

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

肖杰¹, 熊康宁¹, 顾再柯², 王琦¹, 李开萍¹

(1. 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;

2. 贵州省水土保持监测总站, 贵阳 550001)

摘要:为揭示不同地貌和不同等级石漠化地土壤养分状况及其整体水平。通过分析土壤养分指标和运用数理统计确立最小数据集,以不同地貌的研究区和不同等级石漠化的治理模式地进行了评价和对比。结果表明:(1)入选最小数据集体系的指标为土壤 pH 值、全氮、有机质、速效钾,是影响土壤养分评价和植物生长所需养分的指标。(2)受不同石漠化治理模式影响,土壤养分累积效应明显,朝营小流域不同等级石漠化地评价分值大小为潜在 $0.729 >$ 轻度 $0.658 >$ 中度 $0.580 >$ 强度 0.525 ,顶坛小流域则为轻度 $0.541 >$ 潜在 $0.515 >$ 中度 $0.501 >$ 强度 0.341 。(3)经过评价对比,朝营小流域土壤养分综合评价分值(0.673)大于顶坛小流域(0.478),两者受不同地貌、不同土层厚薄和土被连续性以及不同的石漠化治理模式等因素影响是明显的。随着石漠化治理模式不断优化和调整,朝营、顶坛小流域土壤养分的积累仍有上升的潜力。

关键词:石漠化;土壤养分评价;最小数据集;小流域

中图分类号:S158.3;P931.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)02-0293-07

Comparative Study on Comprehensive Evaluation of Soil Nutrients in Rocky Desertification Areas

—A Case Study of Small Watersheds of Chaoying and Dingtan in Guizhou Province

XIAO Jie¹, XIONG Kangning¹, GU Zaike², WANG Qi¹, LI Kaiping¹

(1. Institute of Karst Science, Guizhou Normal University/State Engineering Technology Center for Karst Rock Desertification Rehabilitation, Guiyang 550001, China; 2. Guizhou Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to reveal the soil nutrient status and its overall level in rocky desertification areas with different landforms and grades, through the analysis of soil nutrient index and application of mathematical statistics, the minimum data set was established, and the soil nutrients were evaluated and compared in different geomorphic study areas and different degrees of rocky desertification. The results showed that: (1) the selected indexes of minimum data set were soil pH value, total nitrogen, organic matter and available potassium, which were the indexes to influence soil nutrient evaluation and required nutrients vegetation; (2) affected by different rocky desertification control models, soil nutrient accumulation effect was obvious, the evaluation score of Chaoying small watershed in different rocky desertification area was in the sequence: potential $0.729 >$ mild $0.658 >$ moderate $0.580 >$ strong 0.525 , while the Dingtan small watershed was in the order: mild $0.541 >$ potential $0.515 >$ moderate $0.501 >$ strong 0.341 ; (3) through evaluation comparison, the soil nutrient comprehensive grade of Chaoying small watershed (0.673) was larger than soil nutrient comprehensive grade (0.478) of Dingtan; both were affected by different landforms, soil layer thickness, regolith continuities and rocky desertification governance model obviously. With the optimization and adjustment of rocky desertification governance model, the soil nutrient accumulation in Chaoying and Dingtan small

收稿日期:2017-05-16

修回日期:2017-06-20

资助项目:国家十三五重点研发计划“喀斯特高原综合治理生态产业模式与技术集成示范”(2016YFC0502607);贵州省研究生教育创新计划项目“贵州省熊康宁喀斯特环境研究生导师工作室建设”(黔教研全 GZS 字[2016]04 号);贵州师范大学研究生创新资助项目(2016[31])

第一作者:肖杰(1991—),男,贵州威宁人,在读硕士,研究方向为喀斯特区域经济与生态建设。E-mail:mxj47@163.com

通信作者:熊康宁(1958—),男,贵州威宁人,教授,硕士,主要从事喀斯特石漠化生态治理、世界自然遗产申报等方面的研究。E-mail:xion-
gkn@163.com

watershed still has the potential to rise.

