

# 喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式土壤肥力特征<sup>\*</sup>

刘 艳<sup>1,2,3,4</sup> 宋同清<sup>2,3</sup> 蔡德所<sup>1</sup> 曾馥平<sup>2,3\*\*</sup> 彭晚霞<sup>2</sup> 杜 虎<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004; <sup>2</sup>中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; <sup>3</sup>中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西环江 547100; <sup>4</sup>广西水土保持监测总站, 南宁 530023)

**摘 要** 基于网格法(5 m×5 m)采样,研究了喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式(火烧、刈割、刈割除根、封育、种植玉米、种植牧草)下表层(0~20 cm)土壤肥力特征,利用主成分分析影响土壤肥力的主要因子,典范相关分析探讨土壤养分和土壤微生物的耦合关系.结果表明:研究区6种土地利用方式土壤呈微碱性,pH 7.83~7.98,不同土地利用方式土壤养分含量不同,分别为有机碳 76.78~116.05 g·kg<sup>-1</sup>、全氮 4.29~6.23 g·kg<sup>-1</sup>、全磷 1.15~1.47 g·kg<sup>-1</sup>、全钾 3.59~6.05 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 331.49~505.49 mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷 3.92~10.91 mg·kg<sup>-1</sup>、有效钾 136.28~198.10 mg·kg<sup>-1</sup>,除 pH 呈弱变异外,其他指标均呈中等至强度变异.不同土地利用方式对土壤肥力的影响不同,有机碳、全氮、全磷、碱解氮等主要养分受影响最大,沿封育、火烧、刈割、刈割除根、种植牧草、种植玉米的人为干扰增加梯度而减少;其次是土壤微生物,尤其是放线菌;典范相关分析表明,火烧迹地的全磷与土壤微生物生物量磷,全钾与土壤微生物生物量碳,全氮与放线菌的相互影响最大,刈割、刈割除根、封育、种植玉米、种植牧草土壤全氮与土壤微生物生物量碳,速效磷与土壤微生物生物量氮,pH与土壤微生物生物量碳、真菌,全氮、全钾与土壤微生物生物量磷,pH与真菌、放线菌相互之间的影响最大.土地利用方式的变化改变了喀斯特峰丛坡地土壤肥力特征.在喀斯特地区进行生态恢复与重建时,应采取合理的土地利用方式,提高喀斯特退化生态系统的土壤质量.

**关键词** 土壤肥力 主成分 土地利用方式 喀斯特

**文章编号** 1001-9332(2014)06-1561-08 **中图分类号** S158 **文献标识码** A

**Soil fertility characteristics under different land use patterns in depressions between karst hills.** LIU Yan<sup>1,2,3,4</sup>, SONG Tong-qing<sup>2,3</sup>, CAI De-suo<sup>1</sup>, ZENG Fu-ping<sup>2,3</sup>, PENG Wan-xia<sup>2</sup>, DU Hu<sup>2</sup> (<sup>1</sup>College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; <sup>2</sup>Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; <sup>3</sup>Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, Guangxi, China; <sup>4</sup>Guangxi Soil and Water Conservation Monitoring Station, Nanning 530023, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2014, 25(6): 1561–1568.

**Abstract:** Soil samples were collected from the depressions between karst hills by grid sampling method (5 m × 5 m), soil pH, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) in surface layer (0–20 cm) under different land use patterns (burning, cutting, cutting plus root removal, enclosure, maize plantation, and pasture plantation) were measured, the main factors of influencing the soil fertility was identified by principal component analysis (PCA), and the relationships between soil nutrients and microorganisms were demonstrated by canonical correlation analysis (CCA). The results showed that the soil was slightly alkaline (pH 7.83–7.98), and the soil fertility differed under the different land use patterns, with 76.78–116.05 g·kg<sup>-1</sup> of SOC, 4.29–6.23 g·kg<sup>-1</sup> of TN, 1.15–1.47 g·kg<sup>-1</sup> of TP, 3.59–6.05 g·kg<sup>-1</sup> of TK,

<sup>\*</sup> 中国科学院“西部行动”计划项目(KZCX2XB310)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050205, XDA05070404)、国家科技支撑计划项目(2011BAC09B02)、国家自然科学基金项目(31370845, 31370623, U1033004, 31100329)、广西科技项目(桂科合 1346011、桂科攻 1355007)和广西特聘专家项目资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者. E-mail: fpzeng@isa.ac.cn

2013-09-13 收稿, 2014-03-28 接受.

331.49–505.49  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  of AN), 3.92–10.91  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  of AP, and 136.28–198.10  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  of AK. These soil indexes except pH showed moderate or strong variation. Different land use patterns had various impacts on soil fertility: Soil nutrients such as SOC, TN, TP, and AN were most significantly influenced by land use patterns in the depressions between karst hills; Followed by soil microorganisms, especially soil actinomycetes, and the effect decreased with the increasing gradient of human disturbance from enclosure, burning, cutting, cutting plus root removal, pasture plantation, and maize plantation. CCA elucidated that considerable interactions existed in soil TP with MBP (microbial biomass phosphorus), TK with MBC (microbial biomass carbon), TN with actinomycetes in the burned area, while TN and MBC in the cutting treatment, AP and MBN (microbial biomass nitrogen) in the treatment of cutting plus root removal, pH with MBC and fungus in the enclosure treatment, TN and TK with MBP in the maize plantation, pH with fungi and actinomycetes in the pasture plantation. Land use patterns changed the soil fertility in the depressions between karst hills; therefore, in the ecological restoration and reconstruction of karst region with fragmented landforms and shallow soil, rational land use patterns should be adopted to improve the soil quality of degraded ecosystems.

