

岩溶山区石漠化生态治理的生态效应研究

贺祥¹, 熊康宁², 周文龙², 李晨², 李晋²

(1. 贵州凯里学院, 贵州 凯里 556000; 2. 贵州师范大学 中国南方喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 以贵州省花江峡谷石漠化治理示范区为研究单元, 对比分析了小流域 2005 和 2009 年生态治理下的土壤理化性质与植物数量特征的变化。结果发现, 该区土壤理化性质的变异系数值降低, 说明土壤理化性质的空间变异程度降低; 土壤总孔隙度略微降低, 非毛管孔隙度明显增加, 毛管孔隙度明显下降, 土壤毛管持水量明显降低, 土壤田间持水量明显提高, 表明土壤的孔隙结构更加合理, 土壤持水能力与通气透水性增强; 土壤有机质含量变化不明显, 全氮、全磷含量明显增加, 全钾营养元素含量降低, 土壤 pH 值略微降低; 植物的高度、基径、冠幅、均匀度等数量特征呈明显增长趋势, 土壤质量与植物群落的生态效应具有较好的一致性。经过石漠化生态治理的土壤、植被生态效应改善与提高, 逐步改善岩溶山区石漠化生态环境。

关键词: 岩溶山区; 石漠化生态治理; 生态效应; 花江峡谷; 贵州省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)04-0241-06

中图分类号: X171.4

Ecological Effects in Ecological Management of Rocky Desertification in Karst Mountain Region

HE Xiang¹, XIONG Kang-ning², ZHOU Wen-long², LI Chen², LI Jin²

(1. Guizhou Kaili Institute, Kaili, Guizhou 556000, China; 2. Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: The change of soil physicochemical property and vegetation quantity attributes in Huajiang canyon demonstration area of ecological management of rocky desertification in Guizhou Province during the period from 2005 to 2009 was analyzed. The results indicated that: (1) The coefficient of variation of soil physicochemical properties reduced, suggesting its spatial variation degree decreased. (2) The soil total porosity slightly declined; the soil non-capillary porosity significantly increased; the soil capillary porosity and the soil capillary capacity decrease markedly; the soil field capacity rose obviously, indicating that soil porosity configuration became more rational. (3) Change of organic matter content was not distinct. Total nitrogen and total phosphorus significantly increased but total potassium decreased. Meanwhile, soil pH value slightly decreased. (4) The height, base diameter, crown diameter and evenness of plants increased prominently. The ecological efficiency of soil quality and plant community was preferably coherent. All above results illustrate that the soil and plant ecological efficiency have been improved, which ameliorate the environments in rocky desertification of ecological management areas in karst mountainous region.

Keywords: karst mountain; ecological management of rocky desertification; ecological effects; Huajiang canyon; Guizhou Province

西南地区是我国岩溶最主要的分布区, 贵州、广西、云南、四川等省份, 其分布面积大约为 3.36×10^5 km², 其中贵州省境内的分布面积占 38.7%。西南岩溶山区石漠化是我国西部大开发中生态建设所面临

的关键性地域环境问题之一, 已成为我国岩溶山区可持续发展的主要制约因素之一。贵州高原低山丘陵广布, 岩溶发育强烈, 土壤侵蚀严重, 是地球化学敏感和生态环境脆弱的地区。所以对石漠化治理, 是贵州

收稿日期: 2010-10-06

修回日期: 2010-12-04

资助项目: 国家十二五科技支撑计划重大课题“喀斯特高原峡谷石漠化综合治理技术与示范”(2011BAC09B01); 贵州省教育厅自然科学基金青年项目“喀斯特石漠化治理土壤环境效应研究: 以清镇、花江、毕节示范区为例”(黔教科 20090083)

作者简介: 贺祥(1978-), 男(汉族), 贵州省水城县人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为岩溶环境及其治理。E-mail: hexiang1997403@163.com。

通信作者: 熊康宁(1958-), 男(汉族), 贵州省威宁县人, 教授, 研究方向为喀斯特与洞穴、资源与环境及石漠化生态治理。E-mail: xiongkn@163.com。

