

DOI: 10.5846/stxb201802270396

刘润红,姜勇,常斌,李娇凤,荣春艳,梁士楚,杨瑞岸,刘星童,曾惠帆,苏秀丽,袁海莹,傅桂焕,吴燕慧.漓江河岸带枫杨群落主要木本植物种间联结与相关分析.生态学报,2018,38(19): - .

Liu R H, Jiang Y, Chan B, Li J F, Rong C Y, Liang S C, Yang R A, Liu X T, Zeng H F, Su X L, Yuan H Y, Fu G H, Wu Y H. Interspecific associations and correlations among the main woody plants in a *Pterocarya stenoptera* community in a riparian zone of Lijiang River, Guilin, Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): - .

漓江河岸带枫杨群落主要木本植物种间联结与相关分析

刘润红,姜勇,常斌,李娇凤,荣春艳,梁士楚*,杨瑞岸,刘星童,曾惠帆,苏秀丽,袁海莹,傅桂焕,吴燕慧

广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室/广西师范大学生命科学学院,桂林 541006

摘要:种间联结能够反映植物群落中物种间的关系和群落的稳定程度,对植被的恢复与重建、生物多样性保护等具有重要的意义和价值。为了解漓江河岸带枫杨群落的种间联结特征,基于 2×2 联列表,通过方差比率(VR)、 χ^2 检验、Pearson 相关系数、Spearman 秩相关系数检验及 PCA 排序等,对枫杨群落主要木本植物种间关联性进行定量分析和生态种组划分。结果表明:(1)乔木层、灌木层以及乔木和灌木层的总体种间关联性均呈不显著正联结,表明枫杨群落处于较稳定的阶段;(2) χ^2 检验结果显示,绝大多数种对呈不显著关联,说明群落各种对间关联较弱,各物种间呈独立分布格局;(3)Pearson 相关检验和 Spearman 秩相关检验发现各层次的显著率均较低,种间相关性不显著的种对占绝大部分,种间相关性不强;(4) χ^2 检验、Pearson 相关系数检验和 Spearman 秩相关系数检验结果虽具有一致性,但也存在一定的差异,Spearman 秩相关系数检验更具灵敏性,结合 3 种方法使用效果更佳;(5)根据 PCA 排序和种间联结关系,将 20 个主要种群划分为 4 个生态种组。

关键词:漓江;河岸带;枫杨群落;种间联结;相关检验

Interspecific associations and correlations among the main woody plants in a *Pterocarya stenoptera* community in a riparian zone of Lijiang River, Guilin, Southwest China

LIU Runhong, JIANG Yong, CHAN Bin, LI Jiaofeng, RONG Chunyan, LIANG Shichu*, YANG Ruian, LIU Xingtong, ZENG Huifang, SU Xiuli, YUAN Haiying, FU Guihuan, WU Yanhui

Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education, Guangxi Normal University / College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China

Abstract: Interspecific plant associations, which are significant quantitative and structural characteristics, reflect relationships among species in a plant community as well as community stability, and they have important theoretical significance and application values for the restoration and reconstruction of vegetation, protection of biodiversity, and sustainable utilization of the plant community. For understanding the mechanisms underlying the formation of interspecific associations in *Pterocarya stenoptera* communities, the interspecific associations of the main woody plants in a riparian *Pterocarya stenoptera* community near Lijiang River were examined. A total of 20 sample plots were set up and investigated

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC16B03);2017 年广西硕士研究生创新项目(YCSW2017079);2017 年度自治区级大学生创新创业训练计划项目(201710602236,201710602247)

收稿日期:2018-02-27; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gxlsc@sina.com

in the studied area. We selected 8 tree-layer species and 18 shrub-layer species on the basis of importance values, and quantitatively researched interspecific associations and correlations by using a set of methods, namely, variance ratio analysis of the overall association, χ^2 test, Pearson's correlation coefficient test, Spearman's rank correlation coefficient test, and principal component analysis (PCA) based on 2×2 contingency tables of species presence/absence and abundance per quadrat data. The results showed that the overall interspecific associations were non-significant, positive correlations among the main plant populations in the tree layer, shrub layer, and combined tree and shrub layer, and this reflected that the *Pterocarya stenoptera* community in the riparian zone of the Lijiang River is at a relatively stable developmental stage. The results of the χ^2 test showed that a vast majority of the species pairs were not significantly associated, reflecting a weak association among the various species pairs in the tree layer and shrub layer; most of the species showed an independent distribution pattern. Pearson's correlation coefficient and Spearman's rank correlation tests showed that the significance rates of the species pairs in the tree layer, shrub layer, and combined tree and shrub layer were lower, and the species pairs with insignificant interspecies correlations accounted for the majority of the species pairs in the tree layer, shrub layer, and combined tree and shrub layer. The results of the χ^2 test, Pearson's correlation coefficient test, and Spearman's rank correlation coefficient test were consistent; however, Spearman's correlation coefficient test was more sensitive than the χ^2 test and Pearson's correlation coefficient test, and could make up for the limitations of the χ^2 test and Pearson's correlation coefficient test. Therefore, it is better to investigate the interspecific association and correlation by combining the χ^2 test with Pearson's correlation coefficient and Spearman's rank correlation coefficient tests, because this approach can more accurately and reliably reveal the intrinsic relationship of interspecific associations and correlations among the plant species. According to the PCA and evaluation of interspecific relationships, the 20 main species in the tree and shrub layer were divided into four ecological species groups.

Key Words: Lijiang River; riparian zone; *Pterocarya stenoptera* community; interspecific association; correlation test

植物群落是由共存物种在一定生境条件下相互依存、相互竞争和协同进化并与生境相互作用而形成的有机结合体^[1-2]。种间关系是指群落内各种群之间的相互关系,是植物种群间相互联系和相互影响的综合反映,决定了群落的组成结构、功能和动态特征^[3]。种间关系的分析方法主要包括种间联结性和种间相关性两个方面。种间联结(Interspecific association)是指不同物种在空间分布上的相互关联性,反映了物种在不同生境中相互影响、相互作用所形成的有机联系,表征了物种间相互吸引或排斥的属性^[4]。种间联结通常依据物种存在或不存在二元数据,定性地检验物种之间是否存在关联;而种间相关则是以物种的数量数据(如多度、盖度和重要值等)为依据,体现的是一种定量的关系^[5-6]。因此,研究种间联结和相关性,有助于揭示群落的类型、结构、功能和演替趋势,以及植物与环境的关系,从而为植被的恢复与重建、森林的经营管理和生物多样性保护等提供科学理论依据^[3]。

枫杨(*pterocarya stenoptera*)为胡桃科(Juglandaceae)枫杨属(*Pterocarya*)落叶乔木,广泛分布于我国亚热带和暖温带地区。枫杨喜光,喜潮湿,抗干旱,根系发达,抗风耐火,较耐水淹和土壤贫瘠,生长迅速,适应性强,存活寿命较长,具有防洪护堤、净化水质、绿化环境等重要生态功能,已被广泛用于护堤护岸和造林绿化中^[7]。目前,国内外关于枫杨的研究已见许多报道,主要集中在枫杨的群落学研究^[8]、灭螺等功能作用^[9]、生物量^[10]、生物学特性^[11]、逆境条件下的生理生态特征^[12]、繁殖与栽培^[13]、病虫害防治技术^[14]、散生木优树选择^[15]、育苗技术^[16]等方面,但迄今尚未见关于枫杨群落种间关系的研究报道。

