



广东大峡谷常绿阔叶林主要植物种间关系、生态位及其群落稳定性研究

肖以华, 付志高, 许涵, 邹建平, 贲春丽, 史欣, 曹国松

引用本文:

肖以华,付志高,许涵,邹建平,贲春丽,史欣,曹国松. 广东大峡谷常绿阔叶林主要植物种间关系、生态位及其群落稳定性研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(6): 695–704.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4828>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滨海防护林木麻黄和花吊丝竹混交林群落的种间关联和生态位分析

Interspecific Association and Niche of Mixed Forest Communities of *Casuarina equisetifolia* and *Dendrocalamus minor* var. *amoenus* in the Windbreak of Sandy Coast

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 465–473 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4346>

广东翁源青云山自然保护区森林群落优势树种的生态位特征

Niche Characteristics of Dominant Species of Forest Community in Qingyunshan Natural Reserve, Wengyuan, Guangdong Province

热带亚热带植物学报. 2020, 28(6): 565–573 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4214>

舟山群岛次生林优势种群的生态位与种间联结

Niche and Interspecific Association of Dominant Species in Secondary Forest of Zhoushan Islands

热带亚热带植物学报. 2017, 25(1): 73–80 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3620>

黔中喀斯特次生林主要物种的生态位及种间联结性动态变化

Dynamic Changes in Niche and Interspecific Association of Major Species of Karst Secondary Forest in Central Guizhou

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 9–19 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4252>

地被植物对广东常绿阔叶林土壤养分的指示作用

Indicative Effect of Ground Vegetation on Soil Nutrient Status in Evergreen Broad-leaved Forest of Guangdong

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 115–123 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4105>

向下翻页，浏览PDF全文

广东大峡谷常绿阔叶林主要植物种间关系、生态位及其群落稳定性研究

肖以华¹, 付志高¹, 许涵¹, 邹建平², 贲春丽¹, 史欣¹, 曹国松²

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520; 2. 广东乳源大峡谷省级自然保护区管理处, 广东 乳源 512700)

摘要: 探究特殊生境中常绿阔叶林主要植物的种间关系、生态位状态及群落稳定性, 可为区域的生物多样性保育和自然保护地的保护管理提供科学依据。该文基于广东大峡谷森林生物多样性固定监测样地野外调查数据和 2×2 列联表, 测定了主要植物的重要值、生态位宽度和生态位重叠, 并应用方差比率法和 χ^2 检验分析主要植物间的种间联结、OI 指数、DI 指数, 并依据 Godron 法评价群落稳定性。结果表明, 群落共记录 104 种植物, 隶属于 39 科 74 属, 其中木荷(*Schima superba*)的重要值和生态位宽度最大, 华润楠(*Machilus chinensis*)、鸭脚木(*Schefflera octophylla*)、罗浮柿(*Diospyros morrisiana*)和黄杞(*Engelhardia roxburghiana*)次之, 5 种树在群落资源竞争中占据优势地位, 并且与群落中其他植物产生了较高的生态位重叠(占总数的 67.16%)。群落主要 26 优势种 325 种对中, 负联结大于正联结。 χ^2 检验结果表明种间相对独立性强, 联结较为松散; 但 5 种主要优势种间呈现紧密的关联性, 相伴出现率大。Godron 法分析表明, 群落处于不稳定状态, 群落物种间呈现显著负关联。因此, 广东乳源大峡谷常绿阔叶林群落种间联结不强, 群落不稳定, 亟待加强保育和经营管理。

关键词: 广东大峡谷; 常绿阔叶林; 种间关系; 生态位; 群落稳定性

doi: 10.11926/jtsb.4828

CSTR:32235.14.jtsb.4828

Study on Interspecific Relationship and Ecological Niche of Dominant Species and Community Stability of the Evergreen Broad-leaved Forest in Guangdong Grand Canyon

