

桂北喀斯特峰丛洼地植物群落特征及其与土壤的耦合关系

杜 虎^{1,2} 彭晚霞^{1,2} 宋同清^{1,2*} 王克林^{1,2} 曾馥平^{1,2} 鹿士杨^{1,2} 时伟伟^{1,2,3}
唐 成^{1,2,4} 谭秋锦^{1,2,4}

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, 广西环江 547100; ³江西农业大学农学院, 南昌 330045; ⁴广西大学林学院, 南宁 530004

摘 要 基于喀斯特峰丛洼地草丛、灌丛、次生林、原生林4个生态系统24个样地(20 m × 20 m)的系统取样调查, 研究了喀斯特峰丛洼地不同生态系统群落的结构组成与生物多样性特征, 选取代表植物群落和土壤性质的35个指标, 对不同生态系统及整个喀斯特脆弱生态系统植物群落与土壤主要养分、土壤矿质养分和土壤微生物间的相互关系进行了主成分分析与典范相关分析。结果表明: 沿草丛、灌丛、次生林、原生林的顺向演替发展, 重要值(importance value, *IV*) > 10.00的科、属、种及物种多样性最大值出现在次生林, 群落结构最佳值出现在顶级群落原生林; 喀斯特峰丛洼地景观异质性强, 各生态系统影响因子不同, 土壤微生物在喀斯特脆弱生态系统处于主导地位, 其次为灌丛; 不同集团因子的典范相关分析表明, 植物多样性指标与土壤氮素、Al₂O₃、Fe₂O₃、土壤微生物生物量碳(C_{mic})、真菌和细菌关系密切。因此, 在喀斯特脆弱生态系统恢复与重建过程中, 应针对不同生态系统制定相应的培育管理措施。

关键词 耦合关系, 喀斯特峰丛洼地, 不同生态系统, 土壤, 植被

Plant community characteristics and its coupling relationships with soil in depressions between karst hills, North Guangxi, China

DU Hu^{1,2}, PENG Wan-Xia^{1,2}, SONG Tong-Qing^{1,2*}, WANG Ke-Lin^{1,2}, ZENG Fu-Ping^{1,2}, LU Shi-Yang^{1,2}, SHI Wei-Wei^{1,2,3}, TANG Cheng^{1,2,4}, and TAN Qiu-Jin^{1,2,4}

¹Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; ²Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi, 547100, China; ³School of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; and ⁴College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract

Aims Our objective was to study plant community characteristics and coupling relationships between plant and soil properties in different ecosystems in depressions between karst hills.

Methods We established 24 sample plots of 20 m × 20 m dimensions in four ecosystems (grassland, scrub, secondary forest and primary forest) in depressions between karst hills. We investigated the species composition and diversity characteristics of these ecosystems. We chose 35 indexes covering plant community and soil properties to study the relationships between plant factors and soil nutrients, soil mineral chemical components and soil microbes using analysis by principal component analysis (PCA) and canonical correlation analysis (CCA).

Important findings Along succession from grassland to scrub to secondary forest to primary forest, the maximum number of species, genera and families with importance values (*IV*) > 10.00 and maximum species diversity were in secondary forest, and the optimal community structure was in primary forest. The depressions between karst hills had high landscape heterogeneity, and different ecosystems were influenced by different factors. Soil microbes were the dominant influence in karst fragile ecosystems, followed by scrub. CCA elucidated a close relationship between species diversity and soil nitrogen, Al₂O₃, Fe₂O₃, microbial biomass carbon (C_{mic}), fungi and bacteria. Vegetation improvement and management practices should focus on such characteristics of different ecosystems when undertaking restoration and reconstruction of karst fragile ecosystems.

Key words coupling relationship, depressions between karst hills, different ecosystems, soil, vegetation

植物的分布格局是不同尺度上气候、土壤、地形等环境因子综合作用的结果,在区域、全球尺度上,气候、土壤母质、植被区系决定特定的植被类型(Woodward & Mckoo, 1991),而在景观及更小的尺度上,非地带性的环境因子主导着植被的物种组成和群落类型(Burke, 2001; 宋创业和郭柯, 2007; 徐远杰等, 2010)。在群落演替的过程中,土壤的性质影响植被的变化,同时也因植被的变化而变化,在经过一段时间的这种相互作用后,植被演化为以生态平衡为标志的顶极群落(杨小波和吴庆书, 2000; 刘世梁等, 2003; 焦菊英等, 2005)。本研究的样地喀斯特峰丛洼地位于以贵州为中心连带成片的我国西南喀斯特南部斜坡地带,属亚热带季风气候,湿热条件优越,极有利于生物的繁衍和生长(兰安军等, 2003)。该区域属滇、黔、桂植物区系、华南植物区系和华东植物区系的相汇交错区,也是泛北极与古热带两大植物区系交接过渡的中心地带,植物种类繁多,植物优势种以亚热带成分占优势,其次是热带至亚热带成分、热带成分、温带成分(吴征镒, 2003; 吴征镒等, 2003)。原生性最强的喀斯特非地带性顶极植被类型为亚热带喀斯特常绿落叶阔叶混交林,生境异质性极高、区系组分复杂,生物种类极为丰富,生态系统稳定。喀斯特峰丛洼地受地球内动力、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、耐旱性和石生性等特点的综合影响,生态系统的稳定性和抗干扰能力差(彭晚霞等, 2008),强烈的人为干扰导致了草丛、灌丛、次生林、原生林等不同演替阶段生态系统和群落共存的现象。喻理飞等(2002)、曾馥平等(2007)研究了喀斯特峰丛洼地不同演替阶段的植物群落,张伟等(2008)、何寻阳等(2008)研究了喀斯特峰丛洼地的土壤养分和微生物状况,宋同清等(2010)、彭晚霞等(2011)初步探讨了喀斯特峰丛洼地常绿落叶阔叶混交林植物的分布特征及其环境解释,但关于不同生态系统和群落的植物与土壤耦合关系的研究报道甚少。本文作者在喀斯特峰丛洼地4个典型生态系统(草丛、灌丛、次生林、原生林)中,选择2个代表性群落类型各建立3个20 m × 20 m样方,基于植被和土壤的全面调查分析,运用多重比较分析方法分析了喀斯特峰丛洼地典型生态系统的植物群落特征及差异,用主成分分析方法探讨了其主要影

响因子,用典型相关分析方法揭示了植被与土壤的耦合关系,以期为该地区乃至整个喀斯特地区植被恢复与生态重建提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究区位于广西环江毛南族自治县(107°51′–108°43′ E、24°44′–25°33′ N),最高海拔为1 028.0 m,属亚热带季风气候区。根据广西环江县气象局1986–2005年20年的气象观测数据,研究区年平均气温为15.7 °C,1月平均气温为10.1 °C,7月平均气温为28 °C,历年最低气温为–5.2 °C,无霜期为290天,平均年日照时数为1 451 h,年降水量为1 389.1 mm,4–9月降水量占全年降水量的70%,平均蒸发量为1 571.1 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草丛、灌丛、次生林和原生林。不同生态系统的群落类型不同:草丛主要有以斑茅(*Saccharum arundinaceum*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、蔓生莠竹(*Microstegium fasciculatum*)、水竹叶(*Murdannia triquetra*)和鬼针草(*Bidens pilosa*)为主要建群种的群落类型;灌丛主要有以鞍叶羊蹄甲(*Bauhinia brachycarpa*)、红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、黄荆(*Vitex negundo*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)和火棘(*Pyracantha fortuneana*)为主要建群种的群落类型;次生林主要有以八角枫(*Alangium chinense*)、椴子皮(*Itoa orientalis*)和毛桐(*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*)、灰岩棒柄花(*Cleidion bracteosum*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、南酸枣(*Choerospondias axillaris*)、刨花润楠(*Machilus pauhoi*)、伞花木(*Eurycorymbus cavaleriei*)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)、化香树(*Platycarya strobilacea*)、光叶槭(*Acer laevigatum*)、侧柏(*Platyclusus orientalis*)、乌冈栎(*Quercus phillyraeoides*)、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 样方设置与调查