岩溶山区生态环境改善的关键。当前,针对岩溶山区生态治理模式及生态效益评价、治理前土壤质量特征报道较多^[1-6],但对石漠化治理过程土壤质量特征的变化研究较少。因此,选择贵州省花江峡谷石漠化治理示范区为研究对象,通过连续多年对治理区样地的监测,分别对 2005 和 2009 年样地土壤、植被进行分析研究,研究结论可为科学评估石漠化治理成效以及为岩溶山区石漠化综合治理效益评估提供理论支持,具有一定的科学意义。

1 研究区及研究方法

1.1 研究区及样地概况

花江典型示范区查尔岩峡谷小流域位于花江南岸,海拔在 620~900 m 之间。发育在强岩溶化三叠系碳酸盐岩组为主的法郎向斜构造上,主要出露地层为三叠系中统的关岭组、法郎组白云岩以及少量夜郎组砂页岩。地貌以低中山河谷岩溶峰丛、台地为主,发育有大量的裂隙、漏斗、落水洞和深洼地。该区基岩裸露率较高,大部份为强度以上石漠化等级土地。土壤表现出薄、瘦、干、黏、碱特性,主要有红色石灰土、红小泥土、红大泥土、黄色石灰土、黑色石灰土等

类型。自然植被主要属半湿润常绿阔叶林,以复羽叶栎、榕树、楹树、血桐、香椿为主,并有耐旱生的木棉、余甘子、仙人掌等植物,反映出石生性、耐旱性和喜钙性的石灰岩植被种群生态特征,生态环境较适于建立花椒生产基地。

1.2 研究区的生态治理概况

根据花江典型示范区查尔岩峡谷小流域的地形崎岖、坡度较陡、海拔低、热量充足、石漠化严重等特征,在研究区内采取工程与生态措施进行治理。采取建水渠、蓄水池、拦沙坝、坡改梯等工程措施,主要采取种植花椒为主的经果林,种植砂仁、金银花、中药材的生物措施进行治理。治理措施从 2002 年开始实施,到 2005 年时建设基本完成。生态治理监测从 2003 年开始,从监测数据的完整性角度考虑,本研究采用 2005 和 2009 年对样地的土壤、植被等生态环境监测数据进行对比分析。

1.3 植物群落调查与土壤样品的采集与测定

对花江典型示范研究区查尔岩小流域按强度、中度、轻度、潜在石漠化等级设置样地,共选择 11 样地。根据地形建立 20 m×10 m 大小的监测样地,结合地形图与 GPS 野外测量结果,各样地基本情况列于表 1。

表 1 2005 年花江查尔岩小流域各样地基本情况

样地编号	地貌	海拔/m	坡度/(°)	坡向	岩石裸露率/%	石漠化等级	植被覆盖率/%	植被配置方式
12	槽谷	735	0	NW	6	潜在	21	花椒、构树等
14	峰丛台地	800	0	NW	0	潜在	18	花椒、木豆、构树等
26	峰丛台地	700	0	SE	0	潜在	20	花椒、金银花等
3	槽谷边坡	745	40	SE	45	轻度	16	花椒、金银花、构树等
25	侵蚀台地	721	0	SE	60	轻度	18	花椒、构树等
23	侵蚀陡坡	665	45	SE	60	轻度	14	花椒、砂仁、杂草等
4	槽谷边坡	772	20	NW	70	中度	16	花椒、杂草等
10	侵蚀沟谷	820	25	NW	72	中度	13	花椒、砂仁、杂草等
9	溶沟石牙	893	30	NW	72	强度	8	花椒、金银花、杂草等
19	溶沟石牙	865	30	NW	78	强度	9	花椒、金银花、构树等
27	溶沟石牙	715	15	SE	75	强度	7	花椒、木豆、构树等

对植物群落调查是每年 8 月,调查与采样方法是,灌木样方 10 m×10 m,草本样方 5 m×5 m,1 m×1 m。分别调查每个样方中灌木的种类、数量、地径、高度、南北冠幅和东西冠幅、盖度;草本的物种数、平均高、盖度。物种多样性、均匀度、优势度计算方法^[7]具体表达式为:

