

DOI: 10.5846/stxb201803260595

王静, 王冬梅, 任远, 王斌. 漓江河岸带不同水文环境土壤微生物与土壤养分的耦合关系. 生态学报, 2019, 39(8): - .

Wang J, Wang D M, Ren Y, Wang B. Coupling relationships between soil microbes and soil nutrients under different hydrologic conditions in the riparian zone of the Lijiang River. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): - .

漓江河岸带不同水文环境土壤微生物与土壤养分的耦合关系

王 静^{1,2}, 王冬梅^{1,*}, 任 远¹, 王 斌³

1 北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083

2 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541006

3 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 桂林 541006

摘要: 基于漓江河岸带典型地段内砾石滩、草地、灌草地和疏林地等 4 类水文环境梯度上的土壤样品分析, 探讨了漓江河岸带土壤养分、微生物数量及微生物量等的变化特征及耦合关系。结果表明土壤养分含量、土壤微生物数量及微生物量等在不同水文环境下均有显著差异。随着水淹时间的减少, 土壤含水量、pH 值、有效氮、有效磷和有效钾均呈先增后减的趋势, 最大值多出现在灌草地, 最小值多出现在砾石滩, 而土壤微生物总量、细菌、放线菌数量和微生物量也为先增后减趋势, 其数量或含量在灌草地最多, 砾石滩最少。简单相关分析表明漓江河岸带各微生物指标与土壤有效氮、有效磷及速效钾相关性较强, 与土壤全氮、全磷和全钾的相关性较弱。冗余分析表明土壤有效氮、有效磷和含水量是影响微生物总数、细菌数量、微生物量碳、微生物量氮和微生物量磷的重要因素, 而有机质和全氮是影响放线菌数量的重要因素。研究结果说明适当的水文干扰有利于河岸带土壤养分的积累, 对土壤微生物数量及其生物量也有显著促进作用; 土壤有机质和有效养分含量(有效氮、有效磷等)与微生物数量及微生物量关系密切, 其含量很大程度影响着微生物数量及其活性。在漓江河岸带生态保护和评估等研究过程中应充分考虑不同水文环境下的土壤微生物和养分的变化特征及耦合关系。

关键词: 土壤微生物; 微生物量; 土壤养分; 耦合关系; 河岸带; 漓江

Coupling relationships between soil microbes and soil nutrients under different hydrologic conditions in the riparian zone of the Lijiang River

WANG Jing^{1,2}, WANG Dongmei^{1,*}, REN Yuan¹, WANG Bin³

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China

3 Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China

Abstract: Based on the analysis of soil samples in four different hydrologic conditions of the Lijiang Riparian Zone, i.e., gravel zone, grass zone, shrub-grass zone, and tree zone, this study explored the variation characteristics and relationships among soil nutrients, microbe quantity, and microbial biomass. The results showed significant differences in soil nutrients and microbes among various hydrologic conditions. As the submersion duration decreased, the value of soil water content (SWC), pH, available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) increased and then decreased, the highest value usually appeared in the shrub-grass zone, whereas the lowest was in the gravel zone. The total

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAC16B03)

收稿日期: 2018-03-26; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dmwang@126.com

amount of soil microbes, bacteria, actinomycetes, and microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus (MBC, MBN, MBP) also exhibited an increasing-decreasing trend, and reached a maximum in the shrub-grass zone and a minimum in the gravel zone. Simple correlation analysis showed that various indexes of microorganisms were closely related to AN, AP, and AK and had a loose relationship with total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total potassium (TK). Redundancy analysis revealed that AN, AP, and SWC were important factors affecting the total amount of microbe, bacteria, and microbial biomass C, N, and P, and soil organic matter (SOM) and TN were important factors affecting the amount of actinomycetes. The above results suggested that appropriate hydrologic disturbance was beneficial to the soil nutrient accumulation, and also had a positive impact on the soil microbes and their biomass. The SOM and available nutrients (AN, AP) were closed to soil microbes, and their contents greatly affected the quantity and activity of soil microbes. In the research process of ecological protection and assessment of the Lijiang riparian zone, the variation characteristics and relationship between soil microbes and nutrients under different hydrological conditions must be considered.

Key Words: soil microbe; microbial biomass; soil nutrient; coupling relation; riparian zone; Lijiang River

河岸带是河流生态系统和陆地生态系统的关键过渡地带^[1],具有明显的边缘效应和较高的生物多样性,是地球上最具复杂、多样性最高和动态的生态系统之一^[2-3],它在河溪生物多样性维护、污染物吸收和过滤^[4]以及河流水质保护等方面有重要的作用^[5]。水文地貌过程(洪水动态)和生态学过程(生物学演替)创造了河岸带连续变化的水文环境梯度—从靠近河道较低处的砾石滩,到远方高处茂密的河岸森林。这些水文梯度在水淹频率、群落组成(植被和微生物等)、演替阶段、土壤理化性质和养分循环等方面均有显著差异^[6-7]。因此,在这种变化的水文梯度下土壤的理化性质及微生物特性变化规律及它们之间的耦合关系是一个重要的生态学问题,对了解河岸带土壤质量现状及理解河岸带生态系统结构及功能等具有重要意义。

