

DOI: 10.20103/j.stxb.202407181693

商乃演,李东海,杨小波,黄耀,刘人通,苏欣,杜春雁,和绍翠,祁天运.濒危植物蝴蝶树所在群落不同林层优势树种生态位与种间联结.生态学报, 2025, 45(7): 3389-3400.

Shang N Y, Li D H, Yang X B, Huang Y, Liu R T, Su X, Du C Y, He S C, Qi T Y. Niches and interspecific associations of dominant tree species of different forest layers in the communities with the endangered plant *Heritiera parvifolia*. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3389-3400.

濒危植物蝴蝶树所在群落不同林层优势树种生态位与种间联结

商乃演,李东海,杨小波*,黄耀,刘人通,苏欣,杜春雁,和绍翠,祁天运

海南大学,生态学院,海口 570228

摘要:探究濒危植物群落优势树种的种间关系,有助于了解优势树种间资源利用习性及其群落演替阶段,可为区域的濒危植物保育和自然植被恢复提供理论依据。基于海南热带雨林国家公园吊罗山片区蝴蝶树所在群落的野外调查数据,利用 Shannon 和 Levins 生态位宽度指数、Levins 生态位重叠指数、方差比率法(VR)、 χ^2 检验和 Spearman 秩相关检验法,对群落内的中、小乔木层和大、中灌木层优势树种生态位和种间联结进行分析。结果显示:(1)不同林层的蝴蝶树重要值和生态位宽度均较大,在群落资源竞争中占据主导地位,中、小乔木层和大灌木层的青梅重要值偏高,而生态位宽度远小于蝴蝶树,分布频度对生态位宽度影响较大。(2)大灌木层优势树种存在生态位重叠种对(188组)最多,中灌木层(137组)最少,更能充分利用群落资源,蝴蝶树在小乔木层存在明显生态位重叠种对(15组)最多,种间竞争激烈。(3)中乔木层优势树种总体呈不显著正联结,而小乔木层和大、中灌木层均呈显著正联结,群落稳定性较高。(4)综合 χ^2 检验和 Spearman 秩相关检验发现,小乔木层和中灌木层种间正相关占优势,更利于物种共存,但不同林层的绝大部分种对均呈不显著关联,种间关联较松散,各物种分布的独立性较强。

关键词:蝴蝶树;不同林层;生态位宽度;生态位重叠;种间关联

Niches and interspecific associations of dominant tree species of different forest layers in the communities with the endangered plant *Heritiera parvifolia*

SHANG Naiyan, LI Donghai, YANG Xiaobo*, HUANG Yao, LIU Rentong, SU Xin, DU Chunyan, HE Shaocui, QI Tianyun

College of Ecology, Hainan University, Haikou 570228, China

Abstract: Understanding interspecific relationships among dominant tree species in endangered plant communities enhances our knowledge of their ecological behaviors, especially regarding resource utilization and community succession phases, providing a theoretical foundation for conserving regionally endangered plants and restoring natural vegetation. This study analyzed the niche and interspecific associations of dominant tree species with field investigation data from communities of *Heritiera parvifolia* in Diaoluo Mountain of the Hainan Tropical Rainforest National Park. The analysis utilized the Shannon and Levins niche width index, Levins niche overlap index, variance ratio (VR), Chi-square test (χ^2 test), and Spearman's rank correlation coefficient test across the middle and small arbor layers and the large and middle shrub layers. The results showed that: (1) The importance values and niche width of *Heritiera parvifolia* were greater across various forest layers. This suggested that *Heritiera parvifolia* occupied a dominant position in the competition for community resources. The importance values of *Vatica mangachapoi* in the middle and small arbor layers, as well as in the large shrub layer was high,

基金项目:海南省林业局资助项目(HD-KYH-2022165)

收稿日期:2024-07-18; 网络出版日期:2025-01-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanfengxb@163.com

However, its niche width was significantly smaller than that of *Heritiera parvifolia*. The frequency of distribution had a greater effect on niche width. (2) The dominant tree species in the large shrub layer had the highest number of species pairs (188 groups) with niche overlap and the lowest number in the middle shrub layer (137 groups). This finding suggests that the dominant tree species in the middle shrub layer process a heightened capacity for environmental adaptation and resource utilization. *Heritiera parvifolia* had the highest number of species pairs (15 groups) with significant niche overlap in the small arbor layer, and interspecific competition was intense. (3) The dominant tree species in the middle arbor layer showed an overall insignificant positive association, but the dominant tree species in the small arbor layer, as well as large and middle shrub layers, demonstrated a significantly positive contributing to high community stability. (4) The χ^2 test and Spearman's rank correlation coefficient test further indicated that a predominance of positive linkages between species facilitated coexistence in the small arbor and middle shrub layers. However, the majority of species pairs in different forest layers were not significantly correlated, and the correlation among species was weak. Most species demonstrated high degrees of independence.

Key Words: *Heritiera parvifolia*; different forest layers; niche width; niche overlap; interspecific associations

植物群落是指生活在一定区域内具有特定功能的植物集合体,各物种在生境中通过相互竞争、相互依存及协同进化,使群落能够保持相对稳定状态^[1-3]。生态位是生态学研究的重要理论之一,不仅能定量反映物种对环境资源的利用能力,还可以解释群落中的种间相互作用、物种共存和动态演替等生态过程^[4-5]。种间联结是种间亲和性大小的直观表现形式,对认识群落结构、功能与物种特性关系有着重要的指导作用^[6]。开展生态位和种间联结研究,有利于更好地了解物种利用环境资源的能力,种间关系与群落演替现状。近年来,不同生活型、植被型和同一群落内不同层片优势种的生态位与种间联结研究受到学者们的广泛关注^[7-9],但关于物种多样性高且层次结构不明显的热带雨林优势树种研究较少,尤其是针对濒危植物群落不同层片下的不同林层(乔灌木层分别划分的大、中、小共九个林层)内优势树种的相关研究尚无报道。综合研究热带雨林濒危植物群落不同林层优势树种的生态位与种间联结特征,有助于全面了解物种生态学特性、种间关系和群落演替阶段,并能为生物多样性保护和自然植被恢复提供科学依据。

海南热带雨林是中国现存分布最集中、类型最多样、保存最完好、连片面积最大的大陆性岛屿型热带雨林,是生物多样性保护的热点区之一^[10]。低地雨林、山地雨林及高山云雾林等多样的地带性植被孕育了丰富的植物种类,其中分布的国家重点保护野生植物多达 53 科 83 属 173 种^[11],低地雨林的物种丰富度最高,但同时也存在较大程度的干扰影响,导致生境退化严重。蝴蝶树(*Heritiera parvifolia*)为梧桐科(*Sterculiaceae*)银叶树属(*Heritiera*)的常绿乔木,属于国家二级重点保护野生植物,是海南中偏东南部热带低地雨林的森林优势种^[12]。上世纪九十年代前的商业性采伐导致低地雨林植被破坏严重,蝴蝶树因其具备材质坚硬,纹理通直且耐腐等一类材的特点,种群数量经采伐后大幅减少^[13-14]。目前关于蝴蝶树的研究仅见于植物资源调查、种源繁育与基因组测序等方面^[15-17],现阶段的野外群落生态学特征鲜有文献记载。