Shannon—Wiener 多样性指数(H):

$$H = - \sum_{i=1}^S N_i \log_2 N_i$$

Simpson 优势度指数(C):

$$C = \frac{\sum_{i=1}^S N_i^2}{N^2}$$

Pielou 均匀度指数: $J_w = H / \ln S$

式中: S ——样方物种数; N ——样方所有物种个体数总和; N_i ——样方内种 i 的重要值。

对土壤采样时间为 2005—2009 年,每年 8 月和 12 月,在实验室分析后取其平均值。土壤取样采用梅花型采集表层土壤(0—20 cm)共 5 个土壤样品,混合制样,带回实验室测定土壤理化性质。土壤样品基本上代表了岩溶山区不同石漠化等级在生态治理措施下的土壤质量变化特征。

(1) 土壤物理性质测定方法。土壤机械组成采用简易比重计法; 容重采用环刀法; 持水性能采用环刀取原状土后在室内测定, 并在此基础上计算土壤孔隙度。

(2) 土壤化学性质测定方法。土壤碱解氮, 采用 $\text{FeSO}_4 - \text{Zn}$ 还原碱解扩散法; 土壤速效磷, pH 值 < 6.5 时用盐酸氟化铵法, pH 值 > 6.5 时用碳酸氢钠法; 土壤速效钾, 采用乙酸铵浸提法; 全氮(TN), 采用半微量开氏法; 全磷(TP), 采用氢氧化钠碱熔—铝锑抗比色法; 全钾(K), 采用氢氟酸高氯酸消煮法; 有机质(OM), 采用高温外加热重铬酸钾氧化容量法。数据采用 SPSS 及 Excel 软件分析处理。

2 结果与分析

2.1 石漠化治理对土壤物理性质的生态效应

岩溶山区石漠化治理的土壤质量发生变化与治理方式、土地利用类型、植被变化等有密切的关系。土壤物理特性是影响土壤的通气、透气、持水、导热、抗蚀等各种功能, 是反映土壤质量的一个重要方面^[8]。岩溶山区石漠化治理通过植被对土壤生态系统产生不同的影响, 必然引起土壤物理性质的变化。通过对不同治理时期土壤物理性质指标(容重、孔隙度、持水性能)变化的研究, 分析石漠化生态治理对其土壤物理性质变化的生态效应(表2)。

表2 石漠化生态治理区孔隙分布、持水性能、土壤容重的变化

石漠化等级	特征值	土壤总孔隙度/%		毛管孔隙度/%		非毛管孔隙度/%		毛管持水量/%		田间持水量/%		土壤容重/%		pH 值	
		2005年	2009年	2005年	2009年	2005年	2009年	2005年	2009年	2005年	2009年	2005年	2009年	2005年	2009年
潜在石漠化	均值	54.85	50.86	46.92	35.59	7.93	15.26	39.01	27.29	29.94	36.60	1.20	1.31	8.13	7.62
	标准差	2.65	1.72	0.89	1.53	3.10	1.79	2.51	1.93	3.70	2.52	0.07	0.06	0.14	0.28
	变异系数/%	4.84	3.37	1.90	4.29	39.13	11.75	6.44	7.07	12.35	6.88	5.93	4.21	1.72	3.70
轻度石漠化	均值	52.03	54.37	45.46	36.98	6.58	17.40	38.38	30.88	31.63	42.80	1.27	1.20	7.96	7.70
	标准差	8.76	2.59	6.54	1.43	2.27	3.72	8.90	1.45	6.05	0.91	0.23	0.08	0.24	0.18
	变异系数/%	16.83	4.76	14.40	3.87	34.46	21.35	23.19	4.71	19.13	2.12	18.01	6.49	3.02	2.35
中度石漠化	均值	59.89	55.73	47.00	36.25	12.90	19.48	44.21	31.43	35.03	45.77	1.07	1.16	7.95	7.66
	标准差	1.22	3.80	1.72	0.40	2.93	4.19	0.28	2.79	3.01	8.88	0.04	0.11	0.08	0.33
	变异系数/%	2.03	6.81	3.66	1.09	22.76	21.53	0.62	8.86	8.58	19.40	3.32	9.75	0.98	4.34
强度石漠化	均值	57.70	57.05	49.90	34.54	7.79	22.50	45.24	30.99	36.22	41.18	1.12	1.12	7.82	7.65
	标准差	2.74	1.54	0.83	5.48	2.68	4.94	2.05	5.75	0.84	8.73	0.08	0.05	0.20	0.16
	变异系数/%	4.75	2.69	1.66	15.85	34.46	21.93	4.54	18.55	2.32	21.19	6.74	4.04	2.49	2.15

