生态学杂志 Chinese Journal of Ecology 2013,32(3):522-528

喀斯特峰丛洼地不同生态系统土壤微生物与养分的耦合关系*

卢成阳[1,2,3] 彭晚霞[1,3] 宋同清[1,3**] 曾馥平[1,3] 杨钙仁[2] 张 浩[1,3] 鹿士杨[1,3] 杜 虎[1,3]

([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]广西大学林学院,南宁 530004;[3]中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站,广西环江 547100)

摘 要 基于喀斯特峰丛洼地农作区、人工林、次生林、原生林4类生态系统土壤微生物量、微生物数量及土壤养分的分析,本文探讨了不同生态系统土壤微生物特征及其与土壤养分的耦合关系。结果表明:不同生态系统微生物种群组成不同,真菌比率均较低,农作区、人工林、原生林的放线菌比率较大,而次生林细菌比率较大;不同生态系统中微生物量碳(C_{mic})与微生物量氮(N_{mic})、微生物量磷(P_{mic})的相关性均达到了显著或极显著水平;不同生态系统土壤微生物量与土壤养分的关系密切,而微生物数量与土壤养分的相关性均较弱,表明土壤微生物细菌、真菌、放线菌种群数量分布的随机性较大,而不是受单一养分因子的控制;不同生态系统中土壤微生物属性和土壤养分的耦合关系不同:农作区土壤有机质(SOM)、pH、全磷(TP)起较大作用,主要影响土壤C_{mic}、细菌和真菌;人工林中土壤水分、SOM、全氮(TN)、TP主要影响土壤微生物量;次生林中以pH、SOM、TP、碱解氮(AN)、速效钾(AK)主要影响土壤微生物量和真菌;原生林主要有pH、TP、AN影响土壤微生物量和细菌。

关键词 土壤微生物;土壤养分;耦合关系;生态系统;喀斯特峰丛洼地

中图分类号 Q938.1+3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)3-0522-07

Coupling relationships between soil microbe and soil nutrient under different ecosystems in depression between karst hills. LU Cheng-yang[1,2,3], PENG Wan-xia[1,3], SONG Tong-qing[1,3**], ZENG Fu-ping[1,3], YANG Gai-ren[2], ZHANG Hao[1,3], LU Shi-yang[1,3], DU Hu[1,3] ([1]*Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha* 410125, *China*; [2]*Forestry College of Guangxi University, Nanning* 530004, *China*; [3]*Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang* 547100, *Guangxi, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(3): 522-528.

Abstract: Based on the analysis of soil microbe and soil nutrients in different ecosystems of depression between karst hills, *i.e.*, cropland, plantation forest, secondary forest, and primary forest, this study explored the characteristics of soil microbe and revealed the coupling relationships between soil microbe and nutrients. The composition of microbial population differed in the four ecosystems, where the ratio of fungi was lower in the four ecosystems. The ratio of actinomycetes in cropland, plantation and primary forest was larger than that of bacteria, while the reverse was true in the secondary forest. In the four ecosystems, the microbial biomass carbon (C_{mic}) was significantly correlated with the microbial biomass nitrogen (N_{mic}) and phosphorus (P_{mic}). The relationship between soil microbial factors and soil nutrients differed in the four ecosystems, among which the soil microbial biomass was closely with soil nutrients, while the amount of soil microbial population was weakly related with soil nutrient in the four ecosystems. This indicated

* 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-10)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050205、XDA05070404)、国家科技支撑计划(2011BAC09B02)、国家自然科学基金项目(31000224、31070425、30970508和U1033004)、中国科学院"西部之光"人才培养计划、广西特聘专家项目资助。

**通讯作者 E-mail: songtongq@163.com

收稿日期:2012-06-10 接受日期:2012-12-01

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

that soil microbial populations such as bacteria, fungi and actinomycetes was randomly disturbed, instead of controlled by sole nutrient factor. The coupling relationships between soil microbe and soil nutrient factors were different in the four ecosystems. In the cropland, soil organic matter (SOM), pH, and total phosphorus (TP) played a greater role and mainly affected on C_{mic}, bacteria and fungi. In the plantation forest, soil water content, SOM, total nitrogen (TN), and TP had a greater effect on soil microbial biomass C, N, and P. In the secondary forest, pH, SOM, TP, available nitrogen (AN), and available potassium (AK) mainly influenced soil microbial biomass C, N, P, and fungi. In the primary forest, pH, TP, and AN proudly affected on soil microbial biomass C, N, P, and bacteria.