特殊的地貌条件和人为干扰对植物的分布、适应具有重要影响^[9]。海南热带雨林国家公园吊罗山片区作为蝴蝶树野外种群的主要分布区之一,其所处的低地雨林局部地区岩石裸露,土壤有机质集中分布于土壤表层,养分流失严重且人为活动频繁^[18],在该地区开展蝴蝶树所在群落不同林层优势树种的生态位与种间关联研究极为必要。因此,本研究以吊罗山片区蝴蝶树所在群落的优势树种为研究对象,在野外踏查和群落学调查的数据基础上,分析中、小乔木层和大、中灌木层优势树种的生态位宽度和生态位重叠程度,采用方差比率法(*VR*) χ^2 检验和 Spearman 秩相关检验分析种间联结特征,旨在揭示海南吊罗山蝴蝶树所在群落不同林层优势树种的种间关系、群落结构及演替现状,从而为濒危植物群落保育、低地雨林植被恢复和森林可持续发展提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海南热带雨林国家公园吊罗山片区(18°43′—18°58′N,109°45′—110°30′E),位于海南岛东南部的陵水、保亭和琼中等县的交界处。该区域属于热带海洋性季风气候区,干湿季明显,年均温度 24.6 ℃,最高月均气温 28.4 ℃(七月),最低月均气温 15.3 ℃(一月),年降雨量为 1870—2760 mm,是海南雨量和热量最大的地区之一,发育着中国极为珍稀的原始热带雨林。成土母岩以花岗岩和闪长岩为主,土壤类型从低海拔地区的黄色砖红壤过渡到高海拔的山地黄壤,有机质含量较高。植被类型多样,沿海拔梯度分布有低地雨林、山地雨林、高山云雾林等植被^[19]。植物资源丰富,国家级重点保护野生植物种类较多,其中包括闽粤苏铁(*Cycas taiwaniana*)、卷萼兜兰(*Paphiopedilum appletonianum*)等国家一级重点保护野生植物 4 种,青梅(*Vatica mangachapoi*)、美丽火桐(*Firmiana pulcherrima*)、油楠(*Sindora glabra*)、土沉香(*Aquilaria sinensis*)等国家二级重点保护野生植物 92 种^[11]。

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查

2023 年 12 月,在对海南热带雨林国家公园吊罗山片区实地踏查的基础上,以蝴蝶树种群为目标种群进行调查,选取片区内蝴蝶树发育较好的区域设置 20 个 20 m×20 m 的样地(表 1),每样地划分 4 个 10 m×10 m 的乔木样方,在样地的中心和四角再划分 5 个 5 m×5 m 的灌木样方。调查样方内所有物种,测量并记录种名、胸径、树高、冠幅和数量等信息,同时测定海拔和坡度等地形因子。

表 1 样地概况

Table 1 Status of sampling plots

样地 Plot	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	人为干扰强度 Human disturbance
1	109.898°	18.670°	247	7	弱
2	109.897°	18.670°	266	5	弱
3	109.897°	18.671°	268	28	无
4	109.896°	18.671°	259	26	无
5	109.839°	18.710°	615	19	无
6	109.891°	18.668°	411	21	弱
7	109.889°	18.668°	378	8	无
8	109.836°	18.701°	531	23	弱
9	109.836°	18.699°	231	8	弱
10	109.881°	18.671°	481	13	无
11	109.840°	18.700°	520	30	无
12	109.843°	18.698°	633	40	无
13	109.856°	18.685°	544	25	无
14	109.840°	18.699°	543	35	弱
15	109.895°	18.666°	410	50	弱
16	109.900°	18.669°	215	20	弱
17	109.830°	18.711°	655	20	中
18	109.891°	18.671°	296	45	中
19	109.881°	18.698°	697	15	强
20	109.831°	18.700°	374	30	中

1.2.2 林层划分及重要值计算

野外调查样方中,未记录到大乔木层(高度≥25 m)树种,而小灌木层(30 cm≤高度<50 cm)和草本层的

植物种类较少。因此,参照中国植被志^[20]群落调查方法,按照不同高度级划分蝴蝶树所在群落的林层,分别为中乔木层(8 m≤高度<25 m)、小乔木层(5 m≤高度<8 m)、大灌木层(200 cm≤高度<500 cm)和中灌木层(50 cm≤高度<200 cm),选取重要值代表树种的优势度,分别对不同林层排名前 20 的优势树种开展生态位和种间联结分析。重要值(IV)计算公式参照宋永昌^[21]的方法。

1.2.3 生态位特征

生态位宽度反映了物种利用环境资源的能力,宽度越大,分布范围越广。生态位重叠反映了物种间利用资源的相似性,重叠程度越高,竞争越大。以重要值为参数依据,分别采用 Shannon 指数(B_s)和 Levins 指数(B_L)计算不同林层优势树种的生态位宽度,利用 Levins 生态位重叠指数(O_{ik})计算生态位重叠程度,计算公式参照张金屯^[22]和高伟等^[7]的方法。

1.2.4 总体联结性检验

采用方差比率法(VR)测定样方内不同林层的总体联结性,并用统计量 W 检验总体联结性是否显著,计算公式参照 Schuller^[23]和刘润红等^[2]的方法。

1.2.5 种间联结分析

利用 χ^2 检验和 Spearman 秩相关检验计算群落内不同林层优势树种的种间联结性。基于物种是否存在样方中建立 0,1 二元矩阵,由于是非连续性取样,因此采用 Yates 的连续校正公式计算 χ^2 值。 χ^2 检验未能准确判断不显著种对间的联结性,而 Spearman 秩相关检验属于定量检验,使用该方法能准确地反映出种对间的显著性和相关性,两种检验的计算公式参照张金屯^[22]和阮枰臻等^[9]的方法。

所有数据整理,重要值计算均在 Microsoft Excel 2016 中完成,生态位在 R 4.3.2 中完成计算,种间联结及相关制图由 Origin2021 完成。

2 结果与分析

2.1 蝴蝶树所在群落不同林层优势树种的重要值及生态位宽度

如表 2 所示,中乔木层树种重要值依次为青梅(5.82)、蝴蝶树(4.28)等,青梅和蝴蝶树的重要值与其他树种差异较大,说明这 2 种植物在群落资源竞争中占据相对优势地位。小乔木层的蝴蝶树(4.83)、青梅(3.69)、藤春(*Alphonsea monogyna*)(3.67),大灌木层的蝴蝶树(4.09)、青梅(3.96),中灌木层的蝴蝶树(4.98)、山铜材(*Chunia bucklandioides*)(4.19)重要值均与所在林层的其他树种差异较大。

表 2 蝴蝶树所在群落不同林层优势树种重要值及生态位宽度

Table 2 Importance value and niche width among dominant tree species of different forest layers in the communities with *Heritiera parvifolia*

层次 Levels	排名 Ranking	物种名 Species name	缩写 Abbreviation	重要值 IV/%	生态位宽度 Niche width	
					B_s	B_L
中乔木层 Middle arbor layer	1	青梅 <i>Vatica mangachapoi</i>	Vm	5.82	1.92	4.76
	2	蝴蝶树 <i>Heritiera parvifolia</i>	Hp	4.28	2.46	10.44
	3	黄桐 <i>Endospermum chinense</i>	Ec	2.30	1.58	4.60
	4	肉实树 <i>Sarcosperma laurinum</i>	Sl	2.12	2.49	11.37
	5	海南柿 <i>Diospyros hainanensis</i>	Dh	2.02	1.89	6.23
	6	鹅掌柴 <i>Heptapleurum heptaphyllum</i>	Hh	2.01	1.99	6.60
	7	细子龙 <i>Amesiodendron chinense</i>	Ac	1.82	1.94	6.04
	8	山铜材 <i>Chunia bucklandioides</i>	Cb	1.78	1.30	3.39
	9	海南蕈树 <i>Altingia obovata</i>	Ao	1.73	1.33	3.57
	10	海南锥 <i>Castanopsis hainanensis</i>	Ch	1.62	1.54	4.28
	11	黧蒴锥 <i>Castanopsis fissa</i>	Cf	1.62	0.00	1.00
	12	钝齿木荷 <i>Schima crenata</i>	Sc	1.48	1.54	4.37
	13	黄杞 <i>Engelhardia roxburghiana</i>	Er	1.43	1.74	5.38