Keywords: rocky desertification; soil nutrient evaluation; minimum data set; small watershed

了解土壤的养分状况,不仅反映植被恢复模式对土壤的响应,同时为培肥土壤提供参考依据^[1],更是退化生态系统恢复与重建的研究热门内容。尤其在石漠化地区基于生态脆弱性的自然环境为背景的条件下,受到人类不合理改造自然的的活动,产生人地矛盾尖锐、土地质量严重衰退、地表水土流失和地下土壤漏失耦合作用,加剧了植被生境被破坏与碳酸盐岩大面积的裸露,在地表形成类似于荒漠化景观的生态环境退化演变过程^[2]。石漠化治理中有国内科研机构或学者提出了不同植被恢复为主的生态修复方式,而应用于石漠化治理研究^[3-4],其中植被和土壤分别作为石漠化治理的根本和关键因子^[5]。为研究土壤养分状况,针对土壤养分定性评价的缺陷,而采取客观的定量评价可弥补定性评价的不足。因而,与之有关的成果就土壤养分定量评价的研究主要集中于以最小数据集的确立进行评价植被恢复下的土壤质量^[6];研究石漠化演替过程中土壤肥力而运用主成分分析评价^[7];运用层次分析法确定权重,评价石漠化治理人工种草土壤肥力^[8];采取模糊数学的方法分别评价了石漠化治理区耕作层和县域尺度的耕地土壤养分状况^[9-10]等方面,上述的研究均表现为评价单一研究区土壤养分状况,对于不同地貌研究区与不同等级石漠化的土壤养分评价和对比的研究较为罕见。

土壤养分的分布与累积及其含量的高低,受制于生态系统过程和植物分布、植物归还土壤养分再平衡与生物活动的影响,以植被恢复为纽带的土壤养分是反映生态环境重建与恢复的状况指标之一。在喀斯特石漠化地区采取的石漠化治理模式以植被恢复为主,其中包含退耕还林(草)、封山育林、经果林栽培等措施进行生态环境的恢复与重建,这些过程因不同地貌、不同等级石漠化,以及不同植被恢复的模式构成的土壤环境条件下,土壤养分的丰缺亟待探明和对比,对石漠化治理与生态环境重建恢复研究的延伸具有重要的意义。

因此,本文选取能够代表不同等级石漠化的喀斯特高原山地毕节撒拉溪朝营小流域与高原峡谷关岭—贞丰交界顶坛小流域石漠化治理示范区为研究区。上述两个石漠化治理示范区均在全球热带—亚热带气候带下喀斯特地貌最为典型的分布区中心,同时也处于中国南方喀斯特的中心。基于此,站在前人的研究视角下^[5,11-12]对石漠化治理区进行透视,依据石漠化治理区以碳酸盐岩为基础的地质条件和发展

骨架的地貌支撑,在空间上构成石漠化演化和治理方式的异同。选择不同地貌与不同等级石漠化治理模式地为研究对象,通过最小数据集科学有效地筛选土壤养分评价指标,进行综合评价,以期揭示石漠化治理区高原山地与高原峡谷、不同等级石漠化下治理模式地的土壤养分整体状况和水平。客观反映该地区不同地貌与不同等级石漠化下治理模式的土壤养分的现状,为同气候带下的石漠化地区小流域综合治理方式上,对土壤养分培育和改良、生态环境重建与恢复提供一定数据支撑和思路参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

探讨评价不同地貌研究区和不同等级石漠化治理模式地的土壤养分整体状况与水平,应充分考虑典型的石漠化治理示范区在石漠化程度、石漠化景观类型、植被覆盖率、治理恢复类型和植被类型等自然地理的要素信息(表 1),因此本文选择两个颇具典型性喀斯特地貌的石漠化区域,潜在一轻度等级石漠化区毕节撒拉溪朝营小流域、中度—强度等级石漠化区关岭—贞丰花江顶坛小流域,分别代表高原山地与高原峡谷地貌,其中前者位于贵州省西北部(图 1),毕节市六冲河流域支流区内,经纬度为东经 105°02′—105°08′,北纬 27°11′—27°16′。该地区石漠化等级以潜在一轻度等级的石漠化为主,潜在与轻度等级石漠化占石漠化面积的 53.17%,中度与强度等级石漠化占石漠化面积的 11.66%,小流域内裸岩分布于较陡的坡地上,裸露部分较少且伴有残土覆盖。境内分布二叠系灰岩夹白云岩和砂页岩,为流域内岩石质地构造的主要代表。土壤为地带性黄壤,少部分分布黄棕壤和风化石灰土。气候与地貌类型为亚热带温凉干旱气候和喀斯特高原山地。石漠化治理已完成以坡改梯工程等水土保持措施和退耕种植经济林工作,以防治石漠化的发生和促进土壤养分恢复。当地形成的植被类型主要以天然野生植被大白杜鹃、十大功劳、金丝桃等藤刺灌丛以及少有分布的青冈、通脱木乔木林为主,经果林植被则以刺梨、核桃为主。