河岸带是指位于高低水位之间的河床以及高水位之上直至河水影响完全消失的地带^[17]。漓江河岸带是漓江水生生态系统和陆地生态系统之间进行物质传输、能量转化、信息交换和生物流的重要廊道、过滤器和屏障,具有独特的生态系统结构和服务功能,对维持漓江生态系统健康起着极为重要的作用,为漓江流域社会经济和生态的可持续发展提供了有力支撑。枫杨群落作为漓江河岸带植被主要群落类型之一,在涵养水源、净

化水质、调节气候、防洪固堤、保护生物多样性和维持河岸带生态平衡等方面均具有重要的作用。然而,近年来,随着旅游业和工农业的快速发展,漓江河岸带枫杨林受人为干扰和破坏日益严重,枫杨林被大量砍伐,枫杨在许多河段已不复存在,导致大量种质资源逐渐丧失,开展枫杨群落的保护研究显得十分紧迫。然而,目前漓江河岸带枫杨群落的研究仍处于探索阶段,其种间联结及相关性研究尚属空白,不利于全面认识其群落结构特征。因此,开展漓江河岸带枫杨群落的种间联结及相关性研究具有十分重要的意义。鉴于此,本研究在野外群落学调查的基础上,基于 2×2 联列表,采用方差比率(VR)、 χ^2 检验、Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数检验方法,对漓江河岸带枫杨群落中乔木层和灌木层主要木本植物的种间联结及相关性进行分析,以期揭示该区域枫杨群落的种间关系、群落结构与动态,从而为漓江河岸带植被恢复与重建、森林经营管理、生物多样性保护等提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于桂林市兴安县溶江镇至桂林市区的漓江河岸带上游河段,全长 43 km,地理坐标为 $110^{\circ}18'—110^{\circ}27'E$, $25^{\circ}18'—25^{\circ}32'N$ 。该区域属于中亚热带湿润季风气候区,四季分明,气候温和,无春旱,雨热基本同期,全年光照充足,年平均日照时数为 1670 h,年平均气温 $17.8—19.1^{\circ}C$,最冷 1 月平均气温 $8^{\circ}C$,最热 8 月平均气温 $28^{\circ}C$,年降雨量 1814—1941 mm,年蒸发量 1377—1857 mm,年平均相对湿度为 73—79%,全年无霜期为 309 d;^[18]。漓江属于典型的雨源型山区河流,径流为降雨所形成,年径流量比较丰富,但年内分配极不均匀,汛期 3—8 月,径流量占年径流总量的 80%,其中 5—6 月占年径流量的 40%,9—次年 2 月为枯水期,最枯月 1 月径流量仅占年径流量的 2%^[19]。土壤以山地黄壤为主,土层浅薄,厚度分布不均,质地粗,石砾含量高,呈弱酸性^[20]。该区域枫杨群落层次结构清晰,乔木层以枫杨为建群种,伴生有朴树(*Celtis sinensis*)、阴香(*Cinnamomum burmannii*)、乌桕(*Sapium sebiferum*)、桑(*Morus alba*)等物种;灌木层主要有石榕树(*Ficus abelii*)、空心泡(*Rubus rosaefolius*)、八角枫(*Alangium chinense*)、白饭树(*Flueggea virosa*)、萝芙木(*Rauwolfia verticillata*)、细叶水团花(*Adina rubella*)、牡荆(*Vitex negundo* var. *cannabifolia*)等,同时存在一定数量的枫杨、朴树、阴香、桑等乔木幼苗;草本层物种丰富,主要有海岛苧麻(*Boehmeria formosana*)、马兰(*Kalimeris indica*)、竹叶草(*Oplismenus compositus*)、柔枝莠竹(*Microstegium vimineum*)、麦冬(*Ophiopogon japonicus*)、红花酢浆草(*Oxalis corymbosa*)、酢浆草(*Oxalis corniculata*)、天胡荽(*Hydrocotyle sibthorpioides*)、土牛膝(*Achras aspera*)等;此外,层间及林下层存在少量的鸡矢藤(*Paederia scandens*)、乌藟莓(*Cayratia japonica*)、葎草(*Humulus scandens*)、络石(*Trachelospermum jasminoides*)、薜荔(*Ficus pumila*)、葛藟葡萄(*Vitis flexuosa*)等。

1.2 群落学调查

在充分现场全线踏查的基础上,本研究根据枫杨群落的类型、结构以及生境等特点,选取漓江河岸带上游受人为干扰较轻且发育完好的枫杨群落作为研究对象,建立了 20 个 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的典型样方,其中灵川县灵川镇阳家村和南昌村分别为 6、4 个,桂林市叠彩区大河乡南洲村和大河村分别为 4、6 个,各样方基本情况见表 1。乔木样方大小为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,在此基础上将每个样方划分成 4 个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的小样方进行灌木调查。对样方内所有胸径(DBH) $\geq 2.5\text{ cm}$ 的乔木植株进行每木调查,测量并记录种名、相对坐标、高度、胸径、冠幅等;对灌木层内所有灌木个体(包括胸径 $\leq 2.5\text{ cm}$ 的乔木幼树)记录种名、相对坐标、基径、高度和冠幅等。同时,记录每个样方的土壤类型、海拔、经纬度、距河距离、砾石裸露率、砾石直径、干扰程度等生境特征数据。

1.3 数据分析与统计

1.3.1 总体联结性检验

本文分别选取漓江河岸带枫杨群落乔木层和灌木层中重要值较高的 8 种和 18 种主要物种(表 2)进行种间联结与相关性分析。群落的总体联结性采用 Schluter^[21]提出的根据物种在样方中出现—不出现二元数据的零关联模型计算出的方差比率(VR)来测定,并通过统计量 W 检验总体关联性是否显著。其具体分析方

下,首先假设群落内各物种间无显著关联,根据下列公式逐步计算 VR 值:

表 1 漓江河岸带枫杨群落 20 个样方的基本情况

Table 1 Basic information of 20 sample plots in *pterocarya stenoptera* community of riparian zone in Lijiang River

地点 Location	样方号 No.of sample	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude /m	砾石裸露率 Exposure of gravel/%	干扰程度 Disturbance degree
阳家村	Plot1	110°22'30.08"E	25°24'48.87"N	161	28.5	中度干扰
阳家村	Plot2	110°22'31.89"E	25°24'43.01"N	162	29.8	轻度干扰
阳家村	Plot3	110°22'31.65"E	25°24'43.69"N	162	29.5	轻度干扰
阳家村	Plot4	110°22'31.85"E	25°24'43.80"N	163	26.5	中度干扰
阳家村	Plot5	110°22'32.94"E	25°24'45.81"N	163	28.8	轻度干扰
阳家村	Plot6	110°22'33.14"E	25°24'46.64"N	162	25.1	轻度干扰
南昌村	Plot7	110°21'53.49"E	25°22'58.16"N	160	1.5	轻度干扰
南昌村	Plot8	110°21'54.17"E	25°22'57.73"N	159	0.4	中度干扰
南昌村	Plot9	110°21'55.22"E	25°22'57.23"N	159	0.3	中度干扰
南昌村	Plot10	110°21'56.39"E	25°22'56.69"N	159	0.1	轻度干扰
南洲村	Plot11	110°19'49.48"E	25°20'23.83"N	155	0.1	轻度干扰
南洲村	Plot12	110°19'50.13"E	25°20'23.53"N	155	0	轻度干扰
南洲村	Plot13	110°19'50.23"E	25°20'23.20"N	156	0	轻度干扰
南洲村	Plot14	110°19'50.39"E	25°20'21.96"N	156	0	轻度干扰
大河村	Plot15	110°19'22.99"E	25°19'31.87"N	153	1.2	轻度干扰
大河村	Plot16	110°19'22.20"E	25°19'31.75"N	152	5.1	轻度干扰
大河村	Plot17	110°19'21.94"E	25°19'30.74"N	154	1.8	轻度干扰
大河村	Plot18	110°19'21.59"E	25°19'30.18"N	153	0	轻度干扰
大河村	Plot19	110°19'21.76"E	25°19'29.30"N	153	3.6	轻度干扰
大河村	Plot20	110°19'23.28"E	25°19'30.48"N	152	21.7	中度干扰

$$\delta_T^2 = \sum_{i=1}^S P_i(1 - P_i)$$
$$P_i = n_i/N$$

$$S_T^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2$$

$$VR = S_T^2/\delta_T^2$$

式中, δ_T^2 为总体样本方差; S_T^2 为总种数方差; S 为待测总物种数; N 为总样方数; P_i 为 i 物种出现的频度; n_i 为物种 i 出现的样方数; T_j 为样方 j 内出现的总物种数; t 为样方内物种的平均数。