Key words: soil microbe; soil nutrient; coupling relation; ecosystem; depression between karst hills.

土壤微生物是土壤生态系统的重要组分之一，是推动土壤物质转化、能量流动和营养元素生物地球化学循环的动力(Harris, 2003; Devi & Yadava, 2006)。土壤微生物对环境变化敏感，且与生态系统进化具有协同性，是反映生态系统功能变化和土壤质量的敏感指标之一(姜培坤等，2002; 陈香碧等，2009)。土壤微生物特性与土壤质量的关系密切(周丽霞和丁明懋，2007)。

峰丛洼地是典型的喀斯特地貌，集中分布于我国西南喀斯特南部斜坡地带，面积约为 9.7 万 km^2，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，石漠化现象日益严峻(彭晚霞等，2008)。为了有效遏制石漠化不断扩张的态势，许多学者对喀斯特地区不同生态系统或者不同条件下土壤微生物特性进行了研究，如土壤细菌群落结构、遗传多样性、土壤酶活性、土壤微生物量的空间分布等(陈香碧等，2009; 何寻阳等，2009; 周玮和周运超，2010; 鹿士杨等，2012; 张利青等，2012)，而土壤微生物特性与土壤养分的耦合关系的研究甚少。本文基于喀斯特峰丛洼地农作区、人工林、次生林和原生林 4 类典型生态系统的动态监测样地土壤取样分析，研究土壤微生物特性及与土壤养分的相关性，运用典型相关分析来揭示不同生态系统中土壤微生物特性与土壤养分的耦合关系，为评价喀斯特地区土壤质量以及该区域不同生态系统优化设计、作物合理布局、生态重建提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西环江毛南族自治县(全国石漠化综合治理县)，地理坐标为 107°51′E—108°43′E、24°44′N—25°33′N，研究区地貌为典型喀斯特峰丛洼地，土壤以石灰土为主，土层厚 30 ~ 90 cm，自然植被为灌丛和蕨类(曾馥平等，2007)。岩溶峰丛洼地最高峰的海拔为 1028.0 m。该区属亚热带季风气候，年均气温 16.5 ~ 20.5 ℃，1 月平均气温 10.1 ℃，7 月平均气温 28 ℃，历年最低气温 -5.2 ℃，无霜期 290 d，年均日照时数 1451 h，年太阳总辐射量 334.4 ~ 413.4 $kJ \cdot cm^{-2}$，年均降水量 1389.1 mm，降雨集中于 4—9 月，占全年降雨量的 70%，年均蒸发量为 1571.1 mm，相对湿度平均为 70%(许家康，2010)。4 类典型生态系统研究区域选在该县西南部喀斯特峰丛洼地集中分布地带，分别为: Ⅰ. 农作区。下南承义农业耕作强度干扰区(简称农作区，长期开垦种植玉米、黄豆和红薯等农作物)。Ⅱ. 人工林。下南古周综合治理人工林较强干扰区(1996 年实施生态移民 50%，2001 年进行退耕还林、还草、种果和封山育林等措施)。Ⅲ. 次生林。大才木连中度干扰自然恢复次生林较弱干扰区(1985 年撂荒)。Ⅳ. 原生林。木论自然保护原生林弱度干扰区(目前世界上喀斯特地区保存最完好、面积最大的原生林，1996 年建设为国家自然保护区)。4 类干扰区相互距离 ≤80 km，以便于比较，基本情况见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置调查与取样 通过勘查，2007 年 10—12 月在喀斯特峰丛洼地 4 类典型生态系统研究区域内各选择 1 个较规则的坡面和洼地连续体，按热带森林科学研究中心(Centre for Tropical Forest Science，简称 CTFS)标准(Condit, 1995)从洼地向坡顶建立一块投影面积为 200 m × 40 m 的动态监测样地，其中坡面 160 m × 40 m、洼地 40 m × 40 m。用全站仪将整个样地划分为 20 个 20 m × 20 m 样方，将每个20 m × 20 m样方用插值法细分为4个10 m ×

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表1 喀斯特峰丛洼地4类典型生态系统基本情况
Table 1 General status of the four ecosystems in the area of depressions between karst hills