**Key words:** soil fertility; principal component; land use pattern; karst.

土壤养分是自然因子和人为因子共同作用的结果,是土壤最重要的生态功能之一,其含量是衡量土壤肥沃程度的量化指标,是植物生长发育的基础<sup>[1–2]</sup>.土地利用是自然条件和人为活动的综合反映,土壤养分与土地利用方式具有密切关系,土地利用和管理水平在很大程度上影响土壤质量变化程度,土地利用方式可以影响植物凋落物和残余量,影响土壤微生物活动,破坏土壤团聚体结构,从而导致土壤养分的变化<sup>[3–6]</sup>.合理的土地利用方式可以改善土壤结构,增强土壤抵抗外界干扰的能力,而不合理的土地利用方式则会导致土壤侵蚀加剧,土壤质量下降和退化<sup>[7]</sup>.即使在同一坡面上,不同的土地利用方式也会导致土壤养分具有高度的异质性<sup>[8–9]</sup>.

喀斯特区域景观异质性强,二元结构明显,土壤瘠薄且不连续,水土流失严重,具有明显的脆弱性和易损性,破坏容易恢复难,在喀斯特生态脆弱地区,土壤肥力变化特征直接影响到该地区土壤生产力的高低及生态恢复的途径和方向<sup>[10–13]</sup>.在人地矛盾异常尖锐的背景下,选择合理的土地利用方式是该区域生态保护、恢复与重建的重要举措.本文选择喀斯特峰丛洼地火烧、刈割、刈割除根、封育、顺坡种植玉米、顺坡种植牧草6种最典型的土地利用方式,运用各种统计学方法分析了不同土地利用方式下土壤养分特征,探讨了不同土地利用方式对土壤肥力的影响,揭示土壤主要养分与土壤微生物的耦合关系,以期该地区乃至整个西南喀斯特土地资源的合理利用、生态恢复与重建提供科学依据.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区环江毛南族自治县中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站,地理位置为 $24^{\circ}43'–24^{\circ}44' \text{ N}$ , $108^{\circ}18'–108^{\circ}19' \text{ E}$ ,地势四周高、中间低,为典型的喀斯特峰丛洼地景观单元.海拔为288.5~337.8 m,地形破碎,坡度较陡, $\geq 20^{\circ}$ 的坡面占57%.洼地、坡地平均基岩裸露率分别为15%和30%,相应的土层深度分别为20~160 cm和10~50 cm.土壤由白云岩发育而成的深色或棕色石灰土,地表多覆盖碎石(粒径 $>2 \text{ mm}$ ),表土碎石体积含量在10%~40%<sup>[14]</sup>;土壤质地为粘壤土和粘土,粉粒、粘粒质量分数分别为25%~50%和30%~60%;土壤有机质质量分数为2.2%~10.1%,土壤pH值为中性至微碱性.研究区属中亚热带季风气候,全年无霜期300~330 d,年均气温 $19.9^{\circ}\text{C}$ ,极端高温 $38.7^{\circ}\text{C}$ ,极端低温 $-5.2^{\circ}\text{C}$ ,年平均辐射总量 $414.1 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温5500~6530 $^{\circ}\text{C}$ ,年均降雨量1389.1 mm,降水丰富但季节分布不均,雨季降雨量占全年降雨量的70%以上<sup>[14]</sup>.

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样方设置与土壤取样** 鉴于当地居民对坡面的中下部利用率较高,2006年底在试验区一面东南向山坡中下部建立了6个 $20 \text{ m} \times 70 \text{ m}$ 的监测样地.样地建立前,坡面土壤和植被较为均一,经过试验处理形成了火烧、刈割、刈割除根、封育、种植玉米和种植牧草(桂牧1号)6种常见土地利用方式.玉米品

种为瑞单 8 号. 在玉米整个生育期内, 氮 (N)、磷 ( $P_2O_5$ )、钾 ( $K_2O$ ) 施用量分别为  $160\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $90\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $90\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其中 100% 的磷肥、70% 的氮肥和钾肥作基肥, 30% 的氮肥和钾肥作追肥; 牧草选取桂牧 1 号杂交象草 (*Pennisetum purpureum* cv. Guimu-1, 以下简称桂牧 1 号). 每年于牧草返青后撒施 N :  $P_2O_5$  :  $K_2O$  = 15 : 15 : 15 的复合肥  $300\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 氮 (N)、磷 ( $P_2O_5$ )、钾 ( $K_2O$ ) 施用量均为  $100\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 每年刈割 4 ~ 5 次, 刈割后带出试验区. 每次刈割后施用氮 (N) 和钾 ( $K_2O$ ) 各  $50\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷 ( $P_2O_5$ )  $15\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . 具体设计及处理见表 1. 2009 年 10 月, 用插值法将动态监测样地划分为  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的网格, 土壤采样时以网格点为中心, 在中心 2 m 周围采取 5 个样本 (每个样本取 0 ~ 20 cm 的表层土壤), 混合后代表该样点土样<sup>[15]</sup>. 将土样分成两部分, 一部分带回实验室风干、过筛, 用于土壤养分性状测定, 另一部分带回实验室置于 4℃ 恒温冰箱中, 用于土壤微生物性状测定.

**1.2.2 土壤指标分析** 土壤常规分析参考鲍士旦<sup>[16]</sup>的方法: 土壤 pH 的测定采用电极电位法, 有机碳 (SOC) 的测定采用重铬酸钾氧化-外加热法, 全氮 (TN) 的测定采用半微量开氏法 (流动注射仪测定), 全磷 (TP) 的测定采用 NaOH 熔融-钼锑抗显色-紫外分光光度法, 全钾 (TK) 的测定采用 NaOH 熔融-原子吸收法, 碱解氮 (AN) 的测定采用扩散法, 速效磷 (AP) 的测定采用  $0.5\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$  提取-钼锑抗显色-紫外分光光度法, 速效钾 (AK) 的测定采用  $\text{NH}_4\text{Ac}$  浸提-原子吸收法.