XIAO Yihua¹, FU Zhihao¹, XU Han¹, ZOU Jianping², BEN Chunli¹, SHI Xin¹, CAO Guosong²

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China; 2. Administration Bureau of Daxiagu Nature Reserve of Guangdong Province, Ruyuan, Ruyuan 512700, Guangdong, China)

Abstract: The research on the interspecific relationship, niche status and community stability of dominant plants in evergreen broad-leaved forests in special habitats can provide scientific basis for the conservation of regional biodiversity and the conservation and management of nature reserves. Based on the filed investigation data of long-term plots in Guangdong Grand Canyon and 2×2 correlation tables, the importance value, niche width and niche overlap of dominant species were determined. The index of interspecific associations, OI index and DI index for dominant species were analyzed by using variance ratio method and χ^2 test. Moreover, the community stability was evaluated by Godron method. The results showed that there were 104 species, belonging to 39 families and 74 genera, in which the importance value and niche width of *Schima superba* were the biggest,

收稿日期: 2023-08-03 接受日期: 2024-01-02

基金项目: 广东省林木种质资源调查项目(SL00102); 国家重点研发计划项目(2022YFF1303003-06); 广东省科技厅林业生态监测网络平台建设项目(2022CG646); 广东珠江三角洲森林生态系统国家定位观测研究站项目(0144135)资助

This work was supported by the Project for Forest Germplasm Resources Survey in Guangdong (Grant No. SL00102), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFF1303003-06), the Project for Forestry Ecological Monitoring Network Platform Construction of Guangdong Science and Technology Department (Grant No. 2022CG646), and the Project for Guangdong Pearl River Delta Forest Ecosystem National Positioning Observation and Research Station (Grant No. 0144135).

作者简介: 肖以华(1976年生), 男, 副研究员, 主要从事城市森林生态效益监测研究。E-mail: jxxiaoyihua@126.com

followed by *Machilus chinensis*, *Heptapleurum heptaphyllum*, *Diospyros morrisiana* and *Engelhardia roxburghiana*. These five species occupied a dominant position in the competition for community resources and had a high niche overlap with other plants in the community (67.16% of the total). In 325 pairs of 26 dominant species, negative associations were greater than positive associations. χ^2 test showed that the species were relatively independent and loosely connected. However, the five dominant species showed close correlation, and the concomitant occurrence rate was high. Godron method analysis showed that the community was in an unstable state and there was a significant negative correlation between species. Therefore, it was revealed that the interspecific association of the community in broad-leaved evergreen forests in Guangdong Grand Canyon had weak interspecific association and unstable community, which needs to be strengthened for conservation and management.

Key words: Guangdong Grand Canyon; Evergreen broad-leaved forest; Interspecific relationship; Ecological niche; Community stability

植物群落在演替进化中物种间存在竞争、促进和协同进化等复杂关系。植物种间关系和生态位的研究,不仅可以量化评价植物对环境的适应能力和资源利用能力,而且有助于理解植物群落特征、结构以及植物与环境之间的关系;同时,还能表征群落发育过程中种群之间的关系和优势种的地位^[1]。植物的种间关系、生态位宽度和重叠度决定着群落物种组成和结构的多样性及稳定性,其中,生态位宽度可以对种间关系进行量化描述,其主要反映物种对于环境的适应和资源利用^[2];而生态位重叠则反映物种对资源的利用能力和在群落中的功能位置,体现为 2 物种对于相同资源利用的重叠情况^[3]。物种的种间联结是种间关系最直接的一种表现形式,代表着物种间的协同共生或者竞争结果和现状,其中,正联结表征种间互利或单方有利;负联结则是种间竞争双方不利或一方不利^[4]。Ochiai 匹配系数(OI)和 Dice 指数(DI)是反映不同种间联结程度的指标,其克服了点联结系数受 d 值影响而造成的偏差,2 个指数的值域均为 0~1,越接近 1 表明种对间的正联结程度越高,反之则越低^[5]。目前,诸多研究依据物种的 2×2 联列表进行 χ^2 检验量化分析群落主要优势种间的联结性时,常结合 OI 和 DI 指数综合评价种间联结性^[6-7]。群落中物种的种间关系反映了群落的稳定性,种间关系中正负联结比值越大,群落越稳定。以森林群落的种间关系和联结度及群落稳定性为切点研究群落特征^[8],其结果有助于解析群落演替和物种竞争关系,对于研究区的植被建设保育和物种多样性保护等方面具有重要的理论和实践意义^[9]。

