

# 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究<sup>\*</sup>

龙 健<sup>1</sup> 江新荣<sup>1</sup> 邓启琼<sup>1</sup> 刘 方<sup>2,3</sup>

(1 贵州师范大学地理与生物科学学院, 贵阳 550001)

(2 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

(3 贵州大学环境科学系, 贵阳 550025)

**摘 要** 喀斯特土壤石漠化是我国西南喀斯特地区诱发重要地质灾害的生态环境问题, 是制约区域经济社会发展的关键因素。通过分析贵州喀斯特地区土壤的机械组成、物质成分、理化性质和微生物特性, 探讨了土壤石漠化的本质。结果表明: 土壤侵蚀, 细粒物质减少, 表层土壤消失, 岩土界面缺少风化母质的过渡层, 或者被裸露基岩取代; 土壤质地出现砂化, 颗粒变粗; 土壤有机质及养分含量减少, 保水保肥性能减弱; 土壤微生物功能多样性降低; 超载的社会经济压力等是导致喀斯特地区土壤石漠化最重要的驱动力。

**关键词** 喀斯特地区; 土壤石漠化; 土壤性质

中图分类号 S158.1

文献标识码

A

喀斯特环境是自然环境中一种独特的地理景观, 以二元结构(即地表喀斯特景观单元和地下喀斯特景观单元共同组成的一个密切联系相互制约的双重结构体)为基本特征, 形成了脆弱的生态环境<sup>[1]</sup>。贵州喀斯特(岩溶)区是我国乃至世界热带、亚热带喀斯特地貌分布面积最大、发育最强烈的高原山区, 位于西南喀斯特地貌最集中成片分布的中心片区, 也是世界上发育最完全的喀斯特连续地带<sup>[2]</sup>。喀斯特面积为  $13 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占全省土地总面积的 73.6%, 全省 95% 的县(市)有喀斯特分布。由于喀斯特具有多相多层复杂界面体系, 环境界面变异敏感度高, 环境容量低, 稳定性差, 承灾能力低等特征<sup>[1]</sup>, 喀斯特与黄土、沙漠、寒漠并列为我国四大生态环境脆弱区。喀斯特环境的脆弱性和易伤性, 加上不合理的人为活动影响, 致使喀斯特生态环境不断恶化, 出现一系列环境退化问题, 严重制约了区域可持续发展。特殊的地质背景造就其相对脆弱的生态环境, 其中喀斯特地区土地石质荒漠化(称石漠化)问题尤为突出。在喀斯特土地石漠化地区, 形成了特殊的“喀斯特贫困”现象, 在中国和世界贫困区具有一定的代表性<sup>[3]</sup>。石漠化是指土壤侵蚀导致基岩大面积裸露, 土壤生产力下降, 自然植被景观受到严重破坏的喀斯特地区独有的土地退化现象。它与其他类型的荒漠化一样呈现出毫无生气的自然景

观, 而且由于土壤的彻底流失, 石漠化的后果也比其他类型的荒漠化更为严重, 危害更大, 更难于治理和恢复, 成为我国实施西部大开发和“十五扶贫攻坚计划”中的一块“硬骨头”, 与黄土高原同为我国环境退化问题最为突出的两片地区<sup>[4]</sup>。已引起党中央国务院的高度重视<sup>[5]</sup>。据资料统计, 贵州岩溶荒漠化土地正以平均每年  $508.16 \text{ km}^2$  的速度不断扩展<sup>[6]</sup>, 态势十分严峻。目前, 学术界针对喀斯特环境退化进行了大量研究并已取得了一系列成果, 主要集中在三方面: 喀斯特生态环境发育演化理论研究<sup>[7]</sup>, 自然资源与主要生态问题现状调查<sup>[4]</sup>, 小流域或典型示范区退化生态环境的恢复与重建<sup>[8]</sup>, 为喀斯特地区生态环境治理提供了强有力的理论支持和实践经验。但以往的研究侧重于石漠化现状与地质背景调查<sup>[9]</sup>, 相当程度上忽视了本质特征的探讨。

现已认识到石漠化是一种与脆弱生态地质背景和人类活动相关联的土地退化过程<sup>[10]</sup>, 以土地生产力退化为本质特征, 出现石漠化景观为标志。主要表现在: 地表形态的变化、土壤质量变劣和植被衰退<sup>[11,12]</sup>。其中土壤质量变劣是石漠化的本质, 重点表现在土壤物质流失, 土壤的物理、化学和生物性质退化, 以及土壤发生层次的变化<sup>[12]</sup>。然而, 过去的研究工作多集中在沙漠地区<sup>[13]</sup>, 以地表形态和植被变化分析为主。本文通过对贵州喀斯特地区的不同

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 40361004)、贵州省自然科学基金(2004[3049])和贵州优秀教育人才省长基金联合资助