土壤微生物特性测定参考吴金水等<sup>[17]</sup>的方法:

土壤微生物生物量碳 (MBC) 的测定采用氯仿熏蒸- $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提法, 土壤微生物生物量氮 (MBN) 的测定采用氯仿熏蒸- $\text{K}_2\text{SO}_4$  提取-流动注射氮分析仪法, 土壤微生物生物量磷 (MBP) 的测定采用氯仿熏蒸- $\text{NaHCO}_3$  提取-Pi 测定-外加 Pi 校正法, 细菌、真菌、放线菌数量的测定均采用稀释平板测数法.

1.3 数据处理

采用描述性统计对土壤养分数据进行分析, 利用因子分析将多个土壤性状指标分解为少数几个独立的主成分, 将土壤养分因子和土壤微生物因子进行典范相关分析<sup>[18-19]</sup>. 所有分析均在 SPSS 16.0 软件中完成.

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤养分描述性统计

由表 2 可知, 白云岩发育的石灰土呈微碱性, pH 值 7.83 ~ 7.98, 土壤有机碳和其他元素含量均很高, 有机碳  $109.02 \sim 158.62\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮  $4.29 \sim 6.90\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷  $1.15 \sim 1.47\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全钾  $3.59 \sim 6.05\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 碱解氮  $331.49 \sim 505.49\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效磷  $3.92 \sim 10.91\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $136.28 \sim 198.10\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 除 pH 呈弱变异 (0.8% ~ 3.8%) 外, 有机碳、全氮、全磷、碱解氮均呈中等变异 (10% ~ 30%), 全钾、速效磷和速效钾的变异较大, 其中火烧、封育和种植牧草的全钾, 刈割除根、种植玉米和种植牧草的速效磷, 种植牧草的速效钾呈强度变异, 其他指标均呈中等变异, 种植牧草因人为干扰强烈, 各指标的变异均很大. 除 pH 值、火烧和种植牧草的有机碳、刈割的全磷、封育的全钾、火烧和刈割除根

表 1 不同土地利用方式坡面样地基本情况  
Table 1 General status of the studied slope under different land use patterns

利用方式 Land use pattern	坡形 Slope shape	平均坡度 Mean slope angle (°)	处理方式 Treatment	土壤扰动情况 Soil disturbance
火烧 Burning	S	33.7	每年一月火烧一次 Burning in each January	小 Slight
刈割 Cutting	S	34.5	每年一月砍伐、搬移, 不去除植物根系 Cutting scrub and grass, and moving out of plot in each January	小 Slight
刈割除根 Cutting plus with root removal	S	33.5	每年一月砍伐、搬移, 去除植物根系 Cutting scrub and grass, and removing root in each January	大 Heavy
封育 Enclosure	S	33.0	保留原始植被, 作为对照 Control plot with original vegetation	无 No
种植玉米 Maize plantation	M	26.4	坡中下部去除原始植被, 挖根, 顺坡种植玉米 Planting maize on mid-below slope after removal of vegetation and root	大 Heavy
种植牧草 Pasture plantation	M	24.4	去除原始植被, 挖根, 种植牧草 (桂牧 1 号) Planting pasture of <i>Pennisetum purpureum</i> cv. Guimu-1 after removal of vegetation and root	大 Heavy

S: 直形 Straight; M: 微凹形 Micro-concave.

表 2 不同土地利用方式土壤肥力描述性特征  
Table 2 Descriptive statistics of soil fertility under different land use patterns