将方差比率 (VR) 值看作群落中所有物种总体的关联指数,在独立性零假设条件下,期望值为 1。若 $VR > 1$,则表明物种之间表现出净的正关联;若 $VR < 1$,则表明物种之间表现出净的负关联;若 $VR = 1$ 则表示所有物种之间无关联^[3]。物种之间的正负关联会相互抵消。对测定结果采用统计量 W ($W = N \times VR$) 来检验 VR 值偏离 1 的显著程度,若 $W > \chi_{0.05(N)}^2$ 或 $W < \chi_{0.95(N)}^2$,则物种间总体关联显著 ($P < 0.05$),反之,若则 W 落入 χ^2 分布给出的界限 $\chi_{0.95(N)}^2 < W < \chi_{0.05(N)}^2$,则物种间总体关联不显著 ($P > 0.05$)^[22]。

1.3.2 种间联结性分析

采用 χ^2 统计量对种间联结性进行定性研究,以确定实测值与在机率基础上预期值之间偏差的显著程度。基于 2×2 列联表的 χ^2 统计量来判断种对间的联结性,在进行 χ^2 检验前,首先需根据物种在 20 个样方中是否存在,将原始数据转换成 0,1 形式的二元数据矩阵,0 表示物种在样方中不存在,1 表示物种在样方中存在。根据上述原始数据矩阵,将主要种群所有种对的定性数据列入 2×2 联列表,计算 a 、 b 、 c 、 d 的值。由于本研究的

取样方法为非连续性取样,所以非连续性数据 χ^2 需用 Yates 的连续校正公式测度^[22]。公式如下:

表 2 乔木层和灌木层主要物种种名及缩写

Table 2 Name and abbreviation of main species in tree layer and shrub layer

缩写 Abbreviation	物种 Species	缩写 Abbreviation	物种 Species
Fa	石榕树 <i>Ficus abelii</i>	Ca	风车子 <i>Combretum alfredii</i>
Rr	空心泡 <i>Rubus rosaefolius</i>	Ss	乌桕 <i>Sapium sebiferum</i>
Ps	枫杨 <i>Pterocarya stenoptera</i>	Rc	小果蔷薇 <i>Rosa cymosa</i>
Cs	朴树 <i>Celtis sinensis</i>	Fp	琴叶榕 <i>Ficus pandurata</i>
Ma	桑 <i>Morus alba</i>	Ra	粗叶悬钩子 <i>Rubus alceaefolius</i>
Ac	八角枫 <i>Alangium chinense</i>	Vn	牡荆 <i>Vitex negundo</i> var. <i>cannabifolia</i>
Ar	细叶水团花 <i>Adina rubella</i>	Rv	萝芙木 <i>Rauvolfia verticillata</i>
Fv	白饭树 <i>Flueggea virosa</i>	Ms	柳叶润楠 <i>Machilus salicina</i>
Cb	阴香 <i>Cinnamomum burmanni</i>	Cc	樟 <i>Cinnamomum camphora</i>
Bp	构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	Sc	腺柳 <i>Salix chaenomeloides</i>

$$\chi^2 = \frac{N [| ad - bc | - 0.5N]^2}{(a + b) (b + d) (c + d) (a + c)}$$

式中, N 为总样方数, a 为 2 个物种均存在的样方数, b 、 c 分别为 2 个物种单独存在的样方数, d 为 2 个物种均不存在的样方数。种间关联性通常可分为正关联和负关联 2 类, 设 $V = ((a+d)-(b+c))/(a+b+c+d)$, 若 $ad > bc$, 则 $V > 0$, 种间关联性为正联结; 若 $ad < bc$, 则 $V < 0$, 种间关联性为负联结。

当 $\chi^2 < 3.841 (P > 0.05)$ 时, 种对间相互独立, 即种对间联结不显著;

当 $3.841 < \chi^2 < 6.635 (0.01 \leq P \leq 0.05)$ 时, 种对间联结性显著;

当 $\chi^2 > 6.635 (P < 0.01)$, 种对间联结性极显著^[23]。

1.3.3 种间相关性分析

种间联结性的 χ^2 检验仅定性描述了物种间的关联性是否显著, 并不表示那些不显著的种对间就不存在关联性, 且 χ^2 检验无法判断联结强度的大小, 无法清楚地反映种间关联性的差异性^[24]。与之相比, Pearson 相关系数检验和 Spearman 秩相关系数检验则是基于数量数据, 能够清楚地反映物种间的线性关系, 这 2 个相关系数检验可以对 χ^2 检验进行有效地补充和完善。因此, 在进行种间关联性 χ^2 检验后, 需进一步利用 Pearson 相关系数检验和 Spearman 秩相关系数检验测定其关联强度。本研究利用乔木层、灌木层主要种群的多度作为 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数的数量指标, 对种对间的线性关系进行定量分析它们同时出现的可能性。

Pearson 相关系数计算公式如下:

$$r_s(i, k) = \frac{\sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i) (x_{kj} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \sum_{j=1}^N (x_{kj} - \bar{x}_k)^2}}$$

式中, $r_s(i, j)$ 是物种 i 与物种 k 之间在 j 样方中的 Pearson 相关系数, N 为总样方数, x_{ij} 和 x_{kj} 分别为物种 i 和物种 k 在 j 样方中的多度值, 它们分别组成两个向量 x_i 和 x_k ; $\bar{x}_i$ 和 $\bar{x}_k$ 分别是物种 i 和物种 k 在所有样方中多度的平均值。 r_{ik} 值域范围为 $[-1, 1]$, 正值表示正相关, 负值表示负相关。

Spearman 秩相关系数是首先需要将多度向量转化成秩化向量, 然后将秩化向量代入公式计算得出。

Spearman 秩相关系数计算公式如下:

$$r_p(i, k) = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 (x_{kj} - \bar{x}_k)^2}{N^3 - N}$$

式中, $r_p(i, j)$ 分别是种 i 与种 k 之间在 j 样方中的 Spearman 秩相关系数, N 为总样方数, x_{ij} 和 x_{kj} 分别为种 i 和种 k 在 j 样方中的多度值的秩。

重要值计算在 Excel 2016 中完成, 种间联结和相关性分析在 R 3.4.3 软件中实现, 其中 χ^2 检验、Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数检验结果分别由 spaa 包中的 sp.assoc()、sp.pair() 函数计算得出, Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数显著性通过 psych 包中的 corr.test() 函数进行检验, PCA 分析在 vegan 包 rda() 函数中进行。