基于全面踏查,根据代表性和典型性原则,从

4个生态系统的主要群落类型中各选择2个代表性群落类型, 草丛(I): 水竹叶、白茅; 灌丛(II): 黄荆、盐肤木; 次生林(III): 八角枫、椴子皮; 原生林(IV): 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20 m × 20 m的样方, 共计24个样方。用插值法将样方细分为4个10 m × 10 m的小型样方和16个5 m × 5 m的微型样方, 以5 m × 5 m的微型样方为基本单元, 调查每个胸径(DBH) ≥ 1 cm的个体, 记录树种名称、胸径、树高、冠幅和生长状况等; 按梅花型随机抽取5个微型样方, 调查灌木和草本的种类、数量、高度和生长状况等。同时, 用高精度全球定位系统(global positioning system, GPS) (E640+MobileMapper)记录样方内中心的经纬度、海拔等地理信息, 调查记录其坡向、坡位、坡度、岩石裸露率、土层厚度等情况。

1.3 土壤取样与分析

在20 m × 20 m样方内进行植被调查的同时, 按梅花型在表层土壤(0–20 cm)进行5点取样, 充分混合组成待测样品。将样品分成两部分, 一部分带回实验室风干待测土壤养分性状, 另一部分带回实验室置于4 °C恒温冰箱中待测土壤微生物性状。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-外加加热法; 全氮(TN)的测定采用半微量凯氏法-流动注射仪; 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; 速效氮(AN)的测定采用扩散法; 速效磷(AP)的测定采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃提取-钼锑抗显色-紫外分光光度法; 速效钾(AK)的测定采用NH₄Ac浸提-原子吸收法; SiO₂的测定采用碳酸钠熔融-盐酸提取-质量法; Fe₂O₃、CaO、MgO、MnO的测定采用碳酸钠熔融-盐酸提取-原子分光光度法; Al₂O₃的测定采用碳酸钠熔融-盐酸提取-氟化钾取代EDTA容量法; 土壤微生物生物量碳(C_{mic})的测定采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法; 土壤微生物生物量氮(N_{mic})的测定用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取-流动注射氮分析仪法; 土壤微生物生物量磷(P_{mic})的测定采用氯仿熏蒸-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(刘光崧, 1997; 鲍士旦, 2000; 吴金水等, 2006)。

1.4 数据处理

将所有35个指标划分为4组变量, 其中, 植被

指标为第一类变量, 包括乔木层、灌木层、草本层的丰富度、Simpson指数、Shannon指数、均匀度, 和群落的密度、盖度、平均树高; 土壤主要养分(包括SOC、TN、TP、TK、AN、AP、AK)和pH值为第二类变量; 土壤矿质养分为第三变量, 包括SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、MnO; 土壤微生物为第四类变量, 包括C_{mic}、N_{mic}、P_{mic}、细菌、真菌、放线菌。群落多样性指标的计算方法(马克平等, 1995)为: 丰富度 $R = S$, Shannon指数 $H = -\sum_{i=1}^S P_i \log P_i$, 均匀度 $E = H/\ln S$, Simpson优势度指数 $D = \sum_{i=1}^S P_i^2$, 式中, S 为物种数目, P_i 为种 i 的相对重要值, 即 $P_i = N_i/N$, N_i 为第 i 个物种的重要值, N 为所有重要值之和, 重要值= $RDE+RDO+RFE$ 。式中, RDE 为相对密度, RDO 为相对优势度(胸高断面积), RFE 为相对频度。所有数据处理和主成分分析、典范相关分析均在SPSS 16.0软件中完成。

2 结果和分析

2.1 桂北喀斯特峰丛洼地典型生态系统的植物群落特征

2.1.1 物种组成

由表1可知, 草丛、灌丛、次生林和原生林植物分别有11科20属24种、24科35属40种、49科84属101种和50科79属98种。

草丛、灌丛、次生林和原生林中重要值大于10.00的科分别有2、1、8、5科, 占总科数的18.18%、4.17%、16.32%和10.00%, 占总重要值的90.11%、55.26%、63.53%和49.76%; 重要值大于10.00的属分别有2、1、7、5属, 占总属数的10.00%、2.86%、8.33%和6.33%, 占总重要值的86.61%、54.41%、53.91%和46.57%; 重要值大于10.00的种分别有2、1、6、5种, 占总种数的8.33%、2.50%、5.94%和5.10%, 占总重要值的86.61%、54.41%、49.38%和42.51%。沿草丛、灌丛、次生林的顺向演替发展, 重要值大于10.00的科、属、种的数量逐渐增加, 原生林略有下降, 但重要值大于10.00的科、属、种占总重要值的比例一直下降。

4类生态系统中重要值大于10.00的优势种科、属、种的数量占各自总数的比例均很小, 但它们的重要值之和各占其重要值的比例很大。4类生态系统共有的科、属、种很少, 只有原生林和次生林共有茜草科和荨麻科, 草丛和次生林共有鸭跖草科、

表1 不同生态系统植物科、属、种及其重要值组成特点

Table 1 Composition characteristics of families, genera, species, and their importance values of plants in different ecosystems

生态系统 Ecosystem	科 Family	属 Genus	种 Species	重要值大于10.0的科属种 Families, genera, species with importance values more than 10.0					
				科 Family		属 Genus		种 Species	
				比例 Proportion (%)	比例 Proportion (%)	比例 Proportion (%)	比例 Proportion (%)		
草丛 Grassland	11	20	24	2	90.11	2	86.61	2	86.61
灌丛 Scrub	24	35	40	1	55.26	1	54.41	1	54.41
次生林 Secondary forest	49	84	101	8	63.53	7	53.91	6	49.38
原生林 Primary forest	50	79	98	5	49.76	5	46.57	5	42.51

水竹叶属和水竹叶。

2.1.2 群落结构

不同生态系统群落的结构不同，多重比较分析表明(表2): 原生林的高度极显著高于次生林、灌丛和草丛，次生林的高度极显著高于灌丛和草丛；密度一般随个体的增大而减小，草丛的密度显著高于其他3个生态系统，其他3个生态系统的差异不显著。原生林的高度虽然极显著高于次生林，但由于原生林的层次结构合理，其密度也略高于次生林；盖度的变化比较复杂，是高度和密度共同作用的结果，能综合反映群落的整体结构水平，其大小顺序为原生林>灌丛>次生林>草丛，其中原生林和灌丛的盖度显著高于次生林和草丛，次生林和草丛之间差异不显著。

2.1.3 物种多样性

物种多样性是生态系统持续发展和生产力的核心，能很好地反映群落的组织结构变化(于立忠等, 2006)。由表3可知，喀斯特峰丛洼地不同生态系统的物种多样性不同。草本层的多样性以次生林的最高，总体趋势为次生林>原生林>灌丛>草丛，说明适度的遮阴有利于提高草本层的多样性；灌木层和乔木层的多样性也均以次生林最高，其中灌木层的总体趋势为次生林>原生林>灌丛>草丛，乔木层则为次生林>灌丛>原生林。

