

DOI: 10.5846/stxb201208161154

于扬, 杜虎, 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 鹿士杨, 范夫静, 卢成阳. 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征. 生态学报, 2013, 33(22): - .

Yu Y, Du H, Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Wang K L, Lu S Y, Fan F J, Lu C Y. Characteristics of soil fertility in different ecosystems in depressions between karst hills. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(22): - .

喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征

于 扬^{1,2,3}, 杜 虎^{1,2,3}, 宋同清^{1,2,*}, 彭晚霞^{1,2}, 曾馥平^{1,2}, 王克林^{1,2},
鹿士杨^{1,2,3}, 范夫静^{1,2,4}, 卢成阳^{1,2,5}

(1. 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;
2. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 江西农业大学, 南昌 330045; 5. 广西大学林学院, 南宁 530004)

摘要: 基于喀斯特峰丛洼地坡耕地、草丛、灌丛、人工林、次生林、原生林 6 种典型生态系统的土壤主要养分、矿质养分和微生物这 3 组变量共计 20 个指标的调查、取样和分析, 运用多重比较分析、主成分分析和典范相关分析探讨了其土壤肥力变化特征、主要影响因子及两两之间的相互关系。结果表明, 喀斯特峰丛洼地土壤 pH 值为 6.60—7.75, 土壤主要养分、微生物种群数量和微生物生物量明显高于同纬度地区地带性红壤, 矿质养分含量相对较低, 其中 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 占矿质全量的 90% 以上。土壤肥力的总体趋势为原生林>次生林>灌丛>草丛>坡耕地>人工林。喀斯特石漠化地区实行林草结合的退耕还林还草模式更有利于土壤生态系统的环境改善, 坡耕地应多施有机肥和氮肥, 人工林应多施氮肥。原生林植物与养分之间达到了良好的平衡状态, 主要应加强森林抚育管理, 改善森林环境, 保障植物、土壤养分及微生物之间的良好协调关系。确保土壤资源的合理利用, 促进喀斯特峰丛洼地乃至整个西南喀斯特区域植被的迅速恢复和生态重建。

关键词: 典范相关分析; 喀斯特峰丛洼地; 生态系统; 主成分分析; 土壤肥力

Characteristics of soil fertility in different ecosystems in depressions between karst hills

YU Yang^{1,2,3}, DU Hu^{1,2,3}, SONG Tongqing^{1,2,*}, PENG Wanxia^{1,2}, ZENG Fuping^{1,2}, WANG Kelin^{1,2}, LU Shiyang^{1,2,3}, FAN Fujing^{1,2,4}, LU Chengyang^{1,2,5}

1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi Zhuang Autonomous Region, 547100, China

3 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi, 330045, China

5 Forestry College, Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract: The main soil nutrients, soil mineral nutrients, and soil microbes were investigated, sampled, and analyzed in farmland, grassland, scrub, plantation forest, secondary forest, and primary forest in depressions between karst hills. Multiple comparison analysis, principal component analysis, and canonical correlation analysis were used to study the soil

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB3-10); 国家科技支撑计划 (2011BAC09B02); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05070404, XDA05050205); 国家自然科学基金项目 (Nos. 31070425, 31000224, U1033004, 31100329); 中国科学院“西部之光”人才培养计划; 桂科攻 (1123001-9C); 广西“特聘专家”项目资助

收稿日期: 200-00-00; 修订日期: 200-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songtongq@163.com

characteristics and the main factors affecting soil fertility as well as the relationships between those three factors; the main soil nutrients, soil mineral content, and soil microbes. Soil pH ranged from 6.60 to 7.75 in depressions between karst hills. Across the different ecological systems, from farmland to primary forest soil, pH varied from acidic to alkaline. The soil nutrient content varied in different ecological systems, and changes in soil nutrient content can be modeled during the process of ecological succession. In the process of secondary succession soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), total phosphorous (TP), available nitrogen (AN), and available phosphorous (AP) content increased gradually. The soil nutrient levels were highest in primary forest and follow the sequence of primary forest > secondary forest > shrub > grassland. The soils of these habitats were all significantly or very significantly different. When the landuse type was changed from a landscape with natural secondary succession to farmland or plantation forests, soil TP and TK content increased significantly. The content of the main soil nutrients (SOM, TN, TP, TK, AN, AP, AK), microbial populations, and the soil content of C, N, and P in microbial biomass (C_{mic} , N_{mic} , P_{mic} , respectively), were obviously higher in the karst area than that in the red soil region at the same latitudes. The content of mineral nutrients was relatively low and the sum of SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 accounted for more than 90% of the total mineral nutrients. Although the supply of Ca and Mg were adequate, serious shortages of other mineral nutrients limited plant growth and development. Many types of ecological systems in depressions between karst hills were not obviously showing signs of rocky desertification, although a strong potential for rocky desertification still exists. All ecosystems studied here had high soil microbial populations, and primary forest had highest total microbial populations, bacteria populations and *Actinomyces* population while plantation forest had the lowest. Soil fertility can be ranked in the order of primary forest > secondary forest > scrub > grassland > farmland > plantation forest. The landscape in this karst area is strongly heterogeneous; the ecological systems are complex because numerous factors affect the ecosystems and different ecological systems are influenced by different factors. Therefore, the practice of returning farmland to forests or grassland tends to improve the soil ecosystem environment in karst areas which have undergone rocky desertification. Farmland requires more organic and nitrogenous fertilizers and plantation forests require more nitrogenous fertilizer than other ecosystems. In the primary forest, plants and soil nutrients reach a state of dynamic equilibrium, and land management should focus on strengthening and improving the forest environment and balancing the relationships among plants, soil nutrients and microbes. Assuring that soil resources are used rationally will be helpful in improving the results of ecological restoration and accelerate vegetation rehabilitation in depressions between karst hills or even in the entire karst region of southwest China.

Key Words: canonical correlation analysis; depressions between karst hills; ecosystem; principal component analysis; soil fertility

喀斯特地貌分布于世界各地的可溶性岩石地区,我国西南喀斯特地区是世界三大岩溶区之一。受地球内动力、强烈的地质运动、高温多雨且分布不均、碳酸盐岩溶蚀性强、水文二维结构明显以及其适生植物具有嗜钙性、耐旱性和石生性等限制特点的影响,该区域具有天然的高度异质性和脆弱性,环境容量小,极易退化,与黄土、沙漠、寒漠并列为中国四大生态环境脆弱区^[1]。峰丛洼地是桂西北地区一种典型的喀斯特地貌,在我国西南喀斯特南部斜坡地带广泛分布,面积约为 9.7 万 km^2 ,地质条件的特殊性造成了其生态系统比同纬度的其他地区更易遭受破坏,并且破坏逐渐加重时可导致其整个生态环境系统进入恶性循环。目前因土壤贫瘠、水土流失严重、人地矛盾尖锐、“喀斯特贫困”现象严重与强烈的人为干扰等因素导致出现了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、以植被减少为诱因、以土地生产力退化为本质、以出现类似荒漠化景观为标志的复合退化状态,且呈不断扩张的态势,植被恢复和生态重建迫在眉睫^[2-3]。土壤养分含量是衡量土壤肥沃程度的量化指标,是土壤最重要的生态功能之一,即植物生长发育的基础;土壤矿物质是土壤分化、成土的基础,对土壤物理、化学、生物性质作用明显,同时参与植物生长发育的全过程;土壤微生物是