2 结果与分析

2.1 总体关联性

枫杨群落各层次主要种群总体关联的计算结果如表 3 显示, 枫杨群落乔木层、灌木层以及乔木和灌木层的总体种间关联性基本一致, 各层次的总体关联性的方差比率 (VR) 均大于 1, 且检验统计量均落入界限 $\chi^2_{0.95(N)} < W < \chi^2_{0.05(N)}$, 表明漓江河岸带枫杨群落各层次主要种群在总体上均呈现不显著正关联。

表 3 枫杨群落各层次主要种群种间的总体关联性

Table 3 Overall interspecific associations among main plant populations of different hierarchical levels of *pterocarya stenoptera* community in riparian zone of Lijiang River

层次 Levels	方差比率 Variance ratio (VR)	检验统计量 (W) Statistic (W)	χ^2 临界值 $\chi^2 \text{ threshold } (\chi^2_{0.95}, \chi^2_{0.05})$	检验结果 Results
乔木层 Tree layer	1.12	22.42	(10.85, 31.41)	不显著正关联
灌木层 Shrub layer	1.06	21.21	(10.85, 31.41)	不显著正关联
乔木和灌木层 Combined tree and shrub layer	1.45	28.99	(10.85, 31.41)	不显著正关联

2.2 种间关联性

2.2.1 乔木层种群种间关联性

χ^2 检验统计显示 (图 1 和表 4), 乔木层 28 个种对中, 无极显著关联种对, 朴树与阴香、樟与腺柳 2 对为显著正关联种对, 占总种对数的 7.14%; 枫杨与樟、枫杨与腺柳 2 对为显著负关联种对, 占总种对数的 7.14%; 无显著关联或无关联种对有 24 对, 占 85.71%, 种对间关联较弱, 各物种间呈独立分布格局。

表 4 乔木层种群的 χ^2 检验、Pearson 相关检验和 Spearman 秩相关检验比较

Table 4 The comparison of χ^2 -test coefficient, Pearson's correlation coefficient and Spearman's rank correlation coefficient of tree layer plant species

检验方法 Test methods	正联结 (相关) Positive association (correlation)				负联结 (相关) Negative association (correlation)				无联结 (相关) No association (correlation)
	极显著 Distinctly significant ($P \leq 0.01$)	显著 Significant ($P \leq 0.05$)	不显著 Not significant ($P > 0.05$)	总数 Sum	极显著 Distinctly significant ($P \leq 0.01$)	显著 Significant ($P \leq 0.05$)	不显著 Not significant ($P > 0.05$)	总数 Sum	
χ^2 检验 χ^2 -test	0(0)	2(7.14)	13(46.43)	15(53.37)	0(0)	2(7.14)	7(25)	9(32.14)	4(14.28)
Pearson's 相关系数 Pearson's correlation coefficient	3(10.71)	2(7.14)	5(17.86)	10(35.71)	0(0)	0(0)	18(64.29)	18(64.29)	0(0)
Spearman 秩相关系数 Spearman's rank correlation coefficient	2(7.14)	3(10.72)	6(21.43)	11(39.29)	0(0)	1(3.57)	16(53.57)	17(60.71)	0(0)

2.2.2 灌木层种群种间关联性

χ^2 检验显示 (图 2 和表 5), 153 对灌木层主要种对中, 阴香与琴叶榕呈极显著正关联, 占总种对数的

0.65%; 朴树与白饭树、朴树与阴香、白饭树与风车子、白饭树与柳叶润楠、风车子与琴叶榕 5 对为显著正关联, 占总种对数的 3.27%; 枫杨幼树与柳叶润楠、朴树幼树与粗叶悬钩子、白饭树与乌桕幼树、白饭树与粗叶悬钩子、乌桕幼树与柳叶润楠 5 对为显著负关联, 占总种对数的 3.27%; 无显著关联或无关联种对有 142 对, 占 92.81%, 种对间关联较弱, 各物种间呈独立分布格局。

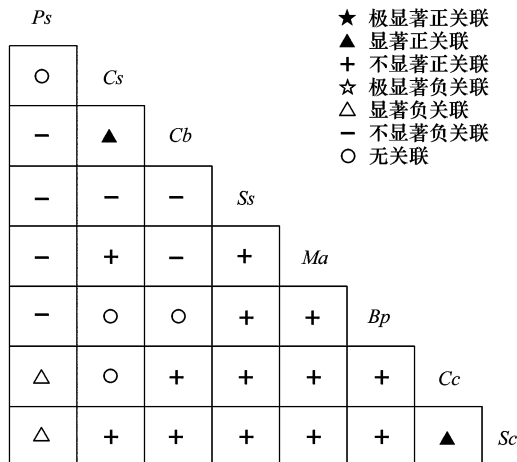


图 1 乔木层种群间种间关联性的 χ^2 检验半矩阵图

Fig.1 Semi-matrix of interspecific correction χ^2 -test of association of main population in tree layer

Ps: 枫杨, *Pterocarya stenoptera*; Cs: 朴树, *Celtis sinensis*; Cb: 阴香, *Cinnamomum burmanni*; Ss: 乌桕, *Sapium sebiferum*; Ma: 桑, *Morus alba*; Bp: 构树 *Broussonetia papyrifera*; Cc: 樟, *Cinnamomum camphora*; Sc: 腺柳, *Salix chaenomeloides*

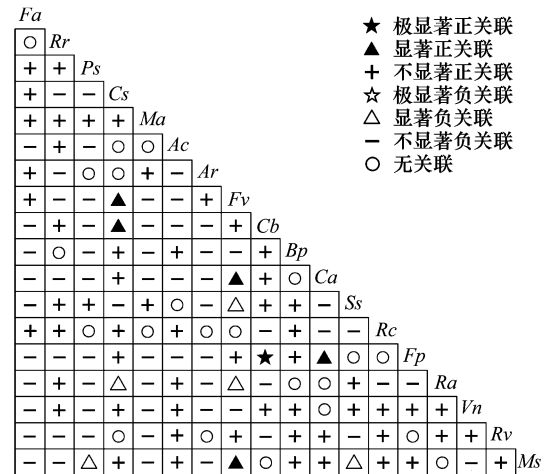


图 2 灌木层 18 个主要种群间 χ^2 检验半矩阵图

Fig.2 Semi-matrix of interspecific association χ^2 correction test of 18 main species in shrub layer

Fa: 石榕树, *Ficus abelii*; Rr: 空心泡, *Rubus rosaefolius*; Ac: 八角枫 *Alangium chinense*; Ar: 细叶水团花, *Adina rubella*; Fv: 白饭树, *Flueggea virosa*; Ca: 风车子, *Combretum alfredii*; Rc: 小果蔷薇, *Rosa cymosa*; Fp: 琴叶榕, *Ficus pandurata*; Ra: 粗叶悬钩子, *Rubus alceaefolius*; Vn: 牡荆 *Vitex negundo* var. *cannabifolia*; Rv: 萝芙木, *Rauwolfia verticillata*; Ms: 柳叶润楠, *Machilus salicina*

表 5 灌木层主要种群的 χ^2 检验、Pearson 相关检验和 Spearman 秩相关检验比较

Table 5 The comparison of χ^2 -test coefficient, Pearson's correlation coefficient and Spearman's rank correlation coefficient of shrub layer main plant species

