

DOI: 10.20103/j.stxb.202402220375

叶家桐, 邓涛, 岑华飞, 段云博, 朱晓珍, 胡兴华. 广西银竹老山资源冷杉群落乔木优势树种生态位与种间联结. 生态学报, 2025, 45(8): 3921-3932.
Ye J T, Deng T, Cen H F, Duang Y B, Zhu X Z, Hu X H. Niche and interspecific association of dominant trees in *Abies ziyuanensis* community of Yinzhulao-shan, Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3921-3932.

广西银竹老山资源冷杉群落乔木优势树种生态位与种间联结

叶家桐, 邓涛, 岑华飞, 段云博, 朱晓珍, 胡兴华*

广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西植物功能物质与资源持续利用重点实验室, 桂林 541006

摘要: 群落的物种组成、种间关系及稳定性影响着濒危植物的个体生存与种群动态, 开展相关研究对深入认识濒危植物的濒危机制, 及科学合理制定解濒危策略具有重要价值。研究基于资源冷杉的模式标本产地广西银竹老山资源冷杉国家级自然保护区 7 个资源冷杉群落固定样地的调查数据, 运用生态位测定、方差比率法 (VR)、 χ^2 检验、联结系数 (AC) 和 Spearman 秩相关检验等方法, 分析群落重要值排名前 15 的乔木优势树种的生态位特征与种间联结性。结果表明: (1) 在乔木层中生态位宽度较大的优势树种依次为多脉青冈、资源冷杉、大屿八角、木荷、云南桫欏叶树与灯笼树; (2) 优势树种间的生态位重叠均值为 0.699, 生态位重叠指数普遍较大, 乔木优势树种对环境或资源需求的相似性较大, 种间竞争较强, 种间关系不稳定。其中, 资源冷杉与其它优势树种组成 14 个种对中生态位重叠值 $O_{ik} \geq 0.50$ 的有 8 对, 优势树种生态位重叠程度较高, 种间竞争较激烈; (3) 乔木优势树种总体联结性和种间联结性表现为不显著正联结, 暗示银竹老山的资源冷杉群落处于动态发育的演替早期阶段。 (4) χ^2 检验、种间联结系数 (AC) 和 Spearman 秩相关检验结果均显示, 多数种对间呈不显著联结, 种间联结性较弱。 (5) 优势树种的 AC 值、Spearman 秩相关检验与生态位重叠值之间呈极显著正相关 ($P < 0.001$)。研究显示, 广西银竹老山资源冷杉与其优势伴生树种的种间关联性较弱, 各物种间呈独立分布格局, 资源冷杉群落稳定性较弱。因此, 建议加强对保护区内资源冷杉群落原生境的保护, 同时开展资源冷杉种群的长期动态监测工作。

关键词: 银竹老山; 资源冷杉; 优势种; 生态位; 种间联结性

Niche and interspecific association of dominant trees in *Abies ziyuanensis* community of Yinzhulao-shan, Guangxi

YE Jiatong, DENG Tao, CEN Huafei, DUANG Yunbo, ZHU Xiaozhen, HU Xinghua*

Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences/Guangxi Key Laboratory of Plant Functional Phytochemicals and Sustainable Utilization, Guilin 541006, China

Abstract: For endangered plant, individual survival and population dynamics are deeply affected by species composition, interspecific interactions, and consequently, the stability within the community. Therefore, research into the niche and interspecific associations among different community species can play a significant role in understanding both the mechanisms of endangerment and the strategies for de-listing threatened plants. In this study, the trees in seven fixed samples plots of *Abies ziyuanensis* communities were thoroughly investigated in Guangxi Yinzhulao-shan *Abies ziyuanensis* national nature reserve, the type locality for this endangered species. The method of the niche determination, ratio of variance (VR) method, Chi-square test (χ^2 test), interspecific association coefficients (AC) and Spearman's rank correlation

基金项目: 国家自然科学基金 (32060255, 32260061); 广西科学院基本业务费项目 (CQZ-E-1916); 广西植物功能物质与资源持续利用重点实验室主任基金 (ZRJJ2022-4); 广西林业科技项目 (2024LYKJ02)

收稿日期: 2024-02-22; **网络出版日期:** 2025-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huxh773@163.com

coefficient test analysis were used. The ecological niche and interspecific association of the top 15 most dominant tree species with important values in the community were analyzed. The results showed that: (1) The dominant tree species with larger niche width in the tree layer included *Quercus multinervis*, *A. ziyuanensis*, *Illicium angustisepalum*, *Schima superba*, *Clethra delavayi* and *Enkianthus chinensis*. (2) The mean value of niche overlap among dominant tree species was 0.699, and the niche overlap index among dominant tree species consistently achieved a high value, potentially due to similar demands for environmental or resources. This suggests relatively strong interspecific competition and unstable interspecies relationships. Thereinto, there were 14 species pairs of *A. ziyuanensis* with other dominant tree species, including 8 species pairs of with $O_{ik} \geq 0.50$, and the niche overlap value of dominant tree species were high, indicating that the competition between species was intense. (3) Significant positive association was not found in both the overall association and interspecific association of those dominant tree species, indicating that the *A. ziyuanensis* community in Yin Zhu Laoshan may be in the early stage of dynamic development. (4) Analyzing by Chi-square test (χ^2 test), interspecific association coefficients (AC) and Spearman's rank correlation coefficient test, only relatively weak associations without significant correlation levels were found among the majority of species pairs in those trees. (5) The correlation between interspecific association coefficient, Spearman's rank correlation coefficient test and niche overlap value of dominant tree species had reached an extremely significant positive level ($P < 0.001$). Based on the results, it may be concluded that weak species associations, labile structure and independent distribution pattern of the dominant tree species were the current features of *A. ziyuanensis* community in Yin Zhu Laoshan, Guangxi. Therefore, a strengthen protection of the original habitat, and long-term population dynamic monitoring had also been suggested for *A. ziyuanensis* in the protected area.

Key Words: Yin Zhu Laoshan; *Abies ziyuanensis*; dominant species; niche; interspecific association

树种在植物群落演替过程中是相互依存的,一旦树种在群落中的组成发生较大的改变,其种间关系也会发生相应变化,进而影响整个群落的稳定性^[1-2]。植物群落内包含共生、竞争、协同进化及相互促进等复杂的种间关系^[3],物种的种间联结及生态位特征不仅能很好地体现这些关系^[4],并能客观反映现阶段植物群落结构与功能的稳定性^[5]。其中,种间联结是群落结构形成与演化的重要基础,体现不同物种在空间分布上的相互关联性,主要用来解释群落结构、功能、组成、竞争程度与演替趋势^[6]。而生态位是指种群在生态系统中与相关种群之间的功能关系,以及其所能利用的各资源总和^[7]。种间联结性与生态位特征分析已被不少研究者一致认为可作为揭示森林群落稳定性和演替阶段的方法^[8-9]。李锦婷等^[10]认为探究珍稀濒危植物的种间联结性与生态位特征,有助于了解各物种间的相互作用及空间关系,进一步揭示群落稳定性。舒琪等^[11]研究发现珍稀濒危植物无翼坡垒与群落优势种对间的关联性较弱,伴生植物青梅威胁其生长发育,提出可适当人为干扰以保存竞争劣势物种的种质资源。汪志培等^[12]对珍稀植物伯乐树乔木层优势树种生态位与种间联结性开展研究的结果揭示,伯乐树濒危原因并非与其伴生树种之间的资源竞争导致,建议加强现有生境及种群的保护。以上可见,研究濒危植物群落的种间联结关系及生态位特征,不仅可深入了解该群落稳定性与演替动态以及群落中种间共存关系,还有助于揭示濒危植物的致濒机理,为制定科学合理的解濒策略提供重要依据^[13-14]。