从表2可以看出, 石漠化土壤经过生态治理, 2009年较2005年土壤总孔隙度呈略微下降, 其中潜在石漠化、中度石漠化、强度石漠化分别下降了7.29%、6.95%和1.13%, 轻度则增加了4.5%; 毛管孔隙度呈明显下降趋势, 潜在石漠化下降了24.15%, 轻度石漠化下降了18.66%, 中度石漠化下降22.86%, 强度石漠化下降30.78%; 非毛管孔隙度呈显著上升, 潜在石漠化上升92.39%, 轻度石漠化上升164.57%, 中度石漠化上升51.03%, 强度石漠化上升188.87%。2009年土壤的孔隙度、持水性能指标值的变异系数值较2006年呈降低趋势, 表明研究区土壤经治理后各物理性质指标的空间变异度减小。

从土壤总孔隙度变化分析可知, 研究区经过几年的石漠化生态治理, 所选样地在种植花椒、构树、金银花等生物治理措施下, 土壤总孔隙度呈略微下降。2005年总孔隙度平均值为56.12%, 2009年总孔隙度平均值为54.5%, 土壤总孔隙度的空间变异系数值降低, 表明目前土壤总孔隙度比例更加趋于合理, 这在

一定程度上有利于提高其土壤的抗蚀、抗冲性, 有利于土壤养分元素的保持。

从土壤毛管孔隙度与非毛管孔隙度变化分析可知, 样地土壤非毛管孔隙度则有了明显增加, 2005年非毛管孔隙度平均约8.80%, 2009年平均约18.66%, 增加1倍多; 2005年毛管孔隙度平均约47.32%, 2009年平均约35.84%, 毛管孔隙度下降幅度约24.26%。石漠化土壤在治理前毛管孔隙度较大, 毛管持水能力较强, 土壤易受湿害; 石漠化土壤的非毛管孔隙度过小, 土壤通气、透水能力较弱, 这也降低了土壤质量。

经过生态措施的治理, 石漠化土壤毛管孔隙度有一定程度的减小, 非毛管孔隙度得到了显著提高。土壤紧实度影响土壤密度, 土壤愈紧实, 则孔隙小而密度大, 导水率下降, 土壤侵蚀的敏感性提高, 造成水土流失^[9]。研究表明2009年土壤的孔隙结构变化趋势更加合理, 促使土壤既有较好的持水能力, 又有较好的通气透水能力。

从表 2 分析可知, 2009 年较 2005 年土壤持水性能特征的变化是土壤毛管持水量的呈明显降低趋势, 潜在石漠化降低 30.04%, 轻度石漠化降低 19.54%, 中度石漠化降低 28.90%, 强度石漠化降低 31.51%; 土壤田间持水量的呈明上升趋势, 潜在石漠化提高 22.24%, 轻度石漠化提高 35.32%, 中度石漠化提高 30.68%, 强度石漠化提高 13.70%。

从持水量方面分析可知, 2005 年石漠化土壤毛管持水量平均值为 41.74%, 田间持水量平均值为 33.20%。2009 年土壤毛管持水量平均值 30.15%, 比 2005 年平均降低了约 11% 左右; 田间持水量平均值为 41.59%, 比 2005 年平均增加了约 12%。研究表明石漠化土壤经治理后, 土壤持水性能发生明显改善, 田间持水量增加, 增加了土壤稳定保持的最高含水量的比重, 对于农作物的生长更为有利; 毛管持水量明显下降, 这与孔隙度减少变化一致, 虽然毛管持水量有一定程度的降低, 但平均约 30% 田间持水量为农作物的生长能够提供充足的水分条件。