目前关于植物种间关系、生态位及其群落稳

定性研究受到广泛关注,主要关注其受生境、群落结构以及人为活动影响的关系。如针对天然原始林^[3,10-13]、次生林^[1,14]和人工林^[8,13,15]的研究表明,随群落正向演替,其群落的种群联结性处于递增状态,其中有一些物种从无联结变成了极强的正联结,种间正联结增加反映该群落趋于更加稳定。从立地类型看,高寒区、荒漠区、岩溶地貌和草地的研究表明,具有相同或相似环境要求以及生态位宽度较大的物种间生态位重叠的值相对较高,种对的正负联结之比越大,群落越稳定^[4,9,16-17];同时,植物的种间关系、生态位及其群落稳定性受到人为活动影响,如重度放牧使主要植物间的关系更加松散^[18]、入侵植物在群落中具有显著优势地位并且与多数物种产生较高的生态位重叠,加剧资源竞争,导致群落的不稳定性^[5,19]。在峡谷生境中,只有少量报道了植物种间关系^[20]、群落特征^[21]、植物组成^[22]等相关的研究;极少综合针对峡谷生境中植物种间关系、生态位及其群落稳定性进行研究。

广东大峡谷又称乳源大峡谷,是拟建南岭国家公园的重要自然生态系统组成部分,其位于北回归线北缘,气候上属中亚热带向南亚热带过渡类型,由于历史地质活动所致,谷内沟壑纵横,奇峰林立,形成奇特的峡谷景观地貌,岩石裸露常见,土壤瘠薄,形成南亚热带与中亚热带的过渡性气候和峡谷内小气候并存的生态环境。地貌和特殊的气候条件对植物的分布、适应都产生特殊的机制,如种类组成、生长型、器官功能性状、生态适应类群等方面与非峡谷立地条件下具有明显差异。目前,关于乳源大峡谷的研究多集中于野生动物的调查^[23-24],但有关该特殊立地条件下的植被研究较少,尤其关

于植物群落种间关系和群落稳定性方面的研究匮乏^[10]。本研究以广东乳源大峡谷省级自然保护区的常绿阔叶林为对象, 研究植物种间关系和生态位及群落稳定性, 有助于理解特殊地质地貌下植物群落演替和特化等规律, 为大峡谷保护区的生物多样性保育和管理提供科学依据, 指导保护区开展植被建设和生物多样性保护等生产实践工作^[25]。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究地位于广东乳源大峡谷省级自然保护区(24°28'~24°32' N, 113°06'~113°13' E), 面积 3 673 hm², 属南亚热带季风气候, 年平均气温 19.9 °C, 降水量 1 761.4 mm, 年均相对湿度 79%。成土母岩主要为石英砂岩和石灰岩等, 土壤类型主要以山地黄红壤和山地草甸土为主。地貌属石英砂峡谷地貌, 地势北高南低, 有利于夏季风进入, 形成充沛的降水, 由于南岭的阻挡减弱了干冷冬季风的南下, 为植被的生长发育提供了优良条件^[26]。

1.2 样地设置和野外调查

在广东乳源大峡谷自然保护区内选择具有代表性的典型常绿阔叶林森林植被, 林龄约 100 a, 建设面积为 1 hm² 的森林生物多样性固定监测样地(海拔 418 m), 并划分为 25 个 20 m×20 m 的小样方, 对样地进行标桩、样方拉线和每木挂牌。每个小样方的左下角(西南角)为原点, 边线到植株点的距离即为 X 和 Y 值, 对所有 DBH≥1.0 cm 的植株进行每木调查, 记录坐标、树牌号、植物种名、胸径、树高、冠幅、分枝数和植株状态。物种鉴定依据《中国植物志》和《广东植物多样性编目》。