类型	干扰强度	植被类型	土壤类型	植被盖度(%)	建群种
Ⅰ	强	农作物	石灰土	≤15	玉米 *Zea mays*、黄豆 *Glycine max*、红薯 *Ipomoea batatas*
Ⅱ	较强	人工林	石灰土	15~40	柑桔 *Citrus reticulata*、板栗 *Castanea mollissima*、任豆树 *Zenia insignis*、香椿 *Toona sinensis*
Ⅲ	较弱	次生林	石灰土	40~85	八角枫 *Alangium chinense*、黄荆 *Vitex negundo*、红背山麻杆 *Alchornea trewioides*
Ⅳ	弱	原生林	石灰土	≥85	石山松 *Pinus calcarea*、单性木兰 *Kmeria septentrionalis*、石山樟 *Cinnamomum saxitilis*

10 m小样方,进一步将每个小样方划分为4个5 m×5 m的微型样方。2010年11月,在每个10 m×10 m样方范围内随机采取5个土壤样本(0~20 cm),采用四分法混合组成待测土样,采样过程中,若采样点上有石块分布,则在石块周围取3个土样混合均匀后,取1/3代替该点样本(彭晚霞等,2010),共获得80个土样。用于测定常规指标的土样置于阴凉处自然风干后,用四分法取土样过筛供测定,用于微生物指标测定的土壤在筛选出石砾后保存于4 ℃冰箱中,待测。

1.2.2 土壤指标的测定 土壤养分测定采用常规方法(中国科学院南京土壤研究所,1978),其中有机质(SOM)采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;pH值用1∶2.5土液比水提,酸度计测定;全氮(TN)用半微量开氏法测定;全磷(TP)用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定;全钾(TK)用NaOH熔融-火焰光度法测定;碱解氮(AN)用扩散吸收法测定;速效磷(AP)用0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$提取-钼锑抗显色-紫外分光光度法测定;速效钾(AK)用中性醋酸铵提取-原子吸收测定(刘光崧,1996);土壤微生物量碳(C_{mic})用氯仿熏蒸-K_2SO_4提取-碳分析仪器法;土壤微生物量氮(N_{mic})用氯仿熏蒸-K_2SO_4提取-流动注射氮分析仪器法;土壤微生物量磷(P_{mic})用氯仿熏蒸-$NaHCO_3$提取-Pi测定-外加Pi校正法;土壤微生物数量测定采用稀释平板法(蔡燕飞和廖宗文,2002),其中细菌用牛肉膏蛋白胨培养基,放线菌用高氏一号培养基,真菌用加入孟加拉红的马铃薯葡萄糖培养基,分别测定细菌、真菌、放线菌(吴金水,2006)。

1.2.3 数据处理 用Excel 2007进行数据的前期处理,用SPSS 13.0进行数据统计分析,LSD法比较微生物平均数间的差异显著程度,Pearson相关系数法计算两个因子间相互关系,运用典型相关分析比较养分指标和微生物指标间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同生态系统土壤微生物特性及相关关系

由表2、表3可看出,不同生态系统土壤微生物

表2 不同生态系统土壤微生物数量及其相关性
Table 2 Soil microbial quantity and the correlation in the four ecosystems

类型	微生物类群	微生物数量($\times10^6$ ind·g^{-1})				相关系数矩阵		
		均值	百分比	标准差	变异率(%)	细菌	真菌	放线菌
农作区	细菌	1.22 Bb	12.11	0.26	21.56	1		
	真菌	0.04 Bb	0.41	0.01	24.75	0.189	1	
	放线菌	8.81 Aa	87.48	2.10	23.84	0.173	0.411**	1
	微生物总数	10.10	100.00					
人工林	细菌	1.71 Bb	28.49	0.71	41.70	1		
	真菌	0.03 Bb	0.52	0.01	45.86	0.189	1	
	放线菌	4.26 Bc	70.98	4.01	94.13	0.283*	0.150	1
	微生物总数	6.00	100.00					
次生林	细菌	2.13 Bb	95.04	3.60	168.70	1		
	真菌	0.00 Bc	0.11	0.01	242.62	0.303**	1	
	放线菌	0.11 Cc	4.85	1.92	1761.47	0.291**	0.600**	1
	微生物总数	2.25	100.00	1.91				
原生林	细菌	4.520 Aa	43.68	1.91	42.33	1		
	真菌	0.17 Aa	1.61	0.06	35.51	0.383**	1	
	放线菌	5.66 Bb	54.70	2.41	42.58	0.335**	0.549**	1
	微生物总数	10.30	100.00					

不同大小写字母分别表示不同生态系统间极显著差异($P<0.01$)和显著差异($P<0.05$)。* $P<0.05$,** $P<0.01$。下同。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3 不同生态系统土壤微生物量及其相关性