河岸带土壤是植被生长的介质,其质量直接决定了植被生长状况,从而影响到河岸带的结构和功能,而土壤微生物作为土壤的重要组成部分,参与了大部分土壤生态过程,如元素地球化学循环、有机物质分解转化、污染物净化等,对土壤健康状况的维持和改善有很大作用^[8-9],因此,河岸带土壤微生物对河岸带的结构和功能也有很大程度的影响。土壤微生物不仅与土壤营养物质分解转化密切相关,还能将不易被植物吸收利用的难溶性无机物变为可溶性物质,从而提高土壤肥力水平。因此,微生物是研究和评价土壤质量和生态系统功能变化的敏感指标^[10-11]。土壤微生物量是土壤养分“库”和“源”,虽只占土壤有机质的很小部分,却在土壤有机质和碳、氮、磷等养分循环转化过程中起重要作用。研究土壤微生物生物量对了解和评价土壤肥力及质量状况也有重要意义^[12]。许多研究学者对河岸带不同植物群落下^[13-14]、不同土地利用方式^[15]、不同受扰区^[16]、不同盐碱土壤下^[17]微生物特性进行了研究,并探讨了土壤微生物特性与土壤养分之间的关系,而在漓江河岸带的研究主要集中在植被多样性与土壤特征^[18]、植被配置^[19-20]、植物根系分布^[21-22]及护岸措施^[23]等方面,有关不同水文环境下的土壤微生物及其与土壤养分因子的相互关系的研究鲜有报道。

广西桂林市是世界著名的旅游城市 and 历史文化名城,千百年来享有“桂林山水甲天下”的美誉,漓江则是其美的灵魂。然而,近年来随着人口数量激增,工农业迅速发展,旅游业的开发力度的加强,漓江流域出现了一系列严重的生态环境问题,主要表现在季节性洪涝灾害频繁出现、河水自净能力下降、水资源污染严重、河岸植被退化、河床裸露、湿地萎缩等^[24],因此急需对其河岸生态系统进行恢复和重建。本文以漓江河岸带为研究对象,通过对土壤主要养分因子、微生物数量及微生物量进行分析,揭示河岸带不同水文环境微生物数量及微生物量的变化规律以及它们与土壤养分因子的耦合关系,以期为研究和改善河岸带土壤质量现状提供理论依据,同时也对退化河岸生态系统恢复和重建工作有一定的参考价值。

1 材料与方法

1.1 样地概况

漓江流域位于广西壮族自治区的东北部(110°18′—110°18′E、25°59′—23°23′N),属珠江流域,流域长度

为 214 km,面积为 12285 km²^[25]。漓江流域地处亚热带季风湿润气候区,年平均温度为 17.8—19.1℃,年均降雨量为 1814—1941 mm,年均蒸发量为 1377—1857 mm,雨热同期,年径流量十分丰富,但极不均匀,3 到 8 月份为洪水季节,径流量占全年的 80%^[26]。漓江流域属喀斯特地貌,大量碳酸盐岩出露,其中桂林到阳朔河段为最典型的岩溶发育区,河道分布沙石。土壤类型为山地红壤且砾石含量很高,砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 73.41%—86.65%、6.17%—13.98%、5.40%—11.00%。乔木主要有枫杨(*Pterocarya tonkinensis*)、阴香(*Cinnamomum burmannii*)、马尾松(*pinusmassoniana*)、毛竹(*Phyllostachys heterocycla* cv.*Gracilis*)等。灌木主要有水杨梅(*Geum aleppicum*)、黄荆(*Vitex negundo*)等。草本主要有狗牙根(*Cynodon dactylon*)、水蓼(*Polygonum hydropiper*)、葎草(*Humulus scandens*)等^[18]。

1.2 试验设计和采样

选取漓江桂林到阳朔段的左侧河岸带为研究区域,分别设置 10 个人类干扰较少河岸带样地。每个样地根据水淹时间、相对高程(相对于水平面)和植被类型^[18]划分为砾石滩、草地、灌草地和疏林地 4 种水文环境梯度,并进行土壤样品的采集。其中砾石滩年均水淹时间大于 7 个月,相对高程小于 0.6 m,几乎无植被覆盖;疏林地年均淹没时间小于 2 个月,相对高程大于 2 m,植被类型为林地。样地基本特征见表 1。

表 1 样地基本特征

Table 1 Basic characters of sample plots

样地编号 No.	经纬度 Latitude and longitude	砾石滩 Gravel zone		草地 grass zone		灌草地 shrub-grass zone		疏林地 Trees zone	
		SD/月	RE/m	SD/月	RE/m	SD/月	RE/m	SD/月	RE/m
1	25°15'48"N 110°17'53"E	9	0.3	6	1	3	1.5	1.5	2.5
2	25°13'54"N 110°19'01"E	8	0.4	6	1	3	1.6	1.8	2.6
3	25°13'21"N 110°20'02"E	9	0.4	7	0.9	4	1.5	2	2.4
4	25°12'05"N 110°21'08"E	7	0.3	5	1	3	1.7	1	2.6
5	25°11'09"N 110°22'57"E	8	0.5	6	1.1	3	1.6	1.5	2.4
6	25°06'54"N 110°25'55"E	8	0.6	6	1.5	4	2.2	1.6	3.1
7	25°06'22"N 110°25'25"E	9	0.5	7	0.9	4	1.4	1.5	2.3
8	24°59'48"N 110°27'31"E	8	0.3	6	0.6	4	1.6	1.8	2.3
9	24°55'20"N 110°30'42"E	7	0.3	5	0.9	3	1.8	1.5	2.4
10	24°46'07"N 110°30'20"E	9	0.4	6	1	4	1.5	1.5	2.1