后者位于贵州省西南部(图 2),关岭县以南、贞丰县以北的北盘江花江峡谷南岸,经纬度为东经 105°36′—105°46′,北纬 25°39′—25°41′。该地区石漠化等级主要为中度—强度等级石漠化,潜在与轻度等级石漠化占石漠化面积的 9.30%,而中度与强度等

级石漠化占石漠化面积的 90.7%,小流域内有少量潜在与轻度石漠化分布于台地区域。境内分布三叠系白云岩、泥质白云岩和页岩,为流域内岩石质地构造的主要代表。土壤在台地部分为黄壤,坡地部分为石灰土。气候与地貌类型为喀斯特亚热带干热河谷气候和喀斯特高原峡谷。石漠化治理在早期完成水

土保持相关工程措施,后期为花椒为主的经济林规模化种植以促进土壤养分恢复。植被类型主要为亚热带常绿落叶针阔混交林,原生植被均已破坏,现以天然野生植被构树、铁线莲和白三叶等灌草丛和经果林金银花、花椒等主要的次生植被为主,以及少有分布的青冈、刺槐、马尾松为主的乔木林。

表 1 研究区地理要素信息

研究区	石漠化等级	海拔/m	植被覆盖率/%	石漠化治理恢复模式	植被类型
毕节撒拉溪高原山地 朝营小流域	潜在	1844	67	封山育林	灌丛次生林
	轻度	1781	46	退耕还林	刺梨、核桃
	中度	1708	33	退耕还草	杂草、少量刺梨核桃
	强度	1831	16	自然恢复	稀疏灌草丛
关岭—贞丰花江高原峡谷 顶坛小流域	潜在	745	56	农林混合地	花椒、玉米
	轻度	717	40	退耕还林	花椒、金银花
	中度	772	20	退耕还草	杂草、少量花椒
	强度	824	12	自然恢复	稀疏灌草丛

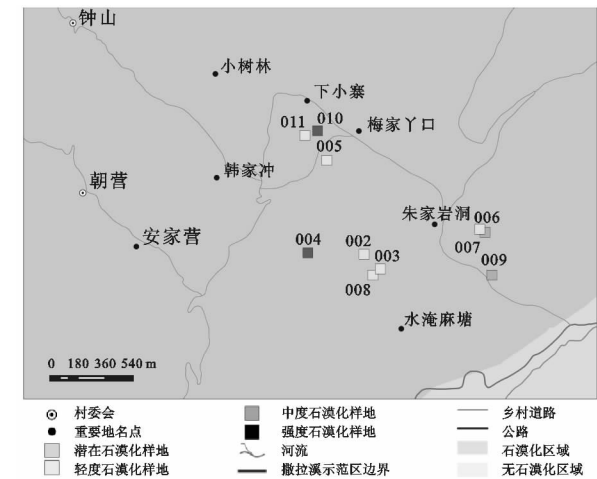


图 1 研究区 I 区

1.2 研究方法

首先分别在朝营小流域和顶坛小流域研究区内,于 2015 年 7 月根据不同等级石漠化划分标准^[4]和野外踏勘的基础上,选取 4 种不同等级石漠化实施的治理恢复模式地为研究对象。在潜在石漠化中,由于两类研究区潜在石漠化占石漠化总面积的份额不同以及土壤的厚度不一,朝营小流域多为封山育林治理模式地,顶坛小流域则为农林混合治理模式地,两类研究区的轻度石漠化为退耕还林治理模式地、中度石漠化为退耕还草治理模式地和强度石漠化为自然恢复治理模式地。基于石漠化地区石多土少的缘故以及土壤覆盖范围和厚度,在上述 4 种模式地基础上再次划分潜在—轻度治理模式地各为 3 个 20 m×20 m 的样地,中度—强度治理模式地各为 2 个 20 m×20 m 的样地,同时以 S 形法在每个样地采取深度为 0—20 cm 的表层土,各取 3 个点,所取土样混合均匀为 1 kg 土。采集完成后将土样带回国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心实验室自然风干,剔除石块和杂质后使用玛瑙研钵