续表

层次 Levels	排名 Ranking	物种名 Species name	缩写 Abbreviation	重要值 IV/%	生态位宽度 Niche width	
					B_S	B_L
小乔木层 Small arbor layer	14	九丁榕 <i>Ficus nervosa</i>	Fn	1.33	0.00	1.00
	15	山乌桕 <i>Triadica cochinchinensis</i>	Tc	1.32	1.73	5.36
	16	钝叶新木姜子 <i>Neolitsea obtusifolia</i>	No	1.29	1.27	3.27
	17	翻白叶树 <i>Pterospermum heterophyllum</i>	Ph	1.28	1.38	3.94
	18	藤春 <i>Alphonsea monogyna</i>	Am	1.26	1.36	3.14
	19	楝叶吴萸 <i>Tetradium glabrifolium</i>	Tg	1.25	1.48	4.02
	20	岭南山竹子 <i>Garcinia oblongifolia</i>	Go	1.23	1.89	6.28
	1	蝴蝶树 <i>Heritiera parvifolia</i>	Hp	4.83	2.63	12.38
	2	青梅 <i>Vatica mangachapoi</i>	Vm	3.69	2.01	4.60
	3	藤春 <i>Alphonsea monogyna</i>	Am	3.67	2.19	7.21
	4	黄椿木姜子 <i>Litsea variabilis</i>	Lv	2.49	2.36	8.64
	5	钝齿木荷 <i>Schima crenata</i>	Sc	2.44	1.36	3.83
	6	肉实树 <i>Sarcosperma laurinum</i>	Sl	2.29	2.19	7.32
	7	岭南山竹子 <i>Garcinia oblongifolia</i>	Go	2.26	2.56	11.18
	8	山铜材 <i>Chunia bucklandioides</i>	Cb	2.10	1.20	2.81
	9	鹅掌柴 <i>Heptapleurum heptaphyllum</i>	Hh	2.03	1.79	5.34
	10	白颜树 <i>Gironniera subaequalis</i>	Gs	1.99	1.81	4.62
	11	九节 <i>Psychotria asiatica</i>	Pa	1.97	2.01	5.42
	12	琼榄 <i>Gonocaryum lobbianum</i>	Gl	1.87	1.85	4.87
	13	白肉榕 <i>Ficus vasculosa</i>	Fv	1.67	1.80	5.42
大灌木层 Large shrub layer	14	毛茶 <i>Antirhea chinensis</i>	Anc	1.65	1.18	2.44
	15	粗毛野桐 <i>Hancea hookeriana</i>	Hah	1.59	1.71	5.12
	16	大花五桠果 <i>Dillenia turbinata</i>	Dt	1.43	1.54	3.87
	17	火烧花 <i>Mayodendron igneum</i>	Mi	1.40	1.55	3.98
	18	海南黄檀 <i>Dalbergia hainanensis</i>	Dah	1.32	2.00	6.18
	19	白茶树 <i>Koilocarpus hainanense</i>	Kh	1.31	1.25	3.22
	20	橄榄 <i>Canarium album</i>	Ca	1.22	1.91	5.70
	1	蝴蝶树 <i>Heritiera parvifolia</i>	Hp	4.09	2.73	13.46
	2	青梅 <i>Vatica mangachapoi</i>	Vm	3.96	2.24	6.25
	3	九节 <i>Psychotria asiatica</i>	Pa	3.06	2.47	9.99
	4	山铜材 <i>Chunia bucklandioides</i>	Cb	2.27	1.18	2.89
	5	粗毛野桐 <i>Hancea hookeriana</i>	Hah	1.78	1.87	6.06
	6	岭南山竹子 <i>Garcinia oblongifolia</i>	Go	1.60	2.29	8.91
	7	肉实树 <i>Sarcosperma laurinum</i>	Sl	1.59	2.23	8.36
	8	藤春 <i>Alphonsea monogyna</i>	Am	1.56	2.25	8.30
	9	鹅掌柴 <i>Heptapleurum heptaphyllum</i>	Hh	1.53	2.00	6.00
	10	黄椿木姜子 <i>Litsea variabilis</i>	Lv	1.43	2.23	7.99
	11	白颜树 <i>Gironniera subaequalis</i>	Gs	1.29	2.11	7.60
	12	朱砂根 <i>Ardisia crenata</i>	Arc	1.25	1.88	6.11
	13	药用狗牙花 <i>Tabernaemontana bovina</i>	Tb	1.21	1.74	5.52
	14	琼榄 <i>Gonocaryum lobbianum</i>	Gl	1.17	1.64	4.49
	15	香楠 <i>Aidia canthioides</i>	Aic	1.10	1.70	5.08
	16	白肉榕 <i>Ficus vasculosa</i>	Fv	1.10	1.75	5.49
	17	山油柑 <i>Acronychia pedunculata</i>	Ap	1.08	1.77	4.55
	18	海南黄檀 <i>Dalbergia hainanensis</i>	Dah	1.08	2.00	6.90
	19	粗丝木 <i>Gomphandra tetrandra</i>	Gt	1.08	2.02	7.11

续表

层次 Levels	排名 Ranking	物种名 Species name	缩写 Abbreviation	重要值 IV/%	生态位宽度 Niche width	
					B_s	B_L
中灌木层 Middle shrub layer	20	大花五桠果 <i>Dillenia turbinata</i>	Dt	1.08	2.05	7.51
	1	蝴蝶树 <i>Heritiera parvifolia</i>	Hp	4.98	2.38	10.12
	2	山铜材 <i>Chunia bucklandioides</i>	Cb	4.19	1.18	2.70
	3	山骨罗竹 <i>Schizostachyum hainanense</i>	Sh	3.42	1.89	6.41
	4	九节 <i>Psychotria asiatica</i>	Pa	3.32	1.81	5.45
	5	琼岛染木树 <i>Saprosma merrillii</i>	Sm	2.39	1.34	3.67
	6	革叶山姜 <i>Alpinia coriacea</i>	Alc	2.17	1.38	3.45
	7	海南轴榈 <i>Licuala hainanensis</i>	Lh	1.77	1.60	4.92
	8	穗花轴榈 <i>Licuala fordiana</i>	Lf	1.57	1.53	4.26
	9	广东粗叶木 <i>Lasianthus curtisii</i>	Lc	1.57	1.55	4.46
	10	青梅 <i>Vatica mangachapoi</i>	Vm	1.47	1.25	2.84
	11	海南五月茶 <i>Antidesma hainanense</i>	Ah	1.47	1.52	4.33
	12	海南染木树 <i>Saprosma hainanensis</i>	Sah	1.40	1.23	2.98
	13	延龄耳草 <i>Hedyotis paridifolia</i>	Hep	1.32	1.01	2.59
	14	桃榔 <i>Arenga westerhoutii</i>	Aw	1.32	1.02	2.60
	15	单穗擂鼓箭 <i>Mapania wallichii</i>	Mw	1.32	0.83	1.96
	16	弯管花 <i>Chassalia curviflora</i>	Cc	1.30	1.02	2.30
	17	山菅兰 <i>Dianella ensifolia</i>	De	1.30	1.36	3.83
	18	纽子果 <i>Ardisia polysticta</i>	Arp	1.30	1.35	3.71
	19	锡叶藤 <i>Tetracera sarmentosa</i>	Ts	1.25	0.49	1.45
	20	药用狗牙花 <i>Tabernaemontana bovina</i>	Tb	1.22	1.01	2.56