2.2 影响桂北喀斯特峰丛洼地脆弱生态系统发育的主要因子

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。桂北喀斯特峰丛洼地草丛、灌丛、次生林和原生林各个生态系统的20个土壤指标、3个群落结构指标及12个物种多样性指标的主成分分析(表4)表明，各个生态系

表2 不同生态系统的群落结构变化

Table 2 Changes in community structure in different ecosystems

生态系统 Ecosystem	高度 Height (m)	密度 Density (ind.·m ⁻²)	盖度 Coverage (%)
草丛 Grassland	1.13 ^{Cd}	174.84 ^{Aa}	74.17 ^{Ab}
灌丛 Scrub	2.22 ^{Cc}	21.22 ^{Bb}	82.5 ^{Aab}
次生林 Secondary forest	5.52 ^{Bb}	0.42 ^{Bb}	77.50 ^{Ab}
原生林 Primary forest	8.74 ^{Aa}	0.54 ^{Bb}	88.00 ^{Aa}

同一列不同大写字母表示差异极显著($p < 0.01$)；同一列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

Different capital letters within a column indicate significant difference at $p < 0.01$. Different lowercase letters within a column indicate significant difference at $p < 0.05$.

统前3个主成分的方差解释的累积贡献率均超过了85%，能全面地反映所有信息，各个生态系统各主成分的贡献率均非常高。不同生态系统的主要影响因子不同，草丛生态系统的主要影响因子为Al₂O₃、Fe₂O₃、草本层均匀度和群落密度，灌丛生态系统的主要影响因子为CaO、C_{mic}、细菌、草本层Shannon-Wiener指数、草本层Simpson指数、草本层均匀度、乔木层Shannon-Wiener指数、乔木层均匀度，次生林生态系统的主要影响因子为pH、SOC、AN、Fe₂O₃、MnO，原生林的主要影响因子为TP、乔木层丰富度、乔木层Shannon-Wiener指数、乔木层Simpson指数、乔木层均匀度和植被密度。

从区域角度出发，进一步对喀斯特峰丛洼地4个生态系统、30个样方、35个指标进行主成分综合分析(表5)发现，前8个主成分对方差的累积贡献率超过85%，能够全面地反映喀斯特峰丛洼地内的所有信息，但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，研究该区域内各因子之间的相互作用关系时，要重视每个因子的分异状况，全面考虑植被和土壤各因子间的相

表3 不同生态系统各层次物种多样性

Table 3 Species diversity of all layers in different ecosystems

层次 Layer	生态系统 Ecosystem	丰富度S Species richness	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	Simpson指数 Simpson index	Pielou均匀度指数 Pielou evenness index
草本层 Grass layer	草丛 Grassland	7.666 7 ^{Aa}	0.871 7 ^{Aa}	0.388 3 ^{Aa}	0.375 0 ^{Bb}
	灌丛 Scrub	5.833 3 ^{Aa}	0.990 0 ^{Aa}	0.456 7 ^{Aa}	0.540 0 ^{ABab}
	次生林 Secondary forest	6.666 7 ^{Aa}	1.380 0 ^{Aa}	0.646 7 ^{Aa}	0.765 0 ^{Aa}
灌木层 Shrub layer	原生林 Primary forest	5.166 7 ^{Aa}	1.211 7 ^{Aa}	0.626 7 ^{Aa}	0.791 7 ^{Aa}
	草丛 Grassland	3.333 3 ^{Bc}	0.475 0 ^{Bc}	0.238 3 ^{Bb}	0.246 7 ^{Bb}
	灌丛 Scrub	13.333 3 ^{Ab}	1.648 3 ^{Ab}	0.630 0 ^{Aa}	0.625 0 ^{Aa}
乔木层 Tree layer	次生林 Secondary forest	21.666 7 ^{Aa}	2.545 0 ^{Aa}	0.850 0 ^{Aa}	0.828 3 ^{Aa}
	原生林 Primary forest	13.833 3 ^{Ab}	2.190 0 ^{Ab}	0.831 7 ^{Aa}	0.860 0 ^{Aa}
	灌丛 Scrub	12.000 0 ^{Aa}	1.928 3 ^{Aa}	0.801 7 ^{Aa}	0.781 7 ^{Aa}
	次生林 Secondary forest	14.500 0 ^{Aa}	1.705 0 ^{Aa}	0.681 7 ^{Aa}	0.645 0 ^{Aa}
	原生林 Primary forest	17.500 0 ^{Aa}	1.526 7 ^{Aa}	0.468 3 ^{Aa}	0.433 3 ^{Aa}

同一列不同大写字母表示差异极显著($p < 0.01$); 同一列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

Different capital letters within a column indicate significant difference at $p < 0.01$. Different lowercase letters within a column indicate significant difference at $p < 0.05$.

表4 桂北喀斯特峰丛洼地不同生态系统的主要影响因子分析

Table 4 Analysis of the main impact factors of different ecosystems in depressions between karst hills, North Guangxi

主成分 Principal component	生态系统 Ecosystem	主成分因子 Principal component factor	累积贡献率 Accumulative contribution (%)
第一主成分 Principal component 1	草丛 Grassland	Al ₂ O ₃ 、Fe ₂ O ₃ 、草本层均匀度及植被密度 Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , evenness of grass layer and density of vegetation	0.402 4
	灌丛 Scrub	CaO, 微生物生物量碳, 细菌, 草本层Shannon-Wiener指数、Simpson指数和均匀度, 乔木层Shannon-Wiener指数和均匀度 CaO, microbial biomass carbon, bacteria, Shannon-Wiener index, Simpson index and evenness of grass layer, Shannon-Wiener index and evenness of tree layer	0.442 8
	次生林 Secondary forest	pH、土壤有机碳、速效氮、Fe ₂ O ₃ 、MnO pH, soil organic carbon, available N, Fe ₂ O ₃ , MnO	0.496 4
	原生林 Primary forest	全磷、乔木层丰富度、Shannon-Wiener指数、Simpson指数、均匀度和植被密度 Total P, abundance, Shannon-Wiener index, Simpson index, evenness of tree layer and density of vegetation	0.534 4
第二主成分 Principal component 2	草丛 Grassland	速效钾、灌木层丰富度、Shannon-Wiener指数、Simpson指数和均匀度 Available K, abundance, Shannon-Wiener index, Simpson index and evenness of shrub layer	0.767 3
	灌丛 Scrub	Al ₂ O ₃ 、Fe ₂ O ₃ 、灌木层丰富度、群落高度 Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , abundance of shrub layer, height of community	0.751 8
	次生林 Secondary forest	植被密度 Density of vegetation	0.716 5
	原生林 Primary forest	速效钾 Available K	0.776 8
第三主成分 Principal component 3	草丛 Grassland	速效磷 Available P	0.885 1
	灌丛 Scrub	速效磷 Available P	0.885 8
	次生林 Secondary forest	微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen	0.880 2

互关系。影响喀斯特峰丛洼地脆弱生态系统发育的主导因子即第一主成分以土壤真菌、细菌、放线菌和速效磷的载荷量最大, 分别为0.960、0.965、0.917和0.832, 说明土壤微生物在喀斯特脆弱生态系统中处于主导地位; 第二主成分以灌木层丰富度、Shannon-Wiener指数、Simpson指数、均匀度和