资源冷杉(*Abies ziyuanensis*)为松科(Pinaceae)冷杉属(*Abies*)的常绿植物,是国家一级重点保护野生植物,也是中国特有的第四纪孑遗珍稀植物,同时被 IUCN 记录为“濒危”植物^[15-16]。近年来,由于全球气候变化,高海拔分布植物极易受到影响,加之资源冷杉挂果慢、结果少、种胚不发育等自身原因,致使其种群数量急速下降,现资源冷杉仅在中国亚热带山地零星残存^[17]。资源冷杉模式产地为广西银竹老山资源冷杉国家级自然保护区,该地的资源冷杉具有重要的研究价值与保存意义^[17]。银竹老山资源冷杉种群的天然更新曾相对稳定,种群数量也较多,但自发现至今的几十年里,因气候的变化、生境的破坏以及种子可育力低等因素,种群数量不断减少,其赖以生存的生境也发生较大变化,曾一度沦为“致危生境”^[18-19]。此外,至今对资源冷杉

群落学特征的研究仍未完善。近年来,关于资源冷杉群落学的研究主要集中在种群保护遗传学^[20]、群落结构^[21]、生物学特性^[22]以及物种起源^[16,23]等领域,而关于资源冷杉群落优势树种间关系以及各种群在群落中的综合位置和作用尚不明确。此外,相关调查发现,目前野外已无资源冷杉纯林,仅见以阔叶树为优势树种的“针-阔混交林”,而这种混交林是否为稳定的群落,是否存在显著的种间关系,以及对资源冷杉种群来说是否为“致危生境”,尚都是有待研究的问题。

鉴于此,本研究以银竹老山自然保护区资源冷杉群落乔木优势树种为研究对象,建设 7 个固定监测样地,在群落学调查的基础上,采用 χ^2 检验、联结系数(AC)、Spearman 秩相关系数检验以及生态位测定等方法对银竹老山资源冷杉群落乔木优势树种生态位和种间联结进行研究^[13],以为揭示资源冷杉种群濒危机制、制定科学合理的解濒策略以及为开展就地保护与野外回归等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究地点位于广西资源县银竹老山资源冷杉国家级自然保护区,为资源冷杉模式标本产地,保护区总面积 4341.2 hm²。地理坐标为 110°32'42"—110°35'06"E,26°15'05"—26°19'15"N,海拔 1700—2021 m^[24]。该地区属中亚热带季风气候,最冷月(1 月)均温 2.1℃,最热月(7 月)均温为 22.2℃,低湿持续时间较长,年平均气温也较低(13.1℃),12 月至翌年 2 月常有积雪现象,年降水量为 2065 mm,年均相对湿度>85%,山间常有云雾缭绕^[17]。保护区地势高峻,主要为相对高差悬殊的花岗岩山地,土壤主要为山地酸性黄棕壤,表土较疏松湿润^[24]。资源冷杉生长区域属于中亚热带中山常绿、落叶阔叶混交林^[25]。

1.2 样地设置与调查方法

前期调查发现,银竹老山的资源冷杉主要集中分布在神宝堂、三角湖塘、二宝鼎等 7 处地点,本研究在这些分布点设置 20 m×30 m 固定监测样地共 7 个,再将每一个样地划分成 6 个 10 m×10 m 的样方,共计样方 42 个,样地面积共 4200 m²^[26]。对样方内胸径≥1 cm 的所有木本植物进行挂牌编号,并逐一记录其坐标、种名、胸径、冠幅、树高及枝下高等指标;同时记录各个样地的生境信息(表 1)^[26]。

表 1 资源冷杉生存群落 7 个样方的基本情况

Table 1 Basic information on sample plots of surviving *Abies ziyuanensis* community

样方号 Plot No	海拔 Elevation/m	坡向 Aspect	坡度 Slope grade/(°)	坡位 Slope Position	经度 Longitude(E)	纬度 Latitude(N)
P01	1839	西南	25	上	110.546477°	26.279312°
P02	1793	西北	25	中	110.552612°	26.259621°
P03	1774	西南	45	谷	110.556961°	26.255878°
P04	1765	西南	25	上	110.569839°	26.276793°
P05	1795	南	45	下	110.555026°	26.254917°
P06	1806	南	40	上	110.554952°	26.255268°
P07	1798	西北	25	谷	110.555109°	26.255629°

1.3 数据处理

1.3.1 重要值计算与分析物种筛选

经统计,在 7 个调查群落中,资源冷杉群落乔木层共有植物 73 种,隶属 22 科 39 属。通过计算资源冷杉群落乔木层所有树种重要值,其中,重要值≥1%且出现样方数≥5 的 15 个物种共有 1572 株,占总物种数的 92%,且其重要值之和达 72.72%(表 2),能较好反映调查群落中的物种情况^[26]。因此,本研究选取该 15 个物种作为资源冷杉群落乔木优势树种,进行生态位特征与种间联结性分析。本研究以重要值(IV)作为选择优势树种的指标,并定义为该物种的相对丰度(RA)、相对优势度(RD)和相对频率(RF)的平均值,具体计算公式为^[27]:

$$IV(100\%) = (RA+RD+RF)/3 \quad (1)$$

$$RA = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^s n_i} \quad (2)$$

$$RD = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^s d_i} \quad (3)$$

$$RF = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^s f_i} \quad (4)$$

式中, S 为总物种数, n_i 为第 i 个物种的个数, d_i 为第 i 个物种的胸高断面面积, f_i 为第 i 个物种出现的样方总数^[28]。

1.3.2 生态位特征

采用 Levins 指数(B_L) 和 Shannon 指数(B_S) 计算物种生态位^[28], 利用 Pianka 生态位重叠指数(O_{ik}) 计算物种间生态位重叠程度^[29]。 B_L 指数与 B_S 指数计算见公式(5)与公式(6), O_{ik} 指数计算见公式(7)。

$$B_L = 1 / \sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \quad (5)$$

$$B_S = 1 / \sum_{i=1}^r P_{ij} \ln P_{ij} \quad (6)$$

式中, r 为总资源位(样方)数; P_{ij} 为物种 i 在资源位(样方) j 上重要值与物种 i 在所有资源位(样方)上重要值总和之比^[28]。

$$O_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^r P_{ij} P_{kj}}{\sqrt{(\sum_{j=1}^r P_{ij})^2 (\sum_{j=1}^r P_{kj})^2}} \quad (7)$$