土壤生命活体的主要组成部分^[4-5],土壤微生物种群数量和生物量是研究和评价土壤微生物调控功能的重要参数^[6-7]。在喀斯特峰丛洼地生态脆弱地区,土壤肥力变化特征直接影响到该地区土壤生产力的高低、生态恢复的途径和方向^[8-10]。本文在喀斯特峰丛洼地 6 个典型生态系统(坡耕地、草丛、灌丛、人工林、次生林、原生林)中,分别选择 2 个代表性群落类型(具体见 1.2.1)各建立 3 个 20 m×20 m 样方,基于土壤的全面调查取样,将各不同生态系统分为两组 1) 草丛、灌丛、次生林和原生林的次生演替过程;2) 由天然次生类型改变为坡耕地和人工林的人类土地利用方式转变过程。运用多重比较分析方法分析了喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力特征及差异,用主成分分析方法探讨了喀斯特峰丛洼地土壤生态系统主要影响因子,用典型相关分析方法揭示了喀斯特峰丛洼地土壤生态系统中土壤主要养分、土壤矿质养分、土壤微生物两两之间的相互关系,以期为该地区乃至整个喀斯特地区土壤肥力资源的合理利用、不同生态系统施肥措施的制定提供理论依据,指导该区域植被的迅速恢复与生态重建。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区选择在广西环江毛南族自治县(全国石漠化综合治理县),107°51′—108°43′E、24°44′—25°33′N,最高海拔为 1028m,属亚热带季风气候区。根据广西环江县气象局 1986—2005 年 20 年间的气象观测数据,研究区年平均气温为 15.7℃,1 月为 10.1℃,7 月为 28℃,历年最低气温为-5.2℃,无霜期为 290 d,年平均日照时数为 1451 h,年平均降雨量为 1389.1 mm,4—9 月降雨量占全年的 70%,平均蒸发量为 1571.1 mm,平均相对湿度为 70%。喀斯特峰丛洼地集中分布在该县的西南部,土壤以碳酸盐岩发育的深色或棕色石灰土为主,土层浅薄,坡度大,水土流失严重,岩石裸露情况严重,石漠化趋势严峻。研究区代表性生态系统有坡耕地、草丛、灌丛、人工林、次生林和原生林,不同生态系统的群落类型不同,坡耕地主要以玉米(*Zea mays*)、甘蔗(*Saccharum officinarum* Linn)、黄豆(*Glycine max*)、红薯(*Ipomoea batatas*)为主;草丛主要有以斑茅(*Saccharum arundinaceum*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、蔓生莠竹(*Microstegium fasciculatum*)、纤毛鸭舌草(*Murdannia triquetra*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)为主要建群种的群落类型;灌丛主要有以聚果羊蹄甲(*Bauhinia brachycarpa*)、红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、黄荆(*Vitex negundo*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)为主要建群种的群落类型;人工林主要有以香椿(*Toona sinensis*)、任豆(*Zenia insignis*)、三年桐(*Vernicia fordii*)、南酸枣(*Allospodias lakonensis*)为主要建群种的群落类型;次生林主要有以八角枫(*Alangium chinense*)、伊桐(*Itoa orientalis*)、广西野桐(*Mallotus barbatus*)为主要建群种的群落类型;原生林主要有以掌叶木(*Handeliendron bodinieri*)和中越棒柄花(*Cleidion javanicum*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)和南酸枣、刨花润楠(*Machilus pauhoi*)和伞花木(*Eurycorymbus cavaleriei*)、青檀(*Cryptocarya chinensis*)、圆果化香(*Platycarya longipes*)和亮叶槭(*Acer laevigatum*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、乌冈栎(*Quercus phillyraeoides*)和圆果化香(*Platycarya strobilacea*)、铁榄(*Sinosideroxylon pedunculatum*)、翠柏(*Calocedrus macrolepis*)和罗城鹅耳枥(*Carpinus luochengensis*)为主要建群种的群落类型。

1.2 研究方法

1.2.1 样方设置与土壤取样

基于全面踏查,根据代表性和典型性原则,从 6 种生态系统的主要群落类型中各选择 2 个代表性群落类型,坡耕地(I):玉米+黄豆、甘蔗+红薯;草丛(II):纤毛鸭舌草、白茅;灌丛(III):黄荆、盐肤木;人工林(IV):任豆、香椿;次生林(V):八角枫、伊桐;原生林(VI):侧柏、铁榄。在坡向、坡度、海拔等基本相同或相似的坡中下位分别建立 3 个 20m×20m 的样方,共计 36 个样方。在对植被、地形、人为干扰等因子全面调查的基础上,在 20 m×20 m 样方内按梅花型对表层土壤(0—20 cm)进行 5 点取样,充分混合组成待测样品,分成两部分,一部分带回实验室风干过筛待测土壤主要养分和矿质养分,另一部分带回实验室置于 4℃ 恒温冰箱中待测土壤微生物性状。

1.2.2 土壤指标分析

土壤 pH 采用电极电位法;有机碳(Soil organic carbon, SOC)重铬酸钾氧化—外加热法;全氮(Total

nitrogen, TN) 半微量开氏法—流动注射仪; 全磷 (Total phosphorus, TP) NaOH 熔融—钼锑抗显色—紫外分光光度法; 全钾 (Total potassium, TK) NaOH 熔融—原子吸收法; 碱解氮 (Available nitrogen, AN) 扩散法; 速效磷 (Available phosphorus, AP) 0.5 mol/L NaHCO₃ 提取—钼锑抗显色—紫外分光光度法、速效钾 (Available potassium, AK) NH₄Ac 浸提—原子吸收法、硅 (SiO₂) 碳酸钠熔融—盐酸提取—质量法; 铁 (Fe₂O₃)、钙 (CaO)、镁 (MgO)、锰 (MnO) 碳酸钠熔融—盐酸提取—原子分光光度法; 铝 (Al₂O₃) 碳酸钠熔融—盐酸提取—氟化钾取代 EDTA 容量法; 土壤微生物量碳 (C_{mic}) 采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法测定; 土壤微生物量氮 (N_{mic}) 用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 提取—流动注射氮分析仪器法; 土壤微生物量磷 (P_{mic}) 采用土壤微生物量磷 (氯仿熏蒸—NaHCO₃ 提取—Pi 测定—外加 Pi 校正法), 细菌、真菌、放线菌的数量测定均采用稀释平板测数法^[11-13]。

1.2.3 数据处理与分析

将所有 20 个指标划分为 3 组变量, 其中, 土壤常规养分分为第一类变量, 包括 pH 值、SOM (soil Organic matter)、TN、TP、TK、AN、AP、AK; 土壤矿质养分分为第二类变量, 包括 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、MnO; 土壤微生物为第三类变量, 包括 C_{mic}、N_{mic}、P_{mic}、细菌 (Bacteria)、真菌 (Fungi)、放线菌 (Actinomycetes)。所有数据处理和主成分分析、典范相关分析均在 SPSS16.0 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 不同生态系统土壤化学性状

