DOI: 10.5846/stxb201805091026
梁士楚,苑晓霞,卢晓明,许桂芬,覃艳,姜勇.漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征.生态学报,2019,39(8): - .
Liang S C,Yuan X X,Lu X M,Xu G F,Qin Y,Jiang Y.Soil physico-chemical properties and distribution characteristics in an aquatic-terrestrial ecotone of the Lijiang River, southwest China.Acta Ecologica Sinica,2019,39(8): - .

漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征

梁士楚[1,2],苑晓霞[1,2],卢晓明[1,2],许桂芬[1,2],覃　艳[1,2],姜勇[1,2,*]
1 广西师范珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室,桂林　541006
2 广西师范大学生命科学学院,桂林　541006

摘要:水陆交错带是水生生态系统与陆地生态系统之间的过渡带,是一种典型的生态交错区,承载着能量流动、物质循环和信息交换的重要作用。土壤作为水陆交错带系统的重要组成部分,是水陆交错带功能实现的基础之一。鉴于此,以桂林漓江水陆交错带纵向梯度(上游、中游、下游)不同植被覆盖条件下的土壤为研究对象,采用野外取样调查、实验分析与统计检验相结合,系统的分析了土壤理化性质及其分布特征,旨在为该区域退化生态系统恢复与重建提供依据。结果表明:11 个土壤理化性质,其中 5 个指标(土壤含水量、全氮、全磷、速效氮和速效钾)在上游、中游和下游均差异性显著。不同梯度下的土壤理化性质的相关性及相关性大小也不尽相同,但在总体上存在一些较相似的变化规律,如上游、中游和下游的土壤容重和孔隙度均呈现显著负相关,土壤全磷和有机质与多数土壤化学性质呈显著正相关;土壤含水量在下游与多数土壤化学性质均显著相关,但在上游仅与土壤全磷显著负相关。PCA 主成分分析表明,土壤容重、土壤孔隙度和土壤全磷含量的贡献均大于其它环境因子的平均贡献率,体现了它们是影响漓江水陆交错带土壤理化性质的重要环境因子。

关键词:水陆交错带;土壤理化性质;相关性分析;主成分分析

Soil physico-chemical properties and distribution characteristics in an aquatic-terrestrial ecotone of the Lijiang River, southwest China

LIANG Shichu[1,2],YUAN Xiaoxia[1,2],LU Xiaoming[1,2],XU Guifen[1,2],QIN Yan[1,2],JIANG Yong[1,2,*]
1 *Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection (Guangxi Normal University), Ministry of Education, Guilin* 541006, *China*
2 *College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin* 541006, *China*

Abstract: The aquatic-terrestrial ecotone is a transitional zone between aquatic and terrestrial ecosystems. It is a typical eco-transitional zone and plays an important role in energy flows, material circulation, and information transformation. Soil, as an important part of the aquatic-terrestrial ecotone, is one of the basic functional aspects of an aquatic-terrestrial ecotone. This study aimed to provide scientific guidance for the restoration of a degraded aquatic-terrestrial ecotone. To do so, a typical area of the aquatic-terrestrial ecotone of the Lijiang River, Guilin, southwest China were selected as the sampling site. We measured eleven soil physico-chemical properties, including the following soil chemical properties: soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), available potassium (AK), and soil pH, as well as the following soil physical properties: soil water content (SWC), bulk density (BD), and soil porosity (PS). We analyzed the relationships between the soil physico-

基金项目:广西自然科学青年基金项目(2016GXNSFBA380030);广西壮族自治区中青年教师基础能力提升项目(ky2016YB062);2017 年度自治区级大学生创新创业训练计划项目(201411000124);2017 年度广西高校优秀教师出国留学项目
收稿日期:2018-05-09;　　**网络出版日期**:2018-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yongjiang226@ 126.com

chemical properties of different distributed community types by employing methods of field investigation and experimental testing using basic statistics including One-way ANOVA, the Tukey-Kramer HSD test, and Principal Component Analysis (PCA) across a longitudinal gradient (upstream, midstream, and downstream) in an aquatic-terrestrial ecotone of the Lijiang River. The results showed that SWC, TN, TP, AN, and AK have significant differences across the longitudinal gradient (upstream, midstream, and downstream) of aquatic-terrestrial ecotones. Although the correlations and the intensity of the correlations between soil physico-chemical properties across the gradient were different, there were some similarities. Of the soil physical properties, bulk density and soil porosity are significantly negatively correlated, while TP and SOM have a significant positive correlation with most of the soil chemical properties across the longitudinal gradient of the aquatic-terrestrial ecotone. Soil water content was significantly positive correlated with most of the soil chemical properties in the downstream region, but only had a significantly negative correlation with TP in the upstream region. A principal component analysis indicated that soil bulk density, soil porosity, and soil total phosphorus contributed more than the other environmental factors to PCA1 and PCA2, which were important predictors of the distribution of different community types in the aquatic-terrestrial ecotone of the Lijiang River.