指标 Index	类型 Type	最小值 Min.	最大值 Max.	均值 Mean	变异系数 CV ( % )	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
pH	I	7.55	8.04	7.89bc	1.4	-1.17	1.64
	II	7.46	8.24	7.93ab	1.6	-0.45	2.63
	III	7.80	8.13	7.98a	0.8	-0.20	-0.13
	IV	7.47	8.10	7.89bc	1.6	-1.14	1.81
	V	6.68	8.26	7.87bc	3.8	-2.18	5.41
	VI	7.34	8.11	7.83c	2.1	-0.58	-0.07
有机碳 Soil organic carbon ( SOC, g · kg <sup>-1</sup> )	I	73.25	143.81	115.78a	12.9	-0.37	0.26
	II	81.63	158.62	115.56a	16.4	0.45	-0.44
	III	79.55	129.79	98.29b	11.8	0.58	-0.06
	IV	82.44	149.97	116.05a	12.6	0.18	-0.04
	V	55.74	109.02	76.78c	14.1	0.70	1.21
	VI	62.29	127.72	95.05b	14.5	-0.01	0.10
全氮 Total nitrogen ( TN, g · kg <sup>-1</sup> )	I	4.35	8.05	6.23b	13.8	0.07	-0.39
	II	3.83	8.53	5.99b	18.2	0.48	-0.46
	III	4.00	6.93	5.40c	11.9	0.56	0.13
	IV	4.90	9.59	6.95a	13.0	0.72	0.81
	V	3.22	6.03	4.29d	13.1	0.37	0.48
	VI	3.50	6.74	5.24c	12.8	0.02	0.05
全磷 Total phosphorus ( TP, g · kg <sup>-1</sup> )	I	0.89	1.85	1.36b	16.7	0.19	-0.76
	II	0.80	1.56	1.24c	14.9	-0.04	-0.70
	III	0.85	2.09	1.38b	20.2	0.61	0.11
	IV	1.06	2.18	1.47a	20.6	0.77	-0.21
	V	0.76	1.58	1.15ce	14.2	0.23	0.20
	VI	0.88	1.68	1.23cd	16.7	0.48	-0.81
全钾 Total potassium ( TK, g · kg <sup>-1</sup> )	I	1.51	8.81	4.75b	33.2	0.56	0.21
	II	1.54	5.73	3.59c	25.0	0.09	0.08
	III	2.95	7.18	4.94b	15.6	0.30	0.62
	IV	1.50	7.83	5.01b	30.7	-0.13	-0.57
	V	3.34	9.31	6.05a	29.1	0.10	-1.28
	VI	2.11	9.39	5.11b	31.7	0.54	0.01
碱解氮 Available nitrogen ( AN, mg · kg <sup>-1</sup> )	I	333.70	656.88	505.49a	13.2	0.46	0.09
	II	271.64	501.10	365.87d	14.0	0.95	0.48
	III	285.19	527.19	401.88c	13.8	0.20	-0.22
	IV	377.67	669.46	480.65b	14.2	0.68	-0.10
	V	226.57	499.29	331.49e	16.3	0.26	0.52
	VI	305.89	506.08	383.79cd	9.9	1.11	2.07
速效磷 Available phosphorus ( AP, mg · kg <sup>-1</sup> )	I	4.60	12.71	8.04b	22.3	0.42	0.08
	II	2.32	6.03	3.92d	21.6	0.31	-0.46
	III	3.02	11.70	7.03c	34.7	0.39	-1.15
	IV	4.56	13.95	7.79bc	25.3	0.89	0.56
	V	4.49	20.23	10.91a	33.2	0.52	0.29
	VI	1.72	16.02	6.96c	50.7	0.56	-0.09
速效钾 Available potassium ( AK, mg · kg <sup>-1</sup> )	I	128.80	224.06	182.97b	12.5	-0.18	-0.76
	II	105.44	236.43	148.90cd	18.1	0.68	0.81
	III	94.04	178.00	136.28d	13.6	-0.19	-0.47
	IV	88.24	383.82	198.10a	24.2	0.56	3.89
	V	88.70	197.07	136.83d	15.6	0.52	0.52
	VI	91.37	328.65	159.20c	36.2	1.68	1.83

I : 火烧 Burning; II : 刈割 Cutting; III : 刈割除根 Cutting plus root removal; IV : 封育 Enclosure; V : 种植玉米 Maize plantation; VI : 种植牧草 Pasture plantation. 下同 The same below. 同列数据后不同小写字母分别表示差异达到显著水平 ( *P* < 0.05 ) Different lowercase letters within the same column indicated significant difference at 0.05 level.



的速效钾偏态数小于零,呈负偏态分布外,其他指标均呈正偏态分布,其中种植玉米的 pH 值偏度最大,种植牧草的有机碳偏度最小;除种植玉米的 pH 值峰值系数大于 3,样品数据为高峽峰外,其余均低于 3,为低阔峰. 不同土地利用方式对 pH、有机碳和各营养元素含量的影响不同,其大小顺序分别为:pH:刈割除根>刈割>封育、火烧>玉米>种植牧草;有机碳:封育>火烧>刈割>刈割除根>种植牧草>玉米;全氮:封育>火烧>刈割>刈割除根>种植牧草>玉米;全磷:封育>刈割除根>火烧>刈割>种植牧草>玉米;全钾:玉米>封育>种植牧草>刈割除根>火烧>刈割;碱解氮:火烧>封育>刈割除根>种植牧草>刈割>玉米;速效磷:玉米>火烧>封育>刈割除根>种植牧草>刈割;速效钾:封育>火烧>种植牧草>刈割>玉米>刈割除根.

2.2 不同土地利用方式对土壤肥力的影响

喀斯特峰丛洼地 6 种不同土地利用方式下,8 个土壤养分指标、6 个土壤微生物指标的主成分分析表明,火烧、刈割、刈割除根、种植玉米前 7 个主成分的分差解释累积贡献率达到 80% 以上,封育和种

植牧草前 8 个主成分的方差累积贡献率分别为 77.0% 和 78.5%,各主成分的贡献率都比较低,表明喀斯特峰丛洼地具有高度的异质性,土地利用方式对土壤肥力影响的因子较多. 因此,有必要全面考虑土壤肥力各因子之间的相互作用关系对不同土地利用方式的响应.

不同土地利用方式对土壤肥力的影响不同. 6 种土地利用方式第 1 主成分的载荷量基本上都以有机质、全氮、碱解氮最大,说明土壤有机质和氮素最容易受土地利用方式的影响;第 2 主成分的最大载荷量在不同土地利用方式下有所差异,火烧为 pH、全钾,刈割为土壤微生物生物量碳、氮,刈割除根为土壤微生物生物量碳,封育为细菌,种植玉米为速效钾,种植牧草为全磷;第 3 主成分的最大载荷量在不同土地利用方式下也不同,火烧和刈割为放线菌,刈割除根为真菌,封育和种植牧草为土壤微生物生物量磷,种植玉米为土壤微生物生物量碳;第 4 主成分最大载荷量各土地利用方式也不同,火烧为土壤微生物生物量氮,刈割为土壤微生物生物量磷,刈割除根和种植玉米为放线菌,封育和种植牧草为全钾. 这

表 3 不同土地利用方式土壤肥力主成分分析  
Table 3 Principal component analysis of soil fertility under different land use patterns