土壤全氮的载荷量最大, 分别为-0.847、-0.877、-0.835、-0.821和-0.831, 表明灌丛在喀斯特脆弱的生态系统中处于重要的地位, 与它们在森林生态系统中所处的空间位置一样, 在喀斯特脆弱生态系统由坡耕地向顶级群落的演替和进化过程中, 同样起着承上启下的作用; 第三主成分以Al₂O₃、Fe₂O₃和

表5 桂北喀斯特峰丛洼地脆弱的生态系统的主成分分析

Table 5 Principal component analysis of fragile ecosystems in depressions between karst hills, North Guangxi

层次 Layer	因子 Factor	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
草本层 Grass layer	丰富度 Abundance	-0.225	0.175	-0.130	0.836	0.239	0.093	-0.008
	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	-0.088	-0.175	-0.032	0.938	-0.067	-0.156	-0.125
	Simpson指数 Simpson index	0.067	-0.278	0.016	0.903	-0.124	-0.154	-0.127
灌木层 Shrub layer	Pielou均匀度 Pielou evenness	0.342	-0.449	0.057	0.713	-0.206	-0.262	-0.028
	丰富度 Abundance	-0.271	-0.847	-0.059	0.178	0.166	-0.279	0.103
	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	-0.134	-0.877	-0.163	0.058	0.220	-0.290	-0.119
乔木层 Tree layer	Simpson指数 Simpson index	-0.022	-0.835	-0.195	0.098	0.300	-0.299	-0.158
	Pielou均匀度 Pielou evenness	0.087	-0.821	-0.176	0.099	0.283	-0.311	-0.181
	丰富度 Abundance	0.484	-0.234	-0.091	0.046	-0.089	-0.777	-0.212
植被层 Vegetation layer	Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	0.328	-0.213	0.089	0.072	-0.049	-0.891	-0.077
	Simpson指数 Simpson index	0.207	-0.233	0.173	0.044	0.001	-0.915	0.051
	Pielou均匀度 Pielou evenness	0.176	-0.219	0.201	0.066	-0.014	-0.909	0.047
土壤层 Soil layer	盖度 Coverage (%)	0.267	-0.287	0.224	-0.350	-0.007	-0.153	-0.486
	高度 Height (m)	0.300	-0.799	-0.232	0.010	-0.239	0.072	-0.320
	密度 Density (ind·m ⁻²)	-0.027	0.747	-0.041	-0.196	0.219	0.459	-0.011
土壤层 Soil layer	pH	-0.052	-0.230	-0.428	0.543	-0.477	0.199	0.209
	土壤有机碳 Soil organic carbon (g·kg ⁻¹)	0.371	-0.664	-0.183	0.040	-0.352	-0.189	-0.172
	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	0.321	-0.831	-0.104	0.015	-0.246	0.161	0.214
	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	0.684	0.119	-0.041	0.020	0.045	-0.565	-0.164
	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	-0.170	0.697	-0.031	-0.224	0.305	-0.405	0.180
	速效氮 Available N (mg·kg ⁻¹)	0.781	-0.446	-0.146	0.013	-0.243	-0.248	-0.046
	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	0.832	-0.200	-0.190	-0.037	-0.213	-0.273	-0.032
	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)	-0.099	0.221	0.103	-0.283	0.127	-0.051	0.883
	SiO ₂ (%)	0.426	0.134	0.426	-0.005	0.556	-0.093	-0.333
	Al ₂ O ₃ (%)	-0.347	0.220	0.867	-0.130	0.023	-0.051	0.028
	Fe ₂ O ₃ (%)	-0.224	0.140	0.872	-0.303	0.069	-0.151	0.021
	CaO (%)	0.136	0.036	-0.476	0.030	-0.758	-0.061	-0.286
	MgO (%)	0.076	0.087	0.018	0.010	-0.910	-0.082	-0.052
	MnO (%)	-0.057	0.221	0.852	0.174	0.105	-0.132	0.061
	微生物生物量碳 Microbial biomass carbon (mg·kg ⁻¹)	0.730	0.083	-0.246	-0.009	-0.020	-0.306	-0.496
	微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen (mg·kg ⁻¹)	0.288	-0.208	-0.117	0.178	-0.427	-0.523	-0.549
	微生物生物量磷 Microbial biomass phosphorus (mg·kg ⁻¹)	0.157	0.055	0.362	0.196	-0.570	-0.550	-0.290
真菌 Fungi (cfu·g ⁻¹)	0.960	-0.045	-0.069	-0.021	-0.001	-0.130	-0.046	
细菌 Bacteria (cfu·g ⁻¹)	0.965	-0.049	-0.041	-0.044	-0.024	-0.102	0.069	
放线菌 Actinomycetes (cfu·g ⁻¹)	0.917	0.035	-0.081	-0.034	0.046	-0.120	-0.176	
方差贡献 Variance contribution	6.623	6.852	3.473	3.774	3.348	5.271	2.339	
累积贡献 Accumulative contribution	0.189	0.385	0.484	0.592	0.688	0.838	0.905	

PC1、PC2、PC3、PC4、PC5、PC6、PC7分别表示第1到第7主成分因子。

PC1, PC2, PC3, PC4, PC5, PC6 and PC7 represent principal component 1, 2, 3, 4, 5, 6 and 7, respectively.

MnO的载荷量最大, 分别为0.867、0.872和0.852, 它们在喀斯特脆弱生态系统的运行中也能发挥重要作用; 第四主成分以草本层丰富度、Shannon-Wiener指数、Simpson指数的载荷量最大, 分别为

0.836、0.938和0.903, 它们在喀斯特脆弱生态系统运行过程中也扮演着比较重要的角色, 特别是在喀斯特退化生态系统初期阶段作用明显。其他因子的最大载荷量在五、六、七主成分中, 对喀斯特峰丛

洼地脆弱生态系统发育的作用相对较小。

2.3 桂北喀斯特峰丛洼地脆弱生态系统植物与土壤的典型相关分析

典范相关分析研究两组变量(两个集团)之间整体的线性相关关系。把喀斯特峰丛洼地4个生态系统24个样方的15个植被因子(X_1-X_{15})构成第1组变量, 土壤主要养分和pH (Y_1-Y_8)、土壤矿质养分(Z_1-Z_6)和土壤微生物性状(W_1-W_6)分别构成第2、3、4组变量。用典范相关分析来研究植被分别与土壤主要养分(包括pH)、矿质养分和微生物之间的关系(表6), 并建立典型变量构成(表7)。前4个特征值的方差贡献率分别达到82.434 4%、79.832 9%、85.132 9%, 基本能反映出绝大部分的变量信息, 由此而建立了植被与其他3组变量之间的4对典型变量构成。

植被因子和土壤养分因子的第一、二、三、四对典型相关系数分别为1.000 0、0.988 6、0.974 5和0.904 1, 相关系数均较大, 统计检验只有第一对达到了极显著水平, 因此取第一对典型变量来分析两类性状之间的相互关系。从第一组典型变量系数可以看出: 植被因子中乔木层Simpson指数和乔木层均匀度的载荷最高, 土壤主要养分因子中TN和AN的载荷最高, 说明乔木层Simpson指数和乔木层均匀度与土壤TN和AN的相互影响最大, 其中乔木层