Key Words: aquatic-terrestrial ecotone; soil physico-chemical properties; distribution characteristics; correlation analysis; principal component analysis

水陆交错带(aquatic-terrestrial ecotone),作为一种动态的陆生生态系统向水生生态系统过渡的典型生态交错区,是河流天然的保护屏障和高地植被间进行物质传输、能量转化、信息交换的重要廊道,具有显著的边缘效应与特殊的生态过程,是地球上最为复杂的生态系统之一[1-3]。在维持水陆交错带稳定性、生物多样性、迟滞沉积物、富集和过滤各种营养元素方面起着十分重要的作用[2,4-6]。土壤是自然连续的非匀质体,在不同的气候、母岩、地形、植被和人为干扰等诸多自然和人为因素的影响下,土壤理化性质的空间分布呈缀块型或梯度格局,从而使得土壤理化性质具有一定的随机性和相关性[7-8]。土壤理化性质作为控制植物生长发育的关键生态因子,是土壤的基本属性和本质特征,是决定土壤肥力和土壤质量的重要指标[9]。其中,土壤含水量、容重和孔隙度等土壤物理结构会直接影响土壤颗粒粘性、毛管的吸附力和容重等,被认为是衡量土壤质量和土壤生产力的重要指标之一,其化学性质如土壤 pH 值、有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾等,直接影响土壤肥力,进而通过影响地表植被的生长最终影响水陆交错带生态系统功能的发挥[4,10-11]。因此,研究水陆交错带土壤理化性质特征,可以很好地了解土壤形成过程、结构和功能,对土壤与植物关系、植被空间格局以及土壤侵蚀、土地利用变化、生态过程等研究有借鉴作用[11]。

漓江是我国乃至世界上最典型的岩溶河流域,位于珠江水系西江一级支流桂江的上游。漓江流域分布的峰丛、峰林以其优美和独特的喀斯特地貌景观成为“中国南方喀斯特二期”重要提名地,成功入选世界自然遗产名录。但近年来,由于旅游业盛行,对漓江流域的过度开发利用导致了水陆交错带湿地萎缩,消落带明显,砾石大面积裸露,流域内生态环境发生显著改变[12-13]。加之在水陆交错带近陆区域过度垦荒,导致很多优势种群如枫杨(*Populus euphratica*)、乌桕(*Tamarix chinensis*)等天然植被破坏严重,土壤沙化,碳酸化等生态问题日益突出,严重影响了漓江国际旅游胜地的可持续发展。因此,亟待对漓江退化水陆交错带生态系统进行植被修复与生态重建。摸清土壤理化性质的特征及其梯度变化是进行退化水陆交错带生态系统植被修复与生态重建的基础和依据。目前,有关漓江水陆交错带土壤方面的研究,主要包括立地根系分布与土壤性质的关系[14]、不同植被类型的土壤酶活性[15]、不同淹没区植物多样性与土壤特征[16]、灌木群落根系分布与土壤养分的关系[17]和土壤有机碳储量及其影响因子[18]等报道。然而,关于漓江水陆交错带纵向梯度(上游、中游、下游)土壤理化性质及其分布特征研究却鲜见报道。鉴于此,本研究以漓江水陆交错带纵向梯度(上游、中游、下游)不同植被覆盖条件下土壤为研究对象,综合应用土壤地理学、分析化学、统计学等研究手段,探究土壤理化性质特征及其相关性,以期为漓江水陆交错带植被恢复与重建、森林管理及其可持续利用等提供基础

数据和科学理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

漓江位于广西壮族自治区桂林市,属于珠江流域西江水系的一级支流—桂江的上游,地理坐标为 109°45′—110°40′E,24°18′—25°41′N(图 1)。现代水文定义漓江起点为兴安县溶江镇灵渠口,终点为平乐县恭城河汇入口,由北至南依次流经桂林市兴安县、灵川县、桂林市区、阳朔县和平乐县 5 县(市),干流总长 214 km,流域总面积为 12285 km^2,占桂林市总面积的 43.9%。漓江流域根据降水、地形、径流等可以划分为上游、中游和下游,其中,上游为源头至桂林水文站河段,长约 105 km,中游为桂林水文站至阳朔水文站河段,长约 83 km,下游为阳朔水文站至恭城河口河段,长约 26 km[15]。

漓江流域位于低纬地区,属于中亚热带湿润季风气候区,气候温和,四季分明,雨量充沛,且雨热基本同季,无春旱,无霜期长达 309 d,全年光照充足,年平均日照时数为 1670 h。年平均气温 17.8—19.1℃,最冷1月平均气温约 8—9℃,最热 8 月平均气温约 28℃。流域内降水量自西北向东南递减,年降雨量 1814—1941 mm,年蒸发量 1377—1857 mm,年平均相对湿度为 73%—79%,全年风向以偏北风为主,平均风速 2.2—2.7 m/s[16]。漓江水陆交错带上游的优势物种主要包括枫杨(*Pterocarya stenoptera*)、石榕树(*Ficus abelii*)、萝芙木(*Rauvolfia verticillata*)、阴香(*Cinnamomum burmannii*)等;中游的优势物种主要包括枫杨(*Pterocarya stenoptera*)、乌桕(*Sapium sebiferum*)、细叶水团花(*Adina rubella*)、紫弹树(*Celtis biondii*)、阴香(*Cinnamomum burmannii*)等;下游的优势物种主要包括构树(*Broussonetia papyrifera*)、牡荆(*Vitex negundo* var. *cannabifolia*)等(表 1)。靠近河岸的区域受江水冲刷影响较强,土壤流失严重,土层浅薄,土壤以沙砾为主;在远离河岸的区域,土壤只有在洪水期受到江水的影响,土壤类型以砂质土壤为主,呈团粒结构,土层较厚,营养物质丰富[17],本区域土壤总体呈微酸性,pH 值范围为 6.18—6.85。

