

# 石漠化治理区不同生态恢复模式土壤质量评价

孙建, 刘子琦, 朱大运, 李渊, 李开萍, 王进

(贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

**摘要:**为研究贵州省喀斯特石漠化地区不同生态恢复模式土壤养分及土壤质量情况,以贵州省黔西南州贞丰—北盘江石漠化治理示范区为研究区,采用土壤质量综合指数法对花椒、金银花、核桃和撂荒地 4 种不同生态恢复模式下土壤质量进行了评价,分析了不同生态恢复模式下土壤理化和微生物指标的分布规律。结果表明:4 种生态恢复模式下 0—5 cm 表层土壤养分富集明显,且 20 cm 土层内随着深度的加深,各营养指标总体呈下降趋势;与短年限撂荒地相比,花椒、金银花和核桃样地总体土壤物理性状较好,养分含量高,土壤微生物生物量明显改善。土壤质量综合指数花椒(0.671)>金银花(0.664)>核桃(0.597)>撂荒地(0.589),表明花椒、金银花对土壤质量提升成效较好,在石漠化治理土壤环境的改善中发挥了积极的作用。

**关键词:**不同生态恢复模式; 养分指标; 土壤质量评价; 石漠化治理

**中图分类号:**S158.3; P931.5

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)05-0222-07

## Evaluation on Soil Qualities of Different Ecological Restoration Models in Rocky Desertification Control Area

SUN Jian, LIU Ziqi, ZHU Dayun, LI Yuan, LI Kaiping, WANG Jin

(School of Karst Science, State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** In order to study soil nutrients and soil quality of different ecological restoration models in karst rocky desertification area of Guizhou Province, Zhenfeng-Beipanjiang River Demonstration Area of rocky desertification control in the Southwest Guizhou Autonomous Prefecture was chosen as the study area. Soil quality comprehensive index method was used to evaluate soil quality under four different ecological restoration models such as *Zanthoxylum bungeanum*, *Lonicera japonica*, *Juglans regia* and abandoned cropland. And the distribution of soil physical, chemical and microbial indicators under different ecological restoration models was analyzed. The results proved that the soil nutrient enrichment in 0—5 cm surface soil of the four ecological restoration model plots was obvious, and the overall nutrition index showed the downward trend with the increase of soil depth within 20 centimeters; compared with the abandoned land for a short period of time, the soil physical properties of fields of *Zanthoxylum bungeanum*, *Lonicera japonica* and *Juglans regia* were better, the nutrient contents were higher, and the soil microbial biomass was significantly improved. The soil quality comprehensive index decreased in the order: *Zanthoxylum bungeanum* (0.671) > *Lonicera japonica* (0.664) > *Juglans regia* (0.597) > abandoned cropland (0.589), which indicates that *Zanthoxylum bungeanum* and *Lonicera japonica* have good effects on soil quality improvement, and play a positive role in improving soil environment in rocky desertification control.

**Keywords:** different ecological restoration models; nutrient index; soil quality evaluation; rocky desertification control

土壤是植物生存发展的重要载体,为植物生长发育提供了必要的养分补给。土壤质量是维持动植物生存发展、保护土壤环境的能力<sup>[1-2]</sup>,是衡量土壤环境

状况的重要表现,能够在一定程度上反映出某地区土壤管理情况及土壤自身的恢复能力<sup>[3]</sup>。喀斯特地区地表起伏大,岩石裸露率高,水土流失严重,加上土层

收稿日期:2018-08-26

修回日期:2018-12-17

资助项目:国家自然科学基金(41761104);贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2018]2777);贵州师范大学 2017 年博士科研启动基金

第一作者:孙建(1994—),男,河北承德人,硕士研究生,研究方向为喀斯特生态环境治理。E-mail:945564070@qq.com

通信作者:刘子琦(1979—),女,贵州贵阳人,副教授,主要从事喀斯特地貌演化、石漠化治理与监测评价研究。E-mail:124294329@qq.com

薄,土壤总量不足,空间分布不均<sup>[4-5]</sup>,导致石漠化地区环境容量小,生态环境脆弱,一定程度上抑制了当地生态环境和社会经济的发展<sup>[6]</sup>。针对该情况,植被恢复成为了石漠化地区脆弱生态系统改善、土壤质量维系、社会经济可持续发展的有效方式之一<sup>[7]</sup>。近年来,随着石漠化治理工作的开展,众多学者在生态恢复和经济发展研究上取得了显著成效,但就植被土壤质量的维护与管理仍存在疏忽。因此加强石漠化地区不同生态恢复模式土壤质量的监测评价,对土壤环境效益提升和石漠化治理生态恢复模式筛选具有重要的意义。