式中, P_{ij} (P_{kj}) 为物种 i (k) 在资源位(样方) j 上的重要值; O_{ik} 为物种 i 与 k 的生态位重叠值^[29]。

1.3.3 总体联结性检验

种群间的总体联结性采用 Schluter 提出的方差比率法(VR) 来进行计算^[30], 并利用 W 统计值检验其显著性, 式中, N 为总样方数, S 为物种总数, n_i 为物种 i 出现的样方数, T_j 为样地 j 内出现的种群数, t 为样方种群的均值, $t = (t_1 + t_2 + \dots + t_N) / N$ ^[30]。公式如下:

$$VR = \frac{S_T^2}{Q_T^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2}{\sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} (1 - \frac{n_i}{N})} \quad (8)$$

当 $VR = 1$, 种对间相互独立; 当 $VR < 1$, 种对间负联结; 当 $VR > 1$, 种对间正联结。采用统计量 $W = N \times VR$ 来检验 VR 值偏离 1 的显著程度, 若物种间总体关联不显著 ($P > 0.05$), 则 W 值落入 χ^2 分布的 90% 置信区间: $\chi^2_{0.95}(N) < W < \chi^2_{0.05}(N)$, 否则, 总体关联显著 ($P < 0.05$)^[30]。

1.3.4 种间联结性分析

采用 χ^2 检验和联结系数(AC) 分析成对物种间联结^[31]。 χ^2 统计量基于 2×2 列联表, 通常用于种间联结性的定性研究^[31]。参考舒琪等^[11], 将重要值排名前 15 位的优势树种是否在 42 个样方出现的原始数据转化为 0 和 1 形式的二元数据矩阵, 以此构建 2×2 列联表, 求出 a 、 b 、 c 、 d 的值 (N 为样方总数, d 为 2 个物种均未出现的样方数, b 和 c 分别为 2 个物种单独出现的样方数, a 为 2 个物种同时出现的样方数)^[11]。在非连续性取样时, 采用 Yates 连续校正后的 χ^2 检验来确定种间关联性, 计算公式如下^[31]:

$$\chi^2 = \frac{N(|ad-bc|-0.5N)^2}{(a+b)(b+d)(a+c)(d+c)} \quad (9)$$

当 $ad > bc$ 时为正联结, $ad < bc$ 为负联结。当 $\chi^2 > 6.65$ 时, 种对间呈极显著联结 ($P < 0.01$); 当 $3.841 < \chi^2 < 6.635$ 时, 种对间呈显著联结 ($0.01 < P < 0.05$); 当 $\chi^2 < 3.841$ 时, 种对间呈不显著联结 ($P > 0.05$)^[31]。

联结系数 (association coefficient, AC) 公式如下:

$$\begin{aligned} \text{当 } ad \geq bc, \text{ 则 } AC &= \frac{ad - bc}{(a+b)(b+d)} \\ \text{当 } ad < bc, \text{ 且 } d \geq a, \text{ 则 } AC &= \frac{ad - bc}{(a+b)(a+c)} \\ \text{当 } ad < bc, \text{ 且 } d < a, \text{ 则 } AC &= \frac{ad - bc}{(b+d)(c+d)} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, AC 值越趋近 1, 则表示种对间正联结性越强; 反之, AC 值越趋近 -1, 则表示种对间负联结性越强; AC 值 = 0, 则表示种对间无联结^[31]。

由于 χ^2 检验无法准确确定不显著种对的联结性, 联结系数 (AC) 能进一步反映群落种对间联结性的相对强弱, 而 Spearman 秩相关系数可定量反映 2 个物种的种间显著性和数量变化趋势, 故结合 Spearman 秩相关系数测定种间相关性^[32], 其计算见公式 (11)。

$$r_s(i, k) = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^N (x_{ij} - x_{kj})^2}{N^3 - N} \quad (11)$$

式中, N 为总样方数量; x_{kj} 与 x_{ij} 分别为物种 k 和 i 在样方 j 中的重要值, $r_p(i, k)$ 和 $r_s(i, k)$ 的值域均为 $[-1, 1]$, 正值表示正相关, 负值表示负相关^[32]。

1.3.5 数据分析

在本研究中, 使用 R 4.2.0、Origin 2018 和 Excel 2021 进行所有统计分析。首先, 通过 Excel 2021 对样方调查数据进行初步整理, 并计算重要值。Spearman 秩相关系数的检验及相关显著性检验分别由 R 语言中 spaa 包的“sp.pair”、psych 包中的“corr.test”函数完成, 此外, 利用 spaa 包中“niche.overlap”与“niche.width”函数进行生态位重叠指数与生态位宽度指数的计算^[33], 采用 Origin 2018 绘制 AC 值、Spearman 秩相关系数与生态位重叠指数的线性回归图。

2 结果与分析

2.1 生态位宽度

资源冷杉群落乔木优势树种的 B_s 指数和 B_L 指数的变化范围分别为 0.78—1.92, 1.98—6.68。群落中多脉青冈的生态位宽度最大 ($B_s = 1.92, B_L = 6.68$), 说明多脉青冈对资源利用程度较好, 在群落中具有较强的竞争力与生存能力。其次为资源冷杉 ($B_s = 1.79, B_L = 5.36$), 木荷、大屿八角与云南桫欏叶树紧随其后, 表明这些树种对环境有较强的适应能力, 为乔木层的优势种 (表 2)。总体而言, B_L 与 B_s 排序基本一致, 但与重要值排序又有所不同, 说明资源冷杉群落演替未达到稳定阶段。

2.2 生态位重叠程度

对资源冷杉群落优势乔木种群生态位重叠程度的分析, 表 3 结果显示 105 组种对有 103 对 (98.10%) 种对间存在生态位重叠 ($Q_{ik} > 0$), 生态位重叠值较高 (均值 = 0.699), 群落物种间存在一定竞争。其中, $Q_{ik} > 0.50$ 的种对有 51 对 (48.57%); $Q_{ik} < 0.50$ 的种对有 52 对 (49.52%), 未存在重叠的种对有 2 对 (1.90%)。其中, 多脉青冈、木荷以及大屿八角与其余 14 个树种有明显生态位重叠, 说明这些物种间竞争程度相对较高。

资源冷杉与其优势伴生树种生态位都存在不同程度的重叠, 14 个种对中有 6 个种对的生态位重叠程度较低 ($0 < Q_{ik} < 0.50$), 占总种对数的 42.86%, 8 个种对 (分别为与大屿八角、木荷、灯笼树、多脉青冈、云南桫欏叶树、灰柯、红滩杜鹃、珍珠花构成的种对) 的生态位重叠程度较高 ($0.50 \leq Q_{ik} < 1$), 占总种对数的 57.14%, 最大值为 0.88 (与大屿八角构成的种对), 反映出资源冷杉整体上与其优势伴生种的生态位重叠程度较高, 种间竞