表 1　样地基本概况

Table 1　Basic information of sample sites

河段 Reaches	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude/m	优势种 Dominant species
上游 Upstream	110°19′49″E	25°20′23″ N	164	枫杨 *Pterocarya stenoptera* 、石榕树 *Ficus abelii*、萝芙木
	110°19′50″E	25°20′22″ N	162	*Rauvolfia verticillata*、阴香 *Cinnamomum burmannii*
	110°19′22″E	25°19′30″ N	165	
中游 Midstream	110°25′09″E	25°06′30″ N	156	枫杨 *Pterocarya stenoptera* 、乌桕 *Sapium sebiferum*、细叶水
	110°25′08″E	25°06′28″ N	155	*Rauvolfia verticillata*、阴香 *Cinnamomum burmannii*
	110°20′58″E	25°12′12″ N	133	
下游 Downstream	110°34′51″E	24°45′06″ N	123	构树 *Broussonetia papyrifera*、牡荆 *Vitex negundo* var.
	110°34′49″E	24°45′02″ N	133	*cannabifolia*.
	110°34′52″E	24°45′08″ N	130	

1.2　研究方法

1.2.1　样方布设及样品采集

经野外实地踏勘,于 2016 年 9—10 月和 2017 年 7—9 月间,沿漓江交错带纵向梯度(上游、中游、下游)分别建立了 10 个大小为 20 m×20 m 的样方(图 1),共计 30 个样方。在此基础上,将每个 20 m×20 m 的样方划分成 16 个 5 m×5 m 的小样方并在其中心位置处用环刀采集 0—15 cm,15—30 cm 和 30—45 cm 的土样用于测定土壤物理性质(含水量、容重和孔隙度),每层均为 3 次重复,取样结束后将土壤依次回填。土壤化学成分测定采用“梅花五点法”采样,在每个 5 m×5 m 小样方的 4 个顶点和中心位置清除表层枯落物和腐殖质层后,用直径 10 cm 的土钻钻取 0—20 cm 土层土样,运用四分法混合均匀后带回实验室用于土壤化学性质的测

定[18]。将采集的新鲜土样放置于室内阴凉通风处自然干燥,待风干后,剔除其中的根系、石块、钙核及动植物残体等杂物后倒入研钵中研细,过不同孔径(0.15、0.25、1.4 mm)的土壤筛,对预处理后的土样进行土壤 pH 值、有机质、全氮、速效氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾 8 个土壤化学性质指标的测定。

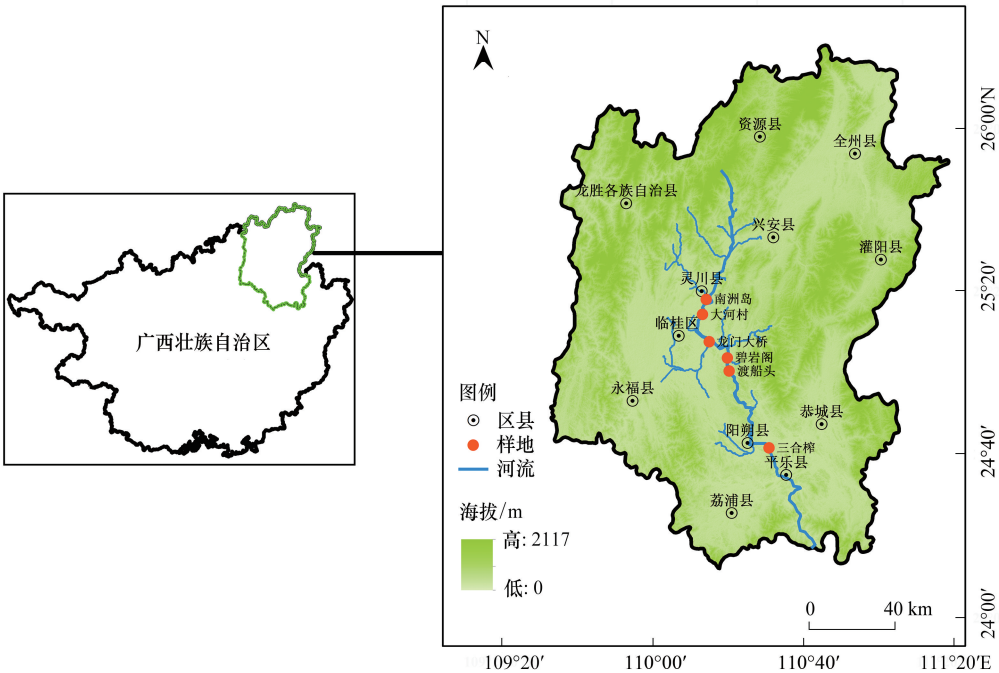

图 1 漓江水陆交错带样地位置分布图

Fig.1 Location of the sampling sites in aquatic-terrestrial ecotone, Lijiang River

1.2.2 样品分析

土壤样品测定是由海南大学土壤实验室和广西师范大学教育部重点实验室共同完成。土壤含水量和土壤容重的测定采用环刀法;土壤孔隙度通过土壤容重和土壤相对密度来计算[19]。土壤 pH 值采用电位法测定;有机质(SOM)含量用重铬酸钾容量法测定;全氮(TN)用半微量凯氏定氮法测定;全磷(TP)用硫酸-高氯酸消解法测定;全钾(TK)用氢氟酸-高氯酸消煮火焰光度计法测定;速效氮(AN)用碱解扩散法测定;速效磷(AP)用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定;速效钾(AK)用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。每个土壤样品均重复测定 3 次取其平均值作为本研究的原始数据。