SD:水淹时间,Submersion duration;RE:Relative elevation,相对高程

于 2014 年 9 月(避开雨季)每种水文环境梯度各选择 3 块 10 m×10 m 地块采集土样,每个地块沿“S”形采集 5—8 处的土壤并混合为一个土样,采土深度为 0—15 cm,共取土壤样品 120 个。土壤放置于便携式冰箱内并运送到实验室。在实验室内,对每个土样进行过筛(2 mm)并混匀,去除可见根系和石头等。再采用四分法将每个土样分为两份,一份室内风干后用于分析土壤理化指标,一份保存在 4℃ 冰箱内用于土壤微生物数量和微生物量的测定。

1.3 数据测定及分析

土壤养分的测定^[27]:土壤含水量的测定采用烘干法(105℃),土壤 pH 值采用电位法,有机质(SOM,g/kg)采用重铬酸钾氧化法,全氮(TN,g/kg)采用凯氏定氮法,全磷(TP,g/kg)采用钼锑抗比色法,全钾(TK,g/kg)采用火焰光度计法,有效氮(AN,mg/kg)采用碱解扩散法,有效磷(AP,mg/kg)采用碳酸氢钠浸提后钼锑抗比色法,速效钾(AK,mg/kg)采用醋酸铵提取和火焰光度法测定。每个土样测 3 次。

土壤微生物三大类群(细菌、放线菌和真菌)数量的测定均采用稀释平板计数法^[28]。所用培养基为:细菌为牛肉膏蛋白胨培养基,放线菌为改良高氏 1 号(苯酚 500 mg/L)培养基,真菌为孟加拉红-链霉素(链霉素 30 mg/L)培养基。结果计算方法:每克干土所含的微生物菌落数(cfu/g)=同一稀释度 N 次重复的菌落平均数×稀释倍数。

土壤微生物量碳 (MBC)、土壤微生物量氮 (MBN) 和土壤微生物量磷 (MBP) 采用氯仿熏蒸浸提法测定^[29], 熏蒸后提取液分别由日本岛津 TOC-5000A 有机碳分析仪、美国哈希 QC8500 型流动注射 (FIA) 分析仪和美国 Thermo Fisher Evolution 300 紫外-可见分光光度计测定。

1.4 统计分析

使用 Microsoft Office Excel 2007 软件进行数据基本处理, 使用 SPSS 16.0 对数据进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 和 Pearson 相关分析, 使用 R 语言^[30] 对土壤微生物指标和土壤养分指标进行冗余分析 Redundancy Analysis (RDA)。

2 结果与分析

2.1 不同水文环境土壤养分的变化

漓江河岸带不同水文环境土壤理化性质如表 2 所示, 随着水淹时间的减少, 土壤含水量、pH 值、有效氮、有效磷和速效钾均呈先增后减的趋势, 土壤含水量、有效氮、有效磷和速效钾含量在灌草地最高, 分别为 24.01%、109.56 mg/kg、11.84 mg/kg、71.77 mg/kg, 在砾石滩最低, 分别为 13.52%、41.72 mg/kg、6.01 mg/kg 和 30.78 mg/kg; 土壤 pH 值在草地最高, 为 7.71, 疏林地最低, 为 6.99; 有机质呈增加趋势, 在疏林地最高, 为 32.68 g/kg, 砾石滩最低为 23.72 g/kg。全氮在草地最高, 为 1.40 g/kg, 在砾石滩最低, 为 0.93 g/kg。不同水文环境梯度之间的土壤全磷含量无显著差异。总体上看, 土壤养分含量最大值多出现在灌草地和草地, 养分最小值多出现在砾石滩和疏林地。

表 2 不同水文环境梯度土壤养分的方差分析

Table 2 Variance analysis of soil nutrient factors from different hydrologic gradients

土壤养分 Soil nutrient factors	水文环境 Hydrologic conditions			
	砾石滩 Gravel zone	草地 Grass zone	灌草地 Shrub-grass zone	疏林地 Trees zone
土壤含水量 SWC/ %	13.52±7.11a	21.43±10.13b	24.01±8.83b	16.86±5.12a
pH	7.32±0.33b	7.71±0.46c	7.45±0.23b	6.99±0.38a
有机质 SOM/ (g/kg)	23.72±9.50a	26.38±11.23a	26.76±8.45a	32.68±6.27b
全氮 TN/ (g/kg)	0.93±0.74a	1.40±0.53b	1.22±0.43ab	1.35±0.85b
全磷 TP/ (g/kg)	0.54±0.17a	0.60±0.17a	0.54±0.10a	0.57±0.14a
全钾 TK/ (g/kg)	89.68±22.98bc	76.92±7.56a	92.71±17.33c	83.39±12.33ab
有效氮 AN/ (mg/kg)	41.72±37.84a	81.92±52.98b	109.56±40.14c	100.00±42.64c
有效磷 AP/ (mg/kg)	6.01±4.06a	10.71±4.12bc	11.84±4.67c	8.86±5.55b
速效钾 AK/ (mg/kg)	30.78±3.28a	44.53±4.49b	71.77±7.28d	57.25±4.67c

SWC: 土壤含水量, Soil water content; SOM: 有机质, Soil organic matter; TN: 全氮, Total nitrogen; TP: 全磷, Total phosphorus; TK: 全钾, Total potassium; AN: 有效氮, Available nitrogen; AP: 有效磷, Available phosphorus; AK: 有效钾, Available potassium; 表中 4 种水文环境梯度的土壤数据为 10 个样地的均值和标准差, 不同小写字母表示不同水文环境梯度差异显著 ($P<0.05$)