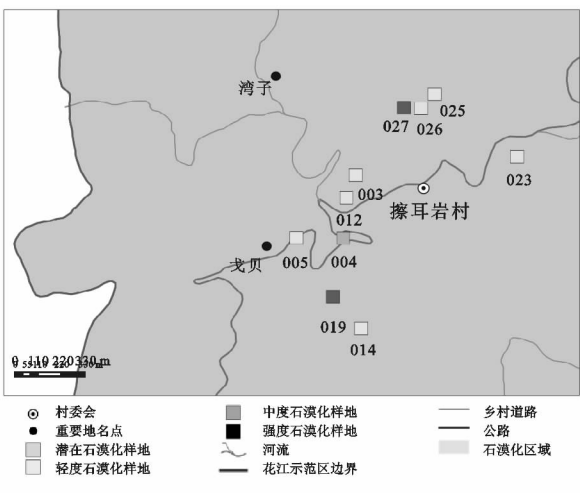


图 2 研究区 II 区

研磨,过 0.149 mm 土壤筛,取得待测土壤样品,用于测定土壤养分指标(表 2),样品分析方法参见参考文献^[13],分析测定土壤样品数据采取针对各指标进行 3 次平行测定,结果取其平均值。

表 2 土壤样品的测定项目

测定项目	试验分析方法
土壤 pH 值	电位法
土壤全氮	半微量凯氏法
土壤全磷	高氯酸—硫酸—钼锑抗比色法
土壤全钾	氢氧化钠熔融—火焰光度计法
土壤有机质	重铬酸钾外加热法
土壤碱解氮	碱解扩散法
土壤速效磷	盐酸—硫酸浸提法
土壤速效钾	乙酸铵浸提—火焰光度法

1.3 数据分析

使用 Microsoft Excel 2016 对试验数据进行整理后,按照相关研究的方法^[14-15]采用 SPSS 19.0 数据分析软件对基本试验数据进行主成分分析,在主成分分析中计算各个土壤养分指标所有特征值≥1

的主成分上的载荷值。

1.3.1 最小数据集确立方法 在这里分组的原则是:(1) 筛选同一主成分中载荷值 ≥ 0.5 的土壤养分指标分为一组;(2) 若同时出现在两个主成分中均 ≥ 0.5 的载荷值,则将该土壤指标参数归入与其他相关性较低的土壤指标参数为一组。分组完毕后,采用公式(1)分别计算每组土壤养分指标的 Norm 值,为进一步分析所选取指标的相关性,则选取每组的 Norm 值中最高分值的 10%范围内的土壤指标,经过相关性分析后,若在矩阵中高度相关($r>0.5$)则按 Norm 值中最高值的指标进入最小数据集,完成最终的最小数据集的确立。

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

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

1.3.2 隶属度函数标准化 由于影响土壤养分因素很多且处于变化之中,因而各个土壤养分指标对土壤养分的影响是模糊的概念,采取隶属度函数^[16] 计算获取相应的隶属度值,以评价土壤中各个土壤养分指标的优劣。隶属度函数还分为以 S 型和抛物线型两种类型的隶属函数,根据已筛选进入 MDS 中各土壤养分指标对土壤养分的正负关联度决定各自的隶属函数类型。

S 型隶属函数公式:

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

抛物线型隶属函数公式:

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

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 本文采取加权求和法^[17] 选择建立综合评价模型来完成对顶坛小流域土壤养分的综合评价,此方法是基于模糊数学中加权求和法,是将评价结果转化为 0.1~1.0 数值,便于不同区域土壤养分之间进行比较,让研究的评价结果更为直观,其中评价的数值越大,代表着土壤养分越丰富。

加权求和公式:

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i N_i \quad (4)$$

式中: W_i 为权重,表示主成分分析中第 i 个指标在其主成分矩阵中的方差贡献率与特征值大于 1 的所有主成分矩阵的方差贡献率总和之比; N_i 为进入最小数据集中指标参数并依照正负关联度,计算后得出的隶属度值。