1.3 数据统计分析

1.3.1 群落优势种和生态位及物种联结性

植物优势程度以重要值表征, 对重要值大于 1 且频数大于 15 的物种进行生态位和种间联结分析^[5]。其中生态位宽度使用 Levins (B_L) 和 Shannon (B_S) 指数计算^[19]。生态位重叠则运用 Pianka^[27] 的方法。物种总体联结性则运用方差比例法(variance ratio, VR) 计算, 再通过统计量 W 检验关联显著性^[28]。参照文献^[5] 计算联结系数(AC)、Dice 指数(DI) 和 Ochiai 指数(OI)。相关计算公式如下:

物种重要值(IV)^[15]: $IV=(R_a+R_d+R_f)/3\times 100\%$, 式中, R_a 、 R_d 和 R_f 分别表示该种植物的相对多度、相

对显著度和相对频度。

Levins 生态位宽度(B_L): $B_L = \frac{1}{r} \times \sum_{j=1}^r P_{ij}^2$, Shannon

生态位宽度(B_S): $B_S = -\sum_{j=1}^r P_{ij} \ln P_{ij}^A$, 式中, P_{ij} 表示第 i 个物种于第 j 个资源等级下的重要值占该种在所有资源水平上重要值总和的比例; r 为资源等级数(样方数量)。

生态位重叠(O_{ik}): $O_{ik} = \sum_{j=1}^r P_{ij} P_{kj} - \sqrt{\sum_{j=1}^r P_{ij}^2 \sum_{j=1}^r P_{kj}^2}$,

式中, O_{ik} 表示物种 i 和物种 k 的生态位重叠; P_{ij} 和 P_{kj} 分别代表物种 i 与物种 k 在资源 j 上的重要值占该物种在所有资源水平上的重要值的比例, r 为资源总数。

物种总体联结性和显著性检验: $S_T^2 = \sum_{i=1}^S P_i(1-P_i)$,

$S_T^2 = (1/N) \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2$, $P_i = n_i/N$, $VR = S_T^2 / \delta_T^2$, $W = VR \times N$,

式中, S 为调查样地的总物种数, N 为总样方数, n_i 为物种 i 出现的样方数, T_j 为样方 j 内出现物种的总数, t 为全部样方中种的平均数。其中, 当 $VR > 1$ 表示物种间表现出正的关联; $VR < 1$ 表示物种间存在负的净关联。采用统计量 W 来检验偏离 1 的显著程度, 如果 $x_{0.95}^0 < W < x_{0.05}^2$, 表示主要物种间无显著关联性, 反之表示显著相关联。种间联结性 x^2 统计量

公式: $x^2 = \frac{N \left[\left(|ad - bc| - \frac{1}{2} N \right) \right]^2}{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)}$, 式中, N

为总样方数。当 $ad > bc$ 时, 种对间呈正联结; 当 $ad < bc$ 时, 种对间呈负联结。 $x^2 < 3.841$ 时, 联结不显著; 当 $3.841 < x^2 < 6.635$ 时, 种对间存在一定的生态联结; 当 $x^2 > 6.635$ 表示种对间存在显著生态联结。

联结系数(AC): 当 $ad \geq bc$, $AC = \frac{(ad - bc)}{[(a+b)(b+d)]}$;

当 $bc > ad$ 且 $d \geq a$ 时, $AC = \frac{(ad - bc)}{[(a+b)(a+c)]}$;