2.2 不同水文环境土壤微生物数量的变化

对漓江河岸带土壤三大类群微生物数量进行了测定, 种群数量特征见图 1。在漓江河岸带土壤中, 细菌数量占绝对优势, 占微生物总数的 79.75%—86.35%; 其次是放线菌, 占 10.31%—13.40%; 真菌最少, 仅占 3.34%—7.82%。不同水文环境下土壤微生物种群数量及组成不同。随着水淹时间的减少, 微生物总数、细菌和放线菌数量的变化趋势相同, 均为先增后减趋势。灌草地微生物总数、细菌和放线菌数量最多, 分别为 48.57×10^6 、 40.30×10^6 和 6.02×10^6 cfu/g; 而砾石滩最少, 分别为 21.98×10^6 、 18.29×10^6 和 2.94×10^6 cfu/g。真菌数量随水淹时间的减少为上升趋势, 疏林地最多, 为 2.84×10^6 cfu/g, 砾石滩最少, 仅为 0.74×10^6 cfu/g。可见微生物总数、细菌和放线菌数量最大值出现在灌草地, 最小值出现在砾石滩, 而真菌数量最大值出现在疏林地和灌草地, 最小值出现在砾石滩。

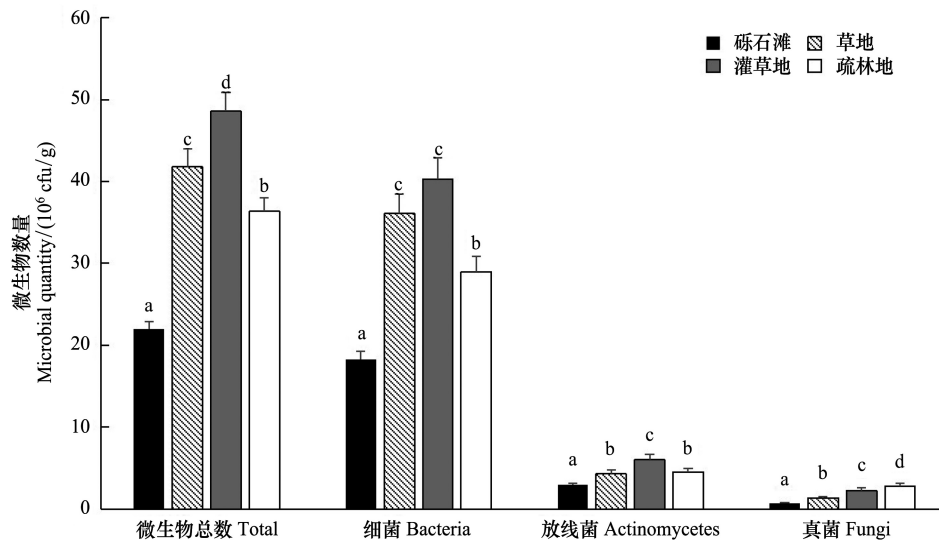


图1 不同水文环境梯度土壤微生物数量的方差分析

Fig.1 Variance analysis of soil microbial number from different hydrologic gradients

图中4种水文环境梯度的土壤数据为10个样地的均值和标准差,不同小写字母表示不同水文环境梯度差异显著($P < 0.05$)

2.3 不同水文环境土壤微生物量的变化

漓江河岸带不同水文环境下土壤微生物量不同。由图2可以看出,随着水淹时间的减少,MBC、MBN和MBP的变化趋势均为先升高后降低,MBC和MBN在灌草地最高,分别为81.92 mg/kg和59.51 mg/kg,在砾石滩最低,分别为22.19 mg/kg和18.71 mg/kg,而MBP在草地最高为12.00 mg/kg,在砾石滩最低为3.40 mg/kg。以上结果得出:漓江河岸带土壤微生物量各个指标(MBC、MBN和MBP)最大值多出现在灌草地,最小值多出现在砾石滩。

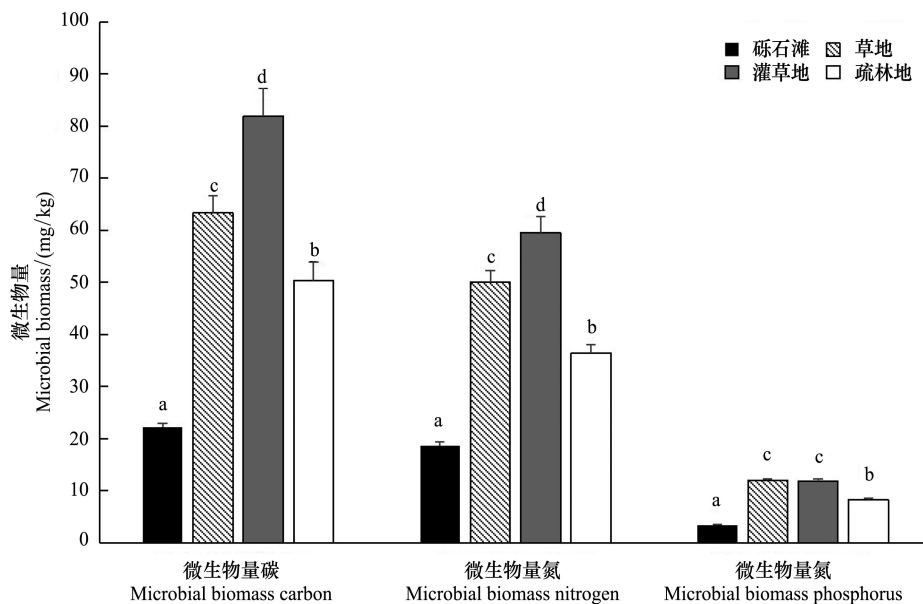


图2 不同水文环境梯度土壤微生物量的方差分析

Fig.2 Variance analysis of soil microbial biomass from different hydrologic gradients