均匀度与土壤AN、乔木层Simpson指数与土壤TN呈正相关, 乔木层均匀度与土壤TN、乔木层Simpson指数与土壤AN呈负相关。由表8典型冗余分析可以看出, 植被第一组典型变量(V_1)可以解释11.32%的组内变异, 并解释11.32%的另一组(土壤主要养分)变异; 而土壤主要养分第一组典型变量(N_1)可以解释26.44%的组内变异, 并解释26.44%的另一组(植被因子)变异。

植被与矿质养分的第一、二对典型相关系数为0.995 9、0.972 4, 均达到了显著水平, 第一组典型变量系数主要反映了乔木层Shannon-Wiener指数、Simpson指数与 Al_2O_3 的正、负相关关系; 第二组典型变量系数主要反映了 Fe_2O_3 与草本层Shannon-Wiener指数的正相关及与草本层Simpson指数的负相关关系。植被第一组典型变量(V_1)可以解释2.40%的组内变异, 并解释2.38%的另一组(矿质养分)变异; 而矿质养分第一组典型变量(M_1)可以解释30.13%的组内变异, 并解释29.88%的另一组(植被因子)变异; 植被第二组典型变量(V_2)可以解释4.35%的组内变异, 并解释4.11%的另一组(矿质养分)变异; 而矿质养分第二组典型变量(M_2)可以解释11.97%的组内变异, 并解释13.21%的另一组(植被因子)变异。

表6 桂北喀斯特峰丛洼地不同生态系统植被与土壤主要养分、矿质养分、微生物的典范相关分析

Table 6 Canonical correlation analysis between vegetation and soil main nutrients, mineral nutrients, microbe of different ecosystems in depressions between karst hills, North Guangxi

因子 Factor	典型向量 Typical vector	典范相关系数 Canonical correlation coefficient	特征值 Eigenvalue	卡方值 Chi-square value	df	p	累积贡献率 Accumulative contribution (%)
土壤主要养分及pH Soil main nutrients and pH	1	1.000 0	9.555 4	237.579 8	120	0.000 1	41.545 4
	2	0.988 6	4.089 6	121.043 4	98	0.057 2	59.326 3
	3	0.974 5	2.960 1	79.347 8	78	0.436 2	72.196 2
	4	0.904 1	2.354 8	46.451 9	60	0.900 1	82.434 4
土壤矿质养分 Soil mineral nutrients	1	0.995 9	7.517 2	149.118 5	90	0.000 1	35.796 2
	2	0.972 4	3.849 4	91.381 2	70	0.044 1	54.126 5
	3	0.926 6	2.808 8	56.457 0	52	0.312 0	67.502 0
	4	0.886 5	2.589 5	32.980 4	36	0.613 0	79.832 9
土壤微生物 Soil microbe	1	0.997 5	8.636 7	189.495 6	90	0.000 1	41.127 1
	2	0.992 5	4.369 8	125.889 0	70	0.000 1	61.935 5
	3	0.968 1	2.731 8	75.497 1	52	0.018 3	74.944 3
	4	0.936 6	2.139 6	42.282 5	36	0.218 0	85.132 9

表7 植被与土壤主要养分、矿质养分、微生物之间的典型变量构成

Table 7 Composition of typical variables between vegetation and soil main nutrients, mineral nutrients, microbe

因子 Factor	典型变量构成 Composition of typical variables
土壤主要养分及pH Soil main nutrients and pH	$V_1 = -0.137X_1 - 0.1098X_2 - 0.2617X_3 + 0.5216X_4 - 0.2499X_5 - 1.3935X_6 + 0.0056X_7 + 1.5855X_8 + 0.509X_9 + 0.2548X_{10} - 2.3453X_{11} + 2.239X_{12} - 0.0352X_{13} - 0.0271X_{14} + 0.4216X_{15}$ $V_2 = 0.2499X_1 + 0.1348X_2 - 1.1462X_3 + 1.4949X_4 + 0.1406X_5 - 0.1053X_6 + 0.2959X_7 - 0.4941X_8 - 2.1574X_9 + 3.6678X_{10} + 0.5941X_{11} - 2.7192X_{12} - 0.1289X_{13} + 1.0272X_{14} - 0.0268X_{15}$ $V_3 = -0.852X_1 + 0.5144X_2 + 2.4197X_3 - 2.3717X_4 + 0.2662X_5 + 0.3071X_6 - 0.5941X_7 + 0.2211X_8 + 4.4884X_9 - 6.09X_{10} - 2.5247X_{11} + 5.1116X_{12} - 0.2245X_{13} - 0.879X_{14} + 0.192X_{15}$ $V_4 = 0.3481X_1 + 1.4801X_2 - 2.094X_3 + 0.8426X_4 - 1.5269X_5 + 1.7259X_6 - 0.683X_7 + 0.071X_8 - 1.98X_9 + 0.55123X_{10} - 6.031X_{11} + 1.4849X_{12} + 0.1804X_{13} - 0.3788X_{14} - 0.7215X_{15}$ $N_1 = -0.1374Y_1 - 0.2421Y_2 - 0.6092Y_3 + 0.393Y_4 - 0.3035Y_5 + 0.6549Y_6 + 0.3061Y_7 + 0.0457Y_8$ $N_2 = 0.1443Y_1 - 0.5119Y_2 + 0.6093Y_3 - 0.2279Y_4 - 0.243Y_5 + 0.7432Y_6 - 0.1349Y_7 - 0.2359Y_8$ $N_3 = 0.5109Y_1 + 0.6613Y_2 + 0.441Y_3 + 0.2005Y_4 + 1.0026Y_5 - 0.9215Y_6 + 0.192Y_7 - 0.8678Y_8$ $N_4 = 0.2704Y_1 - 0.4535Y_2 - 1.2598Y_3 - 0.4309Y_4 - 1.0218Y_5 - 0.1078Y_6 + 0.8623Y_7 - 0.1978Y_8$
土壤矿质养分 Soil mineral nutrients	$V_1 = 1.3328X_1 - 1.4716X_2 - 0.1405X_3 + 1.626X_4 + 0.0186X_5 + 1.7177X_6 - 0.0929X_7 - 1.5137X_8 + 1.0128X_9 - 6.2488X_{10} + 8.0451X_{11} - 2.8657X_{12} + 0.9783X_{13} - 0.535X_{14} + 0.4505X_{15}$ $V_2 = 0.2874X_1 - 5.0447X_2 + 6.4324X_3 - 0.7117X_4 - 1.6101X_5 + 4.1367X_6 - 1.7886X_7 - 1.3492X_8 - 2.1722X_9 + 1.8539X_{10} + 2.3722X_{11} - 1.6156X_{12} - 0.1611X_{13} + 0.2701X_{14} + 0.913X_{15}$ $V_3 = 0.092X_1 - 0.2851X_2 - 1.0624X_3 + 1.145X_4 - 1.0633X_5 + 2.0744X_6 - 2.4406X_7 + 1.891X_8 - 3.2077X_9 + 5.9101X_{10} - 1.1451X_{11} - 2.0214X_{12} + 0.5667X_{13} - 0.5273X_{14} + 0.1106X_{15}$ $V_4 = -0.0587X_1 + 0.8078X_2 + 0.6425X_3 - 1.593X_4 + 0.2789X_5 - 0.4447X_6 - 1.9623X_7 + 1.3052X_8 - 0.3898X_9 + 0.5193X_{10} + 1.1796X_{11} - 1.8717X_{12} - 0.215X_{13} - 0.2506X_{14} - 1.7498X_{15}$ $M_1 = -0.6547Z_1 - 0.7389Z_2 + 0.5349Z_3 - 0.6788Z_4 - 0.3006Z_5 + 0.7029Z_6$ $M_2 = 0.4102Z_1 + 0.8064Z_2 - 1.3247Z_3 - 0.789Z_4 + 1.1617Z_5 + 0.4722Z_6$ $M_3 = 0.774Z_1 - 0.9579Z_2 + 1.658Z_3 - 0.3802Z_4 + 0.5498Z_5 - 0.8751Z_6$ $M_4 = -0.6507Z_1 + 0.2712Z_2 + 0.6565Z_3 + 0.1822Z_4 + 0.1772Z_5 - 0.2587Z_6$
土壤微生物 Soil microbe	$V_1 = -0.0927X_1 + 2.5778X_2 - 4.191X_3 + 2.0699X_4 - 0.4691X_5 + 0.5802X_6 + 1.0912X_7 - 0.9447X_8 - 2.7372X_9 + 2.7691X_{10} + 3.885X_{11} - 5.0184X_{12} + 0.0863X_{13} - 0.335X_{14} + 0.4352X_{15}$ $V_2 = 0.4468X_1 - 1.7554X_2 + 3.1339X_3 - 1.8526X_4 - 0.0248X_5 + 2.5788X_6 - 0.9207X_7 - 1.4121X_8 + 2.1194X_9 - 3.3321X_{10} - 2.3902X_{11} + 3.7412X_{12} + 0.3095X_{13} - 0.5088X_{14} - 0.6302X_{15}$ $V_3 = -0.3023X_1 + 1.6174X_2 - 1.4289X_3 + 0.6059X_4 - 2.8266X_5 + 4.6108X_6 - 0.361X_7 - 1.5005X_8 - 1.4893X_9 + 4.1451X_{10} + 0.0055X_{11} - 2.6993X_{12} + 0.1855X_{13} - 0.8379X_{14} + 0.3584X_{15}$ $V_4 = -0.5843X_1 + 2.0593X_2 - 1.5748X_3 - 1.6356X_4 + 2.9295X_5 - 6.8542X_6 + 2.2734X_7 + 2.8808X_8 + 5.1672X_9 - 5.2043X_{10} - 10.3873X_{11} + 10.5614X_{12} - 0.2834X_{13} - 0.3606X_{14} - 0.6308X_{15}$ $B_1 = 0.7056W_1 - 1.1036W_2 + 0.097W_3 - 2.6388W_4 + 1.8221W_5 + 0.1609W_6$ $B_2 = -0.9062W_1 + 0.4258W_2 - 0.1223W_3 + 4.1721W_4 - 4.1461W_5 - 0.2463W_6$ $B_3 = 2.4987W_1 - 1.4252W_2 + 0.7448W_3 - 2.0212W_4 + 0.5379W_5 - 0.1231W_6$ $B_4 = 1.386W_1 + 0.7722W_2 - 1.2757W_3 - 4.5789W_4 + 3.5505W_5 - 0.1534W_6$

