoornhuysen P, Baldauf S L, Leyval C, et al. Extensive fungal diversity in plant roots[J]. Science, 2002,295(5562):2051.
- [37] 张晶,张惠文,李新宇,等. 土壤真菌多样性及分子生态学研究进展[J]. 应用生态学报,2004,15(10):1958-1962.
- [38] 和文祥,蒋新,余贵芬,等. 生态环境条件对土壤磷酸酶的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013,31(2):81-88.
- [39] 陶宝先,张金池,愈元春,等. 苏南丘陵地区森林土壤酶活性季节变化[J]. 生态环境学报,2010,19(10):2349-2354.
- [40] 曹靖,常雅君,苗晶晶,等. 黄土高原半干旱区植被重建对不同坡位土壤肥力质量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2009,23(1):169-173.
- [41] 游松财,邸苏闯,袁晔. 黄土高原地区土壤田间持水量的计算[J]. 自然资源学报,2009,24(3):545-552.
- [42] 周玮,周运超. 花江峡谷喀斯特区土壤质量两种定量评价方法研究[J]. 中国岩溶,2009,28(3):313-318.