2 结果与分析

2.1 石漠化治理区土壤养分各指标的统计特征

针对石漠化植被演替的变化对土壤理化性质造成影响,尤其是对土壤养分含量有上升的作用^[18],本文中表 3 的统计结果与显著性差异表明,在治理模式影响下,朝营小流域潜在石漠化地全氮含量明显大于轻度和强度的石漠化地($p<0.05$),潜在石漠化地全磷含量明显大于中度和强度的石漠化地($p<0.05$),潜在石漠化地有机质含量明显高于中度和强度石漠化地($p<0.05$),强度石漠化地速效钾含量明显低于潜在和轻度等级石漠化地($p<0.05$)的含量,而其他土壤养分指标在不同等级石漠化地之间均无显著性差异。顶坛小流域土壤养分中轻度石漠化地全磷含量显著高于中度石漠化地($p<0.05$),中度石漠化地有机质含量显著高于强度石漠化地($p<0.05$),潜在石漠化地碱解氮含量明显高于轻度石漠化地($p<0.05$),中度石漠化地速效钾显著高于强度石漠化地($p<0.05$)。而其他土壤养分指标在不同等级石漠化地之间均无显著性差异。朝营小流域除土壤 pH 值低于顶坛小流域外,其他养分指标均高于顶坛小流域。

2.2 土壤养分最小数据集的确定

本文所选取的土壤养分指标依次为土壤 pH 值、土壤全氮、土壤全磷、土壤全钾、土壤有机质、土壤碱解氮、土壤速效磷、土壤速效钾 8 个土壤养分指标在 SPSS 中进行主成分分析,同时进行 KMO 值和 Bartlett 球形检验,检验后结果显示,KMO=0.709, Sig.=0.001 且小于显著性水平 0.05,检验的结果所表明适合做主成分分析。

由主成分分析结果所知,已获取前 3 个均大于 1 的特征值(表 4),其累积贡献率为 75.540%,并按照上述方法所列出的分组原则进行分为 3 个组(表 5)。两类小流域的土壤养分评价指标筛选指标为:土壤 pH 值、土壤全氮、土壤有机质、土壤碱解氮、土壤速效钾。在其中土壤碱解氮与土壤速效钾、土壤 pH 值与土壤有机质分别属于 PC_1 , PC_4 中的多个高载荷变量因子,按照原则对上述 2 组土壤养分指标参数进行相关性分析,分析结果显示(表 6),土壤碱解氮与土壤速效钾显著相关($p<0.01$),对比其两者 Norm 值大小

可知:土壤碱解氮<土壤速效钾,因此,土壤速效钾进入 MDS;土壤 pH 值与土壤全钾两者之间无显著性且为弱相关,因此两者均进入 MDS。最后依据原则所筛选进入 MDS 的土壤养分指标为土壤 pH 值、土壤全氮、土壤有机质、土壤速效钾 4 个指标,其中全氮和速

效钾是石漠化治理区植被恢复重要限制因子,不仅是影响土壤养分的有效性,而且是植物生长所需主要土壤养分的指标,土壤 pH 值是影响植物根系吸收土壤中氮素而维持自身电荷平衡,土壤有机质为植物生长和促进其根系发育以便植物吸收养分而发挥作用。

表 3 两种石漠化治理区不同治理模式地及整体土壤养分含量

研究区	石漠化程度	土壤 pH 值	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	有机质/ (mg · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
Ⅰ 毕节撒拉溪高原山地 朝营小流域	潜在	7.26a	1.81a	0.71a	8.93a	60.52a	270.36a	7.24a	123.87a
	轻度	7.25a	1.57b	0.57ac	8.28a	46.06ab	247.57a	6.18a	124.59a
	中度	7.37a	1.61ab	0.55bc	7.92a	40.34b	249.69a	5.02a	117.06ab
	强度	7.19a	1.48b	0.45b	6.68a	37.10c	247.61a	4.83a	110.16b
Ⅱ 关岭—贞丰花江高原 峡谷顶坛小流域	潜在	7.39a	1.63a	0.48ab	6.82a	45.94ab	166.60a	4.00a	104.90a
	轻度	7.41a	1.40a	0.60a	6.84a	51.19ab	149.50b	4.74a	110.44a
	中度	7.44a	1.69a	0.37b	5.32a	47.85a	141.68ab	5.16a	101.60a
	强度	7.46a	1.44a	0.32ab	6.06a	31.54b	153.60ab	4.43a	90.88b
研究区Ⅰ	土壤养分含量	7.23	1.68	0.61	7.81	52.34	263.26	6.02	121.39
研究区Ⅱ		7.40	1.52	0.47	6.17	41.83	154.30	4.31	103.58