喀斯特峰丛洼地土壤母质为石灰岩, 因淋溶作用强烈, pH 值在 6.60—7.75 之间, 按文中不同生态系统的排列顺序由坡耕地到原生林土壤 pH 值由微酸性向微碱性变化。在次生演替过程中土壤 pH 值的变化为原生林、次生林>草丛>灌丛。当由天然次生类型改变为坡耕地和人工林后土壤 pH 值明显降低, 且与除灌丛外的其他天然次生类型差异极显著 (表 1)。不同的生态系统的土壤主要养分性状不同, 在正向次生演替过程中土壤 SOM、TN、TP、AN、AP 含量均逐渐增加。含量顺序为原生林>次生林>灌丛>草丛。TK 和 AK 含量变化顺序基本相反, 含量顺序分别为草丛>灌丛、次生林>原生林, 灌丛>草丛、次生林>原生林。各级之间均达到了极显著或显著水平。当土地利用类型由天然次生类型人为的改变为坡耕地和人工林后土壤 TP、TK 的含量明显增加。

表 1 不同生态系统土壤主要养分及 Duncan 多重比较分析

Table 1 The conditions of soil nutrient in different ecosystem and Duncan multiple comparison analysis

生态系统 Ecosystem	pH 值	有机质 Organic matter /(g/kg)	全氮 Total nitrogen /(g/kg)	全磷 Total phosphorus /(g/kg)	全钾 Total potassium /(g/kg)	碱解氮 Available nitrogen /(mg/kg)	有效磷 Available phosphorus /(mg/kg)	有效钾 Aailable potassium /(mg/kg)
I	6.60Cc	46.48Ee	2.85Cc	1.31Aa	15.86Aa	81.96 Ff	5.60Dd	70.47Dd
II	7.34Bb	52.99Dd	2.61Dd	0.67Dd	7.72Cc	192.70Dd	4.73Ee	166.51ABab
III	6.78Cc	60.48Cc	2.95Cc	0.81Cc	7.33DdCd	256.39Cc	3.70Ff	172.98Aa
IV	6.78Cc	29.03Ff	1.71Ee	0.94Bb	11.08Bb	163.98Ee	7.71Cc	158.36Bb
V	7.75Aa	95.95Bb	5.63Bb	0.76Cc	6.69Dd	408.94Bb	8.35Bb	166.31ABab
VI	7.54ABab	115.46Aa	5.91Aa	0.99Bb	4.22Ee	603.95Aa	11.10Aa	107.61Cc

I: 坡耕地; II: 草地; III: 灌丛; IV: 人工林; V: 次生林; VI: 原生林。大小写字母分别表示每列数据间差异分别达到极显著水平 $P < 0.01$ 和显著水平 $P < 0.05$ 。下同 Note: I: Slope field; II: Grassland; III: Scrub; IV: Manmade forest; V: Secondary forest; VI: Primary forest

2.2 不同生态系统土壤矿物质特征

矿质元素是土壤组成的重要部分, 是植物生长良好的保障条件。土壤矿物质的化学组成与成土条件和成土过程密切相关, 对土壤的性质有极大的影响, 分析土壤矿质全量的化学组成能够了解土壤的风化发育程度, 阐明土壤化学性质在成土过程中的演变情况及土壤肥力背景状况^[14]。SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 三者的含量占矿质全量比重的绝对优势。不同的生态系统矿质养分的组成特征不同, 在次生演替过程中, SiO₂ 含量顺序为草丛、灌丛>原生林、次生林; Al₂O₃ 与 Fe₂O₃ 含量顺序为灌丛>草丛、次生林>原生林; CaO 含量顺序为原生林>草

丛>次生林>灌丛;MgO 含量顺序为原生林>灌丛、草丛>次生林;MnO 含量顺序为草丛、次生林、灌丛>原生林,各级生态系统之间差异显著或极显著(表 2)。当由天然次生类型改变为坡耕地和人工林后土壤 SiO₂ 含量明显增加的同时土壤的 CaO、MgO 明显减少。

表 2 不同生态系统下土壤矿质含量及 Duncan 多重比较分析

Table 2 The soil mineral components in different ecosystem and Duncan multiple comparison analysis

生态系统 Ecosystem	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	CaO /%	MgO /%	MnO /%
I	72.68Aa	13.55Cc	4.31Ee	0.25Ff	0.86Dd	0.11Dd
II	44.88Cc	17.07Bb	7.06BCc	3.03Bb	1.96Bb	0.30Bb
III	43.49CDcd	20.45Aa	10.99Aa	0.81Dd	2.02Bb	0.28Bb
IV	59.52Bb	17.10Bb	7.44Bb	0.58Ee	0.87Dd	0.67Aa
V	40.08De	16.15Bb	6.74Cc	2.01Cc	1.57Cc	0.30Bb
VI	41.67CDde	12.38Cc	5.88Dd	4.59Aa	2.42Aa	0.19Cc

2.3 不同生态系统微生物特性

2.3.1 土壤微生物种群数量

土壤微生物种群数量受多种因素的影响,能够敏感地反映土壤生态系统受人为干扰或生态恢复重建的细微变化及其程度,是土壤质量变化的指标之一。喀斯特峰丛洼地不同生态系统土壤微生物数量及组成不同,在次生演替过程中,土壤微生物种群总数量顺序为原生林>草丛>次生林>灌丛,原生林的细菌和真菌数量显著高于其他 3 个生态系统,各演替阶段放线菌数量无显著差异。当土地利用类型变为坡耕地后放线菌数量极显著增加,这可能是坡耕地中有机肥的大量施用导致外来微生物种群数量的增多。当土地利用类型变为林地后土壤微生物数量上相对减少。在各生态系统中微生物种群数量组成上,细菌的比例为 11.32%—63.58%,3 个森林生态系统的比率最大,显著高于灌丛和草丛,极显著高于坡耕地,草丛和灌丛显著高于坡耕地;放线菌的组成比例为 35.79%—88.18%,在坡耕地、草丛和灌丛的比率较高,其中坡耕地极显著高于其他生态系统,草丛和灌丛显著高于原生林和次生林;真菌的组成比率很小,仅为 0.14%—0.87%,各生态系统之间差异不显著(表 3)。

表 3 不同生态系统土壤微生物主要种群数量

Table 3 The main microbial population in soil in different ecosystem

生态系统 Ecosystem	细菌 Bacteria /(cfu/g)	真菌 Fungi /(cfu/g)	放线菌 Actinomycetes /(cfu/g)	总数 Sum /(cfu/g)	细菌比例 Percentage of bacteria/%	真菌比例 Percentage of fungi/%	放线菌比例 Percentage of actinomycetes/%
I	40755.41Aab	856147.50Aab	8739897.33Aa	9636800.25Aa	11.32Bc	0.50Aa	88.18Aa
II	442.97Ab	111095.58Ab	226056.50Bb	337595.03Bb	41.85Ab	0.14Aa	58.01Bb
III	538.71Ab	77916.34Ab	105523.41Bb	183978.45Bb	41.12Ab	0.31Aa	58.57Bb
IV	258.07Ab	27134.67Ab	14312.83Bb	41705.57Bb	60.15Aab	0.58Aa	39.27Bbc
V	1157.28Ab	128991.13Ab	59260.92Bb	189409.33Bb	63.58Aa	0.62Aa	35.79Bc
VI	71574.13Aa	1949717.15Aa	1119279.75Bb	3140570.89Bb	58.66Aab	0.87Aa	40.47Bbc

2.3.2 土壤微生物生物量

土壤微生物生物量碳、氮、磷不仅是研究土壤有机质、氮和磷循环及其转化过程的重要指标,而且是综合评价土壤质量和肥力状况的指标之一。喀斯特峰丛洼地不同生态系统微生物生物量碳、氮、磷的含量不同。在次生演替过程中,原生林的 C_{mic} 含量极显著高于其他演替阶段;原生林的 N_{mic} 含量显著高于其他其他演替阶段;P_{mic} 含量在各演替阶段之间不存在显著性差异。当土地利用方式变成坡耕地或是人工林地后土壤土壤微生物生物量无明显变化。各不同生态系统中 C_{mic}/SOC、N_{mic}/TN、P_{mic}/TP 值都很小,分别在 0.34—1.68、2.03—