1.2.3 数据处理及分析

首先,对所有数据均进行 Shapiro-Wilk 函数正态分布检验,对不满足正态分布的数据进行对数转化。然后,利用 one-way ANOVA 分析对漓江水陆交错带纵向梯度(上游、中游、下游)上的土壤理化性质进行差异性检验,运用 Tukey HSD 方法进行均值的多重比较。由于本研究中涉及到 11 个变量,考虑到变量较多会给合理地分析问题和解释问题带来困难。因此,我们采用了 PCA 降维处理。基于提取轴信息的判断准则:①排序轴累积解释方差比例达到 85%时(表 2);②具有解读价值的 PCA 轴的 Kaiser-Guttman 标准[20],即选取特征根超过平均值的轴(图 4)提取排序轴,并根据各环境因子在 PCA 轴上载荷的大小判断其作用大小。各土壤理化性质间的相关性用 Pearson 相关性进行分析,相关性大小用 Student′s t 进行检验。数据统计分析与绘图均在 R-2.16.1 程序(R Development Core Team,2016)中完成。

2 结果与分析

2.1 漓江水陆交错带土壤理化性质的特征分析

图 2 所示:土壤有机质、全氮、全磷和全钾在不同梯度下均差异性显著。土壤有机质和全氮均是中游高于

上游和下游,土壤全磷和全钾为下游高于上游和中游;土壤含水量和速效氮均是上、中游分别与下游差异性显著,且下游高于上中游;土壤容重和孔隙度在不同梯度下均差异不显著;土壤 pH 与速效钾均是中、下游分别与上游差异性显著,且土壤 pH 为下游>中游>上游,而土壤速效钾与之相反。

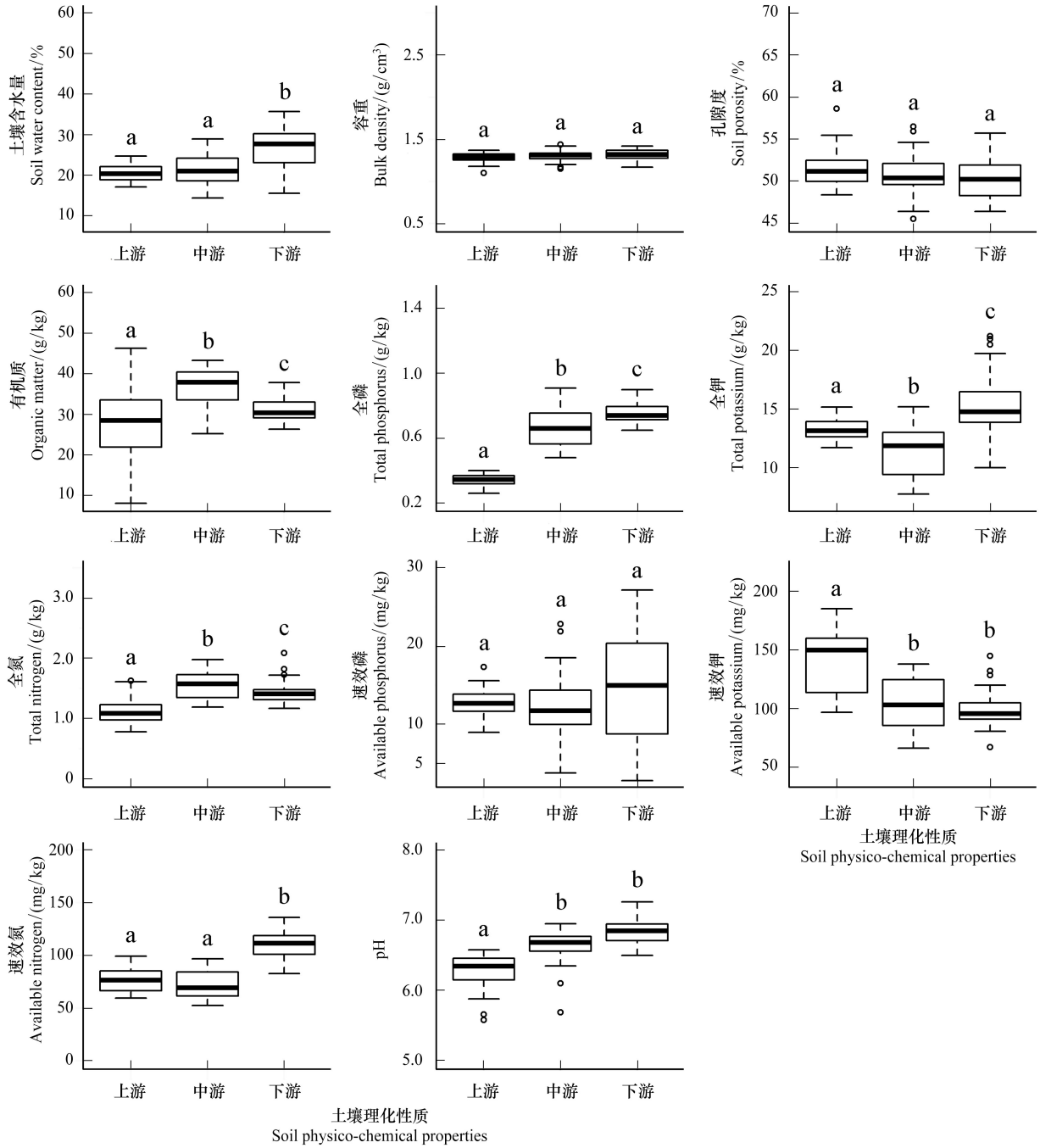

图 2　不同梯度下土壤理化性质分析

Fig.2　The difference on soil physico-chemical properties in aquatic-terrestrial ecotone, Lijiang River