Table 3 Microbial biomass and the correlation in the four ecosystems

类型	微生物量	微生物量(mg · kg^{-1})			相关系数		
		平均值	标准差	变异率(%)	C_{mic}	N_{mic}	P_{mic}
农作区	C_{mic}	323. 902 Dd	154. 110	47. 58	1		
	N_{mic}	80. 451 Cd	37. 350	46. 43	0. 798**	1	
	P_{mic}	9. 643 Dd	4. 067	42. 18	0. 587**	0. 371**	1
人工林	C_{mic}	574. 376 Cc	308. 353	53. 68	1		
	N_{mic}	234. 621 Bc	153. 039	65. 23	0. 983**	1	
	P_{mic}	47. 499 Bb	30. 679	64. 59	0. 935**	0. 951**	1
次生林	C_{mic}	813. 565 Bb	136. 595	16. 79	1		
	N_{mic}	315. 089 Aba	98. 290	31. 19	0. 406**	1	
	P_{mic}	67. 317 Aa	19. 769	29. 37	0. 223**	0. 774**	1
原生林	C_{mic}	1424. 360 Aa	871. 715	61. 20	1		
	N_{mic}	373. 570 Aa	240. 972	64. 51	0. 919**	1	
	P_{mic}	30. 288 Cd	13. 539	44. 70	-0. 084	-0. 262**	1

组成、土壤微生物量及相关性不同。4 类生态系统土壤微生物组成中均以真菌所占比例较小,不到微生物总量的 2%; 农作区、人工林和原生林土壤微生物种群以放线菌所占比例较大,占微生物总数的 54. 70% ~87. 48%; 次生林土壤微生物种群以细菌所占比例较高; 次生林、原生林中真菌与放线菌极显著相关。

农作区、人工林和原生林中土壤微生物量碳(C_{mic}) 和微生物量氮(N_{mic}) 呈显著相关; 人工林中微生物量磷(P_{mic}) 与 N_{mic}、C_{mic} 相关性较好,相关系数分别为 0. 951 和 0. 935,达到极显著水平; 次生林和原生林中 C_{mic} 与 P_{mic} 的相关系数较小。土壤微生物量与土壤微生物种群数量间没有明显的相关性。4 类生态系统土壤 C_{mic} 和 P_{mic} 两两之间存在极显著差异; 农作区、人工林土壤 N_{mic} 极显著低于次生林和原生林,农作区和人工林土壤 N_{mic} 差异极显著,次生林和原生林土壤 N_{mic} 差异不显著; 原生林的细菌和真菌均极显著高于其他 3 类生态系统,次生林显著高于农作区; 农作区的放线菌极显著高于其他 3 类生态系统,两两之间达到显著或极显著差异。

2. 2 不同生态系统土壤微生物与土壤养分的耦合关系

2. 2. 1 土壤微生物与土壤养分的相关分析 不同生态系统土壤微生物特性与土壤养分的相关性不同。由表 4 可以看出,农作区 C_{mic}、N_{mic} 与有机质(SOM) 、全氮(TN) 、碱解氮(AN) 、速效钾(AK) 及 P_{mic} 与 SOM、TN、全钾(TK) 、全磷(TP) 均呈极显著相关; 真菌、放线菌与 AP 呈极显著负相关。人工林土壤微生物量均与水分、SOM、TN、AN 极显著相关,表明增加有机质、全氮和速效氮含量可加速微生物量的积累; 微生物量与 pH、TP、TK、速效磷(AP) 均呈负相关。次生林土壤微生物因子与土壤各因子间的相关性较差。原生林 C_{mic}、N_{mic} 与 SOM、TP、AN、AK 的相关性均达到了极显著水平,同时 C_{mic}、N_{mic}、细菌、真菌、放线菌与 pH、TN 都表现出显著负相关。

2. 2. 2 土壤微生物特性与土壤养分的典型相关分析 由表 5 可见,农作区、人工林、次生林和原生林前 4 个特征值的方差累积贡献率分别达到 76. 86%、71. 91%、71. 18% 和 74. 64%,基本能反映出大部分的变量信息,由此建立两两之间的 4 对典型变量的构成(表 6) ,由于第三、四对典型变量的影响较小,因此只取第一、二对典型变量进行分析。

农作区土壤微生物特性和土壤养分的第一、二对典型相关系数分别为 0. 990 和 0. 897,表明土壤养分第一、二对典型变量相对土壤微生物第一、二对典型变量影响较大,农作区由于受耕作、施肥、收割等人为管理措施的影响,土壤微生物特性和土壤养分典型相关系数均达到了极显著水平。由表 6 可看出,土壤微生物特性中 C_{mic}、细菌和真菌数量载荷量较高,土壤养分中以 SOM、pH、TP 较高,说明 C_{mic}、细菌和真菌与 SOM、pH、TP 的相互影响最大,尤以 SOM 和 C_{mic} 的关系最密切。