作者简介: 龙 健(1974~), 男, 贵州锦屏人, 博士, 教授, 主要从事土壤地理与土壤生态方向研究

收稿日期: 2004-05-25; 收到修改稿日期: 2004-09-27

石漠化土壤的物质组成、理化性质、土体构型及人类驱动因素分析,探讨土壤石漠化的发生机制和本质特征。

## 1 研究区概况

研究区域位于贵州西南部的安顺、兴义两地区,包括紫云、关岭、贞丰、兴义、晴隆五县(市),属于典型的亚热带喀斯特地区。由于中三叠统相变带上的生物礁灰岩在云贵高原南坝大斜坡带的大面积出露,从而集中发育了典型、造型奇特雄伟的锥状峰林喀斯特,这在中国和世界都是独有的,是贵州喀斯特最发育、反映形成环境条件最具代表性的分布地之一。境内海拔高度 340~1560 m,地形破碎,切割强烈,水土流失严重。喀斯特地区虽基岩裸露,但未经破坏的情况下,植被仍然十分茂密,以热带、亚热带常绿阔叶林为主,其组成多为喜钙旱生属种,其中不少是石灰质土壤上特有的树种,如细叶石斛、灰叶槭、香木莲、黑节草、贵州苏铁。在石灰质土壤地区,地势较低、坡度较缓的石灰土多数已被开垦农用,是该区的主要耕作土壤之一。该地区为亚热带季风气候,年均温 15~18℃,降雨量 1200~1430 mm。部分地区有喀斯特原始森林和次生林。

## 材料与方法

### 1.1 资料收集

选择研究地区从 20 世纪 80 年代到 90 年代中期的统计年鉴作为基本资料来源(共 10 年或 11 年),这一时期国家和地方经济发展较快,人类活动对环境施加了更大的压力,人与环境的冲突也更突出,所以本文所用的资料具有一定的代表性。考虑到不同年份间资料的统一性和可靠性,以及贵州喀斯特地区土地利用的特点,选择年末耕地面积和其中的旱地面积反映土地利用情况及其变化。以人口数、农业人口数量、粮食总产量、农业总产值、人均收入反映社会经济状况及其变化。

### 供试土壤

供试土壤分别采自紫云、关岭、贞丰、兴义等县(市)的 5 个典型土壤剖面,基本上代表了贵州喀斯特地区土壤石漠化的不同阶段和类型。各剖面均按发生层次进行划分,实地记载剖面形态特征和成土环境条件(见表 1);同时分层采集土壤样品,自然风干,去除根系、石块等研磨过筛,用于理化性质分析和颗粒组成测定。同时采集新鲜土样带回室内测定土壤微生物指标<sup>[14]</sup>。

表 1 供试土壤剖面形态  
Table 1 Morphological description of soil profiles

采样地点 Sample site	剖面号 Profile No.	层次 Horizon	深度 Depth (cm)	结构 Structure	松紧度 Compactness	根系 Roots	石灰反应 Effervescence
紫云水塘 Ziyunshuitang	ZY-1	A	0~17	块状	松	大量	弱
		B	17~25	块状	较紧	大量	中
		BC	25~44	块状	紧	大量	较强
		C	44~100	粒状	紧	少量	剧烈
紫云宗地 Ziyunzongdi	ZY-2	AC1	0~10	块状	松	大量	弱
		AC2	10~17	块状	松	中量	较强
		BC	17~20	粒状	较紧	中量	强
		C	20~100	粒状	紧	无	剧烈
关岭花江 Guanlinghuajiang	HJ-3	BC	0~6	弱团块	松	中量	弱
		C1	6~11	小团块	较紧	少量	较强
		C2	11~100	弱粒状	紧	无	剧烈
贞丰板围 Zhenfengbanwei	ZF-6	C1	0~3	块状	松	少量	强
		BC	3~35	砂粒	松	无	较强
		C2	35~100	块状	稍紧	无	剧烈
兴义万峰 Xingyiwanfeng	XY-7	C1	0~5	砂粒	松	无	强
		C2	5~100	砂粒	松	无	剧烈

### 3 测试方法

土壤微生物生物量 C 采用熏蒸提取法; 土壤微生物群落功能多样性采用常规的碳素利用 (Biolog) 法。土壤微生物群落功能多样性测度方法采用 Biolog GN 微平板孔中吸光值来计算土壤微生物群落功能多样性指数, 即 Shannon 指数 (H), 其计算公式为  $H = -\sum P_i \ln P_i$ , 式中  $P_i$  为第  $i$  孔相对吸光值 (G-R) 与整个平板相对吸光值总和的比率。代谢剖面反应孔的数目可代表微生物群落的丰富度 (S); 土壤基础呼吸采用密闭培养碱液吸收滴定法测定。

土壤样品分析参见文献 [15, 16]。

## 3 结果与分析

### 3.1 石漠化土壤的土体构型

发育正常的土壤, 其剖面土体构型为 A-B-C, 表层 A 为腐殖质层或淋溶层, 中间层 B 层是淀积层, 下部 C 为母质层, 各层之间还存在一些过渡层段。受石漠化的影响, 供试土壤在土体构型上发生了很大变化, 向土壤剖面层次不明显方向发展, 如表 1、表 2 所示。ZY-1 是一正常发育的土壤, 土体构型为 A-B-BG-C; ZY-2 土壤剖面表层土壤出现明显砂化现象, 砂粒含量显著增高, 土体构型变为 AC<sub>1</sub>-AC<sub>2</sub>-BG-C; HJ-3 和 ZF-6 土壤剖面的 A 层已被严重侵蚀, 前者心土层 BC 直接出露地表, 后者代之以厚度不等的泥砂层 (30 cm 左右), 其下为原土壤的钙积层 (BC) 或母质层 (C), 土体构型为 G-BG-C 或 BG-C; XY-7 号剖面 0~5cm 土层内全为均质砂粒, 土壤剖面的 A、B 层不复存在, 土体构型通体为 C 层, 基岩完全裸露, 呈现大面积的喀斯特石漠化景观。