检验方法 Test methods	正联结 (相关) Positive association (correlation)				负联结 (相关) Negative association (correlation)				无联结 (相关) No association (correlation)
	极显著 Distinctly significant ($P \leq 0.01$)	显著 Significant ($P \leq 0.05$)	不显著 Not significant ($P > 0.05$)	总数 Sum	极显著 Distinctly significant ($P \leq 0.01$)	显著 Significant ($P \leq 0.05$)	不显著 Not significant ($P > 0.05$)	总数 Sum	
χ^2 检验 χ^2 -test	1(0.65)	5(3.27)	58(37.91)	64(41.83)	0(0)	5(3.27)	63(41.17)	68(44.44)	21(13.73)
Pearson 相关系数 Pearson's correlation coefficient	8(5.23)	6(3.92)	49(32.03)	63(41.18)	1(0.65)	6(3.92)	83(54.25)	90(58.82)	0(0)
Spearman 秩相关系数 Spearman's rank correlation coefficient	11(7.19)	12(7.84)	51(33.33)	74(48.36)	7(4.58)	12(7.84)	58(37.91)	77(50.33)	2(1.31)

2.2.3 乔木和灌木层种群间关联性

χ^2 检验统计显示 (图 3 和表 6), 乔木和灌木层 190 对种对中, 无极显著关联种对; 有 11 对呈显著正关联, 占总种对数的 5.78%, 分别为石榕树与枫杨、石榕树与樟、石榕树与腺柳、枫杨与樟、枫杨与腺柳、朴树与白饭树、朴树与阴香、白饭树与风车子、白饭树与柳叶润楠、阴香与琴叶榕、风车子与琴叶榕; 有 4 对为显著负关联, 占总种对数的 2.11%, 分别为朴树与粗叶悬钩子、白饭树与乌桕、白饭树与粗叶悬钩子、樟与腺柳; 无显著关联

或无关联种对有 175 对,占 92.11%,种对间关联较弱,各物种间呈独立分布格局。

表 6 乔木和灌木层种群的 χ^2 检验、Pearson 相关检验和 Spearman 秩相关检验比较

Table 6 The comparison of χ^2 -test coefficient, Pearson's correlation coefficient and Spearman's rank correlation coefficient of combined tree and shrub layer plant species

检验方法 Test methods	正联结(相关) Positive association(correlation)				负联结(相关) Negative association(correlation)				无联结 (相关) No association (correlation)
	极显著 Distinctly significant ($P\leq 0.01$)	显著 Significant ($P\leq 0.05$)	不显著 Not significant ($P>0.05$)	总数 Sum	极显著 Distinctly significant ($P\leq 0.01$)	显著 Significant ($P\leq 0.05$)	不显著 Not significant ($P>0.05$)	总数 Sum	
χ^2 检验 χ^2 -test	0(0)	11(5.78)	80(42.11)	91(47.90)	0(0)	4(2.11)	84(44.21)	88(44.32)	11(5.79)
Pearson 相关系数 Pearson's correlation coefficient	10(5.26)	6(3.16)	55(28.95)	71(37.37)	2(1.05)	5(2.63)	110(57.90)	117(61.58)	2(1.05)
Spearman 秩相关系数 Spearman's rank correlation coefficient	11(5.79)	13(6.84)	62(32.63)	86(45.26)	7(3.69)	8(4.21)	87(45.79)	102(53.69)	2(1.05)

2.3 相关性分析

2.3.1 乔木层种群间相关性

乔木层种群 Pearson 相关检验如图 4 和表 4 所示,在所有 28 个种对中,有 3 对为极显著正相关,2 对呈显著正相关,总共有 5 对,占总对数的 17.85%;无呈显著负相关和极显著负相关的种对出现,检验显著率为 17.85%。其中,种间相关性不显著的种对占绝大部分,种间相关性不强,这同 χ^2 检验的结果相同。

乔木层种群 Spearman 秩相关检验如图 4 和表 4 所示,在所有 28 个种对中,有 2 对为极显著正相关,3 对为显著正相关,总共有 5 对,占总对数的 17.85%;无极显著负相关种对,显著负相关种对 1 对,检验显著率为 21.43%。其中,种间相关性不显著的种对占绝大部分,种间相关性不强,这同 χ^2 检验和 Pearson 相关检验的结果相似。

2.3.2 灌木层种群间相关性

灌木层主要种群 Pearson 相关系数检验结果如图 5 和表 5 所示,在所有 153 个种对中,呈极显著正相关的种对有 8 对,呈显著正相关的种对有 6 对,总共有 14 对,占总种对数的 9.15%;有 1 对呈极显著负相关,有 6 对呈显著负相关,总共有 7 对,占总种对数的 4.57%,检验显著率为 13.72%。其中,大部分种对的种间相关不显著,种间相关性不强,这与乔木层和灌木层 χ^2 检验的结果一致。

灌木层主要种群 Spearman 秩相关系数检验结果如图 5 和表 5 所示,在所有 153 个种对中,有 11 对呈极显著正相关,有 12 对呈显著正相关,总共有 23 对,占总对数的 15.03%;呈极显著负相关的种对有 7 对,呈显著负相关的种对有 12 对,总共有 19 对,占总对数的 12.42%,检验显著率为 27.45%。其中,大部分种对的种间相关不显著,种间相关性不强,这同乔木层以及灌木层 χ^2 检验和 Pearson 相关系数检验的结果相一致。

2.3.3 乔木和灌木层种群间相关性

乔木和灌木层主要种群 Pearson 相关系数检验结果如图 6 和表 6 所示,在所有 190 对种对中,呈极显著正相关的种对有 10 对,呈显著正相关的种对有 6 对,总共有 16 对,占总种对数的 8.42%;有 2 对呈极显著负相

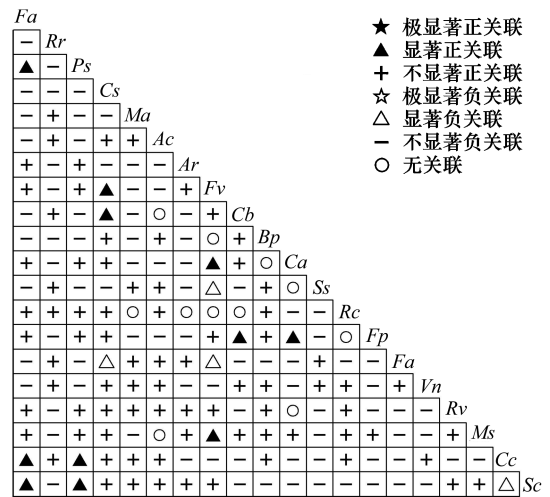


图 3 乔木和灌木层 20 个主要种群间 χ^2 检验半矩阵图
Fig.3 Semi-matrix of interspecific association χ^2 correction test of 18 main species in combined tree and shrub layer

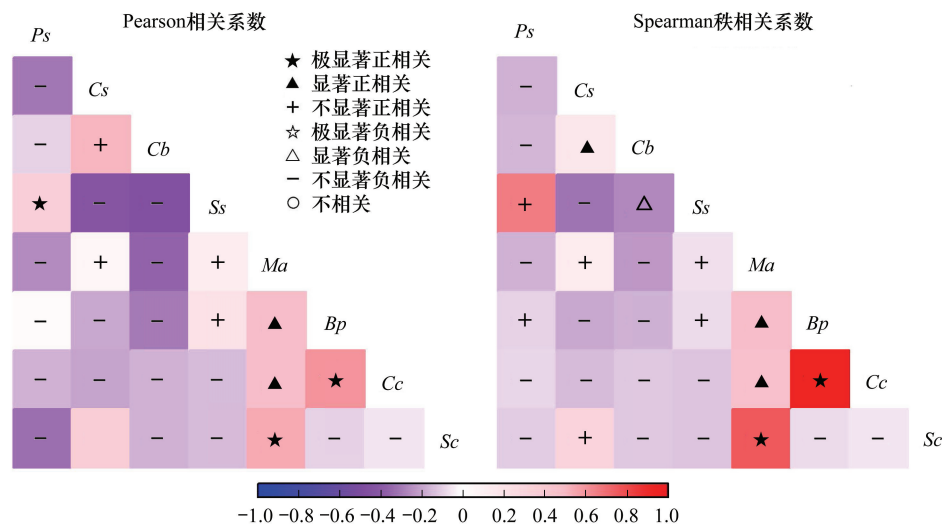


图4 乔木层种群间的 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数半矩阵图

Fig.4 Semi-matrix of Pearson's correlation coefficients and Spearman's rank correlation coefficients of main population in tree layer