争较激烈,群落结构尚未稳定。

表 2 乔木优势树种生态位宽度及重要值排名

Table 2 Niche breadth and importance values ranking of dominant tree species

排名 Ranking	种名 Species name	缩写 Abbreviation	重要值 Importance value/%	生态位宽度 Niche breadth	
				Niche breadth Shannon 指数 (B_S)	Niche breadth Levins 指数 (B_L)
1	大屿八角 <i>Illicium angustisepalum</i>	Ia	18.68	1.70	4.52
2	木荷 <i>Schima superba</i>	Ss	9.98	1.75	4.84
3	云南栲叶树 <i>Clethra delavayi</i>	Cd	7.14	1.41	5.11
4	灯笼树 <i>Enkianthus chinensis</i>	Ec	6.56	1.19	2.79
5	多脉青冈 <i>Quercus multinervis</i>	Qm	5.90	1.92	6.68
6	青冈 <i>Quercus glauca</i>	Qg	4.56	0.97	2.25
7	包果柯 <i>Lithocarpus cleistocarpus</i>	Lc	3.98	0.86	1.98
8	红滩杜鹃 <i>Rhododendron chihsinianum</i>	Rc	3.51	1.06	2.76
9	五裂槭 <i>Acer oliverianum</i>	Ao	2.95	0.78	1.98
10	资源冷杉 <i>Abies ziyuanensis</i>	Ab	2.63	1.79	5.36
11	灰柯 <i>Lithocarpus henryi</i>	Lh	2.18	1.19	2.90
12	红皮木姜子 <i>Litsea pedunculata</i>	Lp	2.14	1.17	3.21
13	半齿柃 <i>Eurya semiserrulata</i>	Es	1.86	1.56	3.90
14	珍珠花 <i>Lyonia ovalifolia</i>	Lo	1.73	1.41	3.55
15	吴茱萸五加 <i>Gamblea ciliata</i>	Gc	1.38	0.85	2.12

表 3 乔木优势树种 Pianka 生态位重叠指数

Table 3 Pianka niche overlap index of dominant tree species

	Ia	Ss	Ec	Qm	Lc	Cd	Qg	Lh	Ao	Ap	Es	Rc	Gc	Lp
Ss	0.607													
Ec	0.279	0.625												
Qm	0.756	0.802	0.573											
Lc	0.288	0.247	0.194	0.466										
Cd	0.656	0.733	0.811	0.773	0.453									
Qg	0.404	0.319	0.027	0.702	0.311	0.118								
Lh	0.277	0.524	0.572	0.560	0.786	0.550	0.375							
Ao	0.880	0.658	0.645	0.833	0.314	0.797	0.420	0.523						
Ap	0.390	0.314	0.001	0.674	0.197	0.074	0.988	0.262	0.386					
Es	0.629	0.831	0.259	0.773	0.175	0.576	0.456	0.173	0.477	0.485				
Rc	0.584	0.289	0.444	0.539	0.739	0.754	0.114	0.625	0.662	0.000	0.174			
Gc	0.405	0.342	0.002	0.689	0.209	0.091	0.984	0.262	0.387	0.999	0.522	0.000		
Lp	0.525	0.413	0.047	0.736	0.485	0.255	0.869	0.375	0.447	0.875	0.584	0.186	0.892	
Lo	0.427	0.684	0.653	0.619	0.734	0.766	0.123	0.899	0.596	0.015	0.353	0.748	0.027	0.201

2.3 总体关联性

采用 VR 检验资源冷杉群落 15 个乔木优势树种间的总体关联性(表 4)。结果表明, $VR = 1.172 > 1$, 统计量 $W = N \times VR = 49.224$; 查 χ^2 临界值表, 可知 $\chi^2_{0.95}(42) = 28.144$, $\chi^2_{0.05}(42) = 58.124$, 则 $\chi^2_{0.95}(42) < W < \chi^2_{0.05}(42)$, 即表示 VR 偏离 1, 不显著, 因此, 资源冷杉群落乔木优势树种之间总体呈现不显著的正联结关系。

表 4 优势树种间的总体联结性

Table 4 The overall association among dominant tree species

方差比率 (VR) Variance ratio	检验统计量 (W) Test statistic	χ^2 临界值 χ^2 threshold ($\chi^2_{0.95}, \chi^2_{0.05}$)	检验结果 Results
1.172	49.224	(28.144, 58.124)	不显著正联结

2.4 种间联结性分析

2.4.1 χ^2 检验

资源冷杉群落乔木优势树种种间 χ^2 检验的计算结果表明,共有 105 个种对,种对的正负联结比值为 1.06,正联结种对稍占优势,与总体联结性呈不显著正联结的结果相同(图 1)。在 105 个种对中,正联结种对有 54 对(51.42%),不显著正联结有 45 对,呈显著正联结有 4 对,呈极显著正联结有 4 对(吴茱萸五加与中华木荷、包果柯;青冈与五裂槭、红皮木姜子;灯笼树与红滩杜鹃);负联结种对共 51 对(48.57%),其中,呈不显著负联结有 41 对,呈显著负联结有 5 对,呈极显著负联结有 5 对(大屿八角与灰柯;灯笼树与青冈、红皮木姜子;云南桫叶树与五裂槭、青冈)。此外,105 个种对中有 86 个种对为不显著联结(81.90%)。 χ^2 检验结果表明,优势树种之间大部分呈不显著联结,独立性较强,群落尚未发育成熟;资源冷杉与伴生优势树种的种间联结性均不显著。

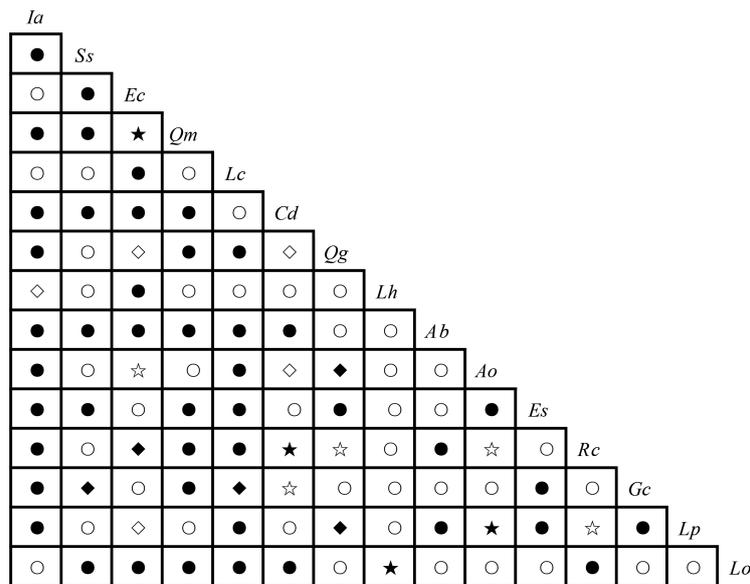


图 1 优势树种间的 χ^2 检验半矩阵图

Fig.1 Semi-matrix diagram of χ^2 test of the dominant tree species

●不显著正联结;○不显著负联结;★显著正联结;☆显著负联结;◆极显著正联结;◇极显著负联结;Ia:大屿八角 *Illicium angustisepalum*; Ss:木荷 *Schima superba*;Ec:灯笼树 *Enkianthus chinensis*;Cm:多脉青冈 *Quercus multinervis*;Lc:包果柯 *Lithocarpus cleistocarpus*;Cd:云南桫叶树 *Clethra delavayi*;Cg:青冈 *Quercus glauca*;Lh:灰柯 *Lithocarpus henryi*;Ab:资源冷杉 *Abies ziyuanensis*;Ap:五裂槭 *Acer oliverianum*;Es:半齿柃 *Eurya semiserrulata*;Rc:红滩杜鹃 *Rhododendron chihsonianum*;Gc:吴茱萸五加 *Gamblea ciliata*;Lp:红皮木姜子 *Litsea pedunculata*;Lo:珍珠花 *Lyonia ovalifolia*