近期,学者采用土壤质量评价方法对不同时空尺度的混合林地土壤质量开展了相关研究。周玮等<sup>[8]</sup>通过土壤质量综合指数法和退化指数法对花江峡谷喀斯特区不同土地利用类型土壤质量进行研究,得出灌木林土壤质量高于乔木林、人工林、耕地和草坡;刘伟玮等<sup>[9]</sup>采用统计学方法和经验法研究辽东山区林参复合经营林土壤质量,表明针阔混交林土壤质量较高;李静鹏等<sup>[10]</sup>运用典范对应分析和因子分析方法研究自然保护区内森林土壤肥力,指出稀树灌丛土壤质量优于常绿阔叶林、针阔混交林和针叶林;龙健等<sup>[11]</sup>计算了石漠化地区的土壤退化指数,认为 3 a 内草地和退耕蒿草地发生严重退化;陈祖拥等<sup>[12]</sup>构建了土壤质量评价体系,采用因子分析法得出山区植被退化土壤质量随退化程度的加深而降低;庞世龙等<sup>[13]</sup>通过综合敏感性分析、主成分分析和相关性分析方法研究石漠化地区不同植被恢复模式土壤质量,表明香樟树土壤质量高于顶果木、柚木和银合欢;苏跃等<sup>[14]</sup>利用多重比较分析法得出土地利用模式从阔叶林地到灌木林地再到灌丛草地方向的演变过程中,土壤质量逐渐降低。

现阶段对土壤质量评价多集中于乔木林和灌木林地,而对石漠化治理特殊的生态恢复模式对比研究较少。因此,本文主要以花椒、金银花、核桃和撂荒地 4 种石漠化地区不同生态恢复模式为主要研究对象,通过土壤质量综合指数评价方法研究不同生态恢复模式下不同土层的物理、化学和生物指标分布状况,探讨不同生态恢复模式土壤养分的分布特点及各养分指标的相关性特点,全面分析评价每种生态恢复模式土壤质量情况,以得出生态效益最佳的作物物种,为石漠化地区的土壤质量的改良提供科学合理的理论依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

贵州省贞丰县北盘江镇石漠化治理示范区(105°36′30″—

105°46′30″E,25°39′13″—25°41′00″N)是典型的喀斯特高原峡谷区域,总面积约 5 100 hm<sup>2</sup>,喀斯特面积占 87.92%。示范区内石漠化面积分布较广,以中度—强度石漠化等级为主,占比高达 90.7%,潜在轻度等级石漠化占比 9.3%。地貌类型以峰丛洼地为主,平均海拔 950 m。气候属亚热带干热河谷气候,全年光热充足,夏季炎热,冬季温和;雨热同季,主要集中在 5 月到 8 月,雨季降雨占年降雨量 80%以上。研究区内石灰岩遍布,水热丰富,岩溶作用剧烈,由于不合理的人类活动,地表植被覆盖率低,水土流失严重,大面积岩石裸露,出现大量溶沟、石芽、石缝等石漠化景观。花椒、金银花和核桃是该地区典型的植被恢复模式,20 世纪 90 年代,贞丰县推广顶坛花椒的种植以及金银花的引入,形成了当地独具特色的石漠化治理模式<sup>[15]</sup>,带来了可观的经济收入<sup>[16]</sup>。

为了最大限度的保证可比性,减少因地貌差异引起的结果误差,在样地选择上严格控制海拔、坡度、坡向的一致性。研究共选取 12 个 20 m×20 m 样地,每种生态恢复模式选取 3 个平行样地,每个样地内设置 3 个土壤采样点对每种作物类型的土壤样品进行采集。花椒、金银花和核桃地中均为单一的植物类型,撂荒地上为稀疏杂草。各生态恢复模式样地的基本情况见表 1。

表 1 研究区不同生态恢复模式信息

样地类型	经纬度	海拔/m	坡度/(°)	坡向
花椒	25°39.797′N,105°38.823′E	820	25	NW
金银花	25°39.329′N,105°38.669′E	772	26	NW
核桃	25°39.40′N,105°39.042′E	665	30	NW
撂荒地	25°38.368′N,105°38.975′E	745	28	NW

## 1.2 数据获取

本试验于 2017 年 4 月末在研究区内花椒、金银花、核桃和撂荒地 4 种不同石漠化生态恢复模式样地中采集土壤样本,用于对每种生态恢复模式的物理、化学和生物指标的测定,进而分析其养分分布情况及土壤质量状况。

物理性质:每个固定土壤样地内采取 3 个环刀土,环刀土每 10 cm 采集一次,采集深度为 30 cm,3 个平行样地共采集环刀土 9 个。对环刀及采集的样品及时进行称重记录,便于后期试验操作。

化学性质:按照“S”形采集线路每个样地采集 9 个土壤样品,采集深度为 20 cm,分别在 0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm 取 3 个土样,每个样地共计 27 个土样。土样带回实验室去除植物根系、腐叶和石块等杂质,经自然风干,最后按照各项指标需求进行过筛处理,为后续试验做好准备。