且 $d < a$ 时, $AC = \frac{(ad - bc)}{[(b+d)(d+c)]}$, 式中 a 表示物种 A

和 B 都存在的样方数; b 表示物种 A 存在而 B 不存在的样方数; c 表示物种 B 存在而 A 不存在的样方

数; d 表示物种 A 和 B 都不存在的样方数。AC 值域为 $[-1, 1]$, 越接近 1, 说明物种间的正联结性越强; 越接近-1, 说明负联结性越强; $AC=0$ 说明物种间完全独立。

Dice 指数(DI): $DI=2a/(2a+b+c)$; Ochiai 指数(OI):

$OI = a/\sqrt{(a+b)(a+c)}$, Dice 指数和 Ochiai 指数的值域均为 $[0, 1]$, 越接近 1, 表明种对间的正联结程度越高, 反之则越低。

1.3.2 群落稳定性

依据 Godron^[5]的方法评价群落稳定性, 以 25 个样方为单位, 将群落的主要优势物种按照频度大小排序, 将物种的频度换算成相对频度, 将物种数的倒数和相对频度进行累积(百分数表示), 采用散点平滑曲线拟合方程($y=ax^2+bx+c$)使之与直线 $y=100-x$ 相交(植物种倒数的累积百分数为 x 轴, 相对频度的累积百分数为 y 轴), 交点坐标(x, y)为稳定性参考点, (20, 80)是群落的稳定点, 交点坐标与点(20, 80)的距离称为欧式距离, 距离越小说明植物群落越稳定, 越大则越不稳定^[8]。

数据的整理分析在 Excel 2016 和 R 4.2.3 中完成。种间联结和生态位宽度计算使用“spaa(species association analysis)”程序包 niche.width()、niche.overlap()、sp.assoc()和 sp.pair()^[29]。

2 结果和分析

2.1 优势种和生态位宽度及重叠

研究样地的常绿阔叶林中调查木本植物 104 种, 隶属 39 科 74 属。重要值大于 1 且频数大于 15 的主要物种共 26 种, 隶属 15 科 23 属。其中山茶科(Theaceae)最多, 共 4 种, 占总数的 15.38%; 樟科(Lauraceae), 共 3 种, 占 11.54%; 紫金牛科(Myrsinaceae)、山矾科(Symplocaceae)、茜草科(Rubiaceae)、壳斗科(Fagaceae)、金缕梅科(Hamamelidaceae)和大戟科(Euphorbiaceae)均是 2 种, 均占 7.69%, 其余 7 科均是 1 种, 约占 3.85%。

26 种主要物种的重要值(IV 为 1.05%~12.23%) 和生态位宽度(B_L 为 3.54~22.84, B_S 为 1.48~3.26) 变幅较大。其中, 木荷(*Schima superba*)和微毛柃(*Eurya hebeclados*)的重要值分别为最大和最小; 生态宽度最大的为木荷, 与重要值一致, 表明木荷在群落资源竞争中具有主导地位。除木荷外, 华润楠(*Machilus chinensis*)、鸭脚木(*Schefflera octophylla*)、罗浮柿(*Diospyros morrisiana*)和黄杞(*Engelhardia roxburghiana*)的重要值居前 20%, 表明在群落的生存资源竞争中, 此 4 种植物占据相对优势地位(表 1)。

325 种对的生态位重叠分析表明, 生态位重叠为 0.5~1 的种对有 67 对, 占总对数的 20.62%; 生

表 1 常绿阔叶林群落植物的重要值和生态位宽度

Table 1 Importance value and niche width of species in evergreen broad-leaved forest