7.23、1.03—9.63 之间, C_{mic}/N_{mic} 在 1.04—7.02 之间, 其中草丛和坡耕地最高, 显著高于其他生态系统(表 4)。

表 4 不同生态系统土壤微生物生物量碳、氮、磷的变化

Table 4 Soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in soil in different ecosystem

生态系统 Ecosystem	微生物量碳 C_{mic} /(mg/kg)	微生物量氮 N_{mic} /(mg/kg)	微生物量磷 P_{mic} /(mg/kg)	微生物量碳/ 土壤有机碳 C_{mic} /SOC	微生物量氮/ 全氮 N_{mic} / TN	微生物量磷/ 全磷 P_{mic} / TP	微生物量碳/ 微生物量氮 C_{mic} / N_{mic}
I	448.76ABb	78.35Bb	13.52Aa	1.68Aa	2.71Aab	1.03Aa	6.44ABa
II	317.51Bb	52.50Bb	13.54Aa	1.07ABabc	2.03Aa	9.63Aa	7.02Aa
III	246.43Bb	136.88Bb	41.18Aa	0.76ABbc	4.83Aab	5.21Aa	2.77Cb
IV	239.69Bb	75.55Bb	14.21Aa	1.56Aab	5.03Aab	1.47Aa	3.20BCb
V	182.15Bb	180.31ABb	33.98Aa	0.34Be	3.32Aab	5.86Aa	1.04Cb
VI	946.21Aa	323.31Aa	44.78Aa	1.41ABab	7.23Aa	5.76Aa	2.75Cb

2.4 主成分分析

主成分分析是研究如何将多指标问题转化为较少指标问题的一种方法, 综合后的新指标彼此不相关, 能综合反映原来多个指标的信息。以喀斯特峰丛洼地 6 个生态系统 20 个土壤指标各自进行主成分分析(表 5), 结果发现, 前 3 个主成分除草丛的累积贡献率为 72.44% 外, 其他 5 个生态系统前 3 个主成分的累积贡献率都达到或超过了 85%, 能全面反映所有信息, 各主成分的方差贡献率均比较高, 降维效果较好。

在次生演替过程, 草丛阶段土壤生态系统的第一主成分以 AK、 SiO_2 、CaO、MgO 和 MnO 的载荷量最大, 称它们为矿质养分因子群, 其中 AK、CaO、MgO 为限制性因子, 它们在草丛土壤生态系统中处于主导地位, 第二主成分载荷量以真菌、细菌最大, 第三主成分为 AP, 它们在草丛土壤生态系统中也处于相对重要的地位; 灌丛阶段土壤生态系统的第一主成分以 pH、SOM、TN、AN、 SiO_2 的载荷量最大, 其中 SiO_2 是限制性因子, 第二、三主成分载荷量以 MgO、MnO、 P_{mic} 、AP、放线菌的载荷量最大, 它们在灌丛土壤生态系统中处于次要地位; 次生林阶段土壤生态系统的第一主成分以 pH 值、SOM、TN、TK、AN、 Fe_2O_3 、MnO、放线菌的载荷量最大, 其中 pH、TK 和放线菌为限制性因子, 第二、三主成分 N_{mic} 和 P_{mic} 载荷量最大; 当正向演替发展到原生林阶段时土壤生态系统中微生物种群数量起着主导作用, 第一主成分以 pH、真菌、细菌、放线菌载荷量最大, 其中 pH 为限制性因子, 第二主成分以 SOM、CaO、MgO、 P_{mic} 的载荷量最大, 它们均为限制性因子, 第三主成分的载荷量以 AK 最大。土地利用类型人为改变为坡耕地和人工林的转变过程中, 坡耕地土壤生态系统的第一主成分载荷量以 SOM、TN、TK、AN、AK、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaO 最大, 表明它们在喀斯特峰丛洼地坡耕地土壤生态系统中处于主导地位, 是重要的指示因子, 综合第三主成分载荷量最大的 MnO, 可归纳为除磷之外的综合土壤养分因子群, 其中 SiO_2 和 MnO 是限制性因子, 第二主成分的 P_{mic} 、真菌及第三主成分的 N_{mic} 的载荷量最大, 它们在坡耕地土壤生态系统中处于比较重要的地位, 称它们为微生物综合因子; 人工林土壤生态系统以 SOM、TN、TP、TK、AN、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaO、MgO 和 P_{mic} 载荷量最大, 结合第二主成分中载荷量较大的 AP, 可见主导因子几乎包含了所有土壤养分(主要养分和矿质养分), 第二主成分中 AP、细菌、放线菌载荷量最大, 它们的地位相对较弱。

2.5 典范相关分析

喀斯特峰丛洼地脆弱生态系统中, 土壤主要养分、矿质养分和微生物的相互作用不同, 它们两两之间的典型相关分析(见表 6), 前 4 个特征值的方差贡献率分别达到 79.72%、83.02%、84.41%, 基本能反映出绝大部分的变量信息, 由此而建立了两两之间的 4 对典型变量构成(见表 7)。

土壤主要养分与矿质养分因子的第一、二、三对典型相关系数分别为 0.93、0.87、0.81, 均达了极显著水平, 第一组典型变量系数主要反映 pH 值与 MgO 之间的正相关关系; 第二组典型变量系数主要反映了 TN、AK 与 SiO_2 和 CaO 之间的负相关关系及 AP 与他们之间的正相关关系; 第三组典型变量系数反映了土壤 Fe_2O_3 与土壤 SOC、土壤 AN 之间正相关及与土壤 TN 之间的负相关关系。