由表 1 还可看出, 石灰岩地区土岩界面常不存在过渡结构 (土层常缺乏 C 层过渡层), 即母岩与土壤通常存在着明显的软硬界面。使土壤与母岩之间的亲和力与粘着力大为降低, 一遇暴雨则极易产生水土流失和块体滑移。其次, 贵州因地处亚热带湿润气候区, 化学淋溶作用强烈, 上层土体中的物理粘粒 (< 0.01 mm) 容易发生垂直下移积累, 从而造成喀斯特地区土体的上松与下紧, 形成一个物理性状不同的界面, 这也容易导致水土流失的产生。另外, 土壤与母岩界面是一化学侵蚀面, 当降雨渗透到岩石表面时, 本身也产生化学侵蚀作用。在自然状态下 (无人干扰), 由于土壤水的渗透能力很强, 使得地表径流常不足以在地表产生土壤侵蚀, 化学侵蚀常常就在喀斯特地区占主导地位<sup>[17]</sup>。喀斯特环境土

壤与母岩间和土壤内部上、下层间存在的这两种质态不同的界面, 不仅加剧了水土流失, 而且对生态环境的敏感性和脆弱性与土壤石漠化起了促进作用。

### 3. 石漠化土壤的颗粒特征

土壤颗粒组成是构成土壤结构体的基本单元, 并与成土母质及其理化性状和侵蚀强度密切相关。土壤颗粒组成的变化是土地荒漠化过程中最为普遍而有代表性的现象, 土地一旦发生荒漠化, 首先表现为地表物质颗粒组成中细粒减少, 粗大颗粒逐渐占据优势, 即产生地表粗化过程, 在植被破坏严重的地区, 地表甚至被大量石砾覆盖。所以随着荒漠化的发展, 土壤机械组成愈来愈粗, 由机械组成的变化和差异, 可以判断土地荒漠化的强弱和发展强度, 划分荒漠化类型<sup>[13]</sup>。

分析结果表明 (表 2), 严重石漠化地 (剖面 HJ-3、ZF-6、XY-7) 土壤具有典型的粗骨性土壤的特征, 小于 0.001 mm 粘粒含量很少, 0.05~0.001 mm 粉粒含量较高, 细土部分的砂粒含量次于粉粒含量, 高于粘粒含量, 说明土壤矿质胶体缺乏, 土壤颗粒粗大紧实, 影响土壤团粒结构的形成; 而未退化的剖面 ZY-1 土壤颗粒组成更加趋近于合理, 土壤通透性能良好, 改善土壤物理性质。由表 2 还可看出, 剖面 ZY-1 的各级水稳性团聚体含量较高, 大小团聚体所占比例较为适宜, 其中以大于 2 mm 团聚体占的比例最高, 土壤结构性好; 而严重石漠化 ZY-6、XY-7 的各级水稳性团聚体含量较低, 大小团聚体的分配不合理, 以大于 0.25 mm 团聚体所占比例最大, 且团聚体从大到小所占比例有逐渐增加的趋势, 土壤结构性差, 部分样品中全部是大于 0.25 mm 的水稳性团聚体, 而较大的团聚体遇水后几乎完全分散。这证明土壤正在砂化 (土壤石漠化), 因为这类土壤中大于 0.25 mm 水稳性结构体有很大一部分是由颗粒组成中的粗砂粒构成的。土壤水稳性团聚体数量表现为剖面 ZY-1 > ZY-2 > HJ-3 > ZF-6 > XY-7, 表明随着喀斯特地区石漠化进程的加剧, 水稳性团聚体含量明显降低, 削弱土壤抗蚀性和蓄水性, 土壤颗粒砂化更加明显。

### 3.3 石漠化土壤肥力状况

随着石漠化的发展, 土壤肥力状况发生明显衰退。分析结果表明 (表 3), 表层土壤有机质含量从 ZY-1 的 52.33g kg<sup>-1</sup> 下降到 XY-7 的 8.43g kg<sup>-1</sup>, 降幅达 80% 以上; 通体都是砂砾的土壤, 有机质含量一般不超过 15.0g kg<sup>-1</sup>。产生这种情况的原因是石漠化, 一方面使有机质随着细粒物质的侵蚀而损失,

表 土壤颗粒组成  
Table Mechanical composition of soils(%)