生物性质;采样方式与化学土壤一致,新鲜样品经去除植物根系、腐叶和石块等杂质,保鲜于 4℃ 的冰箱内,以备后续试验所需。

分析测定方法按照国家标准方法进行<sup>[17-18]</sup>。

1.3 数据分析

数据的统计分析主要在 Origin 和 SPSS 22.0 软件中进行。参照相关研究方法<sup>[19-21]</sup>,采用主成分分析计算出各项土壤指标在所有特征值≥1 的主成分(PC)上的载荷值。

1.3.1 确立最小数据集 通过主成分分析计算出各项土壤指标的载荷值后,对各项指标进行分组。将同一主成分(PC)中载荷值≥0.5 的指标归为一组,若出现同一土壤指标在两个主成分上均≥0.05,则将该土壤指标参数与其他相关性较低的土壤指标参数归为一组;由上述分组原则对各项指标进行分组,根据公式(1) 分别计算出各项土壤指标的 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,若所选指标间高度相关( $\gamma>0.05$ ),则 Norm 值最高的土壤指标进入最小数据集;若同一主成分中有且只有一个指标的载荷值≥0.05,则该项指标直接进入最小数据集。由此最终确定最小数据集。

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

式中:Norm 值  $N_{ik}$  越大,解释综合信息的能力越完全,其中表示为第  $i$  个变量在特征值>1 的第  $k$  个主成分上的综合载荷; $\mu_{ik}$  表示为第  $i$  个变量在第  $k$  个主成分上的载荷值; $\lambda_k$  则表示为第  $k$  个主成分的特征值。

1.3.2 隶属度函数标准化 通过隶属度函数计算各项土壤指标的隶属度值。隶属度函数分为 S 升型隶。

属度函数和 S 降型隶属度函数。根据已进入最小数据集的各项土壤养分指标与土壤养分的关联性,确定其所属隶属度函数类型。

S 升型隶属函数公式:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \leq x_1 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 1.0 & x \geq x_2 \end{cases} \tag{2}$$

S 降型隶属度函数公式:

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

式中:各个养分含量指标的最小值与最大值在函数隶属度中的转折点为  $X_1$  和  $X_2$ 。

1.3.3 综合评价法的计算 基于模糊数学中的加权求和法,将土壤质量评价结果转换为 0.1~1 的具体数值,通过公式(4) 计算出土壤质量综合得分,具体判断不同生态恢复模式中土壤质量的优劣情况。

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i N_i \tag{4}$$

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,数值为 0~1.0; $N_i$  为各指标隶属度值。

2 结果与分析

2.1 土壤养分指标的统计特征

2.1.1 不同生态恢复模式土壤物理性状 据表 2 可知,不同生态恢复模式 0—10 cm 土层土壤物理指标呈现出以下特点:花椒地土壤含水量和总孔隙度最高,土壤容重最低,与其他恢复模式差异显著;电导率撂荒地>核桃>金银花>花椒。不同生态恢复模式间各项物理指标呈现显著性差异,总体表现出花椒地土壤物理性质较其他 3 种植被优越,其含水量相对较高,土壤较为疏松且孔隙度大,土壤盐分含量较低。撂荒地物理性状相对较差,表现为土壤内水分含量低且土壤紧实,土壤容重大,透水性欠佳。

表 2 不同生态恢复模式土壤物理性状

样地	土壤 含水量/%	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/ %	电导率/ (mS·cm <sup>-1</sup> )
花椒	16.741±1.195a	1.132±0.020d	54.980±0.712a	0.308±0.010d
金银花	15.163±0.626ab	1.348±0.016b	52.180±0.488b	0.342±0.004c
核桃	16.633±0.480ab	1.300±0.010c	46.567±0.715c	0.374±0.006b
撂荒地	14.458±0.577b	1.354±0.010a	47.628±0.717c	0.412±0.006a

注:同列不同小写字母表示不同生态恢复模式间差异显著( $p<0.05$ )。

2.1.2 不同生态恢复模式土壤化学性状 同一生态恢复模式下不同土层与同一土层不同生态恢复模式下各项土壤指标呈现出一定的差异(表 3)。同一土层中花椒和撂荒地的 pH 值差异不显著,二者与金银花和核桃呈现出显著性差异。0—5,5—10 cm 土层土壤有机碳金银花>花椒>核桃>撂荒地,花椒与金银花差异不显著,与核桃和撂荒地呈现出显著性差异,花椒地土壤有机碳含量分别是核桃和撂荒地的 1.56,1.40 倍。土壤有机碳随土层加深而减少,而 pH 值先升高后降低。