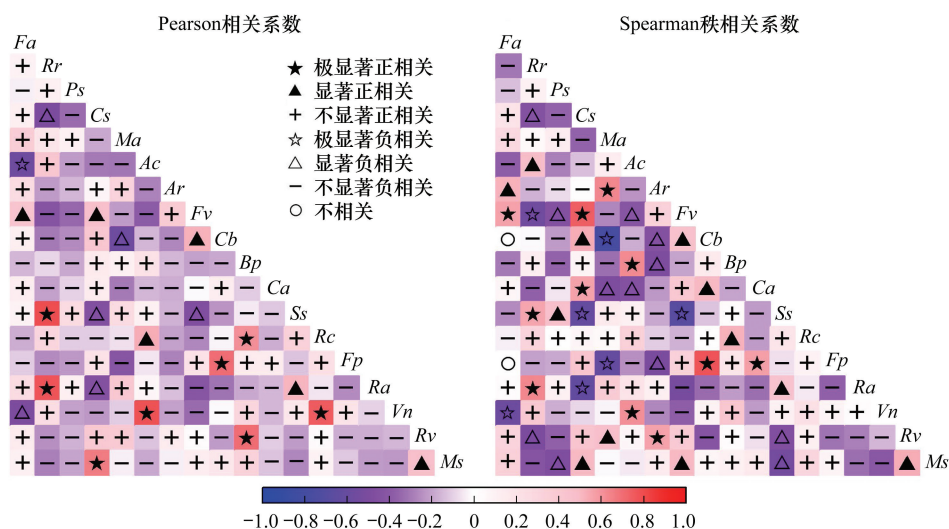


图5 灌木层种群间的 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数半矩阵图

Fig.5 Semi-matrix of Pearson's correlation coefficients and Spearman's rank correlation coefficients of main population in shrub layer

关,有 5 对呈显著负相关,总共有 7 对,占总种对数的 3.68%,检验显著率为 12.11%。其中,大部分种对的种间相关性不显著,相关性不强,这与乔木和灌木层 χ^2 检验的结果一致。

乔木和灌木层主要种群 Spearman 秩相关系数检验如图 6 和表 6 所示,在所有 190 个种对中有 11 对呈极显著正相关,有 13 对呈显著正相关,总共有 24 对,占总对数的 12.63%;呈极显著负相关的种对有 7 对,呈显著负相关的种对有 8 对,总共有 15 对,占总对数的 7.89%,检验显著率为 20.53%。其中,大部分种对的种间相关不显著,种间相关性不强,这同乔木和灌木层 χ^2 检验和 Pearson 相关系数检验的结果相一致。

2.4 生态种组的划分

生态种组是群落中生态习性相似的物种的组合,能够更准确地表达种群和群落的相互关系和种群对环境资源和主导生态因子的适应策略。本研究综合 2×2 联列表 χ^2 检验、Pearson 相关系数、Spearman 秩相关系数检验的结果,结合各物种对环境因子的不同生态适应特征,运用 PCA 排序分析,将乔木和灌木主要物种大致分为 4 大生态种组,结果如图 7 所示。

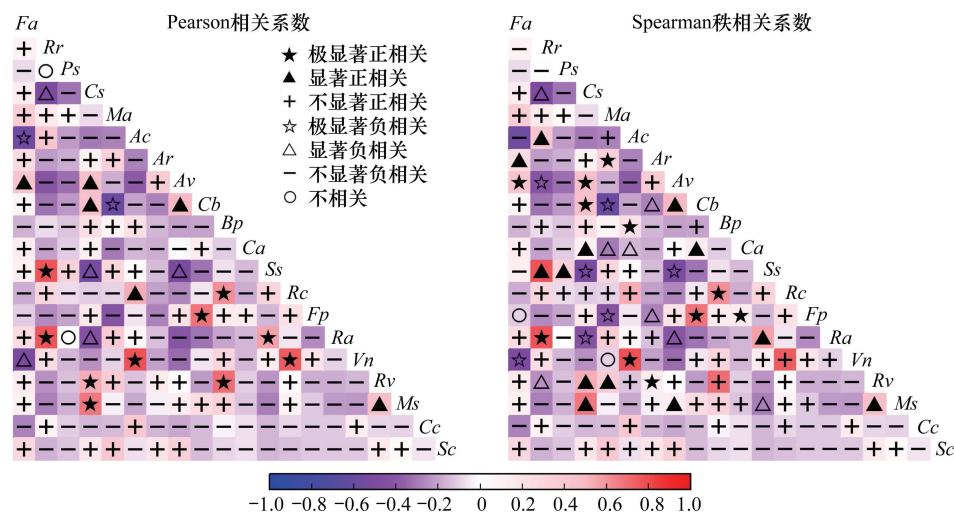


图6 乔木和灌木层种群间的 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数半矩阵图

Fig.6 Semi-matrix of Pearson's correlation coefficients and Spearman's rank correlation coefficients of main population in combined tree and shrub layer

第一生态种组:石榕树(*Fa*)、细叶水团花(*Ar*)、腺柳(*Sc*)、萝芙木(*Rv*)、白饭树(*Fv*),它们都位于第一主成分轴右侧第二主成分轴上方,耐阴喜湿,多生长于靠近漓江河岸边的林下,种间关联基本呈不显著或显著的正联结,生态习性与生境要求基本一致。第二生态种组:空心泡(*Rr*)、乌桕(*Ss*)、粗叶悬钩子(*Ra*)、枫杨(*Ps*)、桑(*Ma*),它们都分布在第一主成分轴的左侧第二主成分轴上方,该生态种组的植物均具有喜阳等特点。第三生态种组:八角枫(*Ac*)、牡荆(*Vn*)、小果蔷薇(*Rc*)、樟(*Cc*)、构树(*Bp*),分布在第一主成分轴的左侧第二主成分轴下方,该生态种组的植物均具有喜阳又略耐荫等特点,两两之间多呈不显著或显著正联结。第四生态种组:琴叶榕(*Fp*)、阴香(*Cb*)、风车子(*Ca*)、柳叶润楠(*Ms*)、朴树(*Cs*),分布在第一主成分轴的右侧第二主成分轴下方,该生态种组的植物均具有稍耐荫等特点,种间关联基本呈不显著或显著的正联结,生态习性和生境要求基本一致。

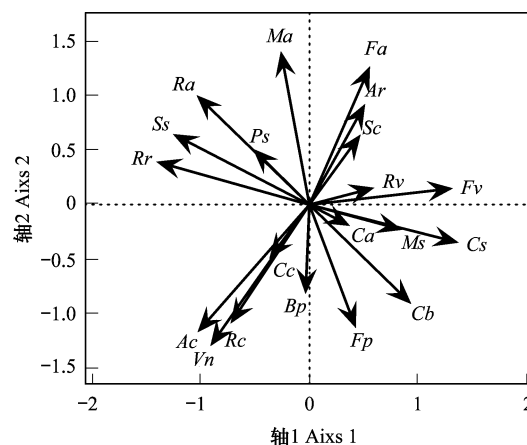


图7 乔木和灌木层主要物种 PCA 二维排序图

Fig.7 Ordination of main plant species in combined tree and shrub layer on the first and second principal component axis