注:相同字母表示无显著差异,不同字母表示具有显著差异($p<0.05$)。

表 4 前 4 个均大于 1 的特征值

主成分	初始特征值		
	总值	方差	累积贡献率
PC ₁	2.793	34.92	36.92
PC ₂	1.216	15.20	50.12
PC ₃	1.025	12.81	62.93
PC ₄	1.008	12.61	75.54

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				分组	Norm 值
	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄		
土壤全氮	0.247	0.847	0.286	-0.012	2	1.06
土壤全磷	0.655	-0.295	-0.345	0.250	1	1.22
土壤全钾	0.537	-0.176	0.446	0.323	1	1.07
土壤有机质	0.331	0.389	-0.467	0.650	4	1.07
土壤碱解氮	0.774	-0.263	0.197	-0.192	1	1.35
土壤速效磷	0.672	0.338	0.171	-0.247	1	1.22
土壤速效钾	0.865	-0.144	-0.005	-0.057	1	1.46

表 6 同一主成分中多个高载荷变量因子相关性分析

PC ₁	土壤 碱解氮	土壤 速效钾	PC ₄	土壤 pH 值	土壤 有机质
土壤碱解氮	1.000	0.662**	土壤 pH 值	1.000	-0.054
土壤速效钾	0.662**	1.000	土壤有机质	-0.054	1.000

注:**表示 $p<0.01$ 。

2.3 石漠化治理区土壤养分综合评价

石漠化治理模式对土壤养分的影响属于模糊性的概念,为此建立土壤养分指标的隶属度函数,达到量纲标准归一化。因此,将进入最小数据集的土壤养分指标进行隶属度函数标准化处理,其中土壤 pH 值在土壤环境中属于一个稳定范围,其范围过高或过低对土壤产生负效应,因而属于抛物线型函数;而土壤全氮、有机质和

速效钾对土壤养分有正效应作用,属于 S 型函数。因此依据正负效应指标的不同分别代入公式(2)—(3)中得出隶属度值,其权重系数则由上述方法得出(表 7)。

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	
土壤 pH 值	抛物线型	6.55	8.03	0.170
土壤全氮	S 型	1.02	2.50	0.201
土壤有机质	S 型	29.04	74.52	0.167
土壤速效钾	S 型	73.01	133.59	0.462

结合上述的隶属度值和采取综合评价法对朝营小流域与顶坛小流域土壤养分进行定量化评价,将评价结果转为 0.1~1.0 的数值,以示评价结果更易区分和直观,便于不同地貌与不同等级石漠化的治理模式地进行对比。将所求的隶属度值与权重系数代入公式(4)中求出了不同地貌与不同等级石漠化治理模式地的评价分值(表 8)。

表 8 土壤养分评价分值

研究区	石漠化 程度	石漠化 治理模式	土壤养分 评价分值
Ⅰ 毕节撒拉溪高原山地 朝营小流域 研究区Ⅰ土壤养分评价分值	潜在	封山育林	0.729
	轻度	退耕还林	0.658
	中度	退耕还草	0.580
	强度	自然恢复	0.525
			0.673
Ⅱ 关岭—贞丰 花江高原峡谷顶坛小流域 研究区Ⅱ土壤养分评价分值	潜在	农林混合	0.540
	轻度	退耕还林	0.515
	中度	退耕还草	0.501
	强度	自然恢复	0.341
			0.478

3 讨论与结论

3.1 土壤养分评价最小数据集

根据 Norm 值和分组原则确立了土壤 pH 值、全氮、有机质、速效钾等指标入选土壤养分的最小数据集指标体系,不仅是影响土壤养分评价的指标,而且是植物生长所需主要土壤养分的指标。说明这 4 项指标数据无冗余能够代表石漠化治理区的土壤养分特性。此外,本文研究所取土壤养分指标较少,下一步可细化增进可供选择的土壤养分指标进行参评,丰富评价石漠化地区参评指标体系,以便更全面反馈评价结果。