研究区石漠化经过一定时期的生态治理后, 土壤孔隙度结构得到有效地改善, 土壤持水性能得到提

高, 表明其土壤物理性能在生态治理措施下逐渐改善, 生态效应明显。

2.2 石漠化治理对土壤营养元素的生态效应

土壤有机质是反映土壤质量的最重要的化学参数之一。除了作为营养来源, 它可以改善土壤的结构和持水量和提高生物活性^[10]。

岩溶山区石漠化治理必然对土壤的有机营养成分含量产生影响, 通过对土壤有机营养成分变化的分析, 研究石漠化治理土壤化学质量生态效应。

对表 3 分析可知, 2005 年各等级石漠化土壤有机质含量在范围 37.02~49.36 g/kg 之间。2009 年各样地有机质含量变化有一定程度的变化, 样地土壤有机质含量在范围 36.05~46.01 g/kg 之间。相对 2005 年, 2009 年的潜在、轻度石漠化土壤有机质含量总体有所下降, 中度、强度石漠化土壤的有机质含量则呈增加趋势。潜在与轻度石漠化的有机质含量略有下降, 这与其所处的坡度位置低、耕作强度、加上长期的翻耕等影响造成营养元素易于流失有关。2009 年土壤有机营养元素指标的变异系数值较 2005 年呈降低趋势, 表明研究区土壤营养元素含量的空间变异程度减弱。

表 3 石漠化生态治理区不同石漠化等级营养元素含量变化

石漠化等级	特征值	有机质/ (g·kg ⁻¹)		全氮/ (g·kg ⁻¹)		全磷/ (g·kg ⁻¹)		全钾/ (g·kg ⁻¹)		碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)		速效磷/ (mg·kg ⁻¹)		速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	
		2005 年	2009 年	2005 年	2009 年	2005 年	2009 年	2005 年	2009 年	2005 年	2009 年	2005 年	2009 年	2005 年	2009 年
		潜在石漠化	均值	45.49	36.05	2.93	3.04	1.08	1.71	7.16	4.01	120.67	208.32	9.92	13.56
	标准差	4.30	2.06	0.22	0.30	0.19	0.94	2.24	0.53	17.11	26.52	5.97	1.89	25.17	50.50
	变异系数/%	9.45	5.72	7.39	9.77	17.67	55.20	31.27	13.25	14.18	12.73	60.15	13.96	23.59	31.52
轻度石漠化	均值	49.36	46.01	3.14	3.97	1.04	1.26	6.02	4.24	124.00	268.45	5.58	19.85	76.67	145.63
	标准差	11.42	13.20	0.59	0.66	0.27	0.44	0.94	0.59	20.66	92.93	3.41	7.77	24.66	32.98
	变异系数/%	23.13	28.69	18.68	16.58	25.62	34.88	15.54	13.98	16.66	34.62	61.12	39.17	32.17	22.65
中度石漠化	均值	44.57	45.80	2.65	2.95	0.95	1.09	4.48	2.21	187.00	293.14	5.88	10.56	112.50	73.13
	标准差	7.45	8.57	0.63	0.45	0.07	0.03	0.45	1.13	57.98	52.95	0.18	4.07	38.89	1.24
	变异系数/%	16.71	18.71	23.79	15.13	7.44	2.59	10.10	51.19	31.01	18.06	3.01	38.52	34.57	1.69
强度石漠化	均值	37.02	45.73	2.39	3.17	0.61	1.52	4.68	2.34	102.00	293.67	2.33	8.32	61.67	121.07
	标准差	19.40	7.41	1.33	0.64	0.33	0.27	0.33	0.65	50.92	40.50	1.76	4.43	32.53	6.47
	变异系数/%	52.40	16.21	55.85	20.30	53.94	18.00	6.97	27.53	49.92	13.79	75.25	53.25	52.75	5.34