指标 Index		pH	有机碳 SOC	全氮 TN	碱解氮 AN	全磷 TP	速效磷 AP	全钾 TK	速效钾 AK	微生物 生物量碳 MBC	微生物 生物量氮 MBN	微生物 生物量磷 MBP	细菌 Bacteria	真菌 Fungi	放线菌 Actinomy- cetes	方差贡献 Variance contri- bution	累计贡献 Accumulative contribution
I	PC1	-0.36	0.885	0.847	0.905	0.551	0.776	-0.002	0.053	0.142	-0.068	0.419	0.184	0.117	0.069	3.609	0.258
	PC2	0.845	-0.106	-0.081	-0.134	-0.419	-0.096	-0.933	0.162	-0.742	0.110	-0.256	-0.004	0.226	0.120	2.525	0.438
	PC3	0.229	0.051	0.121	-0.059	0.107	0.016	-0.072	-0.091	0.090	0.100	-0.012	0.070	0.072	0.969	1.065	0.514
	PC4	-0.024	0.131	-0.043	-0.063	0.341	0.111	0.111	0.062	0.045	-0.972	0.080	-0.010	0.023	-0.095	1.130	0.595
II	PC1	-0.335	0.912	0.889	0.944	0.574	0.704	-0.013	0.288	0.192	0.161	-0.030	0.336	0.33	0.102	3.828	0.273
	PC2	-0.250	0.113	0.090	0.161	0.150	0.331	0.227	0.423	0.868	0.896	0.030	0.171	0.148	0.030	2.080	0.422
	PC3	0.308	-0.122	0.020	-0.048	-0.114	-0.254	-0.007	-0.244	-0.060	-0.001	0.067	-0.294	-0.244	-0.905	1.222	0.509
	PC4	-0.085	-0.059	-0.002	-0.002	0.042	0.069	0.109	0.290	0.064	-0.023	0.983	-0.003	-0.017	-0.078	1.090	0.587
III	PC1	-0.949	0.762	0.386	0.094	0.124	-0.073	0.327	0.069	-0.055	-0.039	0.004	-0.034	0.162	0.064	1.808	0.129
	PC2	-0.009	-0.237	0.090	-0.002	0.375	0.722	0.263	-0.109	0.849	0.749	0.417	0.072	0.049	0.036	2.273	0.292
	PC3	0.079	-0.185	-0.023	0.007	-0.059	0.022	-0.161	0.028	-0.103	0.044	-0.032	0.004	-0.976	0.049	1.040	0.366
	PC4	0.007	-0.093	-0.096	-0.106	-0.212	0.099	-0.175	0.071	0.062	-0.411	-0.061	-0.059	0.050	-0.937	1.179	0.450
IV	PC1	-0.724	0.761	0.849	0.797	0.099	0.731	0.011	0.001	0.196	0.026	0.181	0.034	0.221	-0.109	3.137	0.224
	PC2	0.230	0.058	-0.027	0.225	-0.010	-0.476	0.131	-0.086	-0.120	0.135	-0.102	0.850	0.073	0.185	1.164	0.307
	PC3	0.174	0.094	0.295	0.036	-0.035	0.012	0.063	0.012	-0.195	0.065	0.941	-0.117	-0.074	-0.011	1.080	0.384
	PC4	-0.326	0.032	-0.099	-0.036	0.024	0.085	0.948	0.103	0.164	-0.088	0.063	0.161	0.106	-0.044	1.113	0.464
V	PC1	-0.179	0.965	0.938	0.714	0.844	0.175	0.400	0.154	0.108	0.163	-0.088	0.036	-0.041	-0.192	3.364	0.240
	PC2	0.272	-0.019	0.121	0.267	0.035	0.254	0.150	0.918	0.231	0.051	-0.356	0.010	0.031	0.045	1.276	0.331
	PC3	-0.180	-0.009	-0.094	0.061	0.164	0.180	-0.233	0.003	0.883	0.345	0.770	-0.031	-0.171	0.098	1.691	0.452
	PC4	0.191	-0.007	-0.101	0.112	-0.252	0.033	-0.014	0.048	-0.006	-0.048	0.138	0.053	0.235	0.912	1.037	0.526
VI	PC1	-0.195	0.821	0.875	0.712	0.073	0.623	-0.049	0.004	-0.014	0.152	-0.072	0.237	0.193	0.012	2.503	0.179
	PC2	0.792	-0.174	-0.100	-0.115	-0.930	0.199	-0.146	-0.082	-0.078	-0.217	0.078	-0.048	0.214	-0.291	1.805	0.308
	PC3	-0.048	0.164	-0.099	0.099	0.052	0.191	0.076	-0.021	0.153	0.234	-0.942	0.050	0.059	-0.048	1.067	0.384
	PC4	-0.117	0.048	-0.005	-0.485	0.015	0.519	0.919	0.110	0.094	0.018	-0.085	-0.068	-0.010	-0.084	1.405	0.484

些指标受各自土地利用方式的影响较大,其他因子所受的影响较小. 土地利用方式对土壤肥力影响的总趋势为:首先影响土壤有机质、氮等主要养分,其次对土壤微生物特别是放线菌产生影响.

2.3 不同土地利用方式土壤养分与土壤微生物的典范相关分析

喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式下,土壤养分与土壤微生物的典型相关分析见表 4. 火烧、刈割、刈割除根、封育、种植玉米、种植牧草前 4 个特征值的方差贡献率分别为 70.8%、70.8%、69.3%、59.8%、69.8%、60.3%,基本能反映出绝大部分的变量信息,由此建立了两两之间的 4 对典型变量构成. 经统计检验,火烧前 3 对典型变量的相关系数达到了极显著水平,取前 3 对典型变量来分析两类性质之间的相互关系,其余 5 种土地利用方式只有 1 对典型变量相关系数显著,因此只取 1 对典型变量进行分析(表 5).