0—5,5—10 cm 土层全氮含量表现为花椒>金银花>核桃>撂荒地;0—5 cm 土壤全磷含量花椒>金银花>核桃>撂荒地,花椒与其他样地呈现出显著性差异,分别是金银花、核桃和撂荒地的 1.09,1.14,1.26 倍。而 5—10 cm 和 10—20 cm 土层中全磷含量表现为金银花>花椒>核桃>撂荒地,土壤全钾含



量花椒>撂荒地>金银花>核桃。不同生态恢复模式下土壤全氮、全磷、全钾均表现出随着土层的加深而减少的趋势,且各土层间呈现出显著性差异。

土壤水解氮和有效磷均含量表现为金银花>花椒>核桃>撂荒地,随土层加深,水解氮均呈现出先减少后增加的规律;5—10 cm 土层中金银花地全磷含量显著增加,花椒、核桃和撂荒地全磷含量随土层增加而减少;土壤速效钾含量总体表现为花椒>撂荒地>金银花>核桃,4 种不同生态恢复模式速效钾含量均随土层的增加而减少。

表 3 不同生态恢复模式土壤化学性状

化学性质	土层	花椒	金银花	核桃	撂荒地
pH 值	0—5 cm	7.724±0.024Bb	7.657±0.017Ca	7.824±0.021Ab	7.725±0.020Bb
	5—10 cm	7.812±0.033Ba	7.692±0.018Ca	7.912±0.023Aa	7.800±0.026Ba
	10—20 cm	7.571±0.024Bc	7.505±0.019Cb	7.705±0.020Ac	7.605±0.021Bc
有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )	0—5 cm	36.891±0.327Aa	36.988±0.425Aa	31.647±0.328Ba	26.027±0.235Ca
	5—10 cm	29.592±0.769Ab	30.449±0.417Ab	25.787±.345Bb	21.367±0.396Cb
	10—20 cm	26.000±0.559Ac	23.850±0.450Bc	20.894±0.332Cc	20.382±0.261Cc
全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	0—5 cm	4.784±0.045Aa	4.206±0.056Ba	3.768±0.034Ca	3.633±0.026Da
	5—10 cm	4.172±0.039Ab	3.883±0.067Bb	3.487±0.036Cb	3.337±0.020Db
	10—20 cm	3.509±0.031Bc	3.678±0.038Ac	3.252±0.042Cc	3.184±0.027Cc
水解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	0—5 cm	47.339±0.298Bb	83.005±0.156Ab	44.205±0.346Cb	41.665±0.192Db
	5—10 cm	44.041±0.601Bc	73.013±0.224Ac	32.846±0.349Cc	27.416±0.758Dc
	10—20 cm	50.245±0.407Ba	87.494±0.547Aa	47.442±0.674Ca	46.412±0.650Ca
全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	0—5 cm	1.607±0.014Aa	1.470±0.015Ba	1.412±0.008Ca	1.324±0.004Da
	5—10 cm	1.414±0.014Ab	1.438±0.008Aab	1.262±0.013Bb	1.240±0.010Bb
	10—20 cm	1.239±0.007Bc	1.409±0.016Ab	1.092±0.012Cc	1.091±0.011Cc
有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	0—5 cm	5.579±0.050Ba	7.652±0.026Ac	4.391±0.030Ca	3.915±0.031Da
	5—10 cm	4.522±0.060Bb	8.594±0.035Aa	3.619±0.065Cb	3.289±0.041Db
	10—20 cm	3.357±0.077Bc	8.134±0.035Ab	2.956±0.088Cc	2.368±0.046Dc
全钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )	0—5 cm	17.167±0.042Ab	14.622±0.066Ca	13.945±0.033Da	16.290±0.024Ba
	5—10 cm	17.591±0.085Aa	13.323±0.046Cc	13.418±0.034Cb	15.972±0.118Bb
	10—20 cm	16.573±0.033Ac	14.007±0.060Cb	12.785±0.049Dc	15.459±0.043Bc
速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	0—5 cm	198.171±2.653Aa	120.412±1.217Ca	105.614±0.938Da	128.681±0.915Ba
	5—10 cm	125.397±4.265Ab	95.475±1.603Cb	84.155±1.111Db	110.728±1.010Bb
	10—20 cm	85.586±2.480Bc	76.534±1.391Cc	68.223±1.346Dc	99.496±0.946Ac