从表 3 分析可知, 对石漠化的几年生态治理, 2005—2009 年的土壤营养元素的变化表现为: 表征土壤营养质量特征的全氮、全磷营养元素含量呈显著增加趋势, 全氮营养元素的潜在石漠化土壤增加了 3.75%, 轻度石漠化增加了 26.43%, 中度石漠化增加了 11.34%, 强度石漠化增加了 32.68%; 全磷营养元素的潜在石漠化土壤增加了 58.33%, 轻度石漠化土壤增加了 21.86%, 中度石漠化土壤增加了 14.74%, 强度石漠化土壤增加了 147.28%; 全钾营养元素含量

则呈明显降低, 潜在石漠化土壤降低了 44.02%, 轻度石漠化土壤含量降低了 29.53%, 中度石漠化土壤降低了 50.67%, 强度石漠化土壤降低了 49.93%。随着石漠化程度的严重化, 土壤全氮、全磷、全钾营养元素的含量逐渐降低。

从石漠化土壤氮、磷、钾营养元素含量变化分析可知, 经过生态治理, 石漠化土壤的营养元素全氮、全磷含量在治理后都呈明显增加趋势, 全氮含量平均增幅达 18%, 全磷含量平均增长达 20% 左右, 其中强度

石漠化土壤的全氮、全磷营养含量增量最多,这与强度石漠化土壤多是坡度陡峭的石旮旯地,土壤多位于石隙有关。全钾营养元素含量平均值降低约 43.5%。随土壤 pH 值的升高,土壤的固钾能力相对增强,导致土壤全钾及速效钾含量表现出增加趋势^[11]。从表 2 可以看出研究区土壤 pH 值呈降低趋势,因此其土壤固钾能力相对降低,导致土壤全钾含量表现降低趋势。岩溶山区土壤 pH 值降低趋势及作为与农作物产量最密切营养元素全氮、全磷营养元素含量的增加,表明土壤的营养结构得到有效改善。全钾营养元素含量虽然降低幅度较大,但其含量值仍然较合理,并不影响土壤营养质量。

从表 3 分析可知,2005 与 2009 年的土壤速效营养元素含量的变化表现为:表征植被最易于直接吸收速效营养的碱解氮、速效磷、速效钾含量呈显著增加趋势。潜在石漠化土壤碱解氮营养元素含量增加了 72.64%,轻度石漠化土壤增加了 116.49%,中度石漠化土壤增加了 56.76%,强度石漠化土壤增加了 187.76%;速效磷营养元素的潜在石漠化土壤增加了 36.77%,轻度石漠化土壤增加了 255.46%,中度石漠化土壤增加了 79.66%,强度石漠化土壤增加了 256.43%;潜在石漠化土壤速效钾含量增加了 50.20%,轻度石

漠化土壤含量增加了 89.96%,中度石漠化土壤降低 35.00%,强度石漠化土壤增加了 96.32%。

对速效营养的碱解氮、速效磷、速效钾含量变化分析可知,经过生态治理,石漠化土壤的碱解氮、速效磷、速效钾含量呈显著增加,碱解氮含量平均增幅达 108.45%,速效磷含量平均增长达 157.08%,速效钾含量平均增幅达 50.37%。研究结果表明,经过几年的生态治理,土壤速效营养元素含量得到明显的提高,土壤质量得到有效改善。

分析结果认为,经生态治理,石漠化土壤有机质、氮、磷、钾等营养元素的含量明显提高,速效养分元素含量的增加更加有利于经果林的生长,表明石漠化土壤营养结构更加合理,也反映了生态治理对土壤营养成分的有效改善的生态效应,进一步促进了石漠化土壤质量的改善。

2.3 石漠化治理对植物的生态效应

土壤因子影响着植被的结构特点,反过来群落植被特征也影响着土壤的理化性质^[12]。土壤酸碱度、全盐量、含水量和有机质的异质性往往是决定植物群落组成、结构和分布格局形成的主要因素^[13]。因此,在石漠化治理过程中,群落植被数量特征变化既可表征土壤质量特征的变化,也是生态治理的生态效应(表 4)。