火烧方式下土壤养分和土壤微生物第 1、2、3 对典型变量相关系数分别为 0.889、0.653、0.584,相关显著. 从第 1 组典型变量系数可以看出,土壤因子

中全磷的载荷最高,土壤微生物因子中土壤微生物生物量磷的载荷最高,说明土壤全磷和土壤微生物生物量磷相互作用最大,且呈正相关;第 2 组典型变量系数主要反映了土壤全钾与土壤微生物生物量碳之间的正相关;第 3 组典型变量反映了土壤全氮与土壤放线菌之间的正相关.

刈割、刈割除根、封育、种植玉米、种植牧草 5 种土地利用方式下,土壤养分和土壤微生物的第 1 对典型相关系数分别为 0.739、0.743、0.753、0.731、0.722,均达到了极显著水平. 从刈割的 1 组典型变量系数可以看出,土壤因子中的全氮载荷最大,土壤微生物因子中的微生物生物量碳载荷最大,二者的相互影响最大,且呈正相关;刈割除根主要反映了土壤速效磷与土壤微生物生物量氮之间的正相关;封育主要反映了土壤 pH 与土壤微生物生物量碳、真菌之间的负相关;种植玉米主要反映了土壤全氮、全钾与土壤微生物生物量磷之间的负相关;种植牧草主要反映了土壤 pH 与真菌之间的负相关及与放线菌之间的正相关.

表 4 不同土地利用方式土壤养分与土壤微生物的典范相关分析  
Table 4 Canonical correlation analysis of soil nutrients and microorganisms under different land use patterns

类型 Type	典型向量 Typical vector	典型相关系数 Canonical correlation coefficient	特征值 Eigenvalue	卡方值 Chi-square value	自由度 df	显著水平 Significant level	累积贡献率 Accumulative percentage (%)
I	1	0.889	5.146	139.333	48	0.0001	36.7
	2	0.653	2.445	65.024	35	0.0015	54.2
	3	0.584	1.345	38.614	24	0.0300	63.8
	4	0.446	0.977	18.836	15	0.2213	70.8
II	1	0.739	5.697	71.895	48	0.0143	40.7
	2	0.581	1.908	35.203	35	0.4586	54.3
	3	0.458	1.295	16.031	24	0.8869	63.6
	4	0.266	1.019	5.096	15	0.9913	70.8
III	1	0.743	4.917	78.416	48	0.0036	35.1
	2	0.591	2.473	44.287	35	0.1351	52.8
	3	0.489	1.231	26.002	24	0.3530	61.6
	4	0.387	1.080	14.415	15	0.4943	69.3
IV	1	0.753	3.642	89.265	48	0.0003	26.0
	2	0.652	1.937	49.574	35	0.0523	39.8
	3	0.456	1.524	23.235	24	0.5059	50.7
	4	0.362	1.272	12.193	15	0.6644	59.8
V	1	0.731	4.057	80.724	48	0.0022	29.0
	2	0.609	2.385	44.432	35	0.1319	46.0
	3	0.444	2.047	22.467	24	0.5514	60.6
	4	0.368	1.277	12.033	15	0.6765	69.8
VI	1	0.722	3.349	73.014	48	0.0115	23.9
	2	0.629	2.219	38.023	35	0.3334	39.8
	3	0.386	1.691	14.134	24	0.9436	51.8
	4	0.278	1.184	6.471	15	0.9707	60.3

表 5 不同土地利用方式土壤养分与微生物典型变量构成  
Table 5 Canonical variables composition of soil nutrients and microorganisms under different land use patterns

类型 Type	典型变量组成 Composition of canonical variables
I	$U_1 = 0.258X_2 + 0.301X_3 - 0.440X_4 - 0.823X_5 - 0.033X_6 - 0.262X_7 - 0.011X_8$ $U_2 = -0.001X_1 - 0.335X_2 + 0.164X_3 + 0.422X_4 - 0.539X_5 - 0.502X_6 + 0.896X_7 - 0.225X_8$ $U_3 = 0.853X_1 - 0.057X_2 + 1.359X_3 - 0.772X_4 + 0.500X_5 - 0.389X_6 + 0.315X_7 - 0.810X_8$ $V_1 = -0.479Y_1 + 0.217Y_2 - 0.581Y_3 + 0.052Y_4 + 0.063Y_5 + 0.027Y_6$ $V_2 = 0.758Y_1 + 0.316Y_2 - 0.750Y_3 + 0.106Y_4 - 0.371Y_5 - 0.298Y_6$ $V_3 = -0.078Y_1 - 0.160Y_2 - 0.204Y_3 + 0.451Y_4 - 0.605Y_5 + 0.818Y_6$
II	$U_1 = -0.387X_1 - 0.475X_2 + 0.693X_3 - 0.170X_4 + 0.323X_5 + 0.165X_6 + 0.195X_7 + 0.463X_8$ $V_1 = 0.653X_1 + 0.022X_2 + 0.273X_3 + 0.244X_4 + 0.255X_5 + 0.116X_6$
III	$U_1 = 0.118X_1 + 0.029X_2 - 0.106X_3 - 0.155X_4 + 0.363X_5 + 0.803X_6 + 0.083X_7 - 0.131X_8$ $V_1 = 0.427Y_1 + 0.563Y_2 + 0.213Y_3 - 0.031Y_4 + 0.040Y_5 - 0.013Y_6$
IV	$U_1 = 1.163X_1 - 0.164X_2 + 0.052X_3 + 0.116X_4 + 0.025X_5 + 0.583X_6 + 0.060X_7 - 0.005X_8$ $V_1 = -0.636Y_1 + 0.001Y_2 + 0.087Y_3 + 0.001Y_4 - 0.659Y_5 + 0.137Y_6$
V	$U_1 = 0.481X_1 - 0.814X_2 + 1.197X_3 - 0.411X_4 - 0.247X_5 - 0.048X_6 + 1.095X_7 - 0.103X_8$ $V_1 = -0.349Y_1 + 0.518Y_2 - 0.715Y_3 - 0.432Y_4 - 0.297Y_5 + 0.020Y_6$
VI	$U_1 = 0.930X_1 - 0.849X_2 - 0.004X_3 - 0.084X_4 + 0.114X_5 + 0.418X_6 - 0.274X_7 - 0.076X_8$ $V_1 = 0.282Y_1 - 0.112Y_2 - 0.010Y_3 - 0.267Y_4 - 0.790Y_5 + 0.749Y_6$