表 5 不同生态系统主成分分析
Table 5 Principal component analysis of different ecosystem

指标 Index	坡耕地 Farming land			草丛 Grassland			灌木 Scrub			人工林 Manmade forest			次生林 Secondary forest			原生林 Primary forest		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
pH	0.6053	-0.0146	0.3019	-0.4253	0.004	0.3641	0.9554	0.2199	-0.0855	0.5654	0.2802	-0.7719	-0.923	0.0293	0.3744	-0.9162	0.1853	-0.1703
SOM/(g/kg)	0.9449	0.2281	0.2105	-0.4032	-0.2012	0.7403	0.9615	0.0558	0.1619	0.9752	-0.1575	-0.0144	0.9557	0.0312	0.1618	0.0813	-0.9219	0.1883
TN/(g/kg)	0.8868	0.3429	0.2913	-0.7234	-0.2745	0.6004	0.9609	-0.0505	0.2089	0.9768	-0.0398	0.1319	0.9195	0.0536	0.2805	-0.1207	0.3746	0.8995
TP/(g/kg)	0.554	0.6781	-0.3686	0.7162	0.428	0.1749	0.6559	-0.0979	0.0283	0.8804	0.3112	0.2976	0.0784	0.4597	0.81	0.8172	-0.5618	-0.0816
TK/(g/kg)	0.9283	0.1385	0.3448	-0.063	0.0619	-0.1612	-0.5487	-0.4042	0.6763	0.9724	-0.1774	-0.0292	-0.8836	0.3758	-0.1508	0.6543	-0.5636	-0.48
AN/(mg/kg)	0.8908	0.4404	-0.014	-0.3551	-0.479	0.7122	0.9386	-0.0373	0.2563	0.9705	-0.1878	0.0493	0.9432	-0.0083	0.262	0.7817	-0.403	0.425
AP/(mg/kg)	-0.3672	0.1958	-0.8015	-0.0524	0.2667	0.8815	-0.0493	0.1118	0.9872	-0.2032	0.9743	0.0016	0.4963	0.8196	0.1582	0.7885	-0.4917	0.3637
AK/(mg/kg)	0.9862	0.0537	0.1146	-0.8819	0.333	0.0178	0.363	-0.3211	0.7693	0.3196	0.7435	-0.1065	0.0055	0.8311	-0.0285	0.2436	0.2639	0.9301
SiO ₂ /%	-0.9481	-0.165	-0.0801	0.8663	0.3631	-0.0363	-0.9048	0.1789	-0.3476	-0.7388	-0.4988	0.3577	0.806	-0.0614	-0.2616	0.9422	0.0346	-0.3178
Al ₂ O ₃ /%	0.854	0.248	0.4005	0.3173	0.2083	-0.0431	-0.4609	0.8569	-0.0985	0.8761	0.4271	-0.1771	0.7107	0.6811	-0.1382	-0.5366	0.6426	-0.0401
Fe ₂ O ₃ /%	0.9044	0.129	0.3783	0.163	0.4312	0.0928	-0.6929	0.6943	-0.008	0.9041	0.3223	-0.2246	0.914	0.2213	-0.1219	-0.1864	0.7043	0.2242
CaO/%	0.9361	0.0928	0.2961	-0.8285	-0.3061	-0.0052	0.5378	0.8073	0.1237	0.89	0.1725	-0.321	-0.4087	-0.1569	0.7109	-0.1262	-0.9706	-0.195
MgO/%	0.787	-0.0297	0.5626	-0.9349	-0.0661	0.1747	0.2275	0.9536	0.0933	0.8764	0.1002	-0.4211	-0.3363	0.4732	0.369	-0.0647	-0.9136	-0.3865
MnO/%	-0.2771	0.2488	-0.8773	0.9331	0.2962	0.0063	-0.3025	0.9168	-0.092	0.7527	0.6364	-0.065	0.9695	-0.1206	-0.0596	0.8912	-0.0319	-0.23
Cnic/(mg/kg)	0.5145	0.7861	0.2433	0.699	0.5838	0.012	-0.4433	-0.6121	0.1001	-0.2052	-0.1415	-0.5155	-0.4859	0.8302	0.1132	0.8523	-0.2677	-0.4007
Nmic/(mg/kg)	0.2384	0.2713	0.9124	0.4146	-0.2364	0.7859	0.1846	0.8831	0.3623	-0.4478	-0.1651	0.1728	0.292	-0.0539	0.882	0.2356	-0.8087	-0.5337
Pnic/(mg/kg)	-0.0222	0.9458	0.1478	-0.7843	0.3574	0.4506	-0.0726	0.9795	-0.1857	0.9154	-0.3759	0.0699	0.0902	0.8551	-0.2789	0.2279	-0.9412	-0.242
真菌 Fungi/(个/g)	0.1468	0.9454	-0.2876	0.1046	0.9913	-0.0019	0.41	0.1022	0.8563	0.2248	0.5327	-0.7847	-0.5531	0.6568	-0.484	0.9719	0.0489	0.2044
细菌 Bacteria/(个/g)	0.8208	-0.3359	-0.1508	0.1503	0.7948	-0.0752	-0.5347	-0.5674	0.2613	0.0336	0.9493	0.0844	-0.7064	-0.6468	-0.0383	0.914	-0.0108	0.4027
放线菌 Actinomycetes/(个/g)	-0.0977	0.1887	0.0736	0.0449	0.947	-0.171	0.2131	0.0771	0.8751	-0.1283	0.9121	-0.346	-0.9027	0.3723	0.1865	0.9814	0.114	-0.0301
方差贡献 Variance contribution	10.1605	3.6893	3.639	6.9105	4.297	3.2806	7.1859	6.4462	4.0737	10.4371	4.9556	2.2541	9.6932	4.9112	2.9048	8.8505	6.4465	3.3906
累计贡献 Accumulative contribution	0.508	0.6925	0.8744	0.3455	0.5604	0.7244	0.3443	0.6532	0.8484	0.5219	0.7696	0.8823	0.4847	0.7302	0.8755	0.4262	0.7366	0.8999

表 6 不同生态系统土壤主要养分、矿质养分、微生物的典范相关分析

Table 6 The canonical correlation analysis of the soil main nutrients, mineral nutrient and microbial in difference ecosystem

因子 Factor	典型向量 Typical vector	典型相关系数		卡方值 Chi square	自由度 degree of freedom	显著水平 level of significance	累积贡献率 accumulative contribution rate/%
		Canonical correlation coefficient	特征值 Eigenvalue				
土壤主要养分与矿质养分	1	0.93	5.03	144.77	48	0.0001	35.90
The soil main nutrients and mineral nutrients	2	0.87	3.22	89.68	35	0.0001	58.93
	3	0.81	1.89	51.65	24	0.0009	72.44
	4	0.67	1.02	21.70	15	0.1160	79.72
土壤主要养分与微生物	1	0.95	5.44	162.49	48	0.0001	38.87
The soil main nutrients and microbial	2	0.90	3.52	97.60	35	0.0001	63.98
	3	0.78	1.44	50.74	24	0.0011	74.26
	4	0.65	1.23	25.31	15	0.0460	83.01
矿质养分与微生物	1	0.82	4.00	80.64	36	0.0001	33.32
Mineral nutrients and microbial	2	0.73	3.37	49.42	25	0.0025	61.39
	3	0.68	1.83	27.29	16	0.0384	76.63
	4	0.47	0.93	9.91	9	0.3577	84.41

表 7 不同生态系统土壤主要养分、矿质养分、微生物之间典型变量构成

Table 7 The composition of canonical variables among the soil main nutrients, mineral nutrient and microbial in different ecosystem