编号 No.	植物 Species	相对多度 Relative abundance /%	相对显著度 Relative dominance /%	相对频度 Relative frequency /%	重要值 Importance value /%	生态位宽度 Niche width	
						B_L	B_S
1	木荷 <i>Schima superba</i>	9.49	22.58	4.62	12.23	22.84	3.26
2	华润楠 <i>Machilus chinensis</i>	7.10	18.10	4.76	9.99	17.06	3.12
3	鸭脚木 <i>Schefflera octophylla</i>	13.84	9.92	4.91	9.55	15.93	3.05
4	罗浮柿 <i>Diospyros morrisiana</i>	6.89	3.57	5.19	5.22	21.53	3.23
5	黄杞 <i>Engelhardia roxburghiana</i>	3.84	6.87	3.03	4.58	12.57	2.73
6	柯 <i>Lithocarpus glaber</i>	2.85	5.81	1.73	3.46	8.55	2.25
7	红锥 <i>Castanopsis hystrix</i>	2.40	5.18	2.16	3.25	8.49	2.37
8	鼠刺 <i>Itea chinensis</i>	5.38	1.00	3.46	3.28	9.82	2.66
9	鸭公树 <i>Neolitsea chui</i>	4.49	2.09	5.05	3.88	17.73	3.15
10	光叶山矾 <i>Symplocos lancifolia</i>	2.37	2.24	1.73	2.12	5.91	2.04
11	野含笑 <i>Michelia skinneriana</i>	1.87	1.80	2.45	2.04	10.14	2.55
12	千年桐 <i>Vernicia montana</i>	0.71	3.40	1.30	1.80	5.76	1.96
13	白背叶 <i>Mallotus apelta</i>	1.44	2.46	1.59	1.83	8.14	2.22
14	罗伞树 <i>Brassaiopsis glomerulata</i>	3.38	0.30	2.74	2.14	6.33	2.19
15	山矾 <i>Symplocos sumuntia</i>	1.01	0.21	5.77	2.33	7.92	2.18
16	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	1.59	1.52	1.88	1.66	6.98	2.17
17	鲫鱼胆 <i>Maesa perlaris</i>	2.98	0.23	2.02	1.74	5.09	2.08
18	桤木 <i>Alnus cremastogyne</i>	0.96	1.98	1.44	1.46	6.39	2.03

续表(Continued)

编号 No.	植物 Species	相对多度 Relative abundance /%	相对显著度 Relative dominance /%	相对频度 Relative frequency /%	重要值 Importance value /%	生态位宽度 Niche width	
						B_L	B_S
19	赤杨叶 <i>Amiphyllum fortunei</i>	0.98	1.16	2.02	1.39	11.10	2.51
20	狗骨柴 <i>Diplospora dubia</i>	1.52	0.33	2.45	1.43	9.14	2.46
21	蚊母树 <i>Distylium racemosum</i>	0.81	1.26	1.44	1.17	7.12	2.11
22	华南毛柃 <i>Eurya ciliata</i>	1.87	0.40	1.44	1.24	7.78	2.17
23	广东润楠 <i>Machilus kwangtungensis</i>	0.78	0.79	2.02	1.2	8.38	2.29
24	日本粗叶木 <i>Lasianthus japonicus</i>	2.30	0.17	1.15	1.21	3.54	1.48
25	微毛柃 <i>Eurya hebeclados</i>	1.31	0.41	1.44	1.05	4.93	1.90
26	格药柃 <i>Eurya muricata</i>	0.91	0.13	2.31	1.12	9.26	2.49
27	其他 78 种				17.63		

态位重叠为 0.1~0.5 的种对有 150 对(46.15%), 生态位重叠为 0~0.1 的种对有 91 对(28%), 未发生重叠的有 17 对(5.23%)。群落中, 重要值前 20% 的 5 种植物与其他植物间的生态位重叠为 0.5~1 的共 45 对, 占总对数(67 对)的 67.16%。揭示了重要值和生态位宽度大的植物往往伴随着较大的生态位重叠。生态位重叠为 0~0.5 的种对共 241 对, 占总数的 74.15%, 表明大部分物种间竞争强度较弱, 在资源充裕条件下能共存(图 1)。