IV: Importance value; B_s : 生态位宽度 Shannon 指数; B_L : 生态位宽度 Levins 指数; Vm: 青梅 *Vatica mangachapoi*; Hp: 蝴蝶树 *Heritiera parvifolia*; Ec: 黄桐 *Endospermum chinense*; Sl: 肉实树 *Sarcosperma laurinum*; Dh: 海南柿 *Diospyros hainanensis*; Hh: 鹅掌柴 *Heptapleurum heptaphyllum*; Ac: 细子龙 *Amesiodendron chinense*; Cb: 山铜材 *Chunia bucklandioides*; Ao: 海南蕈树 *Altingia obovata*; Ch: 海南锥 *Castanopsis hainanensis*; Cf: 黧蒴锥 *Castanopsis fissa*; Sc: 钝齿木荷 *Schima crenata*; Er: 黄杞 *Engelhardia roxburghiana*; Fn: 九丁榕 *Ficus nervosa*; Tc: 山乌桕 *Triadica cochinchinensis*; No: 钝叶新木姜子 *Neolitsea obtusifolia*; Ph: 翻白叶树 *Pterospermum heterophyllum*; Am: 藤春 *Alphonsea monogyna*; Tg: 楝叶吴萸 *Tetradium glabrifolium*; Go: 岭南山竹子 *Garcinia oblongifolia*; Lv: 黄椿木姜子 *Litsea variabilis*; Gs: 白颜树 *Gironniera subaequalis*; Pa: 九节 *Psychotria asiatica*; Gl: 琼榄 *Gonocaryum lobbianum*; Fv: 白肉榕 *Ficus vasculosa*; Anc: 毛茶 *Antirhea chinensis*; Hah: 粗毛野桐 *Hancea hookeriana*; Dt: 大花五桠果 *Dillenia turbinata*; Mi: 火烧花 *Mayodendron igneum*; Dah: 海南黄檀 *Dalbergia hainanensis*; Kh: 白茶树 *Koelodepas hainanense*; Ca: 橄榄 *Canarium album*; Arc: 朱砂根 *Ardisia crenata*; Tb: 药用狗牙花 *Tabernaemontana bovina*; Aic: 香楠 *Aidia canthioides*; Ap: 山油柑 *Acronychia pedunculata*; Gt: 粗丝木 *Gomphandra tetrandra*; Sh: 山骨罗竹 *Schizostachyum hainanense*; Sm: 琼岛染木树 *Saprosma merrillii*; Alc: 革叶山姜 *Alpinia coriacea*; Lh: 海南轴榈 *Licuala hainanensis*; Lf: 穗花轴榈 *Licuala fordiana*; Lc: 广东粗叶木 *Lasianthus curtisii*; Ah: 海南五月茶 *Antidesma hainanense*; Sah: 海南染木树 *Saprosma hainanensis*; Hep: 延龄耳草 *Hedyotis paridifolia*; Aw: 桃榔 *Arenga westerhoutii*; Mw: 单穗擂鼓箭 *Mapania wallichii*; Cc: 弯管花 *Chassalia curviflora*; De: 山菅兰 *Dianella ensifolia*; Arp: 纽子果 *Ardisia polysticta*; Ts: 锡叶藤 *Tetracera sarmentosa*

蝴蝶树所在群落不同林层优势树种的生态位宽度与重要值排序并非完全一致,而生态位宽度 B_s 和 B_L 指数的排序基本一致(表2)。其中,中乔木层生态位宽度最大为肉实树(*Sarcosperma laurinum*),重要值水平中等偏上,说明其分布范围较广,生态适应能力强,具有低地雨林泛化种特征,与小乔木层的岭南山竹子(*Garcinia oblongifolia*)相似;中乔木层的蝴蝶树生态位宽度次之,重要值较高,在群落资源竞争中占据主导地位,其他林层的蝴蝶树均与之相似;中乔木层的青梅生态位宽度较小,而重要值最高,在小乔木层和大灌木层亦如此,说明其在群落中竞争优势明显但分布范围狭窄,趋向于发展为低地雨林特化种,与中乔木层的黄桐(*Endospermum chinense*)、小乔木层的钝齿木荷(*Schima crenata*)、大灌木层和中灌木层的山铜材相似;中乔木层的黧蒴锥(*Castanopsis fissa*)和九丁榕(*Ficus nervosa*)生态位宽度最小,说明这2种植物在吊罗山的分布范围较为狭窄,且实际调查发现两者均以大径级个体出现在同1个样方,在群落中空间分布不均匀。

2.2 蝴蝶树所在群落不同林层优势树种的生态位重叠程度

如图 1 所示,蝴蝶树所在群落由中、小乔木层和大、中灌木层优势树种分别组成的 190 组种对中,存在生态位重叠分别有 155、185、188、137 组,各占总种对数 81.58%、97.37%、98.95%、72.11%;生态位重叠明显 ($O_{ik} \geq 0.5$) 分别有 36、43、48、37 组,各占 18.95%、22.63%、25.26%、19.47%;无生态位重叠分别有 35、5、2、53 组,各占 18.42%、2.63%、1.05%、27.89%。其中,中乔木层的九丁榕和细子龙 (*Amesiodendron chinense*) 生态位重叠程度最高 (1.30),而九丁榕的生态位宽度最小,仅出现在 1 个样方中,说明两者对资源的竞争较为激烈,与小乔木层的蝴蝶树和青梅、大灌木层的蝴蝶树和橄榄 (*Canarium album*)、中灌木层的蝴蝶树和单穗插鼓箭 (*Mapania wallichii*) 相似。蝴蝶树在中、小乔木层和大、中灌木层存在明显生态位重叠的种对分别有 9、15、13、13 组,说明其在小乔木层受到的竞争压力最大,中乔木层最小。