2.2　漓江水陆交错带土壤理化性质相关性分析

图 3 所示:不同纵向梯度下的土壤理化性质的相关性不尽相同。但在总体上存在一些较相似的变化规律:如上游、中游、下游的土壤容重和孔隙度均显著负相关,且上游的土壤容重与土壤有机质显著负相关而土壤孔隙度与其正相关;土壤全磷和有机质与多数土壤化学性质显著正相关;土壤水分在下游与有机质、全磷、

全氮 3 个土壤化学性质均显著相关,但在上游仅与土壤全磷显著负相关。

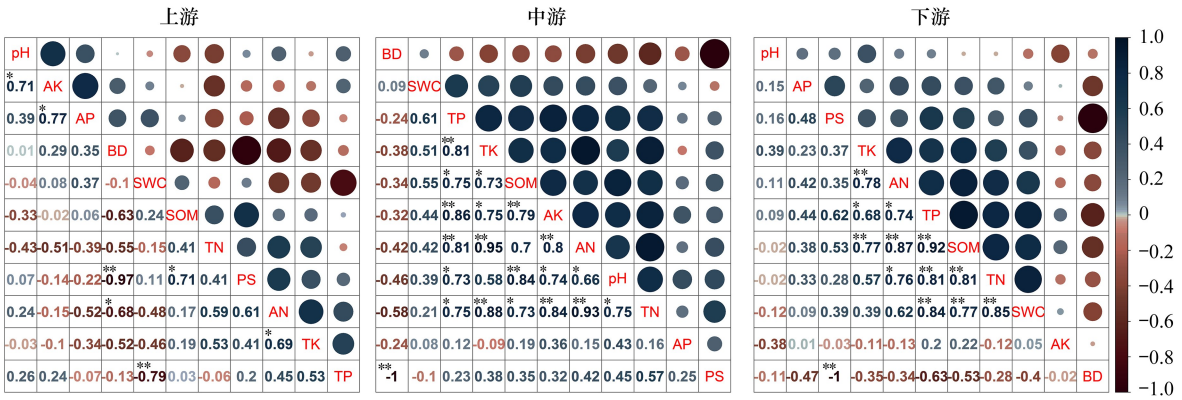

图 3 土壤理化性质的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of the soil physico-chemical properties in aquatic-terrestrial ecotone, Lijiang River

SWC:土壤含水量 Soil water content;BD:容重 Bulk density;PS:孔隙度 Soil porosity;pH:pH 值 pH value;SOM:有机质 Organic matter;TN:全氮 Total nitrogen;TP:全磷 Total phosphorus;TK:全钾 Total potassium;AN:速效氮 Available nitrogen;AP:速效磷 Available phosphorus;AK:速效钾 Available potassium; * :$P < 0.05$; * * :$P < 0.01$; figures without * indicate $P > 0.05$

2.3 漓江水陆交错带土壤理化性质的 PCA 分析

主成分分析表明(图 4,表 2):前 3 个 PCA 轴的累积解释方差比例达 79%且特征根都大于 1(PCA 轴的 Kaiser-Guttman 标准),说明土壤理化性质在前三排序轴的载荷值较高。在本研究中将提取 PCA 分析 3 轴中的前 2 轴为下步数据服务。第一主成分累计贡献率为 39%,主要体现了全磷(0.90)的贡献;第二主成分累计贡献率为 22%,主要体现孔隙度(0.96)和容重(-0.96)2 个土壤物理性质的贡献。

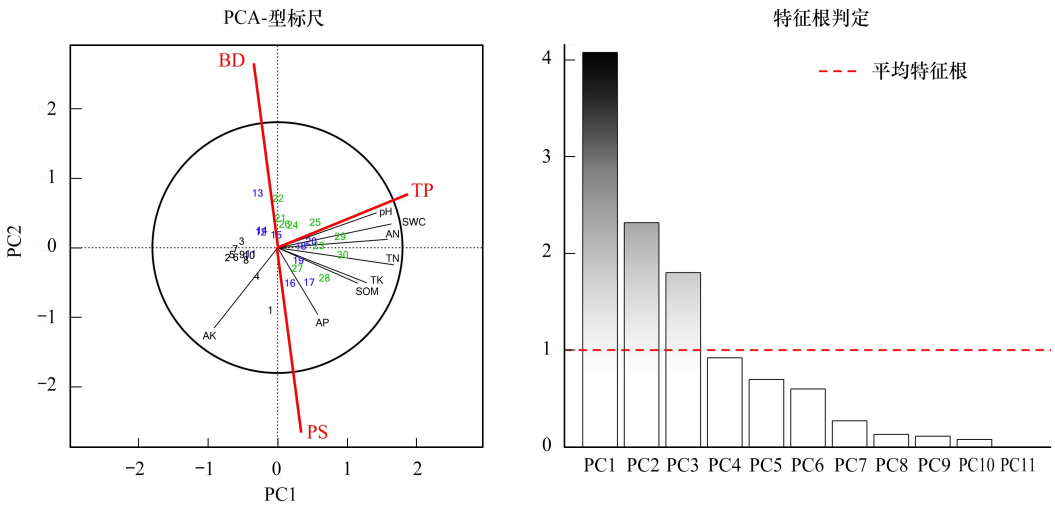

图 4 土壤理化性质的 PCA 分析双序图

Fig.4 PCA sequencing of different quadrats with environmental factors in aquatic-terrestrial ecotone, Lijiang River

1—10(黑色)表示上游样方号:NO.1—10(Black) represents the sample number of upstream;11—20(蓝色)表示中游样方号:NO.11—20(Blue) represents the sample number of midstream;21—30(绿色)表示下游样方号:NO.21—30(Green) represents the sample number of downstream