MBC:微生物量碳, Microbial biomass carbon; MBN:微生物量氮, Microbial biomass nitrogen; MBP:微生物量磷, Microbial biomass phosphorus

2.4 土壤微生物及其与土壤养分之间的相关分析

漓江河岸带土壤微生物与土壤养分的相关性分析结果如表 3 所示。土壤细菌、真菌数量与土壤有机质、有效氮、有效磷和速效钾均呈极显著正相关,而放线菌与有机质、全氮和全磷呈显著负相关,与全钾和有效磷为极显著正相关。土壤 MBC、MBN 和 MBP 与土壤含水量、pH 值、有效氮、有效磷和速效钾均为极显著正相关关系。相对而言,漓江河岸带各微生物指标与土壤有效氮、有效磷及速效钾相关性较强,与土壤全氮、全磷和全钾的相关性较弱。

表 4 土壤微生物特征指标之间的相关性分析表明,细菌和放线菌呈极显著负相关,和真菌呈极显著正相关;放线菌和真菌为极显著正相关。细菌、放线菌和真菌均和微生物量呈极显著正相关。MBC、MBN 和 MBP 两两之间均为极显著正相关,且 MBC 和 MBN 相关系数最大,为 0.916。可见,本研究区域不同土壤微生物数量和微生物量等微生物学指标相互之间关系密切,且与土壤有效养分因子相关性显著。说明漓江河岸带土壤微生物数量及其微生物量与土壤有效养分含量关系密切,它们之间具有协同效应,可作为评价土壤养分有效性的指标。

表 3 土壤微生物与土壤养分间的相关分析

Table 3 Correlation between soil nutrient factors and soil microbe

土壤微生物指标 Soil microbial properties	含水量 SWC	pH	有机质 SOM	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	有效氮 AN	有效磷 AP	速效钾 AK
细菌 Bacteria	0.244 **	0.145 *	0.447 **	0.463 **	0.115	-0.249 **	0.375 **	0.315 **	0.343 **
放线菌 Actinomycetes	0.120	0.082	-0.339 **	-0.358 **	-0.158 *	0.236 **	0.115	0.176 **	0.043
真菌 Fungi	-0.0003	-0.07	0.176 **	0.006	0.155 *	0.091	0.516 **	0.401 **	0.211 **
微生物量碳 MBC	0.422 **	0.271 **	0.054	0.123	-0.101	-0.085	0.241 **	0.234 **	0.276 **
微生物量氮 MBN	0.306 **	0.359 **	0.023	0.116	-0.098	-0.145 *	0.207 **	0.248 **	0.191 **
微生物量磷 MBP	0.335 **	0.283 **	0.014	0.09	0.171 **	0.057	0.337 **	0.394 **	0.294 **

MBC:微生物量碳, Microbial biomass carbon; MBN:微生物量氮, Microbial biomass nitrogen; MBP:微生物量磷, Microbial biomass phosphorus; 下同。数据为 Pearson 相关系数, * 表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)上极显著相关

表 4 土壤微生物之间的相关分析

Table 4 Correlation among soil microbial properties

土壤微生物指标 Soil microbial properties	细菌 Bacteria	放线菌 Actinomycetes	真菌 Fungi	微生物量碳 MBC	微生物量氮 MBN	微生物量磷 MBP
细菌 Bacteria	1					
放线菌 Actinomycetes	-0.249 **	1				
真菌 Fungi	0.292 **	0.279 **	1			
微生物量碳 MBC	0.506 **	0.314 **	0.363 **	1		
微生物量氮 MBN	0.537 **	0.336 **	0.363 **	0.916 **	1	
微生物量磷 MBP	0.458 **	0.335 **	0.310 **	0.620 **	0.648 **	1

2.5 土壤微生物与土壤养分之间的冗余分析

漓江河岸带土壤微生物与土壤养分之间的冗余分析(RDA)结果如图 3 所示。做“向前选择”检验,剔除掉无关的土壤养分指标得出:有效氮、pH、全氮、含水量、有机质、全磷和有效磷对土壤微生物有显著影响。这些土壤养分变量可解释微生物变异的 31.2%,其中 RDA1 轴占可解释部分的 61.4%,RDA2 轴占 19.8%。RDA1 轴(大部分被有效氮、有效磷和含水量所解释)与微生物总量、细菌数量、MBC、MBN 和 MBP 有极显著相关性,而 RDA2 轴(大部分被有机质和全氮所解释)与放线菌数量有极显著相关性。因此可得出,土壤有效氮、有效磷和含水量是影响微生物总数、细菌数量、MBC、MBN 和 MBP 的重要因素,而有机质和全氮是影响放线菌数量的重要因素。