因子 Factors	变量构成 The composition of variables
土壤主要养分与矿质养分第一、二、三、四典型变量 The first, two, three, four typical variable among soil main nutrients and mineral nutrient	$N_1 = -1.0029Y_1 + 0.1087Y_2 + 0.2529Y_3 + 0.1560Y_4 - 0.0913Y_5 - 0.1602Y_6 - 0.3584Y_7 - 0.1304Y_8$ $N_2 = -0.2294Y_1 - 0.4658Y_2 + 0.7880Y_3 + 0.4239Y_4 - 0.3410Y_5 - 0.0346Y_6 - 0.8463Y_7 + 0.7498Y_8$ $N_3 = -0.6190Y_1 + 1.0310Y_2 - 1.1035Y_3 - 0.7248Y_4 + 0.1724Y_5 + 1.0261Y_6 + 0.0022Y_7 + 0.1865Y_8$ $N_4 = 0.0890Y_1 + 0.4509Y_2 + 0.1874Y_3 - 0.0559Y_4 + 0.0962Y_5 + 0.2787Y_6 - 0.6991Y_7 - 0.5365Y_8$ $M_1 = 0.6094Z_1 + 0.3266Z_2 + 0.7574Z_3 + 0.5260Z_4 - 0.9184Z_5 - 0.6768Z_6$ $M_2 = -0.8393Z_1 - 0.0904Z_2 + 0.4878Z_3 - 0.8258Z_4 - 0.0237Z_5 - 0.3309Z_6$ $M_3 = 0.2064Z_1 - 1.3147Z_2 + 2.1148Z_3 + 0.96650Z_4 - 0.4881Z_5 - 0.1455Z_6$ $M_4 = -0.0868Z_1 + 0.5554Z_2 - 0.1451Z_3 + 0.4129Z_4 - 0.1529Z_5 - 1.0329Z_6$
土壤主要养分与微生物第一、二、三、四典型变量 The first, two, three, four typical variable among soil main nutrients and microbial	$N_1 = 0.0203Y_1 - 0.7169Y_2 + 0.1958Y_3 + 0.1144Y_4 + 0.0302Y_5 + 1.3627Y_6 + 0.0402Y_7 - 0.1602Y_8$ $N_2 = 0.1627Y_1 + 1.4631Y_2 - 1.0542Y_3 + 0.0387Y_4 + 0.3771Y_5 - 0.3021Y_6 + 0.0588Y_7 - 0.4825Y_8$ $N_3 = -0.1144Y_1 - 1.6276Y_2 + 1.2665Y_3 + 0.2180Y_4 + 0.4411Y_5 + 0.5052Y_6 - 0.0943Y_7 - 0.4003Y_8$ $N_4 = -0.1354Y_1 - 0.0646Y_2 - 1.2064Y_3 - 0.3389Y_4 + 0.8196Y_5 + 1.488Y_6 - 0.2612Y_7 - 0.3970Y_8$ $B_1 = -0.5747L_1 + 0.5793L_2 - 0.0867L_3 + 1.0611L_4 + 0.1809L_5 - 0.0767L_6$ $B_2 = 1.0962L_1 + 0.3722L_2 + 0.0336L_3 - 1.5878L_4 + 0.5298L_5 + 0.5972L_6$ $B_3 = -0.2339L_1 - 0.2985L_2 - 0.1718L_3 + 0.2010L_4 + 0.3550L_5 + 0.6452L_6$ $B_4 = 2.0337L_1 - 1.696L_2 + 0.8092L_3 - 2.3785L_4 + 1.5542L_5 - 0.5105L_6$
矿质养分与土壤微生物第一、二、三、四典型变量 The first, two, three, four typical variable among soil mineral nutrient and microbial	$M_1 = -0.0220Z_1 - 0.0696Z_2 - 0.4834Z_3 - 0.4690Z_4 - 0.3392Z_5 - 0.3541Z_6$ $M_2 = 1.1143Z_1 + 0.8957Z_2 - 0.5011Z_3 + 0.5122Z_4 + 0.5107Z_5 - 0.3438Z_6$ $M_3 = 0.1023Z_1 - 1.5909Z_2 + 0.9964Z_3 + 0.3444Z_4 + 0.1562Z_5 + 0.0162Z_6$ $M_4 = 0.5091Z_1 - 1.5621Z_2 + 0.8399Z_3 - 1.6071Z_4 + 1.6630Z_5 + 0.3364Z_6$ $B_1 = -0.0994L_1 + 0.3160L_2 - 0.9295L_3 + 0.2098L_4 - 0.1418L_5 + 0.6066L_6$ $B_2 = 0.5242L_1 - 0.3131L_2 - 0.7841L_3 - 0.2240L_4 - 0.0982L_5 + 0.7488L_6$ $B_3 = 0.0176L_1 - 1.1845L_2 - 0.8382L_3 + 0.0408L_4 + 0.3975L_5 - 0.2296L_6$ $B_4 = -0.6930L_1 - 0.7129L_2 + 0.4217L_3 + 2.5870L_4 - 1.2034L_5 - 0.2007L_6$

Y_1 : pH; Y_2 : SOC; Y_3 : TN; Y_4 : TP; Y_5 : TK; Y_6 : AN; Y_7 : AP; Y_8 : AK; Z_1 : SiO₂; Z_2 : Al₂O₃; Z_3 : Fe₂O₃; Z_4 : CaO; Z_5 : MgO; Z_6 : MnO; L_1 : C_{mic}; L_2 : N_{mic}; L_3 : P_{mic}; L_4 : 真菌 Fungi; L_5 : 细菌 Bacteria; L_6 : 放线菌 Actinomycetes

土壤主要养分与微生物因子的第一、二、三对典型相关系数分别为 0.95、0.90、0.78, 均达了极显著水平,

第一组典型变量系数主要反映 AN、真菌之间的正相关关系;第二组典型变量系数主要反映了 SOC、 C_{mic} 的正相关关系和与真菌的负相关关系, TN 和 N_{mic} 之间的负相关关系及与真菌之间的负相关关系;第三组典型变量系数反映了土壤放线菌与土壤 SOC 之间的负相关关系及与土壤 TN 之间正相关。

土壤矿质养分与微生物因子只有第一、二对典型相关系数达到极显著水平,分别为 0.8158、0.7349, 第一组典型变量系数主要反映土壤 P_{mic} 与 Fe_2O_3 、CaO、MgO 之间正相关关系;第二组典型变量系数主要反映了土壤 CaO 与 P_{mic} 负相关关系和与放线菌正相关关系。

3 讨论

3.1 喀斯特峰丛洼地不同生态系统土壤主要养分的变化

喀斯特峰丛洼地的土壤为隐域性土,发育程度不高,没有像当地的地带性红壤成土过程所具有的脱硅富铝化特征。石灰岩山地发育的石灰土,一般富含碳酸钙,土壤呈微碱性反应,pH 值较高。然而喀斯特峰丛洼地地处中亚热带,雨热资源丰富,土壤中的钙、镁大量淋失,尤其是钙淋溶比较彻底,加上施肥等人为管理措施和植物残体的迅速分解^[15-16],许多酸性物质进入土壤,它们对岩石风化形成的碱性物质起到中和作用。喀斯特峰丛洼地土壤呈中性偏微酸性至弱碱性反应,pH 值在 6.60—7.75 之间,如其他土壤一样增施有机肥和开垦利用后土壤酸度有一定程度的加重^[17],因此坡耕地的 pH 值最小,次生林和原生林 pH 值最大。喀斯特峰丛洼地优越的温湿条件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,与同纬度地区的红壤相比^[18],养分含量均很高;不同生态系统养分含量不同,在正向次生演替过程中土壤 SOM、TN、TP、AN、AP 含量均逐渐增加,TK 和 AK 含量变化顺序基本相反,各级之间均达到了极显著或显著水平。这在一定程度上说明随着正向演替过程的发展土壤中的多数养分成一种积累的发展模式。当由天然次生类型改变为坡耕地和人工林后土壤 TP、TK 的含量明显增加,这说明人工施肥能有效增加 TP 和 TK 特别是施草木灰明显增加了 TK 的含量。