注:同行不同大写字母表示同一土层不同生态恢复模式间差异显著;同列不同小写字母表示同一生态恢复模式不同土层间差异显著( $p<0.05$ )。

2.1.3 不同生态恢复模式土壤微生物生物量变化

根据图 1 可知,0—5 cm 层撂荒地土壤微生物量碳、氮(MBC,MBN)与其他恢复模式相比,均呈现出一定劣势,尤与花椒呈现出显著差异,表现为金银花>花椒>核桃>撂荒地;5—10 cm 土层中核桃地的 MBC 和撂荒地的 MBN 含量最低;10—20 cm 土层中撂荒地的 MBC 和 MBN 含量最低,而金银花和花椒的 MBC,MBN 含量较高。0—5 cm 土层中金银花、花椒与核桃 MBN 和 MBC 含量分别是撂荒地的 1.18,1.43,1.22 倍和 1.27,1.42,1.19 倍。该层中 4 种不同恢复模式 MBC 与 MBN 含量范围分别为 200~283 mg/kg,49~70 mg/kg;5—10 cm 土层中 MBC 与 MBN 含量范围为 120~200 mg/kg,35~48 mg/kg,10—20 cm 土层中为 125~170 mg/kg,37~46

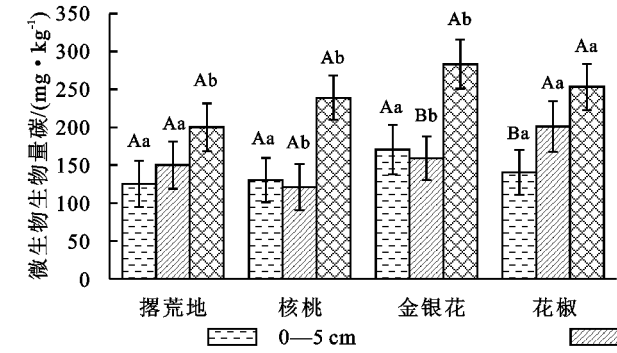
mg/kg,总体上看,随着土层的加深,MBC 和 MBN 含量整体下降。

2.2 最小数据集对比分析

选取土壤容重、土壤总孔隙度、氮、磷、钾等 14 个指标进行主成分分析,结果显示:KMO=0.788, sig.=0.001小于显著水平 0.05,适合主成分分析。

根据表 4,经 SPSS 22.0 进行主成分分析后,提取出前 4 个大于 1 的特征值,其累计贡献率为 77.30%,根据公式(1),计算出各指标的 Norm 值。据前文所述分组原则,将各项土壤养分指标进行分组(表 5),不同生态恢复模式土壤养分指标最终筛选为:水解氮、有效磷、有机碳、全磷、含水量、全氮和 pH 值。其中,水解氮和有效磷属于 PC1,有机碳和全磷属于 PC3,含水量和全氮属于 PC4,pH 值属于 PC2。存在同一主成中具有多个高荷载

变量因子,按照上述方法,将同一主成分中筛选出的养分指标进行相关性分析,相关性分析结果见表 6,PC1 中,水解氮和有效磷显著相关( $p<0.01$ ),选择 Norm 值较大的养分指标进入最小数据集,水解氮(2.430) $>$ 有效磷(2.426),故水解氮进入最小数据集;PC2 中,仅有 pH 值一项指标,依据上述原则,故该指标直接进入最小数据集;PC3 中,有机碳和全磷显著相关( $p<0.01$ ),对比两指标 Norm 值可知:全磷(1.346) $>$ 有机碳(0.975),因此,



注:不同大写字母表示同一土层不同生态恢复模式间差异显著( $p<0.05$ );不同小写字母表示同一生态恢复模式不同土层间差异显著( $p<0.05$ )。

图 1 不同生态恢复模式土壤微生物生物量氮、碳含量

表 4 前 4 个大于 1 的特征值

主成分	总值	方差	累计贡献率
PC1	6.445	46.04	46.04
PC2	1.984	14.17	60.21
PC3	1.290	9.21	69.42
PC4	1.103	7.88	77.30

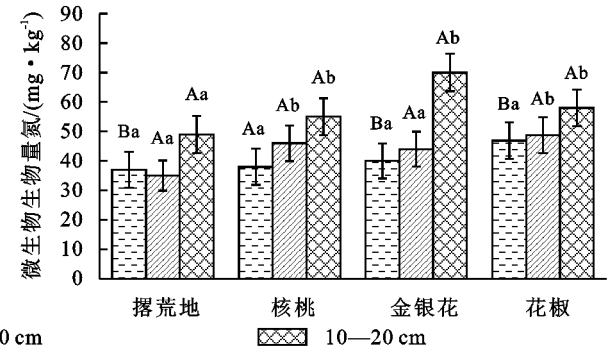
表 5 土壤养分的各个主成分载荷矩阵

土壤养分 指标	主成分				组	Norm 值
	PC1	PC2	PC3	PC4		
土壤总孔隙度	-0.611	-0.419	-0.083	-0.109	2	1.368
土壤容重	0.741	0.448	0.154	0.268	1	2.011
土壤电导率	0.845	0.402	0.023	0.041	1	2.220
土壤含水量	-0.306	-0.382	-0.081	0.566	4	1.120
pH 值	-0.273	0.589	0.248	0.126	2	1.125
有机碳	-0.058	-0.458	0.558	0.319	3	0.975
全氮	-0.376	0.359	0.267	0.602	4	1.288
水解氮	0.950	-0.171	-0.103	0.123	1	2.430
全磷	0.350	-0.464	0.650	-0.219	3	1.346
有效磷	0.947	-0.197	-0.071	0.141	1	2.426
全钾	-0.931	0.228	0.103	-0.123	1	2.391
速效钾	-0.787	0.315	0.203	-0.080	1	2.062
MBN	0.405	0.233	0.554	-0.334	3	1.298
MBC	-0.913	0.114	0.104	0.033	1	2.327