2.4.2 联结系数

主要物种间的 AC 值如表 5 所示,共 105 个种对,负联结种对为 49 个,正联结种对为 56 个,正负联结比值为 1.14。根据常用分级标准,无联结性($-0.20 < AC \leq 0.20$)的种对有 57 对(54.23%),说明该种群间联结不紧密,趋向于独立;显著正联结性($0.60 < AC \leq 1.00$)和不显著正联结($0.20 < AC \leq 0.60$)的种对分别有 0 对(0%)、16 对(15.24%);显著负联结性($-1.00 \leq AC < -0.60$)和不显著负联结($-0.60 < AC \leq -0.20$)的种对分别有 15 对(14.29%),14 对(13.33%)。无联结性和不显著联结性($-0.60 < AC \leq 0.60$)的种对数为 87 对(82.86%),一定程度上说明该群落优势树种之间的种间联结性较弱,这与 χ^2 检验的结果一致。

2.4.3 Spearman 秩相关系数

Spearman 秩相关检验结果表明(图 2),正负相关种对比值为 0.98,此外,显著相关种对有 17 对(16.19%);不显著相关种对有 88 对(83.81%)。其中,7 个种对呈显著负相关(6.67%),10 个种对呈现显著正

相关(9.52%)。Spearman 秩相关检验与 χ^2 检验、联结系数(AC)检验的结果相同,多数物种间无显著联结,呈独立分布格局;小部分物种呈现出竞争或互利关系。

表 5 银竹老山资源冷杉群落乔木优势树种联结系数(AC)

Table 5 Connection coefficient (AC) of dominant tree species in *Abies ziyuanensis* community of Yinzhu laoshan

	<i>Ia</i>	<i>Ss</i>	<i>Ec</i>	<i>Qm</i>	<i>Lc</i>	<i>Cd</i>	<i>Qg</i>	<i>Lh</i>	<i>Ao</i>	<i>Ap</i>	<i>Es</i>	<i>Rc</i>	<i>Gc</i>	<i>Lp</i>
<i>Ss</i>	0.23													
<i>Ec</i>	-0.08	0.13												
<i>Qm</i>	0.14	0.13	0.41											
<i>Lc</i>	-0.03	-0.26	0.07	-0.18										
<i>Cd</i>	0.06	0.23	0.44	0.04	-0.05									
<i>Qg</i>	0.1	-0.05	-0.81*	0.04	0.18	-0.46								
<i>Lh</i>	-0.63*	-0.05	0.02	-0.25	-0.24	-0.10	-0.40							
<i>Ao</i>	0.08	0.01	0.09	0.08	0.12	0.13	-0.06	-0.21						
<i>Ap</i>	0.05	-0.1	-1.00*	-0.17	0.07	-0.83*	0.55	-0.07	-0.42					
<i>Es</i>	0.03	0.04	-0.52	0.03	0.01	-0.18	0.06	-0.24	-0.52	0.25				
<i>Rc</i>	0.06	-0.18	0.53	0.04	0.32	0.19	-0.79*	-0.4	0.06	-1.00*	-0.45			
<i>Gc</i>	0.03	-0.32	-1.00*	0.00	0.15	-0.75*	0.33	0.07	-0.13	0.48	0.15	-1.00*		
<i>Lp</i>	0.05	-0.28	-1.00*	-0.31	0.21	-0.16	0.48	-0.68*	0.09	0.52	0.21	-1.00*	0.52	
<i>Lo</i>	-0.09	0.01	0.20	0.05	0.07	0.06	-0.67*	0.36	-0.13	-1.00*	-0.15	0.22	-1.00*	-0.64*

-表示负联结;无-表示正联结;*表示显著联结;无*表示不显著联结或无联结性

2.4.4 种间联结与生态位重叠的回归分析

由图 3 可知,资源冷杉群落乔木优势树种间的生态位重叠值与联结系数($R^2 = 0.5652$)、Spearman 秩相关系数($R^2 = 0.5287$)的线性拟合效果均较好,且均呈极显著正相关($P < 0.001$),即种间生态位重叠度越低,物种间负联结性就越强;反之,生态位重叠度越高,物种间正联结性就越强。

3 讨论

3.1 优势乔木的生态位特征

生态位宽度和重叠程度是评估物种存在、迁移和灭绝及未来动态的关键属性^[34]。有研究认为生态位宽度越大,物种对环境资源的利用能力也越强,则物种分布范围也更广,在群落中更易与其他种群产生较大生态位重叠度^[35]。但由于生态位宽度较大的物种其生态及生物学特征也可能存在差异,导致对环境资源的利用与需求也并非完全一致^[36],因此,一旦生态位宽度较小的物种之间有相似的生态及生物学特性,它们之间的生态位重叠程度也会较大^[4],这与对木林子矮曲林群落的研究结果相同^[37]。本研究结果同样支持这一观点,如本研究青冈、包果柯和灰柯的生态位宽度较小,但它们却有较大程度的生态位重叠,可能是由于这 3 种植物均为壳斗科乔木,生活习性较为相似。由此可见生态位重叠程度和生态位宽度之间并不存在绝对的正相关关系。此外,本研究中,具有较宽生态位的资源冷杉,并不代表其就属于生态位泛化种,结合实际野外调查,银竹老山现存资源冷杉种群径级结构并不完整,幼树、幼苗十分稀缺,且每个资源位的资源冷杉数量少至 1 到几株。这与濒危植物小黄花茶(*Camellia luteoflora*)^[10]及濒危植物坡垒(*Hopea hainanensis*)^[38]的情况类似,特定生境下它们能在群落中占据优势地位,但种群结构并不健康,仍受其他伴生植物的竞争威胁及种群天然更新困难。

生态位重叠值能反映种群间占据资源位的交错程度以及 2 个种群共同对同一资源位的利用程度,阐明种间共存或竞争关系^[39]。通常认为当种群间的资源利用与生态相似性越高($O_{ik} > 0.500$),种间竞争就会越激烈^[40]。本研究中,资源冷杉群落乔木优势树种的生态位重叠值较高(均值=0.699),表明大部分物种对环境资源的需求相似性较大,说明种间竞争激烈,群落发展较不稳定,这与程永生等^[13]对珍稀濒危植物手参的研