剖面号 Profile No	层次 Horizon	土壤颗粒组成 Particle size distribution				水稳性团聚体含量 Content of water stable aggregates			
		> 0.2 mm	0.2~ 0.05 mm	0.05~ 0.01 mm	0.01~ 0.001 mm	< 0.001 mm	> 5 mm	> 2 mm	> 0.25 mm
ZY-1	A	0.20	32.66	25.31	23.44	18.39	25.40	37.21	17.37
	B	0.25	39.97	24.35	22.27	13.16	23.21	31.55	16.31
	BC	0.88	45.51	25.52	18.55	9.54	19.03	14.52	14.63
	C	1.78	56.74	29.65	10.76	1.07	9.12	10.74	11.05
ZY-2	AC1	0.53	38.21	26.25	19.45	15.56	23.77	35.61	17.51
	AC2	0.72	42.96	25.90	18.20	12.22	22.87	29.52	22.30
	BC	15.33	49.80	18.15	11.80	4.92	16.32	34.31	44.82
	C	20.64	56.43	14.12	6.90	1.91	12.56	17.28	23.91
HJ-3	BC	21.20	49.54	12.82	10.81	5.63	13.35	16.24	34.60
	C1	18.44	49.10	14.44	11.81	6.21	12.47	23.22	39.23
	C2	19.16	51.62	18.10	7.74	3.38	12.85	19.33	35.26
ZF-6	C1	18.14	43.61	18.01	13.52	6.72	7.22	12.53	37.42
	BC	19.76	45.59	17.35	11.50	5.80	5.53	13.62	48.20
	C2	19.14	63.41	11.22	4.91	1.32	3.32	8.27	33.23
XY-7	C1	18.48	59.30	11.31	7.52	3.39	3.39	5.73	37.99
	C2	16.71	62.48	9.59	9.78	1.44	4.35	6.02	44.57

表 3 土壤物质成分及交换性能  
Table 3 Some chemical properties of tested soils

剖面号 Profile No	层次 Horizon	pH (H <sub>2</sub> O)	有机质 O. M. (g kg <sup>-1</sup> )	速效氮 Av-N (mg kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Av-P (mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Av-K (mg kg <sup>-1</sup> )	CaCO <sub>3</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	CEC (cmol kg <sup>-1</sup> )
ZY-1	A	7.73	52.33	276.7	5.53	109.1	2.030	37.21
	B	7.61	45.57	143.3	2.72	72.55	2.100	34.83
	BC	7.80	16.31	58.24	1.50	63.17	37.52	26.17
	C	7.90	12.38	47.62	1.49	55.25	65.91	19.25
ZY-2	AC1	7.76	50.35	165.8	4.85	71.13	1.540	32.36
	AC2	7.22	44.72	132.6	3.82	87.33	1.350	25.45
	BC	7.12	15.42	85.25	1.78	58.32	45.41	13.24
	C	7.22	13.44	92.83	1.67	47.54	76.38	10.12
HJ-3	BC	7.52	14.17	83.45	4.76	93.65	43.33	21.28
	C1	7.44	10.54	41.52	2.41	21.77	176.1	11.74
	C2	7.22	9.65	55.31	2.32	20.65	184.4	12.30
ZF-6	C1	7.13	9.43	35.54	1.82	24.45	251.7	9.48
	BC	7.61	13.72	67.33	3.21	57.90	545.2	16.43
	C2	7.43	7.21	37.50	1.70	27.31	350.3	4.55
XY-7	C1	8.10	8.43	26.72	1.30	17.89	849.2	7.51
	C2	8.25	6.62	25.31	0.52	20.53	789.6	7.34

另一方面导致地表植被覆盖度降低, 有机物来源减少, 矿化分解作用强烈, 不利于有机质积累。可见, 土壤有机质表层对土壤有重要的保护作用。土壤石漠化使土壤速效 N、P、K 含量明显减少, 表层从 ZY-1 的 276.72、5.53、109.10  $\text{mg kg}^{-1}$  减少到 XY-7 的 25.31、0.52、17.89  $\text{mg kg}^{-1}$ 。表明土壤营养元素供应强度急剧下降。严重退化地(剖面 HJ-3、ZF-6、XY-7)土层裸露, 土壤全 N、全 K 和全 P 含量均较低(资料未列出), 速效养分含量更是贫乏, 立地条件严重恶化, 侵蚀地寸草不生(土地石漠化), 土壤抗侵蚀性能很差, 生境处于恶性循环阶段, 土壤质量日趋下降, 单纯采取生物措施进行治疗相当困难。调查表明, 采用长期退耕还林(草)或封山育林措施(10 年以上), 土壤保肥性能可得到一定程度的改善。

由表 3 可见, 随着石漠化程度的加剧, 土壤中碳酸钙的含量逐渐增加, 土壤吸附和交换阳离子的能

力不断减弱。如表 3 所示, 供试土壤碳酸钙在剖面的分布表现为由上到下逐渐升高, 中下部出现聚集; 从未退化的 ZY-1 到严重石漠化的 XY-7,  $\text{CaCO}_3$  含量逐渐升高, 这是由于基岩开始出露所致。阳离子交换量大部分土壤剖面表现出表层 < 表下层, 降低幅度随石漠化程度的加剧而增大。表层阳离子交换能力随砂粒含量的增加而降低, 由 ZY-1 的 37.21  $\text{cmol kg}^{-1}$  一直降低至 XY-7 的 7.34  $\text{cmol kg}^{-1}$ 。土壤交换性能的降低和营养元素的减少, 使土壤吸水保肥能力降低, 肥力状况变坏, 直至土地生产潜力完全丧失。

### 3.4 石漠化土壤矿物质特征

土壤矿物质是构成土壤的骨架, 占土壤固体部分的 95% 以上, 对土壤的性质有极大的影响, 其元素组成是各种成土因素和成土过程综合作用的结果, 可在一定程度上反映土地荒漠化的类型和强度<sup>[12]</sup>。供试土壤土体化学组成见表 4。