2.3 土壤质量的综合评价

确定进入最小数据集的指标后,因各指标量纲不同,需利用隶属度函数对最小数据集进行标准化处理。各指标中,与土壤养分存在正效应关联的指标选取 S 升型隶属度函数进行处理,反之,与土壤养分存在负效应关联的指标采取 S 降型隶属度函数处理。

全磷进入最小数据集;PC4 中,土壤含水量和全氮不显著相关,因此二者均进入最小数据集。综上,最终进入最小数据集的指标分别为 pH 值、全氮、水解氮和全磷。pH,即土壤酸碱性,是土壤肥力的一项重要指标<sup>[22]</sup>,对土壤环境中的微生物种类和数量起到一定的决定作用<sup>[23]</sup>。全氮是植物生长必须的营养元素,对植物的生长发育有密切关系<sup>[24]</sup>;全磷与水解氮也对土壤质量和植物的生长产生较大的影响<sup>[25]</sup>。



土壤 pH 值具有固定的合理范围,其含量过高或过低都会对土壤质量产生负面影响,因此 pH 值属于 S 降型隶属度函数;土壤全氮、全磷和水解氮与土壤养分存在正效应关联,因此,属于 S 升型隶属度函数。根据各项指标所属隶属度函数类型,通过公式(2)、公式(3)计算出各隶属度值,根据公式(4)中权重系数的计算方法,得到不同指标的权重系数,结果见表 7。

表 6 同一主成分中多个高荷载变量因子相关性分析

PC 1	土壤	土壤	PC3	土壤	有机碳
	水解氮	有效磷		土壤	全磷
土壤水解氮	1.000	0.989 * *	土壤有机碳	1.000	0.837 * *
土壤有效磷	0.989 * *	1.000	土壤全磷	0.837 * *	1.000
PC4	土壤	含水量			
	土壤	全氮			
土壤含水量	1.000	0.133			
土壤全氮	0.133	1.000			

注: \*\* 表示  $p<0.01$ 。

表 7 土壤养分隶属函数与权重值

土壤养分 指标	隶属函数 类型	隶属度转折点		权重 系数
		$X_1$	$X_2$	
pH 值	S 降型	7.49	7.96	0.183
有机碳	S 升型	20.366	35.318	0.119
全氮	S 升型	3.223	4.453	0.102
水解氮	S 升型	33.437	82.983	0.596

根据上述方法,将贞丰—北盘江示范区不同生态恢复模式下的土壤养分进行定量化评价。通过得出的隶属度值与权重系数,利用公式(4)计算出不同生态恢复模式下土壤质量综合得分分别为花椒(0.671) $>$ 金

银花(0.664) > 核桃(0.597) > 撂荒地(0.589)(图2), 花椒和金银花地的土壤质量表现出明显的优越性, 而核桃和撂荒地土壤质量欠佳。

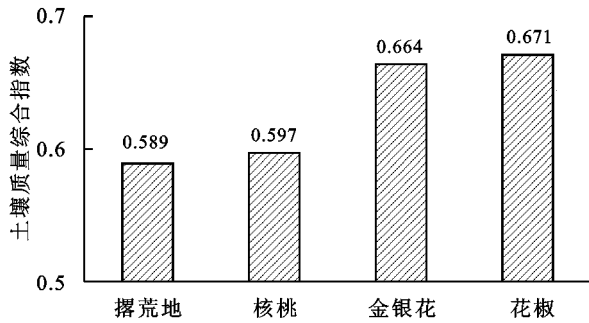


图2 不同生态恢复模式土壤质量综合指数

## 3 讨论

### 3.1 不同生态恢复模式土壤物理性状

数据统计结果表明,花椒地土壤物理性质表现出绝对的优势,各项指标均大于其他模式。主要是由于花椒为多年生植物,生长较为缓慢且耐旱,3—4月期间花椒对水分需求相对较少<sup>[26]</sup>,其根系对浅层土壤的影响较大,改善了土壤物理性质,因此表现出一定的优势。金银花地土壤物理性质仅次于花椒,但就其含水量指标来看,较花椒和核桃地差,4月份正处于金银花的生长期,生长过程中对土壤水分需求较大,降低了土壤含水量低,增大了容重<sup>[27]</sup>。撂荒地土壤物理性质表现出明显的劣势,主要是撂荒地杂草稀疏,裸露土壤面积所占比例较大,土质较紧实,加上研究地位于干热河谷地段,土壤水分蒸发强烈,因此导致撂荒地土壤总孔隙度和土壤含水量较低,容重较高。