3.2 不同等级石漠化地土壤养分评价

由土壤养分评价分值可知,朝营小流域土壤养分的综合评价分值,呈现随石漠化程度加深,土壤养分评价分值递减趋势。其中潜在石漠化地为最高,受石漠化治理中封山育林模式影响,促进林下灌草丛恢复和林地枯落物的增加,有利于枯落物腐败加速土壤养分的累积^[19],因此土壤评价分值相对较高。退耕地和裸岩溶蚀凹槽对土壤养分有重要影响^[20],该研究区因坡耕地较多,退耕后在轻度、中度石漠化地广泛栽种以刺梨核桃为主的经果林和紫花苜蓿、鸭茅等牧草。对土壤减少翻耕和土壤养分的破坏有积极性的作用;据实地观测朝营小流域强度石漠化地仅限于较陡的坡地且分布范围较小,裸岩覆盖地衣与苔藓等初级植物,受流水侵蚀与运移作用往往在石槽下部蓄积土壤,有利于土壤养分在溶蚀凹槽中累积。此外,单一的植被配置方式,缺少一定数量枯落物的输入,构成牧草种植的中度石漠化地土壤养分评价分值低于刺梨为主的经济林轻度石漠化地。

而顶坛小流域表现为轻度土壤养分评价分值高于潜在土壤养分评价分值,出现中度向强度递减的趋势。说明顶坛小流域为实施退耕还林(草)的工作开展已有多,退耕地的退耕时间与土壤养分累积有正相关关系^[21]。该地广泛种植花椒、金银花等经济林和构树、铁线莲、白三叶等灌草丛植物,因其在一定程度上巩固水土减轻土壤养分流失,同时枯落物的蓄积还具有腐败分解其形成土壤养分的作用,为石漠化进一步恶化降低了可能性。潜在石漠化地受除草、施肥及农耕翻种玉米、花生等作物等因素影响导致土壤养分含量低于轻度、中度石漠化退耕还林(草)地。此外,该地石槽中土壤厚度较厚的地方有花椒以及少量分布构树等天然灌丛生长,这主要受裸露的岩石含有节理、裂隙吸收了降雨,拦截

了一定的坡面产流的速度和土壤蓄积的影响^[22],加之大气沉降养分与裸岩受喀斯特溶蚀风化产物,在这些石质凹槽处下的土壤中蓄积形成植物有关^[23]。

3.3 不同地貌区土壤养分评价对比

两类研究区综合评价分值表明,朝营小流域土壤养分处于中等偏上水平(0.673),而顶坛小流域土壤养分处于中等偏下水平(0.478)。该评价分值与朝营小流域和顶坛小流域实际土壤养分状况较为符合。

针对朝营小流域而言,其处于夷平面为核心组成的高原区,受构造运动的抬升地势起伏高,河流侵蚀作用较弱,为贵州喀斯特溶蚀作用滞后发育区。该地土被较为连续,土层较厚且发育土壤为黄壤、黄棕壤为主,石质荒漠化景观均出现在较陡坡地且范围较小,整体上石漠化程度以潜在一轻度为主。基于此,该小流域既采取退耕还林模式种植刺梨与核桃,同时引进草食畜牧业以种植饲用牧草等措施减轻水土流失,从而改善土壤增进土壤养分的累积。使朝营小流域在土壤养分综合评价分值高于顶坛小流域土壤养分综合评价分值。

与朝营小流域对比,顶坛小流域处于坡降大、水流急而深切的峡谷区,受山区性河流影响侵蚀作用强且地表更为崎岖破碎,为贵州喀斯特溶蚀重置发育区。因该地在更早时期出现人地矛盾尖锐,导致水土流失严重和石质荒漠化景观遍布广,石漠化程度形成以中度一强度为主。遍布的裸岩下形成土被不连续、土壤层薄,分布非地带性石灰土,小范围的洼地、台地有较厚土层且发育黄壤土。小流域内多年退耕恢复生态效果较好,尤其是种植花椒带来植被覆盖率和生态效益的提升。由于花椒为当地主要经济林品种,相比金银花和砂仁等药用植物有很大的范围种植,个别退耕还林时间长的高树龄花椒改良土壤作用趋弱、生产管理不善和水肥供应不力构成立地衰退型^[24-25],从而对顶坛小流域土壤养分综合评价分值构成影响。

尽管朝营小流域与顶坛小流域在土壤养分上存有差异,本文研究还注意到两类研究区的综合评价分值均低于有关研究^[10]在喀斯特山区耕地土壤养分评价分值(0.744),这在一定程度上反映当前石漠化治理区土壤养分还有上升的空间,常年的石漠化治理进行植被恢复所带来的生态效益是较显著的,但在追求以植被覆盖为量的同时忽略对以土壤养分为质的培育和改良,这既是石漠化加速植被演替工作出现的缺陷之一,同时也是石漠化治理区土壤养分供应不足与滞后,而亟待解决的关键技术问题。

参考文献:

[1] 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.