表 4 石漠化土壤土体化学元素组成

Table 4 Total composition of chemical elements in fine-earth fraction of soils ( $\text{g kg}^{-1}$ )

剖面号 Profile No.	层次 Horizon	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{MnO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$
ZY-1	A	460.6	214.5	340.5	37.85	19.30	16.87	5.13	9.150	4.43	4.45
	B	432.8	151.4	312.2	45.20	15.56	19.42	9.27	16.31	7.40	7.87
	BC	440.2	176.3	294.6	16.48	9.870	34.16	7.10	6.740	5.62	9.32
	C	502.9	78.10	117.6	58.21	5.350	0.030	0.07	2.180	-	0.35
ZY-2	AC1	638.5	163.7	336.7	12.33	16.98	21.23	3.34	6.620	-	3.33
	AC2	526.4	89.32	290.4	28.55	12.30	15.27	1.75	6.100	3.94	2.25
	BC	487.6	75.46	270.8	19.72	11.87	15.41	3.62	6.820	4.22	2.93
	C	530.7	43.13	115.6	42.47	5.500	0.050	0.18	1.500	-	0.07
HJ-3	BC	680.3	37.28	299.3	9.160	5.560	30.37	1.52	4.390	2.67	1.63
	C1	697.7	32.22	211.6	52.84	4.270	6.530	1.29	20.82	1.38	1.25
	C2	707.8	21.35	115.9	61.43	3.210	0.940	0.13	11.64	1.12	-
ZF-6	C1	723.4	25.51	108.5	53.51	6.270	0.050	0.09	2.410	0.33	0.32
	BC	735.3	39.71	294.7	6.930	6.650	13.97	2.21	5.760	4.72	2.31
	C2	764.8	28.74	139.1	63.22	7.430	0.050	0.12	3.120	0.28	0.20
XY-7	C1	735.4	14.41	127.2	52.93	7.810	0.040	0.13	2.540	0.36	0.45
	C2	782.7	26.52	110.4	91.31	8.970	0.030	0.08	2.730	0.29	0.42

由表 4 可知,  $\text{SiO}_2$  在土体元素组成中占绝对优势, 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  构成了土壤的主体, 三者合计约占土壤矿物质总量的 80% 以上, 其他成分的含量顺序依次为  $\text{CaO} > \text{K}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{TiO}_2 > \text{K}_2\text{O} > \text{MnO} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{Na}_2\text{O}$ 。随着石漠化的发展, 土体中  $\text{SiO}_2$  的含量明显升高, 增量达 300  $\text{g kg}^{-1}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、

$\text{TiO}_2$  和  $\text{MnO}$  等成分不断降低, 下降幅度一般在 40% ~ 80% 之间; 石漠化严重的土壤,  $\text{SiO}_2$  含量在 700  $\text{g kg}^{-1}$  以上,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  不足 40  $\text{g kg}^{-1}$ ,  $\text{MgO}$  低于 9  $\text{g kg}^{-1}$ ,  $\text{CaO}$  由于基岩出露, 含量在 50  $\text{g kg}^{-1}$  以上; 石漠化较弱或尚未发生石漠化的土壤剖面 and 层次,  $\text{SiO}_2$  含量不超过 650  $\text{g kg}^{-1}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  大于 70  $\text{g kg}^{-1}$ ,

MgO 在  $10 \text{ g kg}^{-1}$  以上,这是由于化学侵蚀和淋溶作用所致<sup>[15]</sup>。表明土壤石漠化导致土壤的形成速度减缓,发育程度变弱,其原因可能是表层风化程度较强的土壤流失,而下部土壤风化程度较弱,因而通体土壤富硅。

### 3.5 石漠化土壤微生物功能多样性

分析结果表明(表5),随着石漠化的进程,供试表层土壤微生物生物量由未退化的 ZY-1  $576.9 \mu\text{g}$

$\text{g}^{-1}$  降低至严重石漠化(XY-7)的  $9.24 \mu\text{g g}^{-1}$ ,降幅达 98.4%;基础呼吸也有类似的趋势,降幅达 86.0%;土壤基础呼吸代表了土壤 C 素周转速率及微生物的总体活性,其与微生物生物量的比值即代谢商( $q\text{CO}_2$ ) 升高(表5),不仅能准确反映环境胁迫状况<sup>[18]</sup>,亦与土壤演替进行密切相关<sup>[19]</sup>,对指示喀斯特地区土壤石漠化进程有一定现实意义。

表5 供试表层土壤微生物生态特征

Table 5 Soil microbial eco-characteristics of soils(0~20 cm)

剖面号 Profile No	SMBC ( $\text{C}, \mu\text{g g}^{-1}$ )	基础呼吸 Respiration rate ( $\text{CO}_2\text{-C}, \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ )	代谢商 Metabolic quotient ( $\text{h}^{-1}$ )	微生物群落丰富度 (S)	群落 Shannon 指数 (H)
ZY-1	576.9	0.721	0.0012	94	7.743
ZY-2	327.4	0.453	0.0014	74	5.154
HJ-3	169.5	0.320	0.0019	38	3.550
ZY-6	30.75	0.172	0.0056	11	1.280
XY-7	9.24	0.101	0.0109	5	0.375