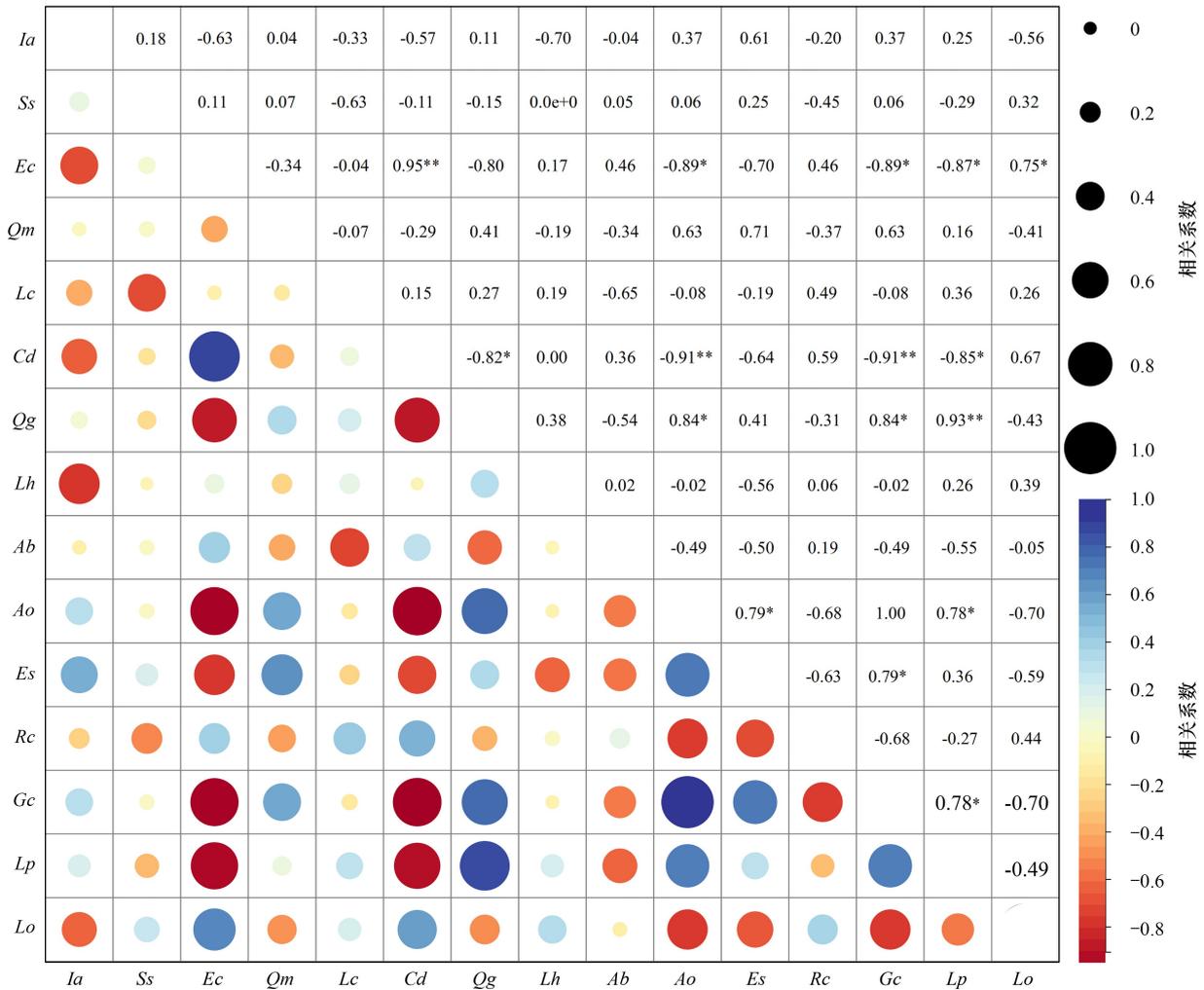


图 2 优势树种的 Spearman 秩相关系数及其显著性

Fig.2 Spearman's rank correlation coefficients and significance of dominant tree species

-表示负联结;无-表示正联结;*表示显著联结($P \leq 0.05$);**表示极显著联结($P \leq 0.01$);无*表示不显著联结或无联结性;颜色深度表示种间关联的绝对值,蓝色代表种对之间的正关联,红色代表种对之间的负关联

究结果相似。其中,资源冷杉与生态位宽度较大的大屿八角、多脉青冈、云南杞叶树、木荷、灯笼树等树种有较高生态位重叠,表明这些树种对环境的适应及对资源的利用能力较相似,因此当这些物种在同一群落时,都能较易获取相同资源而易产生较大生态位重叠,因此可能形成较强的种间竞争关系。陶磊等^[41]对水松(*Glyptostrobus pensilis*)的研究也得到类似结论,随着群落演替的进行,种群间的竞争加剧,与资源冷杉有较高生态位重叠的伴生树种通过侵占其生存空间和对相似资源的竞争,影响资源冷杉的生长更新,对其产生不利影响,可见资源冷杉在群落中的生存面临着较大挑战。

3.2 种间联结性分析

群落物种间的总体联结性与群落稳定性有着密切关系,可反映群落的演替状态^[42]。众多研究表明,随着群落演替的发展,群落结构与物种组成逐渐演替完善并达到相对较稳定状态,各种群间的种内和种间竞争强度也会逐渐削弱,此时群落种间正联结对数占绝对优势,趋于显著正联结,群落稳定性大大增强,越趋向顶级群落^[43-44]。本研究中,资源冷杉群落乔木优势树种的总体联结性呈现不显著正联结,表明资源冷杉群落尚处于不稳定的演替初期或者中期阶段,这与栾宜通等^[45]对云冷杉红松林的研究结论一致,群落结构与物种组成相对不稳定,易受外界因子的干扰。基于实地调查发现,银竹老山小生境较复杂,资源冷杉种群多生长于较陡

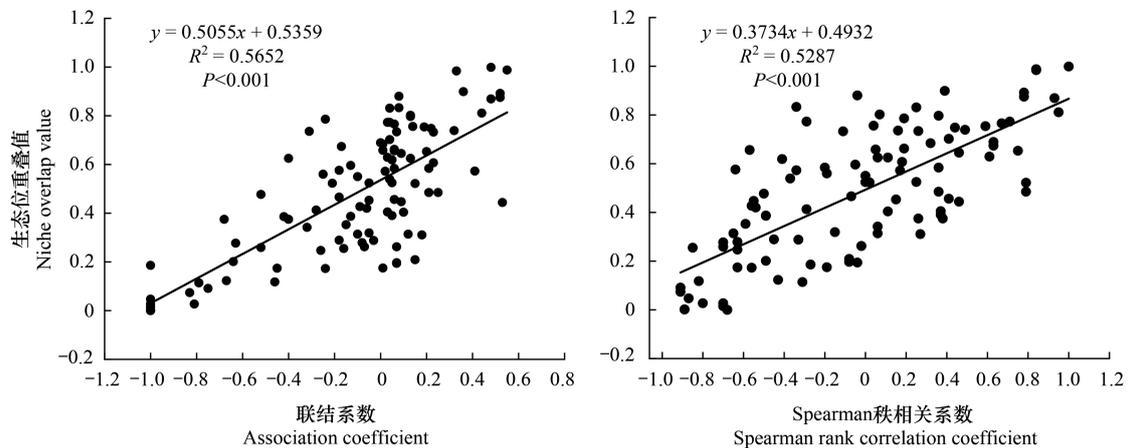


图3 资源冷杉群落乔木优势树种联结系数、Spearman 秩相关系数与生态位重叠的回归分析

Fig.3 Regression analysis between Association coefficient, Spearman rank correlation coefficient with niche overlap among dominant tree species of *A. ziyuanensis* community