表 4 石漠化生态治理区不同石漠化等级植被群落数量特征

石漠化等级	特征值	群落高度/cm		平均地径/cm		平均冠幅/cm ²		物种多样性 H		均匀度 J		优势度 C	
		2005年	2009年	2005年	2009年	2005年	2009年	2005年	2009年	2005年	2009年	2005年	2009年
潜在石漠化	均值	224	308	3.1	7.7	38 633	157 751	2.654 9	1.859 8	0.302 6	3.330 1	0.146 1	0.004 4
	标准差	27.73	16.74	0.3	1.4	975	49 000	0.046 1	0.382 2	0.007 2	1.729 5	0.008 3	0.001 2
	变异系数/%	12.38	5.44	9.96	17.85	2.52	31.06	1.74	20.55	2.38	51.94	5.65	26.91
轻度石漠化	均值	199	230	2.9	5.9	39 187	65 688	2.729 2	3.260 9	0.546 1	4.136 5	0.128 4	0.228 6
	标准差	12.06	32.19	0.2	3.1	1 785	41 754	0.032 7	0.569 8	0.109 6	1.460 5	0.016 3	0.152 7
	变异系数/%	6.07	13.99	7.10	51.60	4.55	63.56	1.20	17.47	20.06	35.31	12.74	66.82
中度石漠化	均值	200	211	2.8	4.2	39 300	60 088	3.397 5	2.623 4	0.677 2	3.234 0	0.111 9	0.083 8
	标准差	14.14	62.93	0.3	0.1	1 131	15 327	0.040 1	0.183 6	0.032 4	0.429 4	0.005 6	0.000 2
	变异系数/%	7.07	29.90	10.10	1.70	2.88	25.51	1.18	7.00	4.78	13.28	4.99	0.25
强度石漠化	均值	143	167	2	3.6	18 144.7	42 955	3.167 3	3.056 9	0.750 3	2.938 6	0.111 9	0.367 0
	标准差	3.06	16.52	0.29	1.5	2 045	3 645	0.115 6	0.700 7	0.001 2	0.517 7	0.007 4	0.211 3
	变异系数/%	2.13	9.89	12.93	40.86	11.27	8.49	3.65	22.92	0.16	17.62	6.64	57.57

对表 4 分析可知,2009 年与 2005 年相比,各等级石漠化样地除群落植物高度与平均冠幅标准差值较大以外,其它各指标的标准差值均较小,结果与样地内植物群落生长高度及冠幅变化较大,植物群落地径、多样性变化较慢一致;2009 年较 2005 年的样地植物群落各指标变异系数增大,这与植物在不同样地生长差异显著的特征吻合,但变异系数值总体较低也表明样地植物群落特征空间变异程度低,数据能较好地

表明石漠化治理植物群落特征变化。

2009 年与 2005 年相比,植物群落高度在潜在、轻度、中度、强度石漠化样地分别增加了 37.55%, 15.77%, 5.25%, 16.51%;植物群落平均地径在潜在、轻度、中度、强度石漠化样地分别增加了 151.09%, 102.27%, 48.21%, 59.70%;植物群落平均冠幅在潜在、轻度、中度、强度石漠化样地分别增加了 308.33%, 67.63%, 52.89%, 136.73%;植物群落物种多样性在

潜在、中度、强度石漠化样地分别降低 29.95%、22.78%、3.49%，轻度石漠化样地则增加了 19.48%；植物群落均匀度在潜在、轻度、中度、强度石漠化样地群落均匀度分别增加了 100.51%、657.42%、377.55%，291.66%；植物群落优势度在潜在、中度石漠化样地分别降低了 96.67% 和 25.12%，轻度、强度石漠化样地分别增加 78.06% 和 227.97%。