由于 Biolog GN 盘中制备有 95 种不同性质的碳源,在培养过程中土壤的不同类群微生物对各自的优先利用碳源具有选择性,进而使 Biolog GN 盘中反应孔的颜色变化出现不同程度的差异。因而, Biolog GN 盘中反应孔的颜色变化数目在一定程度上可间接反映土壤微生物群落结构组成上的差异,颜色变化孔数越多则表明土壤微生物群落种类相对就越丰富。通常把颜色变化孔数作为土壤微生物群落功能多样性的丰富度(S)<sup>[20]</sup>。由表5可见,未退化土壤(ZY-1)的显色孔数最多(达 94 目),其微生物群落丰富度大;严重石漠化土壤(XY-7)显色孔数最少(仅为 5 目),其微生物群落丰富度小。Shannon 指数是研究群落物种数及其个体数和分布均匀程度的综合指标,是目前应用最为广泛的群落多样性指数之一<sup>[20]</sup>。本文采用这个指数来表示土壤微生物群落功能多样性相对多度的信息。由表5可知,严重石漠化土壤(XY-7)的群落 Shannon 指数明显低于未退化土壤(ZY-1),降幅达 95.2%。可见,土壤微生物群落的种群结构受到了土壤石漠化的极大影响,从而使其微生物群落功能多样性出现相应的降低。

## 4 讨论

### 4.1 石漠化土壤质量动态变化

将本研究测定结果(2002年)与同一采样地点

20世纪80年代初土壤普查测定的数据进行对比。结果表明(表6),土地在不采取保护措施的条件下进行利用的样点(ZY-8和花江5)分别和采取保护措施的样点 ZY-1、HJ-3 相比较,表土层变薄、石砾大量增加,土壤有机质和  $< 0.01 \text{ mm}$  的物理性粘粒含量减少;采取防治和退耕措施的严重石漠化土地(样点 ZY-15)和样点 ZY-8 相比较,土壤有机质含量上升,粉粒、粘粒增加,砂粒明显减少,质地变细。由此可见,在自然环境状况下,喀斯特地区土地资源的进化与退化同时并存,不合理的土地利用导致土地向石漠化发展,土壤质量下降;大力推行退耕还林(草)或封山育林措施,增加植被覆盖度,可防治水土流失,促使土壤形成发育,土壤质量逐渐提高。因此,必须加强生态环境建设,控制石漠化的发生和发展,治理已退化的土地。

### 4. 土壤石漠化与人类驱动因素的相关分析

喀斯特土壤石漠化是一种渐发性灾害生态过程,人类活动与生态环境的相互作用是其发生的关键。人类(干扰)活动对喀斯特地区土地石漠化有着重要影响<sup>[17,21]</sup>。表7是土地利用变化各指标与驱动因素的线性相关系数(表中出现个别相关系数偏大的情况,用横线加以标识)。结果表明(表7),人均耕地与人口密度和农业人口数的相关性最大( $r = -0.841, -0.853$ ),与人均产值和总产值的相关性极小;单位耕地的粮食产量反映了耕地质量和对耕

表 6 同一土壤性质的时间动态变化  
Table 6 Dynamic change in soil properties in the same site

采样地点 Sample site	剖面编号 Profile No.	层次 Horizon	厚度 Depth (cm)	有机质 O. M. (g kg <sup>-1</sup> )	> 0.05 mm (%)	0.05~0.01 mm (%)	0.01~0.001 mm (%)	< 0.001 mm (%)
紫云宗地 Ziyunzongdi	ZY-1	表土层 Surface layer	17	52.33	32.86	25.31	23.44	18.39
	ZY-8	表土层 Surface layer	11	12.79	95.70	1.65	0.51	2.14
	ZY-15	表土层 Surface layer	45	61.84	38.28	43.53	7.83	10.36
关岭花江 Guanlinghuajiang	HJ-3	表土层 Surface layer	6	14.17	70.74	12.82	10.81	5.63
	HJ-5	表土层 Surface layer	1	10.90	95.33	1.20	2.15	1.32

表 7 耕地变化指标与驱动因素的相关系数( $n=32, p=0.05$ )  
Table 7 Correlation coefficients between index of changes in cropland and driving forces

耕地指标 Cropland index	总人口 <sup>①</sup>	人均粮食 <sup>④</sup>	农业人口比 <sup>⑤</sup>	人均产值 <sup>⑥</sup>	总产值 <sup>⑦</sup>	粮食总产 <sup>⑧</sup>	人口密度 <sup>⑨</sup>	农业人口数 <sup>⑩</sup>
人均耕地 Cropland per person	-0.421	-0.621	0.357	-0.075	-0.142	-0.386	-0.841	-0.853
单位耕地粮食产量 Per unit grain yield	0.387	0.234	0.250	0.341	0.443	0.853	0.472	0.365
单位耕地产值 Per unit yield value	0.273	0.128	0.145	0.964	0.996	0.455	0.443	0.391
耕地面积 Cropland area	-0.291	-0.662	0.381	-0.187	-0.210	-0.396	-0.621	-0.436
耕地比例 Cropland rate	-0.323	-0.654	0.377	-0.165	-0.167	-0.405	-0.633	-0.457