X_1 , 草本层丰富度; X_2 , 草本层Shannon-Wiener指数; X_3 , 草本层Simpson指数; X_4 , 草本层均匀度; X_5 , 灌木层丰富度; X_6 , 灌木层Shannon-Wiener指数; X_7 , 灌木层Simpson指数; X_8 , 灌木层均匀度; X_9 , 乔木层丰富度; X_{10} , 乔木层Shannon-Wiener指数; X_{11} , 乔木层Simpson指数; X_{12} , 乔木层均匀度; X_{13} , 盖度; X_{14} , 群落高度; X_{15} , 密度; Y_1 , pH; Y_2 , 土壤有机碳; Y_3 , 全N; Y_4 , 全P; Y_5 , 全K; Y_6 , 速效氮; Y_7 , 速效磷; Y_8 , 速效钾; Z_1 , SiO_2 ; Z_2 , Al_2O_3 ; Z_3 , Fe_2O_3 ; Z_4 , CaO; Z_5 , MgO; Z_6 , MnO; W_1 , 微生物生物量碳; W_2 , 微生物生物量氮; W_3 , 微生物生物量磷; W_4 , 真菌; W_5 , 细菌; W_6 , 放线菌。

X_1 , abundance of grass layer; X_2 , Shannon-Wiener index of grass layer; X_3 , Simpson index of grass layer; X_4 , evenness of grass layer; X_5 , abundance of shrub layer; X_6 , Shannon-Wiener index of shrub layer; X_7 , Simpson index of shrub layer; X_8 , evenness of shrub layer; X_9 , abundance of tree layer; X_{10} , Shannon-Wiener index of tree layer; X_{11} , Simpson index of tree layer; X_{12} , evenness of tree layer; X_{13} , coverage; X_{14} , height of community; X_{15} , density; Y_1 , pH; Y_2 , soil organic carbon; Y_3 , total N; Y_4 , total P; Y_5 , total K; Y_6 , available N; Y_7 , available P; Y_8 , available K; Z_1 , SiO_2 ; Z_2 , Al_2O_3 ; Z_3 , Fe_2O_3 ; Z_4 , CaO; Z_5 , MgO; Z_6 , MnO; W_1 , microbial biomass carbon; W_2 , microbial biomass nitrogen; W_3 , microbial biomass phosphorus; W_4 , fungi; W_5 , bacteria; W_6 , actinomycetes.

植被与土壤微生物第一、二、三对典型相关系数达到了显著水平, 分别为0.997 5、0.992 5和0.968 1, 第一组典型变量系数主要反映了土壤真菌与乔木层均匀度的正相关关系及与草本层Simpson指数间的负相关关系; 第二组典型变量系数主要反映乔木层均匀度和Shannon-Wiener指数与真菌的正、负相关关系及与细菌的负、正相关关系; 第三

组变量反映了灌木层Shannon-Wiener指数和 C_{mic} 的正相关关系及与真菌的负相关关系。植被第一组典型变量(V_1)可以解释25.01%的组内变异, 并解释24.98%的另一组(微生物指标)变异; 而微生物第一组典型变量(B_1)可以解释39.91%的组内变异, 并解释39.51%的另一组(植被因子)变异; 植被第二组典型变量(V_2)可以解释4.36%的组内变异, 并解释

表8 桂北喀斯特峰丛洼地生态系统植被与土壤因子的典型冗余分析

Table 8 Typical redundancy analysis of vegetation and soil factors for ecosystems in depressions between karst hills, North Guangxi

因子 Factor	观察值的变异能由典型变量解释的比例 Proportion of variation of observed value can be explained by typical variable (%)						观察值的变异能被它们相对的典型变量所解释的比例 Proportion of variation of observed value can be explained by opposite typical variable (%)					
	I	II	III	I'	II'	III'	I	II	III	I'	II'	III'
土壤主要养分及pH Soil main nutrients and pH	11.32	17.07	6.50	26.44	37.62	8.74	11.32	16.69	6.17	26.44	36.77	8.30
土壤矿质养分 Soil mineral nutrients	2.40	4.35	10.72	30.13	13.97	12.23	2.38	4.11	9.21	29.88	13.21	10.50
土壤微生物 Soil microbe	25.10	4.36	6.95	39.91	30.61	5.28	24.98	4.30	6.51	39.51	29.76	4.87

I、II、III表示植被的第一、二、三组典型变量; I'、II'、III'分别表示土壤主要养分及pH、矿质养分和微生物的第一、二、三组典型变量。

I, II, III stand for the first, second and third group of typical variable for vegetation, respectively; I', II', III' stand for the first, second and third group of typical variables for soil nutrients, pH, soil mineral nutrients and soil microbe, respectively.