### 3.2 不同生态恢复模式土壤化学性状

从同一土层不同生态恢复模式角度来看,花椒、金银花、核桃和撂荒地4种不同生态恢复模式土壤化学养分含量总体表现出花椒 > 金银花 > 核桃 > 撂荒地的规律。花椒在种植过程中无翻耕行为,植株体积较小且根系埋藏浅,凋零枯落叶在表层土壤积累,导致花椒地土壤养分总体高于其他样地;金银花地由于植物体本身对土壤进行覆盖且根系生长较浅,因此其土壤内微生物含量较高,微生物对养分具有一定的分解作用<sup>[28]</sup>。核桃地土壤未表现出明显的养分优势,推测原因为核桃属于深根系乔木,对表层土壤的影响较小<sup>[29]</sup>;撂荒地各项化学指标明显偏低,这是由于撂荒地土质紧实,植物生长较困难,相对裸露的地表遇高温天气时,表层土壤环境不佳,土壤微生物较少。加上喀斯特石漠化地区土层薄,水土养分流失严重<sup>[30]</sup>,致使养分流失大于积累。

从同一生态恢复模式不同土层角度来看,不同生

态恢复模式养分含量的变化总体呈现出随着土层加深而逐渐减少的规律,与赵娜等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。花椒、金银花和核桃的表层土壤均存在枯枝落叶的积累,土壤养分的表层富集现象明显,土层越深,相应的各项养分来源相对表层不足,呈现出下降的趋势。部分指标出现5—10 cm土层相对较高,这是由于受到表层降雨的冲刷,养分随雨水渗入中间土层,使部分养分指标在中间土层集中<sup>[31]</sup>。

### 3.3 不同生态恢复模式土壤生物学性状

不同生态恢复模式中,土壤微生物量总体上表现出金银花 > 花椒 > 核桃 > 撂荒地的规律,金银花地土壤中微生物含量表现出一定的优势,金银花地中地表具有枯落物积累,且金银花属藤蔓型植物,经植物体覆盖的地表存在相对较多的有机物和根际代谢物,为土壤中微生物活性提供了环境基础<sup>[32]</sup>。

土壤微生物表现出随土层深度的加深而逐渐减少的趋势。主要受到地表枯落物等影响,输入到地表的有机质含量丰富,而较深土层输入较少。金银花地0—5 cm土层土壤微生物含量要高于花椒,但其养分含量要比花椒低,可能是金银花地表层土壤存在的微生物较为丰富,将一定的碳和氮固定在自身体内中,导致土壤中所含养分较低<sup>[33]</sup>。

### 3.4 不同生态恢复模式土壤质量综合评价

本研究中,4种生态恢复模式样地在20 cm土层内均表现出随着土层深度的加深,各营养指标总体出现下降的趋势,说明石漠化地区土壤养分表层富集明显,其受外界环境影响较大,与鲍乾等<sup>[34]</sup>喀斯特高原峡谷不同恢复模式土壤养分具有“表聚效应”的研究结论一致;与短年限撂荒地相比,花椒、金银花样地土壤物理性状较好,养分含量总体偏高,土壤微生物生物量明显改善,撂荒地土壤质量呈现出明显的劣势,与李永强等<sup>[35]</sup>等对2 a, 4 a, 22 a, 33 a撂荒地土壤理化性质进行研究,表明随着撂荒年份增加,主要养分元素均出现先降低后增加趋势的结论相符。根据土壤质量综合指数评价结果,表明花椒和金银花样地土壤质量相对较高,说明花椒和金银花对当地土壤环境具有明显积极影响。研究认为,贞丰—北盘江石漠化治理示范区引入花椒和金银花,改善了该地区的土壤环境质量,产生了积极地生态环境效益。

## 4 结论

(1) 花椒、金银花、核桃和撂荒地4种生态恢复模式下0—5 cm表层土壤养分富集明显,且20 cm土层内随着土层深度的加深,各营养指标总体呈下降趋势。

(2) 与短年限撂荒地相比,花椒、金银花和核桃



地土壤总体物理性状较好,化学养分含量高,土壤微生物生物量明显改善。

(3) 土壤质量综合指数花椒(0.671) > 金银花(0.664) > 核桃(0.597) > 撂荒地(0.589),表明花椒和金银花对土壤质量提升成效较好,在石漠化治理土壤环境的改善中发挥了积极的作用。