3 结论与讨论

3.1 群落演替与种间联结的关系

种间联结性与群落演替相互关联,种群间总体关联性体现了群落演替的阶段及其稳定性,群落稳定性是种间联结性的表达形式^[25]。种间联结性是对一定时期内群落组成物种间相互关系的静态描述,这种关系不仅包括空间分布关系,同时也隐含着物种之间的功能,它随群落的发展而变化,在一定程度上反映物种间的相互关系及其与环境间的关系^[26-27]。然而,当群落逐渐向顶极群落发展时,其种间联结性如何发生变化,学者说法不一。如,张明霞等^[28]认为随着演替进展,群落结构及物种组成将逐渐趋于完善和稳定,种对间正联结比例增加,以求得物种间的稳定共存;而黄世能等^[29]认为随着演替进展,群落中的物种总体趋于无关联。本研究发现漓江河岸带枫杨群落乔木层、灌木层以及乔木和灌木层总体种间关系均呈不显著正关联,呈不显著

关联的种对占绝大部分,种对间的关联性较弱,表明漓江河岸带枫杨群落正处于趋于相对稳定的顶级群落演替阶段,群落中的物种组成和群落结构也趋于稳定和完善,各种群之间都能占据有利于自己的生态位,相互依赖和相互竞争大为减弱,物种间的联结较为松散,独立性相对较强。这可能与漓江河岸带枫杨群落的环境条件、目前的发展阶段、物种自身的生物、生态学特性以及外界的干扰有关。漓江河岸带受江水的持续冲刷和淤积,地形地貌复杂多变,地表支离破碎,微生境类型复杂多样,组合、分布随机,不同尺度生境异质性的相互耦合加剧了漓江河岸带生境的分异和复杂程度,由于植物对生境的生态适应性存在差异,造成物种在地理空间分布上的差异,种间联系多被微生境所割裂,各种群相遇的概率变低,造成种对间独立性相对较强。同时,群落的发生、发展和演替过程既是环境对物种筛选的过程,也是物种对环境的适应过程,在生境过滤和种间竞争的共同作用下,群落中各物种相互适应和协同进化,各种群在物种的形态、结构和生理等方面出现了许多趋向于相互弥补、相互配合的特征,如高度的差异等,导致种间生态位发生一定程度的分化,各个物种都占据着有利的位置,和谐共处,相互依赖和相互竞争大为降低和减弱,所以大多数种对联结程度不强,关系松散,独立性强^[28]。因此,种间松散的联结关系可能是漓江河岸带枫杨群落物种共存机制之一,而不同尺度上生境异质性及其耦合效应和植物的生理生态学适应策略是阐述河岸带枫杨群落物种共存机制的基础。此外,外界干扰也会降低群落结构的稳定性,漓江河岸带枫杨群落受自然和人为干扰较严重,给植物的生长带来一定负面影响。

3.2 种间联结性与相关性

种间联结性是各个物种在不同生境条件下相互影响、相互作用而形成的有机联系,它反映了物种间的相互关系及其对环境因子的生态适应性^[30]。种间联结理论认为,正联结是由于物种之间互相依赖或者是由于在异质环境中,物种之间对环境条件具有相同或相似的适应策略,导致各物种之间相互兼容,互相促进生长,常常相伴出现^[31]。在相同环境条件下,植物种对的正联结可能在一定程度上表明相互作用的存在对一方或双方都是有利的,如互惠共生和资源划分的互补等,体现了植物利用资源方式的相似性和生态位的重叠性^[27]。如,枫杨与乌桕均为乔木层喜阳物种,分布在乔木层的第一层,空心泡和粗叶悬钩子均为蔷薇科喜阳、耐土壤贫瘠灌木物种,由于对光照等环境资源需求较相似,种群间能够共同分享资源,两者生态位产生重叠而呈现极显著正联结。

种对间的负联结是由于生物学特性的不同以及种群间对环境需求的差异性或者在竞争资源时发生相互排斥,可能指示不利于一方或双方的相互作用,如种间竞争、干扰等,体现了物种间的排斥性和生态位分离,能够反映各种群对环境异质性的适应性^[32-33]。如,种对乌桕与白饭树,乌桕是组成漓江河岸带植被的主要乔木树种,常分布在地势较高的河漫滩上,对光照要求较强,而白饭树为较耐荫的灌木物种,多生长在靠近河岸的乔木林下,两者由于对生境要求的差异而产生生态位分离,从而呈现极显著负联结;阴香与乌桕,多位于乔木层,两者对光照等环境条件需求较相似,形成了激烈的竞争,从而呈现显著负联结关系,表现出较强的排斥性。

本研究中 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数的检验结果显示乔木层和灌木层负联结种对数均多于正联结种对数,但群落的总体联结性却呈现不显著正联结,这一研究结果与简敏菲等^[24]对九连山常绿阔叶林乔木主要种群的种间关联性分析结果一致。这是由于本研究结果中的正联结相对数值和具有显著或极显著关联的种对数均高于负联结的相对数值和显著或极显著种对数,说明漓江河岸带枫杨群落在长期演替过程中,群落内主要种群的生态位产生了分化,部分物种间存在有利的相互作用,形成了比较稳定的结构,这可能与枫杨群落内部分物种的生态习性密切相关。建群种枫杨与其他物种的联结性不强,甚至基本趋于负相关,这是由于主要种群间进行自我调节、分配和利用生存空间和资源的结果。一般位于乔木层第 1 亚层的植物个体,由于占据着自己合适的生态位,与其他物种的联结性不强^[34]。

3.3 不同检验方法的对比

χ^2 检验、Pearson 相关系数检验和 Spearman 秩相关系数检验的检验结果具有一致性,但也存在一定的差异。这主要是由于 χ^2 检验是基于物种在样方中是否存在的 0、1 二元矩阵数据作为衡量联结性的标准,虽然计算方法简单,且具有明确的判断标准($P < 0.01$ 和 $P < 0.05$),但是其难免会损失种间相对多度等信息,仅能定性

判断种对间是否存在关联,而不能定量地测度其关联程度的大小^[33,35]。Spearman 秩相关系数检验结果的显著与极显著的种对数基本都多于 Pearson 相关系数检验,主要是由于 Pearson 相关系数检验属于参数检验方法,要求物种必须服从连续的正态分布,然而自然界大多数物种均呈集群分布,从而使得 Pearson 相关系数检验的结果存在一定局限性,而 Spearman 秩相关系数检验是一种非参数检验方法,对物种的分布形式没有任何要求。因此,Spearman 秩相关系数检验的灵敏度较 Pearson 相关系数检验的高,应用起来也较为方便,可以有效地弥补 Pearson 相关系数检验的不足。这与前人大多数研究结果一致^[4, 36-37]。因此,在进行种间关系研究时,要以 χ^2 检验为基础,定性测定物种间联结性的显著性,辅以 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数等方法进行检验,共同分析群落中各种对的种间关系,从而相对全面、准确地反映植物群落的种间联结性。