3.2 喀斯特峰丛洼地不同生态系统土壤矿质养分的变化

土壤矿物质是土壤重要组成物质,喀斯特峰丛洼地碳酸盐岩分化过程中生成的次生矿物源源不断的释放各种矿质养分,形成了土壤的物质基础,增强了土壤肥力,促进了植物生长。喀斯特峰丛洼地的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酸不溶物含量很低,CaO、MgO、MnO 等的总量仅为 1.5%—2.0%,岩石风化的养分输入极为有限,土壤中的矿质养分 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 占绝对优势,但其含量明显低于世界土壤平均背景值和同纬度地区的地带性红壤^[18],又加上土壤总量极少,尽管 Ca、Mg 的供应充足(在淋溶强烈的坡耕地和人工林,Ca、Mg 含量很低,但下部碳酸盐岩的复钙作用完全能满足植物的生长),但其他矿质养分的严重缺乏限制了植物的生长和发育。一般来说,产生了石漠化现象的土壤, SiO_2 含量在 700 g/kg 以上, Fe_2O_3 不足 40 g/kg,MgO 低于 9 g/kg,CaO 由于基岩出露,含量在 50 g/kg 以上;尚未发生石漠化的土壤, $SiO_2 < 650$ g/kg, $Fe_2O_3 > 70$ g/kg,MgO > 10 g/kg,且随着石漠化的加重,土壤中 SiO_2 含量明显升高, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaO、MgO 等成分不断降低,石漠化导致土壤的形成速度减缓、发育程度变弱^[19]。喀斯特峰丛洼地各类生态系统虽然没有发生明显的石漠化现象,但仍然有潜在的石漠化危险,如坡耕地 SiO_2 高达 726.8 g/kg,坡耕地、次生林、原生林的 Fe_2O_3 只有 43.1 g/kg、67.4 g/kg、58.8 g/kg。

3.3 喀斯特峰丛洼地不同生态系统土壤微生物性状

土壤微生物数量、分布与组成很大程度上影响并决定着土壤的生物活性、有机质分解、腐殖质合成、土壤团聚体形成以及土壤养分的转化^[6]。喀斯特峰丛洼地各生态系统土壤微生物种群数量较高,其种群总数量、细菌数量、放线菌数量均以原生林最高、人工林最低;一般土壤微生物种群数量的组成均以放线菌的比例最高,但喀斯特峰丛洼地不同生态系统土壤微生物种群数量的组成不同,禾本科植物较多的坡耕地、草丛和灌丛其放线菌的比例较大,三个森林生态系统细菌数量较多,真菌的数量最小,不足 1%,这与宋同清等的研究结果相似^[18]。微生物数量特别是放线菌数量增加,其分解林木凋落物中含有较多木质化纤维成份等难分解物质的能力增强,能促进土壤生态系统物质和能量循环^[20],因此在喀斯特石漠化地区实行林草结合的退

耕还林还草模式更有利于土壤生态系统的环境改善。

土壤微生物量一直是国际土壤学界研究热点^[21]。喀斯特峰丛洼地土壤微生物量碳、氮、磷的含量接近和超过了亚热带稻田土壤^[22],均以原生林土壤含量较高。喀斯特峰丛洼地土壤 C_{mic}/SOC 、 N_{mic}/TN 、 P_{mic}/TP 值都很小,分别在 0.34—1.68、2.03—7.23、1.03—9.63 之间, C_{mic}/N_{mic} 在 1.04—7.02 之间,其中草丛和坡耕地最高,显著高于其他生态系统,其他生态系统间差异不显著。许多研究表明^[23],表层 C_{mic}/SOC 、 P_{mic}/TP 均比较低,土壤 SOC 与 C_{mic} 含量、TP 与 P_{mic} 同步下降;土壤微生物生物量碳与微生物量氮(C_{mic}/N_{mic})的比值是否恒定,不同学者其观点不同,Anderson 等^[24]认为 C_{mic}/N_{mic} 平均值为 6.7,陈国潮等^[25]认为红壤土壤 C_{mic}/N_{mic} 平均值为 6.2,显然喀斯特峰丛洼地坡耕地、草丛土壤的 C_{mic}/N_{mic} 与上述结果相似,而灌丛、人工林和次生林 C_{mic}/N_{mic} 明显偏低。

3.4 喀斯特峰丛洼地土壤各因子间的相互作用及主要影响因素

土壤养分与微生物通过影响植物的生长发育而影响植物群落的产生、发育和演替,进而对生态系统过程、生态系统生产力和生态系统内部结构产生作用,而生态系统的进化维持了物种间的关系、种的分布格局及群落物种多样性,反过来影响了植物群落的发展,增加了系统内物质循环,改变着土壤养分与微生物构成,提高了土地生产力。一般来讲,在群落演替的前期,土壤的性质影响植被的变化,同时也因植被的变化而变化,这种相互促进作用在经过一段时间的演替,土壤和植被群落均受气候的限制,进化为以生态平衡为标志的顶极群落^[26-28]。喀斯特峰丛洼地各种不同生态系统中土壤主要养分、矿质养分和微生物相互作用、关系密切。典型相关分析发现,土壤主要养分与矿质养分、土壤主要养分与微生物、土壤矿质养分与微生物前 4 个特征值的方差累积贡献率分别达到了 79.72%、83.02%、84.41%,基本能反映出绝大部分的变量信息,由此而建立了两两之间的 4 对典型变量构成。其中一、二、三对典型变量相关系数均达到显著或极显著水平,土壤主要养分与矿质养分主要表现在土壤 SiO_2 、CaO、MgO、 Fe_2O_3 对主要养分的影响较大;土壤主要养分与微生物中主要是以 C_{mic} 、真菌对 SOC 和氮的影响最大;土壤矿质养分与微生物的相关关系中主要以 P_{mic} 、放线菌对土壤 Fe_2O_3 、CaO、MgO 的影响最大。

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,不同生态系统影响因子不同。进一步对 6 个主要生态系统 20 个土壤指标的主成分分析显示,前 3 个主成分方差累积贡献率除草丛为 72.44% 外,其他 5 个生态系统前 3 个主成分的方差贡献率均达到或超过了 85%,能全面反映所有信息,各主成分的方差贡献率均比较高,降维效果较好。草丛为矿质养分因子群,灌丛为有机质和氮因子群,次生林的主要因子较多,降维效果不十分理想,原生林主要因子为微生物种群数量因子群。坡耕地的主要因子为除磷之外的主要养分和矿质养分因子群,人工林为所有主要养分和矿质养分因子群。基于土壤主要养分、矿质养分、微生物两两之间的典型相关关系及不同生态系统土壤肥力特征主要影响因子的综合分析,可以得出在自然情况下的正向次生演替过程中土壤养分及微生物组成都在逐渐趋于提高,原生林植物与养分之间达到了良好的平衡状态,主要应加强森林抚育管理,改善森林环境保障植物、土壤养分及微生物之间的良好协调关系。由天然次生类型改变为坡耕地和人工林的人类土地利用方式转变过程中坡耕地应多施有机肥和氮肥,人工林应多施氮肥。喀斯特石漠化地区实行林草结合的的退耕还林还草模式更有利于土壤生态系统的环境改善。

References:

- [1] Peng W X, Wang K L, Song T Q, Zeng F P, Wang J R. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable karst ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 811-820.
- [2] Academic Divisions of Chinese Academy of Sciences. Some suggestions of carrying forward the comprehensive harnessing desertification in Southwest Karst region. *Advance in Earth Science*, 2003, 18(4): 489-492.
- [3] Zeng F P, Peng W X, Song T Q, Wang K L, Wu H Y, Song X J, Zeng Z X. Changes in vegetation after 22 years' natural restoration in the Karst disturbed area in northwest Guangxi, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5110-5119.
- [4] Van Bruggen A H C, Semenov A M. In search of biological indicators for soil health and disease suppression. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1):

13-24.