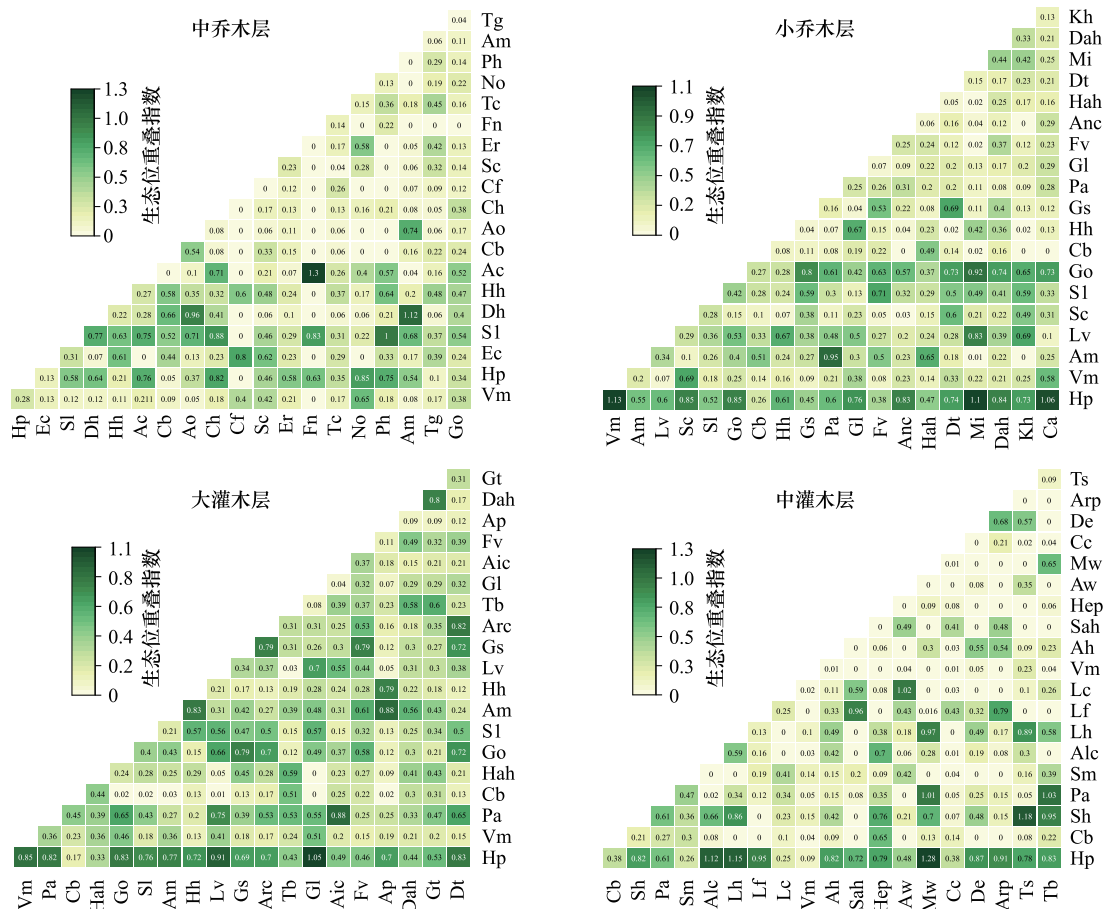


图 1 蝴蝶树所在群落不同林层优势树种 Levins 生态位重叠指数

Fig.1 Levins niche overlap index among dominant tree species of different forest layers in the communities with *Heritiera parvifolia*

Vm: 青梅; Hp: 蝴蝶树; Ec: 黄桐; Sl: 肉实树; Dh: 海南柿; Hh: 鹅掌柴; Ac: 细子龙; Cb: 山铜材; Ao: 海南草树; Ch: 海南锥; Cf: 薰荊蕨; Sc: 钝齿木荷; Er: 黄杞; Fn: 九丁榕; Tc: 山乌柏; No: 钝叶新木姜子; Ph: 翻白叶树; Am: 藤春; Tg: 楝叶吴萸; Go: 岭南山竹子; Lv: 黄椿木姜子; Gs: 白颜树; Pa: 九节; Gl: 琼榄; Fv: 白肉榕; Anc: 毛茶; Hah: 粗毛野桐; Dt: 大花五桠果; Mi: 火烧花; Dah: 海南黄檀; Kh: 白茶树; Ca: 橄榄; Arc: 朱砂根; Tb: 药用狗牙花; Aic: 香楠; Ap: 山油柑; Gt: 粗丝木; Sh: 山骨罗竹; Sm: 琼岛染木树; Alc: 草叶山姜; Lh: 海南轴桐; Lf: 穗花轴桐; Lc: 广东粗叶木; Ah: 海南五月茶; Sah: 海南染木树; Hep: 延龄草; Aw: 桃榔; Mw: 单穗插鼓箭; Cc: 弯管花; De: 山营兰; Arp: 扭子果; Ts: 锡叶藤

2.3 蝴蝶树所在群落不同林层优势树种的总体联结性

如表 3 所示,蝴蝶树所在群落的中乔木层优势树种的总体联结性方差比率 $VR = 1.07 > 1$,且检验统计量 $W = 21.42$,落入 $\chi^2_{0.95(20)} < W < \chi^2_{0.05(20)}$ 区间中,说明中乔木层优势树种总体呈不显著正联结;小乔木层和大、中灌木层的方差比率 VR 分别为 3.26、2.73、2.70,均大于 1,且检验统计量 W 分别为 65.27、54.61、53.91,均不在效应

区间内,说明这三个林层的优势树种均呈显著正联结。

2.4 蝴蝶树所在群落不同林层优势树种的种间关联特征

2.4.1 种间关联性分析

如图 2 所示,蝴蝶树所在群落由中、小乔木层和大、中灌木层优势树种分别组成的 190 组种对中, χ^2 检验呈正联结的种对分别有 82、131、119、109 组,各占总种对数 43.16%、68.95%、62.63%、57.37%。其中,中乔木层均为不显著正联结,其他林层呈极显著正联结均仅有 1 组,分别为小乔木层的毛茛(*Antirhea chinensis*)和橄榄、大灌木层的朱砂根(*Ardisia crenata*)和大花五桠果(*Dillenia turbinata*)、中灌木层的革叶山姜(*Alpinia coriacea*)和海南轴榈(*Licuala hainanensis*),显著正联结分别有 4、3、4 组,其他均为不显著正联结。呈负联结的种对分别有 94、52、67、70 组,各占 49.47%、27.37%、35.26%、36.84%。其中,中、小乔木层呈显著负联结有 4 组和 1 组,其他均为不显著负联结,大、中灌木层均为不显著负联结。呈相互独立的种对分别有 14、7、4、11 组,各占 7.37%、3.68%、2.11%、5.79%。正负联结比分别为 0.87、2.52、1.78、1.56,中乔木层负联结占优势,其他林层均为正联结占优势。由此可知,蝴蝶树所在群落不同林层优势树种组成的种对仅有少部分达到显著程度,种间关联性较弱,绝大部分物种呈现独立分布格局。

表 3 蝴蝶树所在群落不同林层优势树种总体联结性

层次 Levels	方差比率 VR Variance ratio	检验统计量 W Test statistic	χ^2 临界值 χ^2 threshold	检验结果 Results
中乔木层 Middle arbor layer	1.07	21.42	(10.85,31.41)	不显著正联结
小乔木层 Small arbor layer	3.26	65.27	(10.85,31.41)	显著正联结
大灌木层 large shrub layer	2.73	54.61	(10.85,31.41)	显著正联结
中灌木层 Middle shrub layer	2.70	53.91	(10.85,31.41)	显著正联结