4.30%的另一组(微生物指标)变异; 而微生物第二组典型变量(B_2)可以解释30.61%的组内变异, 并解释39.51%的另一组(植被因子)变异; 植被第三组典型变量(V_3)可以解释6.95%的组内变异, 并解释6.51%的另一组(微生物指标)变异; 而微生物第三组典型变量(B_3)可以解释5.28%的组内变异, 并解释4.87%的另一组(植被因子)变异。

3 讨论和结论

3.1 桂北喀斯特峰丛洼地生态系统的稳定性

喀斯特峰丛洼地脆弱的生态系统普遍存在以人为干扰为驱动力、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现象, 出现了草丛、灌丛、次生林和原生林等不同生态系统或群落的共存现象(彭晚霞等, 2008), 不同的生态系统植物群落的特征迥然不同。许多研究表明: 生态系统越平衡就越稳定, 生态系统的稳定性与植物多样性密切相关(Tilman & Doering, 1994; Baskin, 1995; Lehman & Tilman, 2000), 在目前尚没有合适的指标对稳定性进行衡量时, 多数学者仍主要以群落的复杂性(多样性)作为衡量稳定性的指标(张金屯, 1995), 生态学理论认为顶级群落的稳定性一般要高于演替中的群落, 植物物种多样性可以导致群落稳定性。喀斯特峰丛洼地的顶级群落即原生林为非地带性常绿落叶阔叶混交林, 其稳定性最强。但喀斯特峰丛洼地重要值大于10.0的科、属、种及乔木层、灌木层多样性的最大值均出现在次生林, 并非顶级群落原生林, 原生林的盖度最高, 高度和密度相对合理, 这与其他大量的研究结果相似(王国宏, 2002)。喀斯特峰丛洼地植物群落

的稳定性与多样性具有更为复杂的关系, 植物多样性是群落稳定的基础或必要条件, 但并不能完全代表群落的稳定性, 群落的稳定性既要有丰富的植物多样性, 同时也要保证群落结构的合理性。

3.2 影响桂北喀斯特峰丛洼地脆弱生态系统发育的主要因子

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, 4个典型生态系统前3个主成分的方差累积贡献率均超过了85%, 降维效果突出。不同生态系统的影响因子不同, 应制定相应的管理措施。草丛生态系统的主要影响因子为 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、草本层均匀度和草本层群落密度, 对草丛生态系统的管理除要追施矿质养分外, 还要增加个体数量并保证其随机分布, 提高草丛的生物量; 灌丛生态系统影响因子第一主成分为CaO、 C_{mic} 、细菌、草本层Shannon-Wiener指数、草本层Simpson指数、草本层均匀度、乔木层Shannon-Wiener指数、乔木层均匀度, 在灌木林培育过程中, 一定要同时考虑乔木和草本的多样性, 提高灌木林的立体结构, 保障灌木林群落结构的合理性; 次生林生态系统情况比较复杂, 主要受土壤pH、SOC、AN、 Fe_2O_3 、MnO的影响较大, 且pH是其限制因子, 次生林不仅要增加主要养分和矿质养分, 而且要保证合理的酸碱度, 促进次生林向原生林快速发展; 原生林是喀斯特峰丛洼地非地带性顶级群落, 植被、土壤和气候达到了较高水平的平衡状态, 受土壤生态系统的影响很小, 主要受乔木群落自身的结构和多样性的影响, 因此要增加乔木的复杂性, 避免出现单一树种的状况。喀斯特峰丛洼地地区区域尺度范围内的主成分综合分析发现, 前8个主成分贡献率才超过85%, 表

明在区域范围内植被和土壤的相互关系相当复杂,其主要影响因子与4个生态系统不同,其中主导因子主要是土壤真菌、细菌、放线菌微生物因子,次要因子是灌木层植物多样性,土壤矿质养分 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 和草本层多样性作用也比较大,表明在喀斯特脆弱的生态系统中,生物(植物和微生物)的作用较大,土壤养分发挥的作用相对较小,在喀斯特峰丛洼地脆弱生态系统的生态重建和植被恢复过程中,特别要注重土壤微生物与植物多样性的关系以及对灌木的培育和管理。

3.3 桂北喀斯特峰丛洼地脆弱生态系统植物与土壤的耦合关系

喀斯特峰丛洼地的顶级生态系统,即非地带性常绿落叶阔叶混交林,在人为干扰下产生了不同程度的退化,有些地带甚至完全石漠化。近年来,随着退耕还林还草、天保和石漠化治理等工程的全面实施,及各种环保政策计划的落实,喀斯特退化生态系统正在逐步恢复。植被与土壤的相互作用关系也在不断变化,总体趋势为,喀斯特峰丛洼地碳酸盐岩风化过程中生成的次生矿物源源不断地释放各种矿质成分,形成了土壤的物质基础,逐步增强了土壤肥力,改善了土壤的微生物性状,共同调控了植被的物种组成、群落类型和生长发育状况,反过来,植物旺盛的生物量累积和凋落物返还过程又不断地改善着土壤肥力和微生物性状。植物-土壤主要养分-土壤矿质养分-土壤微生物之间相互作用、共同演替发展。典型相关分析表明,植被与土壤主要养分、土壤矿质养分、土壤微生物具有明显的典型相关,前4个特征值的方差累积贡献率接近80%,其中植被与土壤微生物的关系最为密切。植被因子以多样性的载荷量最大,土壤主要养分因子以氮素的载荷量最大,土壤矿质养分因子以 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的载荷量最大,土壤微生物因子以 C_{mic} 、真菌和细菌的载荷量最大。因此在进行喀斯特峰丛洼地脆弱生态系统生态优化设计时,应全面考虑植物多样性的分布格局与土壤氮、矿质养分、微生物生物量碳、真菌和细菌之间的相互关系。

基金项目 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-10)、国家科技支撑计划项目(2011BAC09B02)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070404和XDA05050205)、国家自然科学基金项目(31070425、31000224、30970508和U1033004)和中国科学院“西

部之光”人才培养计划资助。

致谢 本研究调查得到了广西壮族自治区木论国家级自然保护区和环江毛南族自治县林业局的大力支持,在此致谢!