3.4 生态种组与种间联结的关系

生态种组是群落中生态习性相似的物种的组合,而群落的种间联结性和相关性反映了群落内各物种由于受微生境影响而表现在空间分布上的相互关系,从而种间联结性的结果可以作为生态种组划分的重要依据^[26]。本研究利用 PCA 排序,综合 2×2 联列表、 χ^2 检验、Pearson 相关系数、Spearman 秩相关系数检验的结果,结合物种对环境因子的不同生态适应特性,将漓江河岸带枫杨群落主要乔木和灌木物种大致划分为 4 大生态种组。同一生态种组内各物种之间具有较强的正关联或正相关,因为它们的资源利用方式、生物学特点和生态习性比较相似,对生境具有一致的生态适应性和生态位相互分离。相反,不同生态种组间的种对由于它们的资源利用方式、生物学特点和生态习性存在差异,对生境具有不同的生态适应性和生态位重叠,从而造成各生态种组间的种对呈负关联或负相关。但是,仅从上述几个方面进行生态种组划定,由于某些物种出现的频度较小,从而得出的种间联结性和 PCA 排序结果也不非常可靠,因此,在以后的生态种组划分研究中要进一步结合土壤理化性质等环境因子、植物生活型和生活习性,以准确进行生态种组的划分。

参考文献 (References):

- [1] 陶冶, 张元明. 准噶尔沙蒿群落主要物种间的关联性分析. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1308-1314.
- [2] 郭逍宇, 张金屯, 宫辉力, 张桂莲. 安太堡矿区复垦地植被种间关系及土壤因子分析. 生物多样性, 2007, 15(1): 46-52.
- [3] 张忠华, 胡刚. 喀斯特山地青冈栎群落优势种的种间关系分析. 生态环境学报, 2011, 20(8/9): 1209-1213.
- [4] 邓莉萍, 白雪娇, 李露露, 牛沙沙, 韩美娜, 秦胜金, 周永斌. 辽东山区次生林优势木本植物种间联结与相关分析. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1473-1479.
- [5] 王慧敏, 庞春花, 张峰, 赵彩莉. 汾河流域中下游湿地植被优势种种间关联性分析. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2507-2512.
- [6] 周刘丽, 张晴晴, 赵延涛, 许洛山, 程浚洋, 朱丹妮, 宋彦君, 黄海侠, 史青茹, 阎恩荣. 浙江天童枫香树群落不同垂直层次物种间的联结性与相关性. 植物生态学报, 2015, 39(12): 1136-1145.
- [7] 袁传武, 胡兴宜, 谢先伟, 刘晓武, 陈彪, 路伊瑶, 孟凡琳. 枫杨研究进展. 湖北林业科技, 2011, (3): 38-42.
- [8] 陈浩峰, 殷荣华. 武当山湖北枫杨林的群落学研究. 华中师范大学学报: 自然科学版, 1994, 28(2): 243-248.
- [9] 陈全胜, 杨毅, 王万贤, 柯文山, 马安宁, 王宏. 枫杨、夹竹桃、土大黄及其组合灭螺效果研究. 湖北大学学报: 自然科学版, 2000, 22(1): 84-87.
- [10] 李纪元, 饶龙兵, 王惠雄, 潘德寿. 枫杨种源苗期生长及生物量地理变异研究. 林业科学研究, 2000, 14(1): 60-66.
- [11] 徐有明, 邹明宏, 史玉虎, 胡兴宜, 袁克侃. 枫杨的生物学特性及其资源利用的研究进展. 东北林业大学学报, 2002, 30(3): 42-48.
- [12] 贾中民, 魏虹, 田晓峰, 李昌晓. 长期水淹对枫杨幼苗光合生理和叶绿素荧光特性的影响. 西南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(5): 124-129.
- [13] 苏小娟, 胡功鑫, 夏玉宝, 刘常明. 枫杨栽培技术及应用. 现代农村科技, 2013, (20): 55-55.
- [14] 魏胜林, 谢立群. 枫杨树干木霉菌及其生活环境与防治药剂. 江苏农业科学, 2015, 43(9): 186-188.
- [15] 王晓荣, 胡兴宜, 杜克兵, 付甜, 庞宏东, 胡文杰. 枫杨散生木优树选择研究. 中国农学通报, 2016, 32(22): 15-20.
- [16] 曲良谱, 吴红, 王善. 枫杨容器育苗密度试验. 天津农业科学, 2017, 23(10): 98-100.
- [17] Nilsson C, Berggren K. Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation: dam operations have caused global-scale ecological changes in riparian ecosystems. How to protect river environments and human needs of rivers remains one of the most important questions of our time. Bioscience, 2000, 50(9): 783-792.
- [18] 田华丽, 夏艺, 梁士楚, 田丰, 吴华静, 覃盈盈. 桂林漓江湿地植被种类组成及其区系成分. 湿地科学, 2015, 13(1): 103-110.

- [19] 段文军,王金叶,张立杰,李海防,黄华乾. 1960~2010 年漓江流域降水变化特征研究. 水文, 2014, 34(5): 88-93.
- [20] 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.
- [21] Schuler D. A variance test for detecting species association, with some example applications. Ecology, 1984, 65(3): 998-1005.
- [22] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004.
- [23] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [24] 简敏菲,刘琪璟,朱笃,游海. 九连山常绿阔叶林乔木优势种群的种间关联性分析. 植物生态学报, 2009, 33(4): 672-680.
- [25] 金俊彦,覃文更,谭卫宁,罗柳娟,覃国乐. 濒危植物单性木兰群落主要种群种间联结性研究. 西部林业科学, 2013, 42(3): 86-94.
- [26] 黄祥童,王绍先,黄炳军,尹航,崔凯峰,赵伟,范宇光,顾德峰. 珍稀植物对开蕨与其伴生物种的联结性及群落稳定性. 生态学报, 2015, 35(1): 80-90.
- [27] Ward J S, Parker G R, Ferrandino F J. Long-term spatial dynamics in an old-growth deciduous forest. Forest Ecology and management, 1996, 83(3): 189-202.
- [28] 张明霞,王得祥,康冰,张岗岗,刘璞,杜焰玲,于飞. 秦岭华山松天然次生林优势种群的种间联结性. 林业科学, 2015, 51(1): 12-21.
- [29] 黄世能,李意德,骆土寿,王伯荪. 海南岛尖峰岭次生热带山地雨林树种间的联结动态. 植物生态学报, 2000, 24(5): 569-574.
- [30] 陈玉凯,杨小波,李东海,农寿千,吕晓波,吕洁杰,杨民,李小成. 海南霸王岭海南油杉群落优势种群的种间联结性研究. 植物科学学报, 2011, 29(3): 278-287.
- [31] 房飞,胡玉昆,张伟,公延明,柳妍妍,杨秀娟. 高寒草原植物群落种间关系的数量分析. 生态学报, 2012, 32(6): 1898-1907.
- [32] 刘翔宇,何东,田文斌,宋彦君,尹芳,许沼山,程浚洋,阎恩荣. 浙江普陀山岛森林木本植物的种间关联格局. 植物生态学报, 2017, 41(12): 1219-1227.
- [33] 徐满厚,刘敏,翟大彤,刘彤. 植物种间联结研究内容与方法评述. 生态学报, 2016, 36(24): 8224-8233.
- [34] 金则新. 浙江天台山常绿阔叶林优势种群结构及种间联结性研究. 广西植物, 2002, 22(3): 203-208.
- [35] 李秋玲,范庆安,马晓勇,高昆,张峰. 山西黄河湿地植被优势种群种间关系. 生态学杂志, 2007, 26(10): 1516-1520.
- [36] 高永恒,曾晓阳,周国英,王根绪. 长江源区高寒湿地植物群落主要种群种间关系分析. 湿地科学, 2011, 9(1): 1-7.
- [37] 杨兆静,张钦弟,李豪,白玉宏,毕润成. 山西五鹿山自然保护区暴马丁香群落木本植物种间联结性分析. 植物科学学报, 2013, 31(1): 42-48.