的沟谷两侧山坡或山顶^[18],除了不同物种占据不同生态位产生的种间竞争,不同的海拔、坡度、坡向等生境因子也会影响种间联结性^[46],这些因素可能制约着资源冷杉群落的稳定发展。

综合 χ^2 检验、种间联结系数(AC)和 Spearman 秩相关检验结果发现,不显著种对数均大于显著种对数,说明群落物种间的联结性较弱,独立性较强,推断资源冷杉群落处于演替的初期或者中期。其中,Spearman 秩相关检验结果表明,灯笼树-云南栲叶树、吴茱萸五加-红皮木姜子和青冈-五裂槭等均呈现极显著正联结,说明这些物种之间相互依存或在资源需求上互补,在养分和空间充足的状态下,一般不会发生竞争。而灯笼树-青冈、灯笼树-红皮木姜子、云南栲叶树-青冈等均呈现极显著负联结,说明这些物种可能对生存环境与资源具有相互排斥性。此外,不同种间联结检验方法均表明资源冷杉与其它物种的种间联结性不显著,进一步说明资源冷杉与其伴生优势树种尚未达到稳定共存的格局。该结果与薛卫星等^[47]研究鹅掌楸和陶磊等^[41]研究水松等珍稀濒危植物群落生态位和种间联结性的结果一致。

3.3 生态位重叠与种间联结性的相关性

物种间的种间联结与生态位重叠密切相关,能反映 2 个物种对环境资源利用的异同,有研究表明,正(负)联结越强则生态位重叠指数越大(小)^[48]。本研究发现,资源冷杉群落乔木优势树种间的生态位重叠值与联结系数(AC)、Spearman 秩相关系数之间存在极显著的正相关性($P < 0.001$)。该结论在诸多研究中也得到验证^[32,36]。本研究中,如灯笼树和云南栲叶树、五裂槭与吴茱萸五加的种对间呈极显著正联结,生态位重叠值也较大。但也有研究认为,物种间负联结的形成较复杂,负联结性能反映出物种间生态位的分离与排斥程度,若生态位重叠值高,则是由环境资源竞争引起的负关联,而生态位重叠值低则是由栖息地差异引起的负关联^[49],如本研究中青冈与灯笼树的种间关系为负联结,种对间的生态位重叠程度较低,说明该种对间的负联结可能是由生境差异引起,因为青冈为高大常绿乔木,灯笼树为喜阳落叶小乔木,2 个物种对光照、水分等需求不同,这支持了罗敏贤等^[50]认为常绿树种和落叶树种因生长所需光性的不同而长于不同生境会导致物种间呈显著负联结的观点;而资源冷杉与多脉青冈,大屿八角与云南栲叶树的种间关系也为负联结,但其种对间的生态位重叠程度较高,说明该负联结可能是由资源竞争引起的。

3.4 植被保护与生态恢复策略

本研究结果表明,资源冷杉种群与其优势伴生树种的种间联结性较弱,优势树种趋于独立分布,群落稳定性较低。此外,结合实际野外调查发现,银竹老山现存大部分资源冷杉母树下几无幼苗,难以完成自然更新,也就是说资源冷杉幼树(幼苗)可能需经历高强度的种间竞争才能长成大树,故随着群落演替,资源冷杉群落

面临的种间竞争将可能越来越激烈。因此有必要采取科学的保育措施以促进资源冷杉种群的稳定健康发展。一方面,在就地保护过程中,需关注与资源冷杉呈负关联及生态位重叠值较高的物种,如大屿八角、木荷、多脉青冈等与资源冷杉生态位重叠值较高,推测当资源不足时其可能危及资源冷杉的生存和繁衍。另一方面,在开展野外回归或生境修复时,可寻找与资源冷杉正联结性较强的物种,为资源冷杉创造良好的生境,以调节种间关系,提升群落稳定性,促进种群更新。

4 结论

综上所述,资源冷杉群落优势乔木树种间联结性较弱,独立性较强,且优势物种间整体上生态位重叠度较高,可能存在较激烈竞争,群落演替处于相对不稳定阶段,易受外界因子的干扰。建议加强对保护区内资源冷杉群落原生境的保护,同时科学开展资源冷杉种群的长期动态监测工作,从而因地制宜地制定科学合理的解濒策略。

参考文献(References):

- [1] Chen Q, Chen J, Zhong J J, Ji L T, Kang B. Interspecific association and functional group classification of the dominant populations in shrub layer in secondary forest of *Pinus tabulaeformis* in Qinling Mountain, China. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(6): 1736-1744.
- [2] Liu Z W, Zhu Y, Wang J J, Ma W, Meng J H. Species association of the dominant tree species in an old-growth forest and implications for enrichment planting for the restoration of natural degraded forest in subtropical China. *Forests*, 2019, 10(11): 957.
- [3] Gu L, Gong Z W, Li W Z. Niches and interspecific associations of dominant populations in three changed stages of natural secondary forests on Loess Plateau, P.R. China. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 6604.
- [4] 王如, 彭文成, 杨佳, 吴彪, 张碧嘉, 廖立国. 尖峰岭杉木人工林群落主要木本植物的生态位和种间联结. *应用生态学报*, 2024, 35(6): 1483-1491.
- [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] Jin S S, Zhang Y Y, Zhou M L, Dong X M, Chang C H, Wang T, Yan D F. Interspecific association and community stability of tree species in natural secondary forests at different altitude gradients in the southern Taihang Mountains. *Forests*, 2022, 13(3): 373.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 陈聪琳, 赵常明, 刘明伟, 徐凯, 徐文婷, 熊高明, 葛结林, 邓滢, 申国珍, 谢宗强. 神农架南坡小叶青冈+曼青冈常绿阔叶林主要木本植物生态位与种间联结. *生态学报*, 2024, 44(11): 4889-4903.
- [10] 李锦婷, 穆君, 申开平, 郭云, 白小节, 臧丽鹏, 李青, 韩勛, 赵颖, 何跃军. 小黄花茶群落优势木本植物生态位及种间联结性. *生态学报*, 2024, 44(1): 283-294.
- [11] 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.
- [12] 汪志培, 卢建, 何耀理, 于焕喜, 廖婷, 解婷婷, 宋庆妮, 杨清培, 刘骏. 江西齐云山伯乐树群落乔木层优势物种生态位与种间联结研究. *江西农业大学学报*, 2023, 45(6): 1431-1442.
- [13] 程永生, 王甜语, 奚为民, 闫明. 濒危植物手参生存群落主要物种的生态位特征及其种间联结. *植物科学学报*, 2024, 42(4): 444-453.
- [14] 徐满厚, 刘敏, 翟大彤, 刘彤. 植物种间联结研究内容与与方法评述. *生态学报*, 2016, 36(24): 8224-8233.
- [15] 国家林业和草原局农业农村部. 国家重点保护野生植物名录; 国家林业和草原局农业农村部公告 2021 年第 15 号.
- [16] 向巧萍. 中国的几种珍稀濒危冷杉属植物及其地理分布成因的探讨. *广西植物*, 2001, 21(2): 113-118.
- [17] 宁世江, 唐润琴. 广西银竹老山资源冷杉种群退化机制初探. *广西植物*, 2005, 25(4): 289-294, 320.
- [18] 宁世江, 唐润琴, 曹基武. 资源冷杉现状及保护措施研究. *广西植物*, 2005, 25(3): 197-200, 280.
- [19] 张玉荣. 资源冷杉的濒危机制与种群保育研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [20] 代文娟. 资源冷杉的保护遗传学研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2006.
- [21] 王蕾, 景慧娟, 凡强, 陈春泉, 廖文波. 江西南风面濒危植物资源冷杉生存状况及所在群落特征. *广西植物*, 2013, 33(5): 651-656.
- [22] 段云博, 朱晓珍, 胡兴华, 邓涛, 黄仕训. 资源冷杉与元宝山冷杉针叶精油成分的比较. *广西植物*, 2020, 40(5): 663-672.