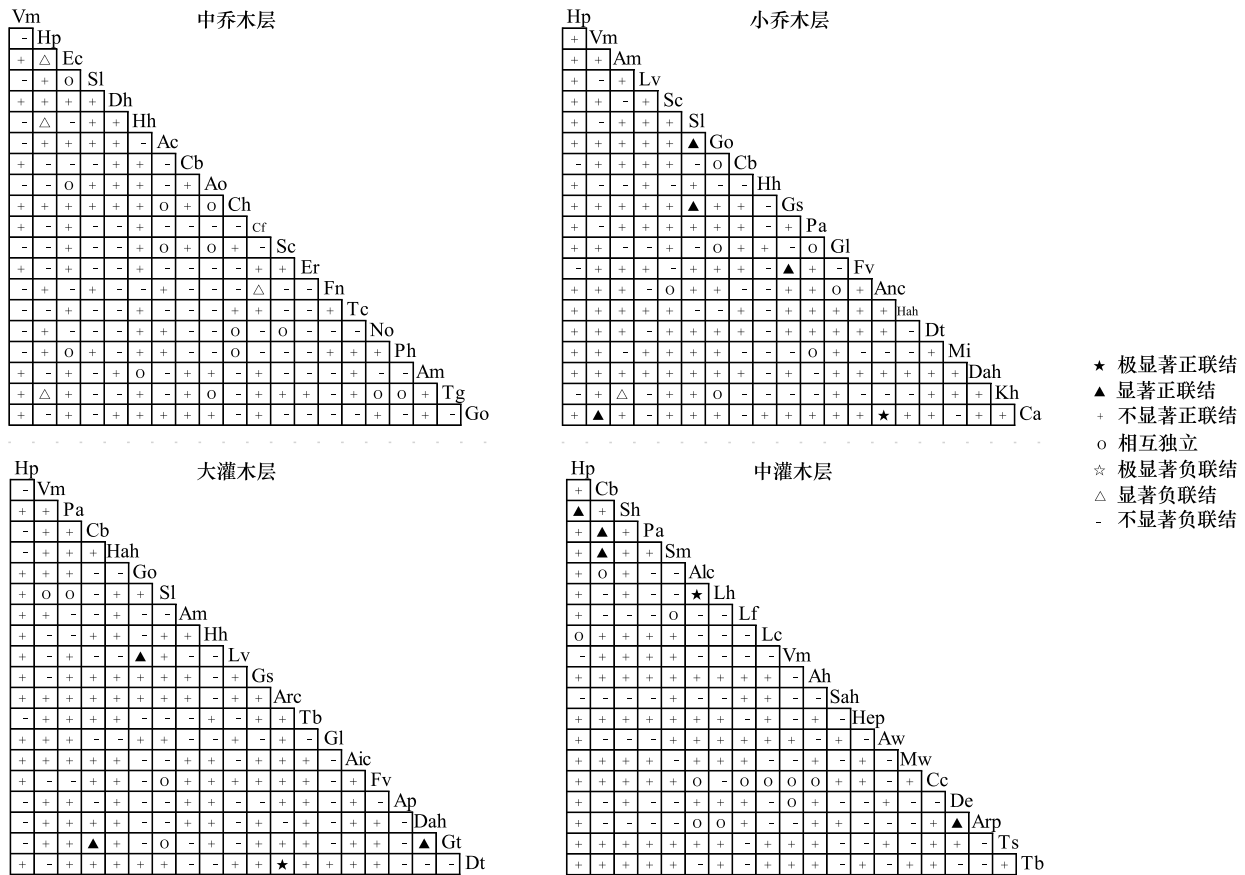
2.4.2 种间相关性分析

如图 3 所示,蝴蝶树所在群落由中、小乔木层和大、中灌木层优势树种分别组成的 190 组种对中, Spearman 秩相关检验呈正相关的种对分别有 84、114、88、103 组,各占总种对数 44.21%、60.00%、46.32%、54.21%。其中,呈极显著正相关($P \leq 0.01$)的种对分别有 1、6、2、10 组,主要包括小乔木层的蝴蝶树和岭南山竹子、中灌木层的蝴蝶树和革叶山姜等种对,呈显著($P \leq 0.05$)正相关分别有 5、7、10、13 组,其他均为不显著正相关。呈负相关的种对分别有 106、76、102、87 组,各占 45.79%、40.00%、53.68%、45.79%。其中,中、小乔木层和大灌木层呈极显著负相关的种对分别有 1、2、2 组,呈显著负相关分别有 4、3、5 组,其他均为不显著负相关,中灌木层均为不显著负相关。正负相关比分别为 0.79、1.50、0.86、1.18,中乔木层和大灌木层负相关占优势,小乔木层和中灌木层正相关占优势。由此可知,蝴蝶树所在群落不同林层优势树种间的 Spearman 秩相关检验与 χ^2 检验结果基本一致。结果表明,蝴蝶树所在群落不同林层中的绝大部分物种间呈现独立分布格局,小部分物种间为争夺环境资源而产生竞争关系。

3 讨论

3.1 蝴蝶树所在群落不同林层优势树种的生态位特征

植物群落中物种对环境资源的利用能力通常在生态位宽度上体现,生态位宽度越大,越能充分利用各种资源,分布范围就越广^[24-26]。一般而言,在群落环境资源利用中占据主导地位的物种,生态位宽度越大,重要值越高^[27]。本研究中,海南吊罗山不同林层的蝴蝶树皆与之相符,表明该种对资源利用的偏好程度低,在群落资源竞争中相对优势明显,以蝴蝶树为目的树种进行样方布设可能是导致其生态位宽度较大和重要值较高的主要原因,这与濒危树种闽桦(*Betula fujianensis*)天然林优势种群研究结果相同^[7]。然而,中、小乔木层及大灌木层的青梅和大、中灌木层的山铜材均表现出生态位宽度偏小,重要值偏高的现象,说明在群落发展过程

图2 蝴蝶树所在群落不同林层优势树种 χ^2 检验Fig.2 Interspecific association χ^2 test among dominant tree species of different forest layers in the communities with *Heritiera parvifolia*

中,这2种植物对环境适应和资源利用能力要比蝴蝶树差。舒琪等^[28]和桂慧颖等^[19]分别对青梅、山铜材种群研究证实,生境破碎化可能是影响青梅扩散分布的原因之一,山铜材因其萌蘖繁殖和生境偏好的特性集中分布于低地雨林沟谷中,造成分布区狭窄。另有研究表明,物种分布的频率是影响生态位宽度的重要原因^[27]。本研究中,中乔木层的肉实树和小乔木层的岭南山竹子生态位宽度均较大,在调查样方中出现的次数较多,分布范围广且适应能力强,而中乔木层的九丁榕生态位宽度最小,出现次数少。野外调查时发现,九丁榕偏好生长于岩石裸露度较高的石缝中,山铜材则依靠萌蘖繁殖在沟谷样方中存在较高的聚集度,说明这些物种逐渐适应了不同于其他优势树种的生境条件。

生态位重叠是指物种间对环境资源利用的相似性程度,在共享资源的同时存在竞争或彼此促进的关系^[29-31]。本研究发现,蝴蝶树所在群落的中、小乔木层和大、中灌木层优势树种间存在生态位重叠分别有155、185、188、137组种对。随高度级的增加,生态位重叠种对数先增加后减少,说明中灌木层优势树种的生长发育会逐渐占用空间资源,加剧种间竞争,大灌木层存在最大的竞争强度,直到小乔木层部分个体出现竞争淘汰或非自然原因死亡,生态位重叠的种对数才开始逐渐减少。吊罗山片区的蝴蝶树在中乔木层存在明显生态位重叠的种对(9组)少于小乔木层(15组),说明蝴蝶树在小乔木层竞争压力较大,而在中乔木层能更充分利用资源。有研究表明,生态位宽度与生态位重叠程度存在相关性^[32-33]。本研究生态位宽度较大的蝴蝶树在不同林层均与其他优势种的生态位重叠程度较高,而小乔木层生态位宽度较大的黄椿木姜子与其他优势种的生态位重叠并不高,中乔木层生态位宽度最小的九丁榕与细子龙的生态位重叠最高,这说明生态位宽度和生态位重叠之间并非简单的线性关系,群落中不同林层的物种组成不断发生变化,不同物种间的生态学特