分析结果表明，经生态治理石漠化样地植被的高度、地径、冠幅、均匀度等数量特征呈明显增长趋势，植物生物量明显增加，生态效应明显。样地植物群落多样性在人造经济林等影响下，物种多样呈降低趋势。通过对照表 2—4，可分析出不同等级石漠化土壤质量生态效应变化与植物群落的生态效应变化特征具有较好的一致性。

3 结论

(1) 石漠化生态治理土壤物理性质的生态效应。各样地同级石漠化的土壤物理性质变异系数值降低，表明研究区土壤经治理后各物理性质指标的空间变异程度减小；样地土壤总孔隙度呈略微降低趋势，一定程度上提高了土壤的抗蚀、抗冲性，有利于土壤养分元素的保持；土壤非毛管孔隙度明显增加，毛管孔隙度呈明显下降，土壤的孔隙结构变化趋势更加合理，土壤既有较好的持水能力，又有较好的通气透水能力；土壤的持水性能质量明显改善，田间持水量增加，增加了土壤稳定保持的最高含水量的比重，对于农作物的生长更为有利；毛管持水量明显下降，这与毛孔隙度减少变化一致，虽然毛持水量有一定程度的降低，但平均约 30% 的田间持水量仍然能为农作物的生长能够提供充足的水分条件。

(2) 石漠化生态治理土壤营养元素的生态效应。各样地有机质含量变化较小，潜在、轻度石漠化土壤总体有机质含量有所下降，中度、强度石漠化土壤的有机质含量则呈增加趋势。表征土壤营养质量特征的营养元素全氮、全磷含量在治理后都呈明显增加趋势，全氮含量平均增幅达 18%，全磷含量平均增长达 20% 左右，全钾营养元素含量呈降低趋势，平均值降低了约 43.5%。全氮和全磷营养元素含量的增加，有效改善了土壤的营养结构。

(3) 石漠化生态治理植被的生态效应。样地植物高度、地径、冠幅、均匀度等数量特征呈明显增长趋势，植物生物量明显增加，生态效应明显。不同等级

石漠化土壤质量生态效应变化与植物群落的生态效应变化特征具有较好的一致性。

(4) 综合分析可知，在生态治理后石漠化土壤、植被的质量、数理特征的生态效应有明显改善与提高，表明通过石漠化生态综合治理措施的实施，随着植被逐步恢复，岩石裸露率下降，石漠化土壤有机质、氮、磷、钾等营养元素的含量明显提高，营养结构更加合理，逐步改善了岩溶山区石漠化生态环境。

[参 考 文 献]

- [1] 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: 北京地质出版社, 2002: 81-88.
- [2] 滕建珍, 苏维词, 廖风林. 贵州北盘江镇喀斯特峡谷石漠化地区生态经济治理模式及效益分析[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(3): 70-75.
- [3] 梅再美, 熊康宁. 喀斯特地区水土流失动态特征及生态效益评价: 以贵州清镇退耕还林(草)示范区为例[J]. 中国岩溶, 2003, 22(2): 136-144.
- [4] 龙健, 李娟. 典型喀斯特地区石漠化演变过程对土壤质量性状的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 77-82.
- [5] 刘方, 王世杰, 刘元生, 等. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 640-645.
- [6] 罗海波, 宋光煜, 何腾兵. 贵州喀斯特山区石漠化治理过程中土壤质量特性研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 112-116.
- [7] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 78-79.
- [8] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国中亚热带缓丘红黏土红壤肥力的演化: 物理学肥力的演化[J]. 土壤学报, 1999, 37(2): 203-216.
- [9] 郑华, 欧阳志云, 王效科, 等. 不同森林恢复类型对南方红壤侵蚀区土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(9): 1994-2002.
- [10] 刘占锋, 傅伯杰. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 901-914.
- [11] 赵其国. 红壤物质循环及其调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 73-163.
- [12] 刘世梁, 马克明, 傅伯杰, 等. 北京东灵山地区地形土壤因子与植物群落关系研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 496-502.
- [13] 张林静, 岳明, 顾峰雪, 等. 新疆阜康绿洲荒漠过渡带植物群落物种多样性与土壤环境因子的耦合关系[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 329-334.