<sup>①</sup>Total population; <sup>④</sup>Food supply per capita; <sup>⑤</sup>Rate of agriculture population; <sup>⑥</sup>GDP per capita; <sup>⑦</sup>Total yield value; <sup>⑧</sup>Total food yield; <sup>⑨</sup>Population density; <sup>⑩</sup>Number of agriculture population

地的开发程度,它与驱动因素的相关性未超过 0.5;单位耕地产值与人均产值相关系数为 0.964,与总产值相关系数为 0.996,而与其他因素的相关性不大;耕地面积和耕地比例(指耕地面积占总土地面积的比例)与各因素的相关系数基本一致,都表现为与人均粮食和人口密度相关较大,但人均产值和总产值与耕地指标的相关性普遍较小,表明农业总产值与耕地变化的联系较复杂。可见,贵州喀斯特地区以耕地变化为突出问题的土地利用变化,与社会经济状况的变化密切相关,人类因素是土地利用变化的主要驱动力。而土地利用变化(强度)直接影响喀

斯特石漠化程度的大小。有关各驱动因素对喀斯特石漠化的相对重要性和贡献率仍值得进一步深入研究。

#### 4.3 土壤石漠化演变过程

喀斯特石漠化是我国西南岩溶地区(尤其贵州)的重要地质生态灾害问题,它不是一种纯自然过程,而是与人类活动密切相关。石漠化的发生、发展过程实际上就是人为活动破坏生态平衡的地表覆盖度降低的土壤侵蚀过程。表现为:人为因素→林退、草毁→陡坡开荒→土壤侵蚀→耕地减少→石山、半石山裸露→土壤侵蚀→完全石漠化(石漠)的逆向发展

模式。喀斯特石漠化是土地荒漠化的主要类型之一,它以脆弱的生态地质环境为基础,以强烈的人类活动为驱动力,以土地生产力退化为本质,以出现类似荒漠景观为标志。

#### 4.4 土壤石漠化的本质

喀斯特土壤石漠化虽然能够引起地表形态、植被等变化,但其本质是使土壤的物质组成、理化性质和生产性能发生变化,并且这种变化随石漠化的程度不同而异。具体表现在:喀斯特地区在自然植被演替成为次生植被或人工开垦利用后,有机质表层丧失,岩溶山区土壤表层出现砂化。经开垦利用后,岩溶环境土壤表层砂化现象更为明显。土地利用强度越大,对土壤团粒结构的破坏也越大,土壤有机质受土地利用强度的明显影响。退耕后土壤质量有所恢复。林地、灌草坡开垦后,土壤有机质下降是土壤水稳性团聚体下降及减少的主要原因。在人们环保意识未强化、相关举措未到位的前提下,土地利用方式的改变如超垦、滥樵,加大了环境负荷,造成植被稀疏,土壤细颗粒流失、减少,粗颗粒富集、基岩裸露,进而产生土壤石漠化。可以认为,喀斯特环境独特的二元结构和地貌特征是土壤石漠化产生的主要自然原因,人类对生态系统的破坏和土地不合理利用是喀斯特石漠化激发的主要人为因素。

**致谢** 土壤样品分析得到了贵州大学土壤教研室何腾兵、刘元生、黄莺、卜通达老师的帮助;土壤微生物测试部分在浙江大学华家池校区农业部亚热带土壤与植物营养重点实验室中进行;本工作也得到中国科学院南京土壤研究所滕应博士后的大力支持。在此一并致谢。