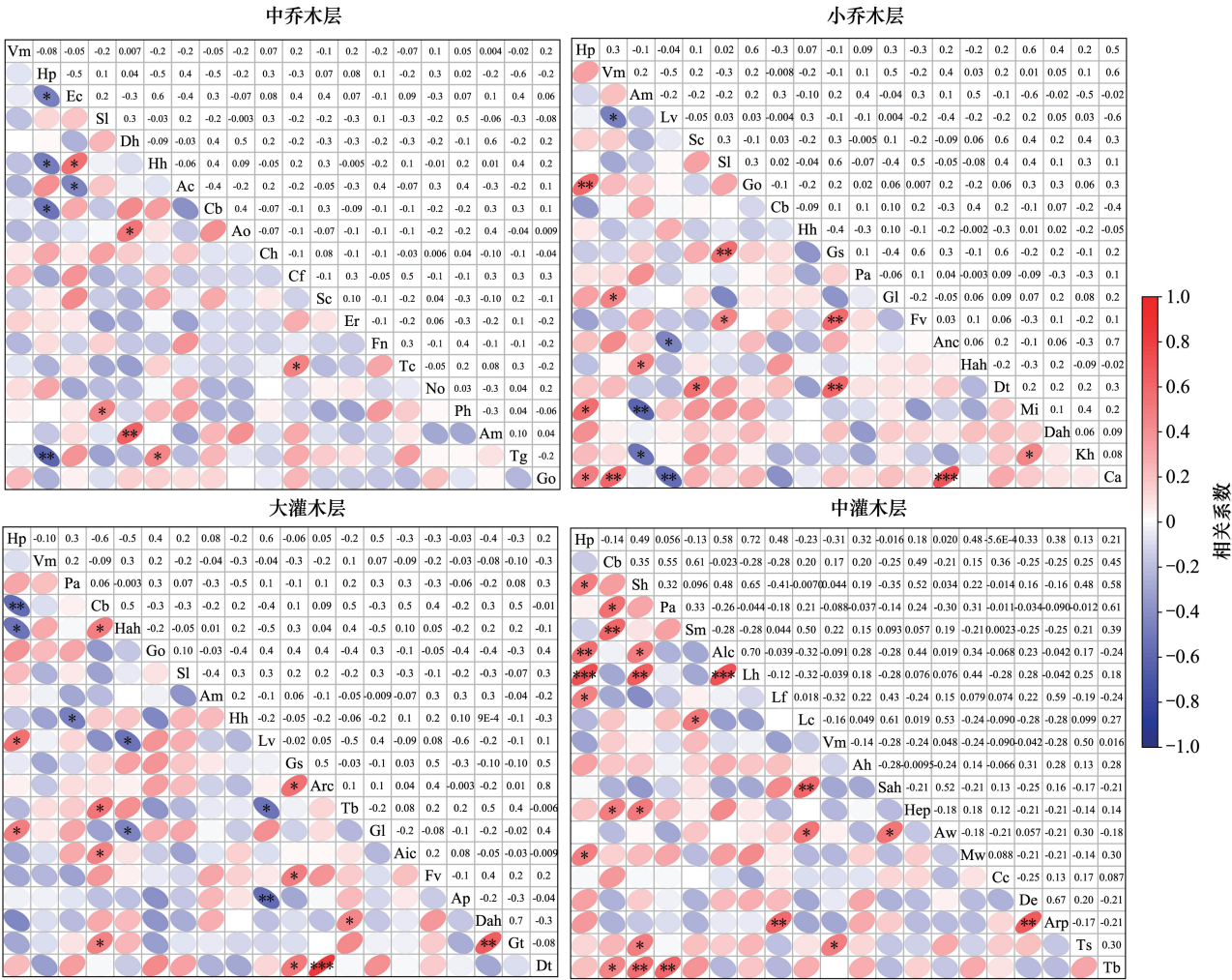


图3 蝴蝶树所在群落不同林层优势树种 Spearman 秩相关检验

Fig.3 Spearman's rank correlation coefficient test among dominant tree species of different forest layers in the communities with *Heritiera parvifolia*

* $P \leq 0.05$; ** $P \leq 0.01$; *** $P \leq 0.001$

性有差异因而对生境的要求也不同。

3.2 蝴蝶树所在群落不同林层优势树种的种间联结

种间联结是不同物种由于生境差异而产生的相互联系,能有效反映群落的动态特征^[34—36]。随着群落演替的更新,物种间对环境资源利用越相似,种间正关联性可能越强,也可能趋于无关联,有利于物种稳定共存,群落向顶级方向演替^[2, 37—38]。本研究对海南吊罗山蝴蝶树所在群落不同林层优势树种的总体联结性分析发现,中乔木层优势树种总体呈不显著正联结,其他林层均呈显著正联结,说明中乔木层种间关系总体上偶合不紧密,而小乔木层和大、中灌木层的物种组成及结构逐渐完善,形成了稳定的搭配关系,与王文进等^[39]对同地区热带山地雨林的种间联结研究结果相似。群落优势树种间的正负联结比值是衡量群落稳定性的标准之一^[40—42]。Spearman 秩相关检验研究结果发现,中、小乔木层和大、中灌木层优势树种正负相关比分别为 0.79、1.50、0.86、1.18,在群落稳定性方面,小乔木层>中灌木层>大灌木层>中乔木层,小乔木层与中灌木层更利于物种共存。但不同林层的大多数优势树种间均呈不显著联结,关联性较弱,种对间表现出较高的独立性,这一结论在许多热带雨林的种间联结性研究中已得到验证^[43—44],可能与前期的商业性采伐破坏,种间生态学特性差异及热带雨林物种多样性高有关^[45]。种间关系方面,本研究发现中乔木层的海南栎(*Diospyros*

hainanensis)和藤春、小乔木层的蝴蝶树和岭南山竹子、大灌木层的朱砂根和大花五桠果、中灌木层的蝴蝶树和革叶山姜等种对呈极显著正相关,说明不同林层的这些种对所具有的相似生态学特性在一定程度上体现了生态位的重叠性;而中乔木层的蝴蝶树和楝叶吴萸(*Tetradium glabrifolium*)、小乔木层的藤春和火烧花(*Mayodendron igneum*)、大灌木层的蝴蝶树和山铜材等种对间呈极显著负相关,主要是由于生态学特性不同,生境异质性程度高而导致物种对环境的适应能力不同,种群间出现了排斥。

4 结论

综上所述,(1)海南热带雨林国家公园吊罗山片区的蝴蝶树在不同林层(中、小乔木层和大、中灌木层)内的资源竞争优势明显,趋向于发展为单一优势种;(2)不同林层的大部分优势树种对资源利用存在一定的相似性,中灌木层的优势树种更能合理利用环境资源,蝴蝶树在小乔木层受到的竞争压力最大,中乔木层最小;(3)小乔木层和中灌木层更利于物种共存,但不同林层的大部分优势树种种间联结不显著,关联性较弱,呈现独立分布格局。因此,应在就地保护的基础上,合理搭配生态学特性相似的物种,适当进行人工抚育,间伐小乔木层的岭南山竹子,大灌木层的橄榄和中灌木层的革叶山姜等物种,充分利用群落中的环境资源进而达到物种共存,为蝴蝶树种群的有效保护和低地雨林植被恢复提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 涂洪润,李娇凤,杨丽婷,白金莲,卢国琼,利恒春,梁士楚,姜勇. 桂林岩溶石山青冈群落主要乔木树种的种间关联. 应用生态学报,2019,30(1): 67-76.
- [2] 刘润红,陈乐,涂洪润,梁士楚,姜勇,李月娟,黄冬柳,农娟丽. 桂林岩溶石山青冈群落灌木层主要物种生态位与种间联结. 生态学报,2020,40(6): 2057-2071.
- [3] 涂洪润,农娟丽,朱军,赵佳佳,杨婉琳,朱琪琪,谢彦军,刘润红. 桂林岩溶石山密花树群落主要物种的种间关联及群落稳定性. 生态学报,2022,42(9): 3688-3705.
- [4] Hirzel A H, Hausser J, Chessel D, Perrin N. Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? Ecology,2002,83(7): 2027-2036.
- [5] Ma Y M, Li Q H, Pan S P, Liu C, Han M S, Brancelj A. Niche and interspecific associations of *Pseudoanabaena limnetica*-Exploring the influencing factors of its succession stage. Ecological Indicators,2022,138: 108806.
- [6] Sanjerehei M M, Rundel P W. A comparison of methods for detecting association between plant species. Ecological Informatics,2020,55: 101034.
- [7] 高伟,黄茂根,黄石德,吴兴盛,方栋龙,陈爱平. 濒危树种南桦天然林优势种群生态位特征. 植物科学学报,2023,41(5): 613-625.
- [8] Pandey R, Rawat M, Singh V, Yousefpour R, Reshi Z A. Large scale field-based evaluation of niche breadth, niche overlap and interspecific association of Western Himalayan temperate forest tree species. Ecological Indicators,2023,146: 109876.
- [9] 阮梓臻,王斌,钟艺倩,罗婷,刘晟源,陆茂新,陶旺兰,陆芳,李冬兴,李先琨. 淡黄金花茶伴生群落优势乔灌木的种间联结及群落稳定性分析. 植物科学学报,2024,42(2): 170-180.
- [10] 吴庭天,陈毅青,陈宗铸,雷金睿,陈小花,李苑菱. 海南热带雨林代表性种群空间分布特征研究. 林草资源研究,2023,52(5): 133-141.
- [11] 张顺卫,李婧涵,杨小波,李东海,王重阳,朱子丞,江悦馨,何亦绮,商乃演,杜春雁,刘畅,钟丽爽,苏欣. 海南省国家重点保护野生植物分布特征及所依托植被类型研究. 广西植物,2024(2024-04-29). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20240428.1451.002.html>.
- [12] 李婧涵,张顺卫,杨小波,李东海,戚春林,黄耀,张翔,郝杰威,梁彩群,朱子丞,江悦馨,王重阳,何亦绮. 海南省分布的国家重点保护野生植物组成及区系特征. 广西植物,2024(2024-04-24). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.q.20240422.1652.002.html>.
- [13] 徐祥浩. 中国梧桐科植物的种类及其经济意义. 广西植物,1984,4(2): 149-155.
- [14] 黄金城. 中国海南岛热带森林可持续经营研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院,2006.
- [15] 杨小波,林英,梁淑群. 海南岛五指山的森林植被 I. 五指山的森林植被类型. 海南大学学报: 自然科学版,1994,12(3): 220-236.
- [16] 张林祥. 蝴蝶树利用林下腐殖土提高出苗率技术初探. 现代园艺,2014,37(10): 43.
- [17] Xin G L, Ren X L, Liu W Z, Jia G L, Deng C Y. The complete chloroplast genome of a rare species *Heritiera parvifolia* merr. (Malvales: Sterculiaceae). Conservation Genetics Resources,2018,10(4): 885-888.
- [18] 张晓琳,王帅,王旭,文关四,刘海伟,李佳灵. 海南吊罗山自然保护区土壤有机碳贮量研究. 热带作物学报,2014,35(2): 362-368.
- [19] 桂慧颖,方发之,黎肇家,麦有专,张晓凤. 海南吊罗山濒危植物山铜材种群结构与动态特征. 植物研究,2024,44(1): 75-85.
- [20] 王国宏,方精云,郭柯,谢宗强,唐志尧,沈泽昊,王仁卿,王襄平,王德利,强胜,于丹,彭少麟,达良俊,刘庆,梁存柱.《中国植被志》研编内