人工林土壤微生物特性和土壤养分的第一、二对典型相关系数分别为 0. 951 和 0. 513,表明土壤养分第一、二对典型变量相对土壤微生物第一、二对典型变量影响较大,均达到了极显著水平。土壤微

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表4 土壤微生物与土壤养分间的相关分析

Table 4 Correlation between nutrient factors and microbial biomass

类型	微生物量因子	养分因子								
		水分	pH	SOM	TN	TP	TK	AN	AP	AK
农作区	C_{mic}	-0.220	0.311**	0.920**	0.894**	0.553**	0.582**	0.827**	-0.214	0.810**
	N_{mic}	-0.163	0.079	0.815**	0.742**	0.323**	0.341**	0.782**	-0.312**	0.626**
	P_{mic}	-0.402**	0.420**	0.645**	0.659**	0.666**	0.557**	0.382**	0.196	0.510**
	细菌	-0.228*	0.135	0.033	0.006	-0.035	-0.042	-0.032	0.109	0.125
	真菌	-0.189	0.164	0.249*	0.158	-0.104	0.068	0.265*	-0.179	0.295**
	放线菌	0.081	-0.011	0.164	0.164	-0.089	0.037	0.220*	-0.274*	0.216
人工林	C_{mic}	0.677**	-0.115	0.793**	0.728**	-0.458**	-0.053	0.512**	-0.100	0.375**
	N_{mic}	0.613**	-0.048	0.732**	0.668**	-0.417**	-0.067	0.457**	-0.058	0.347**
	P_{mic}	0.617**	-0.039	0.756**	0.686**	-0.469**	-0.100	0.486**	-0.042	0.352**
	细菌	0.241*	-0.474**	0.264*	0.146	-0.274*	-0.102	0.368**	-0.276*	0.014
	真菌	-0.065	-0.041	-0.048	-0.034	0.293**	-0.038	-0.039	-0.034	-0.005
	放线菌	0.210	-0.226*	0.247*	0.190	-0.276*	0.076	0.247*	-0.158	0.000
次生林	C_{mic}	0.312**	0.109	0.303**	0.429**	0.373**	-0.175	0.387**	-0.046	-0.097
	N_{mic}	0.032	-0.143	0.152	0.247*	0.142	-0.158	0.019	-0.014	0.440**
	P_{mic}	-0.024	-0.133	0.084	0.148	0.085	-0.037	-0.066	-0.122	0.575**
	细菌	-0.243*	-0.049	-0.152	-0.209	-0.223*	0.191	-0.189	-0.030	0.011
	真菌	-0.311**	-0.168	-0.092	-0.179	-0.211	0.351**	-0.260*	-0.008	0.315**
	放线菌	0.034	0.071	0.038	0.033	0.046	0.471**	-0.010	-0.104	0.193
原生林	C_{mic}	0.322**	-0.628**	0.656**	-0.527**	0.604**	0.084	0.742**	0.404**	0.630**
	N_{mic}	0.315**	-0.515**	0.549**	-0.533**	0.517**	0.058	0.666**	0.351**	0.644**
	P_{mic}	-0.156	-0.235*	0.061	0.120	-0.048	-0.012	-0.013	0.136	-0.105
	细菌	0.200	-0.011	0.203	-0.289**	0.186	0.039	0.282*	0.093	0.279*
	真菌	0.108	-0.158	0.157	-0.382**	0.149	0.065	0.295**	0.059	0.233*
	放线菌	0.172	-0.314**	0.222*	-0.478**	0.189	-0.093	0.341**	0.112	0.303**

表5 土壤微生物与土壤养分典型相关系数的卡方检验

Table 5 Chi-square test of canonical correlation coefficient between soil microbe and soil nutrient