#### 参考文献

- [1] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性. 云南地理环境研究, 1990, 2(1): 21~29. Yang M D. Fragility of karst environment (In Chinese). Yunnan Geographic Environment Research, 1990, 2(1): 21~29
- [2] Sweeting M M. Reflections on the development of Karst geomorphology in Europe and a comparison with its development in China. Z. Geomorph., 1993, 37: 127~136
- [3] 万军. 贵州省喀斯特地区土地退化与生态重建研究进展. 地球科学进展, 2003, 18(3): 447~453. Wan J. Land degradation and ecological rehabilitation in karst areas of Guizhou Province, Southwest China (In Chinese). Advance in Earth Sciences, 2003, 18(3): 447~453
- [4] 蔡运龙. 中国西南喀斯特山区的生态重建与农林牧业发展: 研究现状与趋势. 资源科学, 1999, 21(5): 37~41. Cai Y L. Ecological rehabilitation and development of agriculture, forestry and animal husbandry in Karst mountain areas of Southwest China: Status quo and trend of study (In Chinese). Resources Science, 1999, 21(5): 37~41
- [5] 中国科学院学部. 关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议. 地球科学进展, 2003, 18(4): 489~492. Chinese Academy of Sciences. Some measures improving land rocky desertification in Karst regions of Southwest China (In Chinese). Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 489~492
- [6] 甘露, 万国江, 梁小兵. 贵州岩溶荒漠化成因及其防治. 中国沙漠, 2002, 22(1): 69~74. Gan L, Wan G J, Liang X B. Causes of Karst desertification in Guizhou and its countermeasures (In Chinese). Journal of Desert Research, 2002, 22(1): 69~74
- [7] 宋林华. 喀斯特地貌研究进展与趋势. 地理科学进展, 2000, 19(3): 193~202. Song L H. Progress and trend of the study on karst geomorphology (In Chinese). Progress in Geography, 2000, 19(3): 193~202
- [8] 杨胜天, 朱启疆. 贵州典型喀斯特环境退化与自然恢复速率. 地理学报, 2000, 55(4): 459~466. Yang S T, Zhu Q J. Rates of environmental degradation and natural rehabilitation in typical Karst area of Guizhou (In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2000, 55(4): 459~466
- [9] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. 第四纪研究, 2003, 22(6): 657~666. Wang S J, Li Y B, Li R L. Karst rocky desertification: Formation background, evolution and comprehensive management (In Chinese). Quaternary Sciences, 2003, 22(6): 657~666
- [10] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富. 岩溶生态系统土壤及表生植被某些特性变异与石漠化的相关性. 土壤学报, 2004, 41(2): 196~202. Li Y B, Xie D T, Wei C F. Correlation between rock desertification and variation of soil and surface vegetation in Karst ecosystem (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 196~202
- [11] Zhu Z D, Wang T. Trends of desertification and its rehabilitation in China. Desertification Control Bulletin, 1993, 22: 15~19
- [12] 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. 水土保持学报, 2002, 16(1): 76~79. Long J, Huang C Y, Li J. Effects of land use on soil quality in Karst hilly areas (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(1): 76~79
- [13] 常庆瑞, 安韶山, 刘京. 陕北农牧交错带土地荒漠化本质特性研究. 土壤学报, 2003, 40(4): 518~523. Chang Q R, An S S, Liu J. Characteristics of land desertification in the agriculture and animal husbandry interlace zone of northern Shanxi (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(4): 518~523
- [14] 龙健, 黄昌勇, 滕应. 铜矿尾矿库土壤—海洲香薷植物体系的微生物特征研究. 土壤学报, 2004, 41(1): 120~125. Long J, Huang C Y, Teng Y. Soil microbial characteristics of soil—*E. har-douensis* system in copper mine tailings (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 120~125
- [15] 中国科学院南京土壤研究所编. 中国土壤系统分类土壤物理和化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1992. Institute of Soil Science, CAS. ed. Analytical Method of Soil Physics and Chemistry of Chinese Soil System Classification (In Chinese). Beijing: Chinese Agriculture Science and Technology Press, 1992
- [16] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科



- 学技术出版社, 1978. Institute of Soil Science, CAS. ed. Analysis of Soil Physics and Chemistry (In Chinese), Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978
- [17] 龙健, 李娟, 黄昌勇. 我国西南地区的喀斯特环境与土壤退化及其恢复. 水土保持学报, 2002, 16(5): 5~ 8. Long J, Li J, Huang C Y. Soil degradation and reconstructive way on karst environment on Southwest China (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(5): 5~ 8
- [18] Frostegard A, Tunlid A. Phospholipid fatty acid composition, biomass and activity of microbial communities from two soil types experimentally exposed to different heavy metals. Appl. Environ. Microbiol., 1993, 59: 3605~ 3617
- [19] Insam H., Domsch K H., Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. Microbial Ecol., 1998, 15: 177~ 188
- [20] 滕应, 黄昌勇, 骆永明. 铅锌银矿区土壤微生物活性及其群落功能多样性研究. 土壤学报, 2004, 41(1): 113~ 119. Teng Y, Huang C Y, Luo Y M. Activities and functional diversity of microbial community in soil polluted with Pb-Zn-Ag mine tailings (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 113~ 119
- [21] 张殿发, 王世杰, 周德全. 土地石漠化的生态地质环境背景及其驱动机制—以贵州省喀斯特山区为例. 农村生态环境, 2002, 18(1): 6~ 10. Zhang D F, Wang S J, Zhou D Q. Eco-environment of rocky desertification and its driving mechanism—A typical example in karst mountainous areas of Guizhou Province (In Chinese). Rural Eco-environment, 2002, 18(1): 6~ 10

## CHARACTERISTICS OF SOIL ROCKY DESERTIFICATION IN THE KARST REGION OF GUIZHOU PROVINCE

Long Jian<sup>1</sup> Jiang Xinrong<sup>1</sup> Deng Qiqiong<sup>1</sup> Liu Fang<sup>2,3</sup>

(1 College of Geography and Biology Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

(2 State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Geochemistry Institute of Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

(3 Department of Environment Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract** Karst soil rocky desertification is not only a geo-ecological disaster induced by Karst geomorphy, but also a critical factor restraining social and economic development of Southwest China. Soil mechanical composition, physical features, chemical properties, microbial feature and chemical composition of soils were measured for studying the Karst rocky desertification. The results indicate that fine soil particles decrease progressively with soil erosion, leading to disappearance of surface soil layer and replacement of a sand layer. The absence of weathering parent material between soil and rocks makes calcareous soil unstable. Soil erosion at the rock-soil interface is a distinct character. Soil texture tends to be desertified. As a result, soil organic matter and nutrients in the surface soil layer reduce progressively and so do the soil's nutrient and moisture retention and functional diversity of the soil microbial communities. Soil formation is at the stage of chemical erosion and sand deposition. It could be concluded that rocky desertification is the final result of a vicious cycle of social economic stress and environmental deterioration.

**Key words** Karst region; Soil rocky desertification; Soil properties