$X_1$ : pH;  $X_2$ : 有机碳 Soil organic carbon;  $X_3$ : 全氮 Total nitrogen;  $X_4$ : 全磷 Total phosphorus;  $X_5$ : 全钾 Total potassium;  $X_6$ : 碱解氮 Available nitrogen;  $X_7$ : 速效磷 Available phosphorus;  $X_8$ : 速效钾 Available potassium;  $Y_1$ : 土壤微生物生物量碳 Microbial biomass carbon;  $Y_2$ : 土壤微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen;  $Y_3$ : 土壤微生物生物量磷 Microbial biomass phosphorus;  $Y_4$ : 真菌 Fungi;  $Y_5$ : 细菌 Bacteria;  $Y_6$ : 放线菌 Actinomycetes.

3 讨 论

喀斯特峰丛洼地主要母质纯碳酸盐岩的 CaO 和 MgO 含量很高,但以硅酸盐矿物为主的不溶物含量很低,岩石风化的养分输入极为有限.但喀斯特峰丛洼地属亚热带季风气候,温、湿条件优越,极有利于生物的繁衍和生长,生物自肥作用十分强烈,同时加速了岩石的溶蚀风化和土壤的形成发育进程,与同纬度地区红壤相比,土壤养分含量均很高<sup>[20]</sup>.受下伏碳酸盐岩的强烈影响,由白云岩发育的石灰土的土壤 CaO、MgO 含量高达 118.0 和 67.4 g·kg<sup>-1</sup><sup>[21]</sup>,远高于同区域石灰岩发育的石灰土;土壤呈微碱性,pH 达 7.83~7.98,也远高于石灰岩发育的石灰土(7.0 左右).研究区的土壤母质为白云

岩,其土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷的含量远高于同区域石灰岩发育的石灰土,全钾、速效钾的含量虽然高于同区域的红壤,但远低于同区域石灰岩发育的石灰土<sup>[20,22]</sup>.不同土地利用方式对土壤养分的影响不同,其中有机碳、全氮、全磷、碱解氮等均随人为干扰的减少而增大,顺坡种植玉米和牧草两种土地利用方式由于收获和垦殖的原因,土壤养分急剧减少<sup>[23]</sup>,即使进行了施肥补偿,其有机碳、全氮、全磷和碱解氮仍然较低,而种植玉米的全钾和速效磷、种植牧草的速效钾较高.所有土壤养分指标除 pH 呈弱变异外,其他均呈中等至强变异,其中钾和速效磷的变异较大.

土壤养分与微生物、植被相互作用,土壤各种矿物质养分形成土壤的物质基础,增强土壤肥力,改善土壤的微生物性状,共同调控植被的物种组成、群落类型和生长发育状况,植物旺盛的生物量累积和凋落物返还过程反过来不断地改善土壤肥力和微生物性状<sup>[19,21]</sup>.喀斯特峰丛洼地景观异质性强,生态系统类型复杂,影响因子众多,不同生态系统的影响因子不同.喀斯特峰丛洼地 6 种不同土地利用方式土壤养分(8 个)、土壤微生物(6 个)共计 14 个指标的主成分分析显示,前 7~8 个主成分方程累积贡献率接近或分别达到 80%,各主成分的贡献率都比较低,降维效果差,土地利用方式对土壤肥力的影响广泛,不同土地利用方式对土壤肥力影响的因子不同.总的趋势是:首先影响土壤有机碳、全氮和碱解氮等主要养分,土壤有机碳、全氮和碱解氮的提高促进了氮素转化为可供植物利用的有效态养分,提高氮素利用效率,加速了土壤氮素循环<sup>[24]</sup>,有利于土壤微生物生物量碳、氮的积累<sup>[25-26]</sup>;其次是影响了土壤微生物尤其是放线菌.典范相关分析表明,火烧土地利用方式下土壤养分与土壤微生物前 3 对典型变量相关系数显著,其中全磷与土壤微生物生物量磷、全钾与土壤微生物生物量碳、全氮与放线菌的相互影响最大,刈割、刈割除根、封育、种植玉米、种植牧草 5 种土地利用方式土壤养分与土壤微生物只有第 1 对典型变量相关系数显著,其中土壤全氮与土壤微生物生物量碳,土壤速效磷与土壤微生物生物量氮,pH 与土壤微生物生物量碳、真菌,全氮、全钾与土壤微生物生物量磷,pH 与真菌、放线菌之间的相互影响最大.