参考文献

- Bao SD (2000). *Soil Assay on Properties of Agro-Chemistry*. 3rd edn. China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese) [鲍士旦 (2000). 土壤农化分析. 第三版. 中国农业出版社, 北京.]
- Baskin Y (1995). Ecosystem function of biodiversity. *Biological Science*, 44, 657–660.
- Burke A (2001). Classification and ordination of plant communities of the Naukluft Mountains, Namibia. *Journal of Vegetation Science*, 12, 53–60.
- He XY, Wang KL, Xu LL, Chen HS, Zhang W (2008). Soil microbial metabolic diversity and its seasonal variations along a vegetation succession in a karst area: a case study in southwest China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 28, 2590–2596. (in Chinese with English abstract) [何寻阳, 王克林, 徐丽丽, 陈洪松, 张伟 (2008). 喀斯特地区植被不同演替阶段土壤细菌代谢多样性及其季节变化. 环境科学学报, 28, 2590–2596.]
- Jiao JY, Ma XH, Bai WJ, Jiao F, Wen ZM (2005). Correspondence analysis of vegetation communities and soil environmental factors on abandoned cropland on hilly-gullied loess plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 42, 744–752. (in Chinese with English abstract) [焦菊英, 马祥华, 白文娟, 焦峰, 温仲明 (2005). 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, 42, 744–752.]
- Lan AJ, Zhang BP, Xiong KN, An YL (2003). Spatial pattern of the fragile karst environment in southwest Guizhou Province. *Geographical Research*, 22, 733–741. (in Chinese with English abstract) [兰安军, 张百平, 熊康宁, 安裕伦 (2003). 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析. 地理研究, 22, 733–741.]
- Lehman CL, Tilman D (2000). Biodiversity, stability, and productivity in competitive communities. *The American Naturalist*, 156, 534–532.
- Liu GS (1997). *Soil Physical and Chemical Analysis and Description of Soil Profile*. China Standards Publishing House, Beijing. (in Chinese) [刘光崧 (1997). 土壤理化分析与剖面描述. 中国标准出版社, 北京.]
- Liu SL, Ma KM, Fu BJ, Kang YX, Zhang JY, Zhang YX

- (2003). The relationship between landform, soil characteristics and plant community structure in the Donglingshan Mountain region, Beijing. *Acta Phytoecologica Sinica*, 27, 496–502. (in Chinese with English abstract) [刘世梁, 马克明, 傅伯杰, 康永祥, 张洁瑜, 张育新 (2003). 北京东灵山地区地形土壤因子与植物群落关系研究. 植物生态学报, 27, 496–502.]
- Ma KP, Huang JH, Yu SL, Chen LZ (1995). Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China. II. Species richness, evenness and species diversities. *Acta Ecologica Sinica*, 15, 268–277. (in Chinese with English abstract) [马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝 (1995). 北京东灵山地区植物群落多样性的研究II: 丰富度、均匀度和物种多样性指数. 生态学报, 15, 268–277.]
- Peng WX, Song TQ, Zeng FP, Wang KL, Liu L (2011). Spatial heterogeneity of vegetation in karst mixed forest of evergreen and deciduous broadleaf. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 31, 815–822. (in Chinese with English abstract) [彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 刘璐 (2011). 喀斯特常绿落叶阔叶混交林植被的空间异质性. 西北植物学报, 31, 815–822.]
- Peng WX, Wang KL, Song TQ, Zeng FP, Wang JR (2008). Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable karst ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 811–820. (in Chinese with English abstract) [彭晚霞, 王克林, 宋同清, 曾馥平, 王久荣 (2008). 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. 生态学报, 28, 811–820.]
- Song CY, Guo K (2007). Relationship between plant community and soil on the inter dune lowland in the middle of Otingdag sand land. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 31, 40–49. (in Chinese with English abstract) [宋创业, 郭柯 (2007). 浑善达克沙地中部丘间低地植物群落分布与土壤环境关系. 植物生态学报, 31, 40–49.]
- Song TQ, Peng WX, Zeng FP, Wang KL, Qin WG, Tan WN, Liu L, Du H, Lu SY (2010). Spatial pattern of forest communities and environmental interpretation in Mulun National Nature Reserve, karst cluster-peak depression region. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 298–308. (in Chinese with English abstract) [宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 覃文更, 谭卫宁, 刘璐, 杜虎, 鹿士杨 (2010). 木论喀斯特峰丛洼地森林群落空间格局及环境解释. 植物生态学报, 34, 298–308.]
- Tilman D, Doering JA (1994). Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 367, 363–365.
- Wang GH (2002). Further thoughts on diversity and stability in ecosystems. *Biodiversity Science*, 10, 126–134. (in Chinese with English abstract) [王国宏 (2002). 再论生物多样性与生态系统的稳定性. 生物多样性, 10, 126–134.]
- Woodward FI, Mckoo IF (1991). Vegetation and climate. *Environment International*, 17, 535–546.
- Wu JS, Lin QM, Huang QY, Xiao HA (2006). *Soil Microbial Biomass—Methods and Application*. China Meteorological Press, Beijing. (in Chinese) [吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾 (2006). 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 气象出版社, 北京.]
- Wu ZY (2003). Notes on the distribution patterns of world families of seed plants. *Acta Botanica Yunnanica*, 25, 535–538. (in Chinese) [吴征镒 (2003). 《世界种子植物科的分布区类型系统》的修订. 云南植物研究, 25, 535–538.]
- Wu ZY, Zhou ZK, Li DZ, Peng H, Sun H (2003). The areal-types of the world families of seed plants. *Acta Botanica Yunnanica*, 25, 245–257. (in Chinese with English abstract) [吴征镒, 周浙昆, 李德铎, 彭华, 孙航 (2003). 世界种子植物科的分布区类型系统. 云南植物研究, 25, 245–257.]
- Xu YJ, Chen YN, Li WH, Fu AH, Ma XD, Gui DW, Chen YP (2010). Distribution pattern and environmental interpretation of plant species diversity in the mountainous region of Ili River Valley, Xinjiang, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 1142–1154. (in Chinese with English abstract) [徐远杰, 陈亚宁, 李卫红, 付爱红, 马晓东, 桂东伟, 陈亚鹏 (2010). 伊犁河谷山地植物群落物种多样性分布格局及环境解释. 植物生态学报, 34, 1142–1154.]
- Yang XB, Wu QS (2000). Vegetation development on tropical abandoned fields, Hainan Island, China. *Acta Phytoecologica Sinica*, 24, 477–482. (in Chinese with English abstract) [杨小波, 吴庆书 (2000). 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, 24, 477–482.]
- Yu LF, Zhu SQ, Ye JZ, Wei LM, Chen ZR (2002). Dynamics of a degraded karst forest in the process of natural restoration. *Scientia Silvae Sinicae*, 38(1), 1–7. (in Chinese with English abstract) [喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 魏鲁明, 陈正仁 (2002). 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究. 林业科学, 38(1), 1–7.]
- Yu LZ, Zhu JJ, Kong XW, Hu WL, Tan XR (2006). The effects of anthropogenic disturbances (thinning) on plant species diversity of *Pinus koreansis* plantation. *Acta Ecologica*

- Sinica*, 26, 3757–3764. (in Chinese with English abstract) [于立忠, 朱教君, 孔祥文, 胡万良, 谭学仁 (2006). 人为干扰(间伐)对红松人工林林下植物多样性的影响. 生态学报, 26, 3757–3764.]
- Zeng FP, Peng WX, Song TQ, Wang KL, Wu HY, Song XJ, Zeng ZX (2007). Changes in vegetation after 22 years' natural restoration in the karst disturbed area in Northwest Guangxi. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 5110–5119. (in Chinese with English abstract) [曾馥平, 彭晚霞, 宋同清, 王克林, 吴海勇, 宋希娟, 曾昭霞 (2007). 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复22年后群落特征. 生态学报, 27, 5110–5119.]
- Zhang JT (1995). *Methods of Quantitative Vegetation Ecology*. China Science and Technology Press, Beijing. (in Chinese) [张金屯 (1995). 植被数量生态学方法. 中国科学技术出版社, 北京.]
- Zhang W, Chen HS, Wang KL, Zhang JG, Hou Y (2008). Spatial variability of soil nutrients on hillslope in typical karst peak-cluster depression areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 24, 68–73. (in Chinese with English abstract) [张伟, 陈洪松, 王克林, 张继光, 侯娅 (2008). 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, 24, 68–73.]

责任编辑: 郭 柯 责任编辑: 王 葳