3 讨论

3.1 不同纵向梯度土壤理化性质对比分析

土壤理化性质作为控制植物生长发育的关键生态因子,是土壤的基本属性和本质特征[21]。本研究表明,

表 2　主成分分析(PCA)中前三轴环境变量的载荷和解释方差

Table 2　The loadings and explained variance of environmental variables in the first three axes in principal component analysis (PCA)

土壤环境因子 Soil environmental variables	PCA1	PCA2	PCA3
含水量 Soil water content/%	0.78	-0.12	0.36
容重 Bulk density/(kg/m^3)	-0.16	-0.96*	0.11
孔隙度 Soil porosity/%	0.16	0.96*	-0.10
pH	0.68	-0.18	-0.08
有机质 Organic matter content /(g/kg)	0.55	0.18	-0.08
全氮 Total nitrogen content /(g/kg)	0.80	0.09	-0.67
全磷 Total phosphorus content /(g/kg)	0.90*	-0.28	-0.48
全钾 Total potassium content/(g/kg)	0.61	0.18	-0.20
速效氮 Availabel nitrogen content /(mg/kg)	0.76	-0.04	0.63
速效磷 Availabel phosphorus content /(mg/kg)	0.28	0.34	0.57
速效钾 Availabel potassium content/(mg/kg)	-0.44	0.41	0.27
特征根 Eigenvalue	4.08	2.32	1.80
方差比例 Proportion explained	0.39	0.22	0.17
累积方差比例 Cumulative proportion	0.39	0.61	0.79

* 表示该变量的负荷绝对值大于 0.85

土壤含水量是上游和中游均与下游存在显著差异,且下游显著高于上游和中游,含水量均在 20%以上。水陆交错带距离水体较近,地下水位高,土壤受到纵、横双向水分渗透的影响,因此含水量普遍较高。同时,上游的海拔和地势相对较高(表 1),坡度较陡峭,土壤层较薄,砾石含量较高,因而导致地表径流速度加快,水分散失速度快,导致同一时间内土壤含水量偏低;另外一个原因可能与下游地形平坦且河流水量较多,土壤可能更多的得到各支流(如,小溶江、甘棠江、桃花江、柘木河等)的汇入和高海拔土壤下渗的水分的补充增加[22],进而导致下游的土壤含水量显著高于上游和中游。土壤容重是土壤紧实度的敏感性指标,表征土壤的疏松程度与通气性,与土壤孔隙度成负相关[23]。本研究发现土壤容重和孔隙度在不同梯度下均差异性不显著,与前人的很多研究结果不一致[24]。上游的土壤大多未经搬运,为原地土壤的积累,质地紧实, 土壤体积质量大,但结构较差;而中、下游土壤多为上游泥沙的冲积物,土壤质地疏松,容重不断减少,孔隙度明显变大,中下游的土壤结构会显著好于上游[25],但在我们的研究结论中没有得到相似的结论。这可能与在具体生境下土壤成土过程中受土壤母质“遗传”特征和不同植被的影响有关,有待于进一步深入研究。土壤有机质、土壤全氮、土壤全磷和土壤全钾在不同梯度上均呈差异性显著($P<0.05$),其中有机质和全氮含量呈现中游相对较高,上游和下游相对较低,全钾含量变化趋势与其相反,即中游相对较低,上游和下游相对较高。土壤有机质含量通常作为土壤肥力水平高低的一个重要指标,主要来源于植物凋落物,而凋落物性质和数量是影响有机质积累的主要因素[24]。不同植物群落类型的有机质含量差异性显著,落叶物种显著高于常绿物种。据本实验野外实地观察发现:水陆交错带中游梯度包括的主要植被类型有枫杨、紫弹树和乌桕等落叶大乔木;枫杨和乌桕群落下面的腐殖质层厚度显著高于其它 2 个梯度上分布的凋落物厚度。这暗示落叶物种周期性落叶的物候学特性导致归还于土壤的枯枝落叶逐渐增多,从而通过凋落物输入土壤的有机质增加,致使土壤有机质含量高。此外,很多研究表明土壤氮素主要来源于土壤有机质,所以土壤中有机质含量丰富的地段一般氮素含量也高[26],这一结论在本研究中得到很好的佐证,即不同梯度下土壤氮含量与土壤有机质分布格局一致。本研究结果显示土壤 pH 为下游>中游>上游,且中游、下游与上游差异性显著(图 2),这可能是由于漓江流域存在两个明显的生态分区,即上游非岩溶森林生态分区和中下游岩溶生态分区[27]。岩溶区的成土母质多为由碳酸盐风化而成,全土层都有一定的碳酸钙含量(土壤钙含量分析将在下篇文章体现),在亚热带环境中钙不断淋溶,土壤 pH 偏碱性。因此,中游和下游的土壤 pH 值显著大于上游。但是本研究发现中下游土壤 pH 值近中性,并没有偏碱性,这可能是由于漓江水陆交错带中下游土壤受上游非岩溶生态区土壤影响,土壤 pH 值被中和,这有待于进一步深入研究。此外,Cheng 等[25]在加拿大亚伯达省中部利用氮-16 同位素示踪技术研究发