3 讨论

3.1 土壤微生物数量及其生物量变化特征

漓江河岸带土壤三大微生物类群数量中细菌数量最多,放线菌次之,真菌最少,与大多数土壤中三大类群微生物数量分布情况相同。细菌、真菌和放线菌在土壤动植物残体分解过程中起到不同的作用,同时,对环境的偏好也有所不同,例如,细菌和放线菌喜中性和微碱性的土壤环境,而真菌适合生长在酸性条件下的土壤^[31]。漓江河岸带地处喀斯特地貌,土壤中性偏碱(pH 值为 6.99—7.71),所以细菌和放线菌数量最多,尤其是细菌数量远远大于其他几种微生物数量,说明细菌的生存繁殖力、竞争力、抗干扰力以及分解养分的能力要强于其他类群。放线菌和真菌的数量不及细菌,但其绝对数量也较多,反应其对于河岸带土壤的物质养分循环和系统稳定性也具有一定的作用。本研究发现漓江河岸带微生物数量(细菌: 18.29×10^6 — 40.30×10^6 ,放线菌: 2.94×10^6 — 6.02×10^6 ,真菌: 7.4×10^5 — 28.4×10^5 cfu/g)与其他喀斯特或非喀斯特区域微生物数量范围相比并无明显差异,例如会仙喀斯特溶洞湿地系统内土壤细菌、放线菌和真菌数量分别为 6.1×10^6 — 43.60×10^6 、 1.44×10^6 — 2.65×10^6 、 2.92×10^4 — 6.52×10^4 cfu/g^[32],岩质海岸防护林细菌、放线菌和真菌数量分别为 6.98×10^6 — 52.89×10^6 、 0.59×10^6 — 6.27×10^6 、 2.11×10^5 — 20.23×10^5 cfu/g^[33]。

一般情况下,微生物量碳(MBC)占土壤有机碳的 1%—4%^[34],而微生物量氮(MBN)占土壤全氮的 2%—6%^[35]甚至更高^[36]。但也有学者认为土壤中的微生物量碳、氮含量变化范围很大,极高或极低的生物量值均有可能存在,并不是土壤固定的特征^[37]。本研究结果发现漓江河岸带土壤 MBC 含量很低,均值为 54.44 mg/kg,其结果要远远低于其他喀斯特峰丛洼地土壤^[38-39],其 MBC 含量均值分别为 403.48 mg/kg、766.65 mg/kg。分析认为存在这种巨大差距的原因在于,刘艳 等和徐广平 等研究的峰丛洼地土壤黏粒含量及有机质均高于漓江河岸带土壤。其土壤黏粒含量均值都在 45%左右,而漓江河岸带土壤黏粒含量均值仅为 8.70%。一些研究结果显示,土壤质地中较细的颗粒相较于粗颗粒能保存更多的有机物^[40-42]。细粒级土壤中的微生物量碳、氮的比例也要高于粗质地土壤^[37, 43]。漓江水流湍急,水位上升迅速,对河岸产生了强烈而频繁的冲刷造成了河岸土壤砾石含量很高而无法保存更多的有机物质,再加上该区域植被分布较少,凋落物、根系以及土壤腐殖质等也较为缺乏,土壤肥力相对贫瘠,这些因素都是导致土壤微生物量碳含量偏低的原因。

漓江河岸带土壤微生物总数、细菌和放线菌数量以及微生物量(MBC、MBN 和 MBP)随着水淹时间的减少呈先增后减趋势,在灌草地最高,其次是草地,再次为疏林地,砾石滩最低。不同水文环境梯度土壤结构、养分含量及通气透水性不同,因而影响到土壤微生物数量及活性。灌草地和草地植被多样且生物量较大,凋落物非常丰富使其土壤养分含量较高,再加上河水影响(洪水冲刷、淹没和沉积)带来的死亡动植物残体滞留,待它们腐败之后也会进一步增加该区域的土壤养分,较高的土壤养分含量有利于土壤微生物生存及数量和活性的提高;另外,灌草地和草地水淹时间相对适中,土壤的通气透水性较好,也有利于微生物生存及活动。Bertrand 等^[44]的中度干扰假说也认为中等程度的干扰能维持高水平的生物多样性。砾石滩几乎无植被分布,水淹时间最长,相对高程最低,因此,受到河水影响的频率和强度也最大,土壤侵蚀严重且部分土壤养分被河

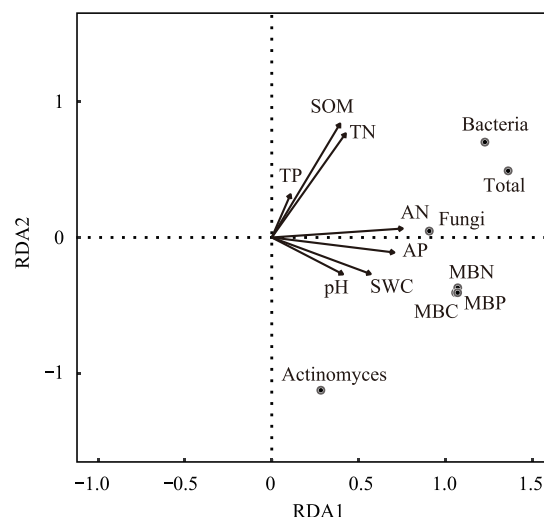


图3 土壤微生物与土壤养分之间的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis among soil microorganisms and soil nutrients

SWC: 土壤含水量, Soil water content; SOM: 有机质, Soil organic matter; TN: 全氮, Total nitrogen; TP: 全磷, Total phosphorus; AN: 有效氮, Available nitrogen; AP: 有效磷, Available phosphorus; Total: 微生物总数; Bacteria: 细菌; Actinomycetes: 放线菌; Fungi: 真菌

水冲走,贫瘠的土壤和厌氧环境不易微生物生存和繁殖,所以微生物数量及活性最低;疏林地靠近陆地,虽然植被丰富,但是水淹时间最短且相对高程最高,河水对其影响强度最小,土壤养分来源绝大部分依靠植物凋落物而无河水的输入,因此土壤微生物数量及活性略低于灌草地和草地。