参考文献

[1] Liu S-L (刘世梁), Fu B-J (傅伯杰), Lü Y-H (吕一

- 河), *et al.* Assessment of soil quality in relation to land use and landscape position on slope. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(3): 414–420 (in Chinese)
- [2] Liu L (刘 璐), Zeng F-P (曾馥平), Song T-Q (宋同清), *et al.* Spatial heterogeneity of soil nutrients in Karst area's Mulun National Nature Reserve. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(7): 1667–1673 (in Chinese)
- [3] Fu B-J (傅伯杰), Guo X-D (郭旭东), Chen L-D (陈利顶), *et al.* Land use changes and soil nutrient changes: A case study in Zunhua County, Hebei Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2001, **21**(6): 926–931 (in Chinese)
- [4] Zheng H (郑 华), Su Y-R (苏以荣), He X-Y (何寻阳), *et al.* Effects of land use on soil nutrient in peak-forest valley: A case study in Dacai Village of Huanjiang County, Guangxi. *Carsologica Sinica* (中国岩溶), 2008, **27**(2): 177–181 (in Chinese)
- [5] Zhang P (张 萍), Guo H-J (郭辉军), Dao Z-L (刀志灵), *et al.* Preliminary study on soil biochemical activities in Gaoligong Mountains. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2000, **37**(2): 275–279 (in Chinese)
- [6] Shi Y-X (史衍玺), Tang K-L (唐克丽). Changes of biological characteristics of soil quality under man-made accelerated erosion. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 1998, **14**(1): 28–40 (in Chinese)
- [7] Sha L-Q (沙丽清), Qiu X-Z (邱学忠), Gan J-M (甘建民). Relationship between land use and soil fertility in Xizhuang watershed, Baoshan, China. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2003, **22**(4): 9–11 (in Chinese)
- [8] Ovalles FA, Collins ME. Soil landscape relationships and soil variability in north central Florida. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, **50**: 401–408
- [9] Miller PM, Singer MJ, Nielsen DR. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, **52**: 1133–1141
- [10] Zhang W (张 伟), Chen H-S (陈洪松), Wang K-L (王克林), *et al.* Spatial variability of soil nutrients on hillslope in typical Karst peak-cluster depression areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2008, **24**(1): 68–73 (in Chinese)
- [11] Liu S-J (刘淑娟), Zhang W (张 伟), Wang K-L (王克林), *et al.* Spatiotemporal heterogeneity of topsoil nutrients in Karst peak-cluster depression area of Northwest Guangxi, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(11): 3036–3043 (in Chinese)
- [12] Peng W-X (彭晚霞), Song T-Q (宋同清), Zeng F-P (曾馥平), *et al.* Models of vegetation and soil coupling coordinative degree in grain for green project in depressions between Karst hills. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2011, **27**(9): 305–310 (in Chinese)
- [13] Peng W-X (彭晚霞), Wang K-L (王克林), Song T-Q (宋同清), *et al.* Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable Karst ecosystem. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(2): 811–820 (in Chinese)
- [14] Chen HS, Liu JW, Wang KL, *et al.* Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in Karst region of northwest Guangxi, China. *Catena*, 2011, **84**: 21–28
- [15] Peng WX, Song TQ, Zeng FP, *et al.* Spatial distribution of surface soil water content under different vegetation types in northwest Guangxi, China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **69**: 2699–2708
- [16] Bao S-D (鲍士旦). Soil Agricultural and Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [17] Wu J-S (吴金水), Lin Q-M (林启美), Huang Q-Y (黄巧云), *et al.* Soil Microbial Biomass: Methods and Application. Beijing: Weather Press, 2006 (in Chinese)
- [18] Du H (杜 虎), Peng W-X (彭晚霞), Song T-Q (宋同清), *et al.* Plant community characteristics and its coupling relationships with soil in depressions between Karst hills, North Guangxi, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2013, **37**(3): 197–208 (in Chinese)
- [19] Peng W-X (彭晚霞), Song T-Q (宋同清), Zeng F-P (曾馥平), *et al.* The coupling relationship between vegetation, soil, and topography factors in Karst mixed evergreen and deciduous broadleaf forest. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(13): 3472–3481 (in Chinese)
- [20] Song T-Q (宋同清), Wang K-L (王克林), Peng W-X (彭晚霞), *et al.* Ecological effects of intercropping white clover on tea plantation in a subtropical hilly region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(11): 3647–3655 (in Chinese)
- [21] Han M-R (韩美荣), Song T-Q (宋同清), Peng W-X (彭晚霞), *et al.* Compositional characteristics and roles of soil mineral substances in depressions between hills in Karst region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(3): 685–693 (in Chinese)
- [22] Song T-Q (宋同清), Peng W-X (彭晚霞), Zeng F-P (曾馥平), *et al.* Soil ecological effects of converting cropland to forest and grassland in depressions between Karst hills. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2011, **48**(6): 1219–1226 (in Chinese)
- [23] Zeng F-P (曾馥平), Peng W-X (彭晚霞), Song T-Q (宋同清), *et al.* Changes in vegetation after 22 years' natural restoration in the Karst disturbed area in Northwest Guangxi. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(12): 5110–5119 (in Chinese)
- [24] Lu S-Y (鹿士杨), Peng W-X (彭晚霞), Song T-Q (宋同清), *et al.* Soil microbial properties under different grain-for-green patterns in depressions between Karst hills. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(8): 2390–2399 (in Chinese)
- [25] Song M (宋 敏), Zou D-S (邹冬生), Du H (杜虎), *et al.* Characteristics of soil microbial populations in depressions between Karst hills under different land use patterns. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(9): 2471–2478 (in Chinese)
- [26] Ralte V, Pandey HN, Barik SK, *et al.* Changes in microbial biomass and activity in relation to shifting cultivation and horticultural practices in subtropical evergreen forest ecosystem of north-east India. *Acta Oecologica*, 2005, **28**: 163–172

作者简介 刘艳,女,1980年生,博士研究生.主要从事水土保持及生态恢复研究. E-mail: liuyan201206@163.com

责任编辑 张凤丽