现土壤 pH 值增加促使氮素矿化,暗示随 pH 值增加在一定程度上也加剧了土壤有机氮的矿化。因此,土壤速效氮含量也是下游最高。

土壤磷素是植物生长发育所必需的重要元素之一,磷素在土壤中主要以有机磷与无机磷两种形态存在,其含量受土壤母质、成土作用以及外界因素的影响[28]。整体来看,上游土壤全磷明显低于中下游。这与李冬林等[27]在秦淮河河岸带土壤理化性质分析得出的研究结论一致。由于上游处于源头,人为干扰少,保护较好,所以土壤中的磷含量最低。中下游属于重要的旅游区和居民区,人口密集,遭受人为干扰较严重,如日常生活污水排放、农业污水和洗涤用品中含有大量的磷,使土壤中富集了很多磷元素,可能是造成上游土壤磷含量显著低于中下游的重要原因。而土壤速效磷在不同梯度下差异均不显著,其原因可能是土壤中的磷素与钙质成分作用形成难溶性磷酸钙,降低了磷的速效性[29]。土壤钾是植物光合作用、淀粉合成和糖类转化所必需的元素,也是反映土壤肥力和生产力的主要指标,而速效钾是植物能利用的钾,占土壤中钾素的极少部分,能真实反映土壤中钾素的供应情况[30]。本研究发现漓江水陆交错带的全钾含量呈现为下游>中游>上游(图 2),由于土壤全钾主要来源于土壤母质在成土过程中释放,具有可溶性强和极易流失的特征[30]。有研究表明,全钾在含水量较高的表层土壤中有较好的矿物结构,有利于土壤全钾以同晶代替的形式进入粘土矿物内保存起来[31];此外,可溶性钾随着地表水由上游流向下游地段积累,下游的土壤层较厚积累了丰富的钾素,这可能使得下游土壤全钾含量高。土壤速效钾含量表现为中游和下游分别与上游差异性显著 (图 2)。有研究认为,土壤速效钾的含量主要受植被类型和干扰强度的影响[32]。本研究中发现上游主要多分布常绿大乔木,而中下游主要以落叶乔木以及小灌木为主;和上游相比,中下游距离市区和景点较近,人口密集,干扰严重,可能是局域生境的变化和外界干扰的共同作用影响了土壤速效钾含量的再分配。

3.2 土壤理化性质的相关性与 PCA 分析

土壤理化性质关系密切[26]。通过对土壤理化性质相关性分析发现不同梯度下物理和化学性质相关性各不相同,但总体上存在一些较相似的变化规律。如土壤容重和孔隙度 2 个土壤物理性质在不同梯度下均显著负相关,这与很多研究结论一致[33]。其次,在上游梯度下土壤有机质含量与土壤容重存在显著的负相关而与土壤孔隙度正相关。土壤有机质在土壤中最主要、最直接的作用就是改良土壤结构,促进土壤团聚体形成更多的空隙,从而增加土壤的疏松性,改善土壤的通气性和透水性。即土壤有机质含量越高,土壤孔隙度越高,土壤容重越低。土壤全磷在上游与土壤含水量显著负相关,在中游与土壤有机质等 7 个土壤化学性质均显著相关,在下游与土壤含水量,土壤有机质等 4 个土壤化学性质显著相关。由于上游海拔相对较高,坡度较陡峭,人为干扰少,土壤 P 处于亏缺状态,受淋溶作用影响强烈[34],导致 2 者显著的负相关;而中下游与土壤化学性质高度相关,同时土壤磷含量富集程度高,主要与沿江居民行为、旅游、植被等多方面及长时期因素的影响有关。土壤有机质含量在不同梯度下与土壤全氮、全钾、速效氮、速效钾、速效磷含量存在显著相关性(图 3)。有研究表明,土壤有机质含量的变化直接会影响到土壤多种元素含量的变化,氮素、钾素主要来自于有机质的分解及矿化积累[35]。土壤水分是自然界水循环的一个重要环节,处于不断的变化和运动中,直接影响作物的生长和土壤中各种物质的转化过程[36]。本研究中发现上游和下游的土壤含水量与土壤化学性质具有显著相关性,有利于土壤 N、P、K 的质量分解。

主成分分析旨在利用降维的思想,把多指标转化为少数几个综合指标(即主成分)且所含信息互不重复,可以弱化变量间的自相关性所引起的误差,从而达到对本研究中土壤理化性质的精确评估[37-38]。本文发现第一主成分中土壤全磷的主成分载荷相对较高(0.90),土壤全磷在不同梯度下分别与土壤理化性质显著相关(图 3,表 2);第二主成分中土壤孔隙度和土壤容重载荷值相对较高(分别为 0.96 和-0.96),主要反映土壤容重和孔隙度的土壤物理性质的贡献,相关性分析结果也表明在不同梯度下土壤容重和孔隙度均呈现显著负相关(图 3,表 2)。

4 结论

研究结果表明,漓江水陆交错带 11 个土壤理化性质中 5 个指标(土壤含水量、全氮、全磷、速效氮和速效

钾)在上游、中游和下游均差异性显著。不同纵向梯度下,土壤容重与土壤孔隙度呈极显著负相关,土壤全磷和土壤有机质与其他土壤理化性质显著相关;土壤含水量在下游与多数土壤化学性质均显著相关但在上游仅与土壤全磷显著负相关。主成分分析进一步证明,土壤全磷含量、土壤容重和土壤孔隙度的贡献均大于其它环境因子的平均贡献率,体现了它们是对漓江水陆交错带植被分布具有重要影响的环境因子。

参考文献(References):

[1] Díaz S, Lavorel S, de Bello F, Quétier F, Grigulis K, Robson T M. Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(52): 20684-20689.

[2] Lavorel S, Grigulis K. How fundamental plant functional trait relationships scale-up to trade-offs and synergies in ecosystem services. Journal of Ecology, 2012, 100(1): 128-140.

[3] McGill B J, Enquist B J, Weiher E, Westoby M. Rebuilding community ecology from functional traits. Trends in Ecology & Evolution, 2006, 21(4): 178-185.