3.2 土壤微生物与土壤养分之间的关系

土壤有机质、氮、磷等是微生物生存活动的限制性养分元素,微生物的一切生命活动都需要土壤养分的支持,而土壤微生物活动对土壤结构的形成和养分元素的转化有密切的关系,因此土壤养分与微生物数量关系十分密切,土壤养分含量可直接影响土壤微生物数量及其活性^[45-46]。土壤有机质、全氮和有效氮的提高会促进微生物量碳氮的积累^[47-48],土壤微生物量与土壤可利用氮之间有极显著正相关关系^[49]。本研究发现漓江河岸带随着水淹时间的减少土壤细菌、放线菌和微生物量(MBC、MBN、MBP)与土壤有效养分(AN、AP、AK)变化规律相同,均呈现先增后减的趋势;相关性分析得出微生物数量及微生物量和土壤全效养分含量(TN、TP、TK)的关系不密切,但却和土壤有效养分(AN、AP、AK)的相关性较大,与卢成阳等(2013)研究结果一致^[50],表明土壤微生物数量可指示土壤有效养分含量水平,微生物生物量也可作为判断土壤有效养分含量高低的敏感指标,是土壤有效养分的源和库。土壤微生物与土壤养分之间的冗余分析也表明,土壤有效氮、有效磷和含水量是影响微生物总数、细菌数量、MBC、MBN和MBP的重要因素,而有机质和全氮是影响放线菌数量的重要因素。由此可见,漓江河岸带土壤有机质和有效养分含量(AN、AP等)与微生物数量及微生物量有紧密联系,土壤微生物的活性有赖于土壤有效养分水平及环境状况,土壤微生物与土壤有效养分之间相互促进,协同发展。因此,漓江河岸生态系统在进行土壤或植被恢复过程中应充分考虑土壤养分与微生物的变化特征及耦合关系,采取措施控制土壤有机质、有效氮和有效磷含量,改善土壤养分有效性及微生物特性,使得河岸带生态系统朝更健康、更高级的方向发展。

参考文献(References):

- [1] Naiman R J, Décamps H. The ecology of interface; riparian zones. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28: 621-658.
- [2] Gregory S V, Swanson F J, McKee W A, Cummins K W. An ecosystem perspective of riparian zone. *BioScience*, 1991, 41(8): 540-551.
- [3] Malanson G P. *Riparian landscapes*. New York: Cambridge University Press, 1993: 1-10.
- [4] 钱进,王超,王沛芳,侯俊. 河湖滨岸缓冲带净污机理及适宜宽度研究进展. *水科学进展*, 2009, 20(1): 139-144.
- [5] 饶良懿,崔建国. 河岸植被缓冲带生态水文功能研究进展. *中国水土保持科学*, 2008, 6(4): 121-128.
- [6] Naiman R J, Bechtold J S, Drake D C, Latterell J J, O'Keefe T C, Balian E V. Origins, patterns, and importance of heterogeneity in riparian systems//Lovett G M, Turner M G, Jones C G, Weathers K C, eds. *Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes*. New York: Springer, 2005: 279-309.
- [7] Samaritani E, Shrestha J, Fournier B, Frossard E, Gillet F, Guenet C, Niklaus P A, Pasquale N, Tockner K, Mitchell E A D, Luster J. Heterogeneity of soil carbon pools and fluxes in a channelized and a restored floodplain section (Thur River, Switzerland). *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(6): 1757-1769.
- [8] Douerelo I, Goulder R, Lillie M. Soil microbial community response to land-management and depth, related to the degradation of organic matter in English wetlands: implications for the *in situ* preservation of archaeological remains. *Applied Soil Ecology*, 2010, 44(3): 219-227.
- [9] Fierer N, Schimel J P, Holden P A. Variations in microbial community composition through two soil depth profiles. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(1): 167-176.
- [10] 曹慧,孙辉,杨浩,孙波,赵其国. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(1): 105-109.
- [11] 杨万勤,王开运. 森林土壤酶的研究进展. *林业科学*, 2004, 40(2): 152-159.
- [12] 周丽霞,丁明懋. 土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用. *生物多样性*, 2007, 15(2): 162-171.
- [13] 吕瑞恒,周正立,于军,梁继业,葛瑞威,王夏楠. 和田河上游不同植物群落土壤理化性质及酶活性分析. *林业科学研究*, 2016, 29(1): 117-123.
- [14] 孔涛,吴祥云,赵雪淞,刘民,黄静,张丹. 浑河上游河岸带土壤微生物数量及酶活性特征. *水土保持通报*, 2014, 34(1): 123-128.
- [15] 杨文彬,耿玉清,王冬梅. 漓江水陆交错带不同植被类型的土壤酶活性. *生态学报*, 2015, 35(14): 4604-4612.
- [16] 李冬林. 秦淮河河岸带土壤主要生物学与生态学特性研究[D]. 南京:南京林业大学,2008.
- [17] 牛世全,杨建文,胡磊,景彩虹,达文燕,杨婷婷,李君锋,姚健. 河西走廊春季不同盐碱土壤中微生物数量、酶活性与理化因子的关系. *微生物学通报*, 2012, 39(3): 416-427.
- [18] 李扬,王冬梅,信忠保. 漓江水陆交错带植被与土壤空间分异规律. *农业工程学报*, 2013, 29(6): 121-128.
- [19] 任远,王冬梅,信忠保. 漓江流域水陆交错带植被配置型式分类及生态特征. *生态学报*, 2014, 34(15): 4423-4434.