[2] 熊康宁,黎平,周忠发,等. 喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究:以贵州省为例[M]. 北京:地质出版社,2002.

[3] 国家林业局防治荒漠化管理中心,国家林业局中南林业调查规划设计院. 石漠化综合治理模式[M]. 北京:中国林业出版社,2012.

[4] 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.

[5] 曹建华,袁道先,童立强. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J]. 草业科学,2008(9):40-50.

[6] 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.

[7] 钟杰,蒋新革,吴立潮,等. 石漠化演替过程中土壤肥力质量综合评价[J]. 中南林业科技大学学报,2013,33(7):56-61.

[8] 孙泉忠. 贵州省石漠化综合治理人工种草土壤肥力综合评价[J]. 贵州农业科学,2015,43(9):94-97.

[9] 王建锋. 重庆石漠化丘陵区耕层土壤养分空间变异性研究及肥力综合评价[D]. 重庆:西南大学,2010.

[10] 舒英格,何腾兵,高雪,等. 喀斯特山区县域耕地土壤养分综合评价[J]. 贵州农业科学,2009(8):112-115.

[11] 熊康宁,李晋,龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报,2012,67(7):878-888.

[12] 熊平生,袁道先,谢世友. 我国南方岩溶山区石漠化基本问题研究进展[J]. 中国岩溶,2010,29(4):355-362.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.

[14] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality[M]. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of American, Inc, 1994.

[15] 李婕玲,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):54-59.

[16] 王建国,杨林章,单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. 土壤学报,2001,38(2):176-183.

[17] 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.

[18] 司彬,姚小华,任华东,等. 黔中喀斯特植被恢复演替过程中土壤理化性质研究[J]. 江西农业大学学报,2008,30(6):1122-1125.

[19] 杨吉华,张永涛,高祥伟,等. 封山育林提高森林蓄水保土效益的研究[J]. 水土保持研究,2001,8(3):2-5,54.

[20] 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.

[21] 周涛,戴全厚,吴秀芹,等. 喀斯特山区退耕还林地土壤养分效应及评价[J]. 水土保持研究,2011,18(6):71-74.

[22] 王济,蔡雄飞,雷丽,等. 不同裸岩率下我国西南喀斯特山区土壤侵蚀的室内模拟[J]. 中国岩溶,2010,29(1):1-5.

[23] 盛茂银,刘洋,熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J]. 生态学报,2013,33(19):6303-6313.

[24] 杨苏茂,熊康宁,喻阳华,等. 我国喀斯特石漠化地区林草植被恢复模式的诊断与调整[J]. 世界林业研究,2017,30(3):91-96.

[25] 廖洪凯,龙健,李娟,等. 花椒(*Zanthoxylum bungeamun*)种植对喀斯特山区土壤水稳性团聚体分布及有机碳周转的影响[J]. 生态学杂志,2015(1):106-113.

(上接第 292 页)

[22] 刘家宏,王光谦,李铁健. 黄河数字流域模型的建立和应用[J]. 水科学进展,2006,17(2):186-195.

[23] 陈玉林,韩家田. 半干旱地区洪水预报的若干问题[J]. 水科学进展,2003,14(5):612-616.

[24] 王万忠,焦菊英,郝小品. 黄土高原暴雨空间分布的不均匀性及点面关系[J]. 水科学进展,1999,10(2):165-169.

[25] Ariza-Villaverde A B, Jiménez-Hornero F J, Ravé E G D. Influence of DEM resolution on drainage network extraction: A multifractal analysis [J]. Geomorphology, 2015,241:243-254.

[26] 师长兴,周园园,范小黎,等. 利用 DEM 进行黄河中游河网提取及河网密度空间差异分析[J]. 测绘通报, 2012(10):24-27.

[27] Bandara C M M. Drainage density and effective precipitation [J]. Journal of Hydrology, 1974,21(2):187-190.

[28] Wang H, Yang Z, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe(Yellow River) sediment load (1950—2005): Impacts of climate change and human activities[J]. Global and Planetary Change, 2007,57(3):331-354.

[29] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984,28(3): 323-344.