[4] 郭怀成, 黄凯, 刘永, 郁亚娟. 河岸带生态系统管理研究概念框架及其关键问题. 地理研究, 2007, 26(4): 789-798.

[5] 郭二辉, 孙然好, 陈利顶. 河岸植被缓冲带主要生态服务功能研究的现状与展望. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1830-1837.

[6] Critchley C N R, Chambers B J, Fowbert J A, Sanderson R A, Bhogal A, Rose S C. Association between lowland grassland plant communities and soil properties. Biological Conservation, 2002, 105(2): 199-215.

[7] Stella J C, Rodríguez-Gonzalez P M, Dufour S, Bendix J. Riparian vegetation research in Mediterranean-climate regions: common patterns, ecological processes, and considerations for management. Hydrobiologia, 2013, 719(1): 291-315.

[8] Capon S J, Chambers L E, Mac Nally R, Naiman R J, Davies P, Marshall N, Pittock J, Reid M, Capon T, Douglas M, Catford J, Baldwin D S, Stewardson M, Roberts J, Parsons M, Williams S E. Riparian ecosystems in the 21st Century: hotspots for climate change adaptation? Ecosystems, 2013, 16(3): 359-381.

[9] Hale R, Reich P, Daniel T, Lake P S, Cavagnaro T R. Scales that matter: guiding effective monitoring of soil properties in restored riparian zones. Geoderma, 2014, 228-229: 173-181.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 李扬, 王冬梅, 信忠保, 王晶, 任远, 李青山. 漓江水陆交错带不同淹没区植物多样性与土壤特征. 生态学报, 2015, 35(15): 5121-5130.

[13] 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.

[14] 郭玉珊. EN-1 固化剂对土壤理化及生物学性质的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.

[15] 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.

[16] 韩耀全, 周解, 吴祥庆. 漓江的自然地理与水质调查. 广西水产科技, 2007, (2): 8-16.

[17] 杨文彬. 漓江水陆交错带土壤酶活性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.

[18] 禹娟红, 包振国, 王秉忠, 刘玲玲, 车树理. 不同植被恢复模式对土壤理化性质的影响. 人民黄河, 2015, 37(2): 94-98, 103-103.

[19] 文璐, 刘晶岚, 习妍, 张振明, 王小平, 陈俊崎, 王春能. 北京地区重要古树土壤物理性状分析. 水土保持研究, 2011, 18(5): 175-178.

[20] Borcard D, Gillet F, Legendre P. 数量生态学. 赖江山, 译. 北京: 高等教育出版社, 2014: 107-113.

[21] 李艳, 李鹏, 赵忠, 张良恩, 孙楠. 退耕地植被恢复演替的生态环境效应研究进展. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(8): 155-159.

[22] 何其华, 何永华, 包维楷. 岷江上游干旱河谷典型阳坡海拔梯度上土壤水分动态. 应用与环境生物学报, 2004, 10(1): 68-74.

[23] 罗琰, 苏德荣, 吕世海, 布和, 贺晶, 谢晶杰. 辉河湿地河岸带土壤养分与酶活性特征及相关性研究. 土壤, 2017, 49(1): 203-207.

[24] 王琼. 牟平海岸带土壤理化性质分析. 安徽农业科学, 2015, 43(28): 95-97, 227-227.

[25] 陈春瑜, 和树庄, 胡斌, 吕文龙. 土地利用方式对滇池流域土壤养分时空分布的影响. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2677-2684.

[26] 李冬林, 韩丽, 阮宏华, 张纪林. 秦淮河河岸带土壤理化性质分析. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(4): 17-22.

[27] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 付甜, 封晓辉. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系. 生态学报, 2012, 32(3): 852-862.

[28] 郦威, 卢振兰, 孔维静, 张远. 太子河河岸带土壤理化性质特征及其与环境因子的关系. 生态科学, 2013, 32(1): 90-97.

[29] 赵少华, 宇万太, 张璐, 沈善敏, 马强. 土壤有机磷研究进展. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2189-2194.

[30] 王淑平, 周广胜, 吕育财, 邹建军. 中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系. 植物生态学报, 2002, 26(5): 513-517.

[31] 侯晓丽, 薛晔, 薛立, 卢广超, 邵仪若. 不同坡位杉木林土壤物理性质和养分的时空变化. 安徽农业大学学报, 2013, 40(5): 721-725.

[32] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 付甜, 封晓辉. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系. 生态学报, 2012, 32(3): 852-862.

[33] 何加林, 曹洪麟, 张燕婷, 叶万辉, 李武军, 吴林芳. 广西木论喀斯特森林土壤养分水平与植被及地形的关系. 热带亚热带植物学报, 2009, 17(5): 502-509.

[34] 杨春璐, 马溪平, 李法云, 侯伟, 李悦, 王杰, 孔维静, 范庆锋. 海城河河岸带土壤理化性质分析. 生态科学, 2010, 29(3): 262-267.

[35] 吴则焰, 林文雄, 陈志芳, 刘金福, 方长旬, 张志兴, 吴林坤, 陈婷. 武夷山不同海拔植被带土壤微生物 PLFA 分析. 林业科学, 2014, 50(7): 105-112.

[36] 林大仪. 土壤学. 北京: 中国林业出版社, 2002: 244-245.

[37] Hartley A M, House W A, Leadbeater B S C, Callow M E. The use of microelectrodes to study the precipitation of calcite upon algal biofilms. Journal of Colloid and Interface Science, 1996, 183(2): 498-505.

[38] 祖元刚, 李冉, 王文杰, 苏冬雪, 王莹, 邱岭. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性. 生态学报, 2011, 31(18): 5207-5216.