- [20] 信忠保, 肖玉玲, 王冬梅, 李扬, 任远, 李青山. 广西桂林漓江河岸带植被配置类型与退化机制研究. 生态科学, 2014, 33(4): 631-641.
- [21] 李青山, 王冬梅, 信忠保, 李扬, 任远. 漓江水陆交错带典型立地根系分布与土壤性质的关系. 生态学报, 2014, 34(8): 2003-2011.
- [22] 李青山, 王冬梅, 信忠保, 李扬, 任远. 漓江水陆交错带典型灌木群落根系分布与土壤养分的关系. 生态学报, 2015, 35(15): 5104-5109.
- [23] 周思思, 王冬梅, 谭会国. 漓江桂林—阳朔段不同护岸措施的功能对比评价. 中国水土保持科学, 2015, 13(4): 58-66.
- [24] 黄伟军, 刘秀珍, 蔡德所. 漓江水生态系统问题研究. 生态经济, 2007, (3): 131-134, 159-159.
- [25] 刘金荣, 冯红, 俞秀兰, 宋桂金, 叶青. 历史上漓江(桂江)水系名称的变化浅议. 中国岩溶, 2003, 22(1): 77-82.
- [26] 黄宗万, 陈余道, 蒋亚萍, 程亚平. 漓江流域水资源形势分析. 广西科学院学报, 2005, 21(1): 56-60.
- [27] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 62-93.
- [28] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 农业出版社, 1986: 102-287.
- [29] 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.
- [30] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL. [2018]. <https://www.R-project.org/>.
- [31] 王少昆, 赵学勇, 左小安, 郭铁瑞, 李玉强, 曲浩. 科尔沁沙质草甸土壤微生物数量的垂直分布及季节动态. 干旱区地理, 2009, 32(4): 610-615.
- [32] 靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富. 起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较. 环境科学, 2016, 37(1): 335-341.
- [33] 胡海波, 张金池, 高智慧, 陈顺伟, 臧廷亮. 岩质海岸防护林土壤微生物数量及其与酶活性和理化性质的关系. 林业科学研究, 2002, 15(1): 88-95.
- [34] Jenkinson D S, Ladd J N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover//Paul E A, Ladd J N, eds. Soil Biochemistry. New York: Marcel Dekker, 1981: 415-471.
- [35] Brookes P C, Landman A, Pruden G, Jenkinson D S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. Soil Biology and Biochemistry, 1985, 17(6): 837-842.
- [36] Azam F, Yousaf M, Hussain F, Malik K A. Determination of biomass N in some agricultural soils of Punjab, Pakistan. Plant and Soil, 1989, 113: 223-228.
- [37] Hassink J. Effect of soil texture on the size of the microbial biomass and on the amount of C and N mineralized per unit of microbial biomass in dutch grassland soils. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(11): 1573-1581.
- [38] 刘艳, 宋同清, 蔡德所, 曾馥平, 彭晚霞, 杜虎, 刘扬. 抛荒土地不同处理及利用方式对喀斯特地区土壤微生物的影响. 农业工程学报, 2013, 29(23): 202-210.
- [39] 徐广平, 何成新, 张德楠, 赵志国, 陆树华, 姚月锋, 黄玉清. 桂西南岩溶山地不同土地利用方式土壤微生物量及其活性特征. 广西植物, 2013, 33(3): 331-337.
- [40] Bechtold J S, Naiman R J. Soil texture and nitrogen mineralization potential across a riparian toposequence in a semi-arid savanna. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(6): 1325-1333.
- [41] Cabezas A, Comín F A. Carbon and nitrogen accretion in the topsoil of the middle Ebro River Floodplains (NE Spain): implications for their ecological restoration. Ecological Engineering, 2010, 36(5): 640-652.
- [42] Bullinger-Weber G, Le Bayon R C, Thébault A, Schlaepfer R, Guenat C. Carbon storage and soil organic matter stabilisation in near-natural, restored and embanked Swiss floodplains. Geoderma, 2014, 228-229: 122-131.
- [43] Kiem R, Kandeler E. Stabilization of aggregates by the microbial biomass as affected by soil texture and type. Applied Soil Ecology, 1997, 5(3): 221-230.
- [44] Bertrand C, Franquet E, Chomérat N, Cazaubon A. An approach to the Intermediate Disturbance Hypothesis at the landscape scale: the effects of hydrodynamic disturbance on phytoplankton communities. Archiv Für Hydrobiologie, 2004, 161(3): 351-369.
- [45] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.
- [46] 胡亚林, 汪思龙, 黄宇, 于小军. 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响. 生态学报, 2005, 25(10): 2662-2668.
- [47] Ralte V, Pandey H N, Barik S K, Tripathi R S, Prabhu S D. 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(2): 163-172.
- [48] Nishiyama M, Sumikawa Y, Guan G, Marumoto T. Relationship between microbial biomass and extractable organic carbon content in volcanic and non-volcanic ash soil. Applied Soil Ecology, 2001, 17(2): 183-187.
- [49] 刘玉杰, 王世杰, 刘秀明, 刘方. 茂兰保护区小生境土壤微生物活性研究. 地球与环境, 2011, 39(3): 285-291.
- [50] 卢成阳, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 杨钙仁, 张浩, 鹿士杨, 杜虎. 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. 生态学杂志, 2013, 32(3): 522-528.