- [5] Yao H Y, Huang C Y. Soil Microbial Ecology and Its Experimental Technology. Beijing: Science Press, 2006: 5-5.
- [6] Harris J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54 (4): 801-808.
- [7] Xu H F, Liu X T, Bai J H. Dynamic change and environmental effects of soil microorganism in marsh soils from *Carex meyeriana* wetlands in Changbai Mountain. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(3): 115-122.
- [8] Zhang W, Chen H S, Wang K L, Zhang J G, Hou Y. Spatial variability of soil nutrients on hillslope in typical karst peak-cluster depression areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 24(1): 68-73.
- [9] Liu S J, Zang W, Wang K L, Chen H S, Shu S Y, Tan W N. Spatiotemporal heterogeneity of topsoil nutrients in Karst Peak-Cluster depression area of Northwest Guangxi, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(11): 3036-3043.
- [10] Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Wang K L, Du H, Lu S Y. 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*, 2011, 27(9): 305-310.
- [11] Bao S D. Soil Agricultural Chemistry Analysis. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [12] Liu G S. The Soil Physical and Chemical Analysis and Profile Description. Beijing: China Standards Press, 1996.
- [13] Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, Xiao H A. Soil Microbial Biomass-Methods and Application. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [14] Guo M, An S S, Chang Q R, Li B C. Characteristics of soil ferric oxide and mineral elements in Hilly-gully Area of Southern Ningxia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(3): 38-40.
- [15] Du Y X, Pan G X, Li L Q, Hu Z L, Wang X Z. Partitioning of vegetation biomass, nutrient storage and cycling of degraded ecosystems from mountainous Karst region, central Guizhou, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6338-6347.
- [16] Hu Z L, Pan G X, Li L Q, Du Y X, Wang X Z. Changes in pools and heterogeneity of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus under different vegetation types in Karst mountainous area of central Guizhou Province, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4187-4195.
- [17] Zhang W, Chen H S, Wang K L, Hou Y, Zhang J G. Spatial variability of soil organic carbon and available phosphorus in a typical Karst depression, northwest of Guangxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5168-5175.
- [18] Song T Q, Wang K L, Peng W X, Wang J R, Xiao R L, Zeng F P, Tang Y. Ecological effects of intercropping white clover on tea plantation in a subtropical hilly region. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3647-3655.
- [19] Huang C Y. Soil Science: Text Book Series for 21st Century. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000: 154-157.
- [20] Long J, Li J, Jiang X R, Huang C Y. Soil microbial activities in Maolan karst forest, Guizhou Province. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 597-602.
- [21] Arunachalam A, Pandey H. Ecosystem restoration of Jhum fallows in Northeast India: microbial C and N along altitudinal and successional gradients. *Restoration Ecology*, 2003, 11(2): 168-173.
- [22] Liu S L, Xiao H A, Tong C L, Wu J S. Microbial Biomass C, N and P and their responses to application of inorganic and organic fertilizers in subtropical paddy soils. *Research of Agricultural Modernization*, 2003, 24(4): 278-283
- [23] Wu J S. Soil Organic Matter and Its Turnover Dynamics // He D Y. Soil Fertility and Fertilization on Cultivated Plants in South China. Beijing: Science Press, 1994: 37-46.
- [24] Anderson J P E, Domsch K H. Quantities of plant nutrients in the microbial biomass of selected soils. *Soil Science*, 1980, 130(4): 211-216.
- [25] Chen G C, He Z L. Study on microbial biomass in red soil under different land use types. *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, 29(6): 276-278.
- [26] Liu Z K, Wang S P, Cheng Z Z, Wang Y F, Han J G. Properties of soil nutrients and plant community after rest grazing in Inner Mongolia steppe, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 2048-2056.
- [27] Jiao J Y, Ma X H, Bai W J, Jiao F, Wen Z M. Correspondence analysis of vegetation communities and soil environmental factors on abandoned cropland on hilly-gullied loess plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5): 744-752.
- [28] Yang X B, Wu Q S. Vegetation development on tropical abandoned fields, Hainan island, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2000, 24 (4): 477-482.

参考文献:

- [1] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 曾馥平, 王久荣. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. *生态学报*, 2008, 28(2): 811-820.
- [2] 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.
- [3] 曾馥平, 彭晚霞, 宋同清, 王克林, 吴海勇, 宋希娟, 曾昭霞. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复 22 年后群落特征的变化. *生态学报*, 2007, 27(12): 5110-5119.

- [5] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术. 北京: 科学出版社, 2006: 5-5.
- [7] 徐惠风, 刘兴土, 白军红. 长白山沟谷湿地乌拉苔草沼泽湿地土壤微生物动态及环境效应研究. 水土保持学报, 2004, 18(3): 115-122.
- [8] 张伟, 陈洪松, 王克林, 张继光, 侯娅. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究. 农业工程学报, 2008, 24(1): 68-73.
- [9] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 陈洪松, 舒世燕, 谭卫宁. 桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征. 生态学报, 2011, 31(11): 3036-3043.
- [10] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 杜虎, 鹿士杨. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程的植被土壤耦合协调度模型. 农业工程学报, 2011, 27(9): 305-310.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [13] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006.
- [14] 郭曼, 安韶山, 常庆瑞, 李壁成. 宁南宽谷丘陵区土壤矿质元素与氧化铁的特征. 水土保持学报, 2005, 12(3): 38-40.
- [15] 杜有新, 潘根兴, 李恋卿, 胡忠良, 王新洲. 黔中喀斯特山区退化生态系统生物量结构与 N、P 分布格局及其循环特征. 生态学报, 2010, 30(23): 6338-6347.
- [16] 胡忠良, 潘根兴, 李恋卿, 杜有新, 王新洲. 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. 生态学报, 2009, 29(8): 4187-4195.
- [17] 张伟, 陈洪松, 王克林, 侯娅, 张继光. 桂西北喀斯特洼地土壤有机碳和速效磷的空间变异. 生态学报, 2007, 27(12): 5168-5175.
- [18] 宋同清, 王克林, 彭晚霞, 王久荣, 肖润林, 曾馥平, 汤宇. 亚热带丘陵茶园间作白三叶草的生态效应. 生态学报, 2006, 26(11): 3647-3655.
- [19] 黄昌勇. 土壤学: 面向 21 世纪课程教材. 北京: 中国农业出版社, 2000: 154-157.
- [20] 龙健, 李娟, 江新荣, 黄昌勇. 贵州茂兰喀斯特森林土壤微生物活性的研究. 土壤学报, 2004, 41(4): 597-602.
- [22] 刘守龙, 肖和艾, 童成立, 吴金水. 亚热带稻田土壤微生物生物量碳、氮、磷状况及其对施肥的反应特点. 农业现代化研究, 2003, 24(4): 278-283.
- [23] 吴金水. 土壤有机质及其周转动力学 // 何电源. 中国南方土壤肥力与栽培植物施肥. 北京: 科学出版社, 1994: 37-46.
- [25] 陈国潮, 何振立. 红壤不同利用方式下微生物量的研究. 土壤通报, 1998, 29(6): 276-278.
- [26] 刘忠宽, 汪诗平, 陈佐忠, 王艳芬, 韩建国. 不同放牧强度草原休牧后土壤养分和植物群落变化特征. 生态学报, 2006, 26(6): 2048-2056.
- [27] 焦菊英, 马祥华, 白文娟, 焦峰, 温仲明. 黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落与土壤环境因子的对应分析. 土壤学报, 2005, 42(5): 744-752.
- [28] 杨小波, 吴庆书. 海南岛热带地区弃荒农田次生植被恢复特点. 植物生态学报, 2000, 24(4): 477-482.