#### 参考文献:

- [1] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality [C]//Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F. Defining Soil Quality for A Sustainable Environment. Madison: Sssa Special Publication, American Soil Agronomy, 1994:3-21.
- [2] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality [J]. Applied Soil Ecology, 2000,15(1):3-11.
- [3] 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.
- [4] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J].水土保持学报,2017,31(5):1-8.
- [5] 张信宝,王世杰,曹建华,等.西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J].中国岩溶,2010,29(3):274-279.
- [6] 张殿发,王世杰,李瑞玲.贵州省喀斯特山区生态环境脆弱性研究[J].地理学与国土研究,2002,18(1):77-79.
- [7] 李静鹏,徐明锋,苏志尧,等.不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J].生态学报,2014,34(9):2297-2307.
- [8] 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.
- [9] 刘伟玮,刘某承,李文华,等.辽东山区林参复合经营土壤质量评价[J].生态学报,2017,37(8):2631-2641.
- [10] 李静鹏,徐明锋,苏志尧,等.不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J].生态学报,2014,34(9):2297-2307.
- [11] 龙健,黄昌勇,李娟.喀斯特山区土地利用方式对土壤质量演变的影响[J].水土保持学报,2002,16(1):76-79.
- [12] 陈祖拥,刘方,王世杰,等.喀斯特山区植被退化过程中的土壤质量变化及评价[J].中国岩溶,2016,35(6):639-648.
- [13] 庞世龙,欧芷阳,申文辉,等.广西喀斯特地区不同植被恢复模式土壤质量综合评价[J].中南林业科技大学学报,2016,36(7):60-66.
- [14] 苏跃,刘方,李航,等.喀斯特山区不同土地利用方式下土壤质量变化及其对水环境的影响[J].水土保持学报,2008,22(1):65-68.
- [15] 喻阳华,王璐,钟欣平,等.贵州喀斯特山区不同海拔花椒人工林土壤质量评价[J].生态学报,2018,38(21):7850-7858.
- [16] 李苇洁,汪廷梅,王桂萍,等.花江喀斯特峡谷区顶坛花椒林生态系统服务功能价值评估[J].中国岩溶,2010,29(2):152-154,161.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:30-106.
- [18] 林启美,吴玉光,刘焕龙.熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J].生态学杂志,1999,18(2):63-66.
- [19] 房全孝.土壤质量评价工具及其应用研究进展[J].土壤通报,2013,44(2):496-504.
- [20] 肖杰,熊康宁,顾再柯,等.喀斯特石漠化治理区土壤养分综合评价与对比:以贵州朝营和顶坛小流域为例[J].水土保持研究,2018,25(2):293-299.
- [21] 李婕羚,李朝婵,胡继伟,等.典型喀斯特山区无籽刺梨基地土壤质量评价[J].水土保持研究,2017,24(1):54-60.
- [22] 许自成,王林,肖汉乾.湖南烟区土壤 pH 分布特点及其与土壤养分的关系[J].中国生态农业学报,2008,16(4):830-834.
- [23] 林毅,梁颂捷,朱其清.三明烟区土壤 pH 值与土壤有效养分的相关性[J].烟草科技,2003(6):35-37.
- [24] 李龙,姚云峰,秦富仓,等.黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因素[J].应用生态学报,2015,26(5):1306-1312.
- [25] 胡忠良,潘根兴,李恋卿,等.贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C, N, P 含量和空间异质性[J].生态学报,2009,29(8):4187-4195.
- [26] 李安定.喀斯特地区顶坛花椒林地生态需水过程及造林技术的研究[D].贵阳:贵州大学,2006.
- [27] 张笑培,杨改河,任广鑫,等.黄土高原南部植被恢复对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):64-68.
- [28] 赵娜,孟平,张劲松,等.华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价[J].应用生态学报,2014,25(2):351-358.
- [29] 钱进芳,吴家森,黄坚钦.生草栽培对山核桃林地土壤养分及微生物多样性的影响[J].生态学报,2014,34(15):4324-4332.
- [30] 熊康宁,陈永毕,陈起伟,等.点石成金:贵州石漠化防治技术与模式[M].贵阳:贵州科技出版社,2011:14-21.
- [31] 李昌兰.喀斯特典型坡耕地土壤养分流失试验研究[D].贵阳:贵州大学,2016.
- [32] Dilly O, Munch J C. Ratios between estimates of microbial biomass content and microbial activity in soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 1998,27(4):374-379.
- [33] 董莉丽,郑粉莉.土地利用类型对土壤微生物量和有机质的影响[J].水土保持通报,2009,29(6):10-15.
- [34] 鲍乾,杨瑞,聂朝俊,等.贵州喀斯特高原花江峡谷区不同恢复模式的土壤养分特征[J].生态学杂志,2017,36(8):2094-2102.
- [35] 李永强,赵萌莉,韩国栋,等.不同年限草原撂荒地土壤理化特性研究[J].中国草地学报,2012,34(3):61-64,69.