- [23] 杨玲,梁思琪,潘佳明,韦金鑫,丁涛,蒋日红,邵毅贞,张宪春,刘勇波,向巧萍. 濒危植物百山祖冷杉和资源冷杉的物种划分及其遗传资源的保护. 植物生态学报,2023,47(12): 1629-1645.
- [24] 李晓笑. 中国5种冷杉属植物生态濒危机制研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
- [25] 傅立国,吕庸浚,莫新礼. 冷杉属植物在广西和湖南首次发现. 植物分类学报,1980,18(2): 205-210.
- [26] 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.
- [27] Lamont B B,Downes S,Fox J E D. Importance-value curves and diversity indices applied to a species-rich heathland in Western Australia. Nature, 1977,265: 438-441.
- [28] 宋永昌. 植被生态学. 2版. 北京:高等教育出版社,2017.
- [29] Pianka E R. The structure of lizard communities. Annual Review of Ecology and Systematics,1973,4: 53-74.
- [30] Schluter D. A variance test for detecting species associations,with some example applications. Ecology,1984,65(3): 998-1005.
- [31] 张金屯. 数量生态学. 3版. 北京:科学出版社,2018.
- [32] 刘益鹏,叶兴状,叶利奇,陈绪辉,郑世群,陈世品,张国防,刘宝. 观光木群落优势树种生态位和种间联结. 应用生态学报,2022,33(10): 2670-2678.
- [33] 马克平,国际生物多样性计划中国委员会. 中国生物多样性保护与研究进展. X,第十届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集. 北京:气象出版社,2014: 165-174.
- [34] Ahmad M,Sharma P,Rathee S,Singh H P,Batish D R,Lone G R,Kaur S,Jaryan V,Kohli,R K. Niche width analyses facilitate identification of highrisk endemic species at high altitudes in western Himalayas. Ecol. Indic. 2021,126,107653.
- [35] Rosas Y M,Peri P L,Lencinas M V,Martínez Pastur G. Potential biodiversity map of understory plants for *Nothofagus* forests in southern Patagonia: analyses of landscape,ecological niche and conservation values. Science of the Total Environment,2019,682: 301-309.
- [36] 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.
- [37] 艾鑫,薛卫星,艾训儒,姚兰,朱江,郭秋菊. 木林子矮曲林优势种生态位与种间联结性. 森林与环境学报,2024,44(5): 501-510.
- [38] Zhang L,Zhang H L,Chen Y K,Nizamani M M,Zhou Q,Su X T. Analyses of community stability and inter-specific associations between a plant species with extremely small populations (*Hopea hainanensis*) and its associated species. Frontiers in Ecology and Evolution,2022,10: 922829.
- [39] Levine J M,HilleRisLambers J. The importance of niches for the maintenance of species diversity. Nature,2009,461(7261): 254-257.
- [40] 沈雪梨,吴远密,朱艺璇,童玲,胡巧立,蒋万杰,范雅倩,夏晓飞,沐先运,张志翔. 濒危植物百花山葡萄群落物种生态位特征与种间联结研究. 植物科学学报,2020,38(2): 195-204.
- [41] 陶磊,黄雍容,蔡德淡,罗素珍,肖祥希,张岚棋,黄云鹏. 福建省尤溪水松-江南桫木群落生态位特征及种间联结性. 生态学杂志: 1-13. [2024-10-14]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20241012.1621.002.html>
- [42] 雷德芳,王志杰. 黔中喀斯特地区马尾松群落主要物种种间联结、生态位及群落稳定性特征. 生态学报,2024,44(10): 4353-4367.
- [43] Lib T T,Rong L,Wang M J,Ye T M,Qi W. Dynamic changes in niche and interspecific association of major species of karst secondary forest in central Guizhou. Journal of Tropical and Subtropical Botany. 2021,29,9-19.
- [44] Wu D T,Wu C P,Sheng G,Wei X,Jiao J J,Jiang B,Zhu J R,Yuan W G. Interspecific association dynamics of Nanmu natural forest in Jiande, Zhejiang Province. Journal of Zhejiang A&F University. 2021,38,671-681.
- [45] 栾宜通,李念森,乔璐靖,琚存勇,蔡体久,孙佩丽. 云冷杉红松林优势树种生态位、种间联结及群落稳定性. 植物研究,2024,44(5): 753-762.
- [46] 温鑫鸿,王其炳,潘辉,王李睿,陈妍,何东进. 天宝岩柳杉群落主要乔木种群的种间联结性. 森林与环境学报,2022,42(1): 1-10.
- [47] 薛卫星,李春辉,艾训儒,姚兰,郭秋菊,朱江. 鹅掌楸天然林优势树种生态位与种间联结性. 森林与环境学报,2023,43(1): 26-34.
- [48] 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.
- [49] 张东梅,赵文智,罗维成. 荒漠草原带盐碱地优势植物生态位与种间联结. 生态学杂志,2018,37(5): 1307-1315.
- [50] 罗敏贤,林碧华,陈绪辉,肖丽芳,潘标志,叶宝鉴,刘宝,郑世群. 福建龟山伞花木所在群落乔灌层优势种的种间联结性. 植物资源与环境学报,2022,31(6): 63-72.