类型	典型向量	典型相关系数	特征根	卡方值	自由度	显著水平	累积贡献率(%)
农作区	1	0.990	0.981	961.168	54	0.000	44.50
	2	0.897	0.805	408.740	40	0.000	59.00
	3	0.760	0.578	179.801	28	0.000	69.88
	4	0.459	0.211	59.075	18	0.000	76.86
人工林	1	0.975	0.951	580.880	54	0.000	40.95
	2	0.716	0.513	157.672	40	0.000	54.05
	3	0.474	0.224	56.873	28	0.001	63.21
	4	0.308	0.095	21.338	18	0.263	71.91
次生林	1	0.987	0.975	830.793	54	0.000	28.77
	2	0.792	0.627	266.288	40	0.000	46.90
	3	0.571	0.326	115.371	28	0.000	60.49
	4	0.479	0.229	54.948	18	0.000	71.18
原生林	1	0.972	0.944	658.354	54	0.000	43.41
	2	0.732	0.536	217.042	40	0.000	56.83
	3	0.587	0.344	99.653	28	0.000	67.33
	4	0.408	0.166	35.086	18	0.009	74.64

生物特性中以 C_{mic}、N_{mic} 和 P_{mic} 的载荷量较大，土壤养分以水分、SOM、TN、TP 较大，说明人工林中土壤水分和全量养分主要影响土壤微生物量。

次生林土壤微生物和土壤养分的第一、二对典型相关系数分别为 0.987 和 0.792，均达到了极显著水平。土壤微生物特性以 C_{mic}、N_{mic} 和真菌数量的载荷量较大，土壤养分以 pH、SOM、TP 较大，表明次生林 pH、SOM、TP 主要影响土壤 C_{mic}、N_{mic} 和真菌。

原生林土壤微生物特性和土壤养分的第一、二对典型相关系数分别为 0.944 和 0.532，均达到了极显著水平。土壤微生物特性中 N_{mic}、P_{mic}、细菌数量的载荷量较大，土壤养分以 pH、TP、AN 较大，说明原生林土壤 pH、TP、AN 主要作用于 N_{mic}、P_{mic} 和细菌数量。综合以上变量分析可看出，4 类不同生态系统的典型变量分析与相关分析结果(表 4)基本一致。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 6 土壤微生物与土壤养分的前两对典型变量的构成

Table 6 Composition of the first two-pair canonical variables for soil microbe and soil nutrients

类型	典型变量
农作区	$U1 = -0.4394X_1 + 0.3736X_2 - 0.7049X_3 + 0.0097X_4 - 0.139X_5 + 0.1661X_6 + 0.0553X_7 + 0.0437X_8 - 0.343X_9$
	$V1 = -0.4076Y_1 - 0.1407Y_2 - 0.1947Y_3 - 0.1386Y_4 - 0.1217Y_5 - 0.0588Y_6$
	$U2 = -1.6526X_1 - 0.5921X_2 + 1.717X_3 + 0.077X_4 + 1.5889X_5 - 0.4687X_6 - 0.0593X_7 - 0.6486X_8 - 0.2392X_9$
	$V2 = 0.7277Y_1 + 0.834Y_2 + 0.4677Y_3 - 0.9672Y_4 - 0.7978Y_5 - 0.3475Y_6$
人工林	$U1 = -0.1737X_1 - 0.6392X_2 - 0.835X_3 + 0.2911X_4 + 0.2434X_5 - 0.0145X_6 - 0.0419X_7 + 0.0372X_8 + 0.1407X_9$
	$V1 = -1.9563Y_1 + 1.5242Y_2 - 0.3676Y_3 - 0.1299Y_4 - 0.1156Y_5 + 0.0386Y_6$
	$U2 = -0.7438X_1 - 1.3005X_2 - 0.0245X_3 - 1.0778X_4 + 3.6364X_5 - 0.504X_6 + 0.133X_7 - 0.339X_8 + 0.4968X_9$
	$V2 = -2.5971Y_1 + 3.1212Y_2 - 1.6811Y_3 + 0.5467Y_4 + 1.1126Y_5 - 0.2261Y_6$
次生林	$U1 = 0.8892X_1 - 0.1307X_2 - 0.0382X_3 + 0.1805X_4 + 0.2027X_5 - 0.1119X_6 + 0.0308X_7 - 0.1675X_8 + 0.1319X_9$
	$V1 = 0.8672Y_1 - 0.2219Y_2 + 0.3775Y_3 + 0.0829Y_4 + 0.0911Y_5 - 0.1576Y_6$
	$U2 = -0.2471X_1 - 0.0025X_2 - 1.2716X_3 - 0.6584X_4 + 0.9374X_5 + 0.9584X_6 + 2.6524X_7 + 0.2763X_8 - 2.6104X_9$
	$V2 = 2.761Y_1 - 1.3793Y_2 - 1.2699Y_3 + 0.0459Y_4 - 0.255Y_5 - 0.0376Y_6$
原生林	$U1 = 0.9235X_1 - 0.1432X_2 - 0.1221X_3 - 0.1453X_4 - 0.2108X_5 - 0.0772X_6 + 0.5264X_7 + 0.1311X_8 + 0.1028X_9$
	$V1 = -0.1861Y_1 + 0.401Y_2 + 0.3714Y_3 + 0.3014Y_4 + 0.167Y_5 + 0.0855Y_6$
	$U2 = -1.0972X_1 - 0.3279X_2 + 0.6943X_3 - 0.156X_4 + 1.1784X_5 - 0.1539X_6 + 1.1368X_7 - 0.2531X_8 - 1.0018X_9$
	$V2 = 3.2683Y_1 - 1.9488Y_2 - 0.6805Y_3 - 0.6117Y_4 - 0.2977Y_5 + 0.2807Y_6$