- 容与规范. 植物生态学报, 2020, 44(2): 128-178.
- [21] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [22] 张金屯. 数量生态学. 2 版. 北京: 科学出版社, 2011.
- [23] Schluter D. A variance test for detecting species associations, with some example applications. *Ecology*, 1984, 65(3): 998-1005.
- [24] 刘雨婷, 侯满福, 贺露炎, 唐伟, 赵俊. 滇东菌子山喀斯特森林群落乔木优势树种生态位和种间联结. *应用生态学报*, 2023, 34(7): 1771-1778.
- [25] Cardillo M, Dinnage R, McAlister W. The relationship between environmental niche breadth and geographic range size across plant species. *Journal of Biogeography*, 2019, 46(1): 97-109.
- [26] Schellenberger Costa D, Gerschlaue F, Kiese R, Fischer M, Kleyer M, Hemp A. Plant niche breadths along environmental gradients and their relationship to plant functional traits. *Diversity and Distributions*, 2018, 24(12): 1869-1882.
- [27] 杜忠毓, 邢文黎, 薛亮, 肖江, 陈光才. 喀斯特石漠化锑矿区植物群落主要物种生态位特征及其种间联结. *生态学报*, 2023, 43(7): 2865-2880.
- [28] 舒琪, 胡璇, 徐瑞晶, 商泽安, 漆良华. 海南岛甘什岭青梅种群结构与动态. *林业科学*, 2020, 56(5): 160-167.
- [29] 陈玉凯, 杨琦, 莫燕妮, 杨小波, 李东海, 洪小江. 海南岛霸王岭国家重点保护植物的生态位研究. *植物生态学报*, 2014, 38(6): 576-584.
- [30] Laughlin D C, McGill B J. Trees have overlapping potential niches that extend beyond their realized niches. *Science*, 2024, 385(6704): 75-80.
- [31] Jacquemyn H, De Coensel B, Evans A, Wang D Y, Merckx V S F T. The relationship between phylogeny, range size, niche breadth and niche overlap in European orchids (Orchidaceae). *Journal of Biogeography*, 2024, 51(3): 409-421.
- [32] 何江, 徐来仙, 艾训儒. 湖北七姊妹山亚热带常绿阔叶混交林主要木本植物的生态位与种间联结. *林业科学研究*, 2023, 36(3): 138-148.
- [33] Suárez-Mota M E, Villaseñor J L. Ecological niche overlap among species of the genus *Zaluzania* (Asteraceae) from the dry regions of Mexico. *Plant Ecology and Evolution*, 2020, 153(3): 337-347.
- [34] 李婧涵, 张顺卫, 杨小波, 李东海, 商乃演, 杜春雁. 海南紫荆木群落物种组成及种间联结性. *南方农业学报*, 2024 (2024-03-15). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1381.S.20240314.1530.002.html>.
- [35] Nan Q R, Zhang Q, Li X H, Zheng D N, Li Z H, Zhao L Y. Niche and interspecific association of the dominant species during the invasion of *Alternanthera philoxeroides* in the Yangtze River Basin, China. *Agriculture*, 2023, 13(3): 621.
- [36] Zhang Y Y, Zhou W M, Yuan Q, Deng J J, Zhou L, Yu D P. Niches, interspecific associations, and community stability of main understory regeneration species after understory removal in temperate forests. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1371898.
- [37] 李坚锋, 潘萍, 欧阳勋志, 彭松立, 邓文平, 宁金魁. 庐山常绿阔叶林种间联结性及物种共存机制. *生态学杂志*, 2022, 41(8): 1474-1481.
- [38] Hu J T, Zheng Z L, Wen X Y, Hu X S, Lin Y M, Li J, Ni J, Wu C Z. Variation in niche and interspecific associations across elevations in subtropical forest communities of the Wuyi Mountains, Southeastern China. *Forests*, 2024, 15(7): 1256.
- [39] 王文进, 张明, 刘福德, 郑建伟, 王中生, 张世挺, 杨文杰, 安树青. 海南岛吊罗山热带山地雨林两个演替阶段的种间联结性. *生物多样性*, 2007, 15(3): 257-263.
- [40] 郭忠玲, 马元丹, 郑金萍, 刘万德, 金哲峰. 长白山落叶阔叶混交林的物种多样性、种群空间分布格局及种间关联性研究. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2013-2018.
- [41] 张零念, 朱贵青, 杨宽, 刘星月, 巩合德, 郑丽. 滇中云南杨梅灌丛主要木本植物生态位与种间联结. *植物生态学报*, 2022, 46(11): 1400-1410.
- [42] Chen M, Mo F Y, Zheng L L, Bin G L, Zou Z Y, Chen P Q, Xue Y G. Correlation and community stability analysis of herbaceous plants in Dashiwei Tiankeng Group, China. *Forests*, 2023, 14(6): 1244.
- [43] 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.
- [44] 舒琪, 徐瑞晶, 胡璇, 商泽安, 漆良华. 海南岛甘什岭青梅群落主要乔木树种生态位与种间联结. *生态学杂志*, 2021, 40(9): 2689-2697.
- [45] 戴小华, 余世孝, 练璐藩. 海南岛霸王岭热带雨林的种间分离. *植物生态学报*, 2003, 27(3): 380-387.