X_1: pH; X_2: 水分; X_3: 有机质; X_4: 全氮; X_5: 全磷; X_6: 全钾; X_7: 碱解氮; X_8: 速效磷; X_9: 速效钾; Y_1: C_{mic}; Y_2: N_{mic}; Y_3: P_{mic}; Y_4: 细菌数; Y_5: 真菌数; Y_6: 放线菌数。

3 讨 论

土壤是活的有机体,土壤微生物参与土壤矿物质的分解与转化,是影响土壤肥力的重要因素。生态系统中土壤理化性质发生变化是影响微生物活动的环境因素,造成微生物活性的显著差异,进而影响土壤养分的循环和转化(Hansen *et al.*, 2009)。本研究中喀斯特峰丛洼地原生林土壤中的微生物量显著高于其他生态系统,与魏亚伟等(2010)的研究结果一致;微生物种群数量以农作区、原生林为最高,一方面,农作区收获后的残余物以及原生林归还土壤大量的凋落物为微生物环境提供了丰富的碳源,同时保持了表层土壤水分含量,为微生物的生长提供优越的环境(鹿士杨等,2012);另一方面,可能由于农作区、原生林生态系统的表土结构较人工林和次生林生态系统更适合喀斯特土壤微生物的生存,能显著提高微生物的活性。喀斯特峰丛洼地土壤 C_{mic}、N_{mic} 相关性强,土壤微生物数量和生物量与土壤养分含量主要呈正相关,与靳正忠等(2009)研究结论一致,其中农作区表现的较为突出,可能是由于施肥、翻耕等人为干扰对土壤中细菌、真菌、放线菌产生影响(张成娥等,2001;邵宝林等,2006;张利青等,2012),加速了土壤微生物和土壤养分的相互作用。

土壤微生物与土壤养分关系密切,随着生态系统的演替进展,有机质、全氮和碱解氮的提高会加速微生物量碳、氮的积累(吴铁航和李振高,1995; Maithani *et al.*, 1996; Nishiyama *et al.*, 2001; Ralte *et al.*, 2005),土壤微生物量与潜在的土壤可利用氮之间存在着显著的正相关(刘玉杰等,2011)。本研究发现,喀斯特峰丛洼地生态系统从农作区、人工林、次生林到原生林的发展过程中微生物量碳、氮呈递增趋势;土壤养分与土壤微生物数量的关系不密切,但却是影响喀斯特峰丛洼地农作区、人工林、原生林土壤微生物量的重要因素,尤其是 SOM、TN、AN。C_{mic}、N_{mic} 均与 SOM、TN 和 AN 呈显著正相关,表明有机质是土壤养分的源和库,土壤微生物量可作为衡量土壤养分指标的敏感指标,而人工林除土壤养分外水分也是影响土壤微生物量的主要因子。次生林土壤微生物量与土壤养分因子间相关关系较弱,其主要影响因子可能是植被、地形等。典型相关分析表明,不同生态系统土壤微生物与土壤养分的耦合关系不同:农作区 C_{mic}、细菌和真菌与土壤 SOM、pH、TP 的相互作用最明显,尤以 SOM 和 C_{mic} 的关系最密切;人工林土壤水分和全量养分主要影响土壤微生物量;次生林土壤 pH、SOM、TP 主要影响土壤 C_{mic}、N_{mic} 和真菌;原生林土壤 pH、AN、TP 主要作用于 N_{mic}、P_{mic} 和细菌。由此可见,喀斯特峰丛洼地不同生态系统土壤微生物和土壤养分之间具有紧密的联系,土壤微生物生长有赖于土壤的肥力水平和环境状况,土壤微生物和土壤肥力之间相互促进,协同发展。因此,不同的生态系统应采取不同的

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

施肥管理措施，农作区应多施有机肥和氮肥，人工林应多施氮肥，次生林和原生林主要加强森林抚育管理，改善土壤微生物特性，促使土壤以及整个生态系统朝更高级的、健康的方向发展。

参考文献

蔡燕飞，廖宗文. 2002. 土壤微生物生态学研究方法进展. 土壤与环境，**11**(2)：167－171.

陈香碧，苏以荣，何寻阳，等. 2009. 喀斯特原生土壤与退化生态系统土壤细菌群落结构. 应用生态学报，**20**(4)：863－871.

何寻阳，王克林，于一尊，等. 2009. 岩溶区植被和季节对土壤微生物遗传多样性的影响. 生态学报，**29**(4)：1763－1769.

姜培坤，徐秋芳，俞益武. 2002. 土壤微生物量碳作为林地土壤肥力指标. 浙江林学院学报，**19**(1)：19－21.

靳正忠，雷加强，徐新文，等. 2009. 塔里木沙漠公路防护林土壤微生物生物量与土壤环境因子的关系. 应用生态学报，**20**(1)：51－57.

刘玉杰，王世杰，刘秀明，等. 2011. 茂兰保护区小生境土壤微生物活性研究. 地球与环境，(3)：71－76.

刘光崧. 1996. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法：土壤理化分析与剖面描述. 北京：中国标准出版社.

鹿士杨，彭晚霞，宋同清，等. 2012. 喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式的土壤微生物特性. 生态学报，**32**(8)：2390－2399.

彭晚霞，王克林，宋同清，等. 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**(2)：811－820.

彭晚霞，宋同清，曾馥平，等. 2010. 喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因子. 生态学报，**30**(24)：6787－6797.

邵宝林，龚国淑，张世熔，等. 2006. 横断山北部高山区不同生态条件下土壤微生物数量及其与生态因子的相关性. 生态学杂志，**25**(8)：885－890.

魏亚伟，苏以荣，陈香碧，等. 2010. 人为干扰对桂西北喀斯特生态系统土壤有机碳、氮、磷和微生物剖面分布的影响. 水土保持学报，**24**(3)：164－169.

吴金水，林启美，黄巧云，等. 2006. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京：气象出版社.

吴铁航，李振高. 1995. 土壤微生物在持续农业中的作用与应用前景. 土壤学进展，**23**(4)：29－36.

许家康. 2010. 广西年鉴. 南宁：广西年鉴社.

张成娥，杜社妮，白岗栓，等. 2001. 黄土塬区果园套种对土壤微生物及酶活性的影响. 土壤与环境，**10**(2)：121－123.

张利青，彭晚霞，宋同清，等. 2012. 云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量C、N、P空间分布. 生态学报，**32**(7)：2056－2065.

曾馥平，彭晚霞，宋同清，等. 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**(12)：5110－5119.

中国科学院南京土壤研究所. 1978. 土壤理化分析. 上海：上海科学技术出版社.

周丽霞，丁明懋. 2007. 土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用. 生物多样性，**15**(2)：162－171.

周 玮，周运超. 2010. 北盘江喀斯特峡谷区不同植被类型的土壤酶活性. 林业科学，**46**(1)：136－141.

Condit R. 1995. Research in large, long-term tropical forest plots. *Trends in Ecology & Evolution*, **10**: 18－22.

Devi NB, Yadava PS. 2006. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India. *Applied Soil Ecology*, **31**: 220－227.

Hansen K, Vesterdal L, Schmidt IK, *et al*. 2009. Litter fall and nutrient return in five tree species in a common garden experiment. *Forest Ecology and Management*, **257**: 2133－2144.

Harris JA. 2003. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration. *European Journal of Soil Science*, **54**: 801－808.

Maithani K, Tripathi RS, Arunachalam A, *et al*. 1996. Seasonal dynamics of microbial biomass C, N and P during regrowth of a disturbed subtropical humid forest in northeast India. *Applied Soil Ecology*, **4**: 31－37.

Nishiyama M, Sumikawa Y, Guan G, *et al*. 2001. Relationship between microbial biomass and extractable organic carbon content in volcanic and non-volcanic ash soil. *Applied Soil Ecology*, **17**: 183－187.

Ralte V, Pandey HN, Barik SK, *et al*. 2005. 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*, **28**: 163－172.

作者简介 卢成阳，男，1986年生，硕士，主要从事区域生态和森林生态研究。E-mail: ecolcy@163.com

责任编辑 魏中青

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net