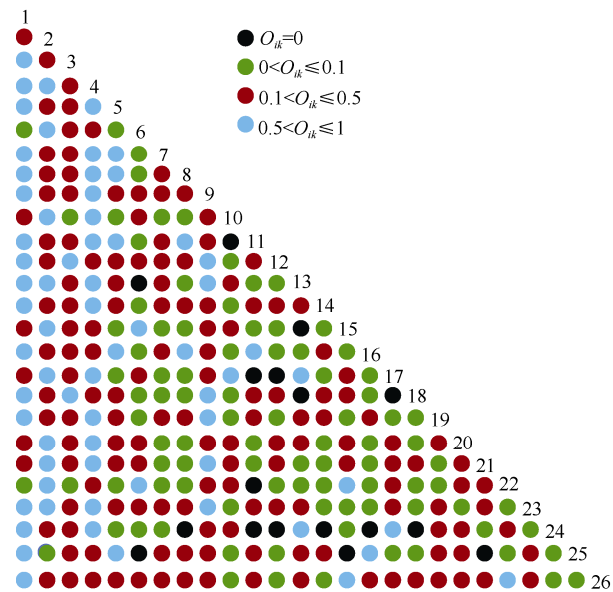


图 1 常绿阔叶林群落主要优势种的生态位重叠度。1~26 见表 1。下同
Fig. 1 Niche overlap of dominant species in evergreen broad-leaved forest. 1-26 see Table 1. The same below

2.2 群落物种的种间关联性

从联结系数矩阵结果可见(图 2: A), 联结系数为 -1~-0.6 的有 56 个种对, 占总数的 17.23%; -0.6~-0.3 的有 50 个种对, 占 15.38%; -0.3~0 的有 58 个,

占 17.84%; 0 的有 6 个, 占 1.85%; 0~0.3 的有 62 个, 占 19.08%; 0.3~0.6 的有 54 个, 占 16.62%; 0.6~1 的有 39 个, 占总数的 12%, 正联结 155 个, 占 47.7%; 负联结 164 个, 占 50.45%。种间联结最小的有红锥(*Castanopsis hystrix*)-栲木(*Alnus cremastogyne*)(7-18)、罗浮柿-鼠刺(*Itea chinensis*)(4-8)、山矾(*Symplocos sumuntia*)-广东润楠(*Machilus kwangtungensis*)(15-23)、栲木-广东润楠(18-23)、蚊母树(*Distylium racemosum*)-广东润楠(21-23)和鼠刺-格药柃(*Eurya muricata*)(8-26)。

χ^2 检验结果表明, 具有显著联结的种对有 45 个 ($P<0.05$), 占总数的 13.9%, 极显著和显著联结的种对分别为 20 个(占 6.2%)和 25 个(占 7.7%); 而无显著联结的 280 个(占 86.1%)。可见种间联结较为松散, 即种间相对独立性强(图 2: B)。

OI 和 DI 指数分析结果表明, OI 指数为 0~0.2 的有 70 个(占 21.54%), 0.2~0.4 有 97 个(占 29.84%), 0.4~0.6 有 93 个(占 28.62%), 0.6~1 有 65 个(占 20%)。而 DI 指数为 0~0.2 的有 74 个(占 22.77%), 0.2~0.4 的有 97 个(占 29.85%), 0.4~0.6 的有 98 个(占 30.15%), 0.6~1 的有 56 个(占 17.23%)。综合 OI 和 DI 指数可知, 群落主要优势种间的 OI 和 DI 指数小于 0.4 的占比分别为 51.38%和 52.62%, 表征种间关联程度弱, 即共同出现率小。群落重要值前 20% 的 5 物种(木荷、华润楠、鸭脚木、罗浮柿和黄杞)两两之间, 仅华润楠-黄杞(2-5, $OI<0.6$ 和 $DI<0.6$)间呈紧密的关联性, 相伴出现的机率大($OI>0.6$ 和 $DI>0.6$) (图 2: C, D)。

2.3 总体联结和群落稳定性

物种总体联结性分析表明, 群落方差比率 $VR=0.63$, 即物种间存在负的净关联。应用统计量 W 检验 VR 偏离 1 的显著性, 统计量 $W=25.23$,

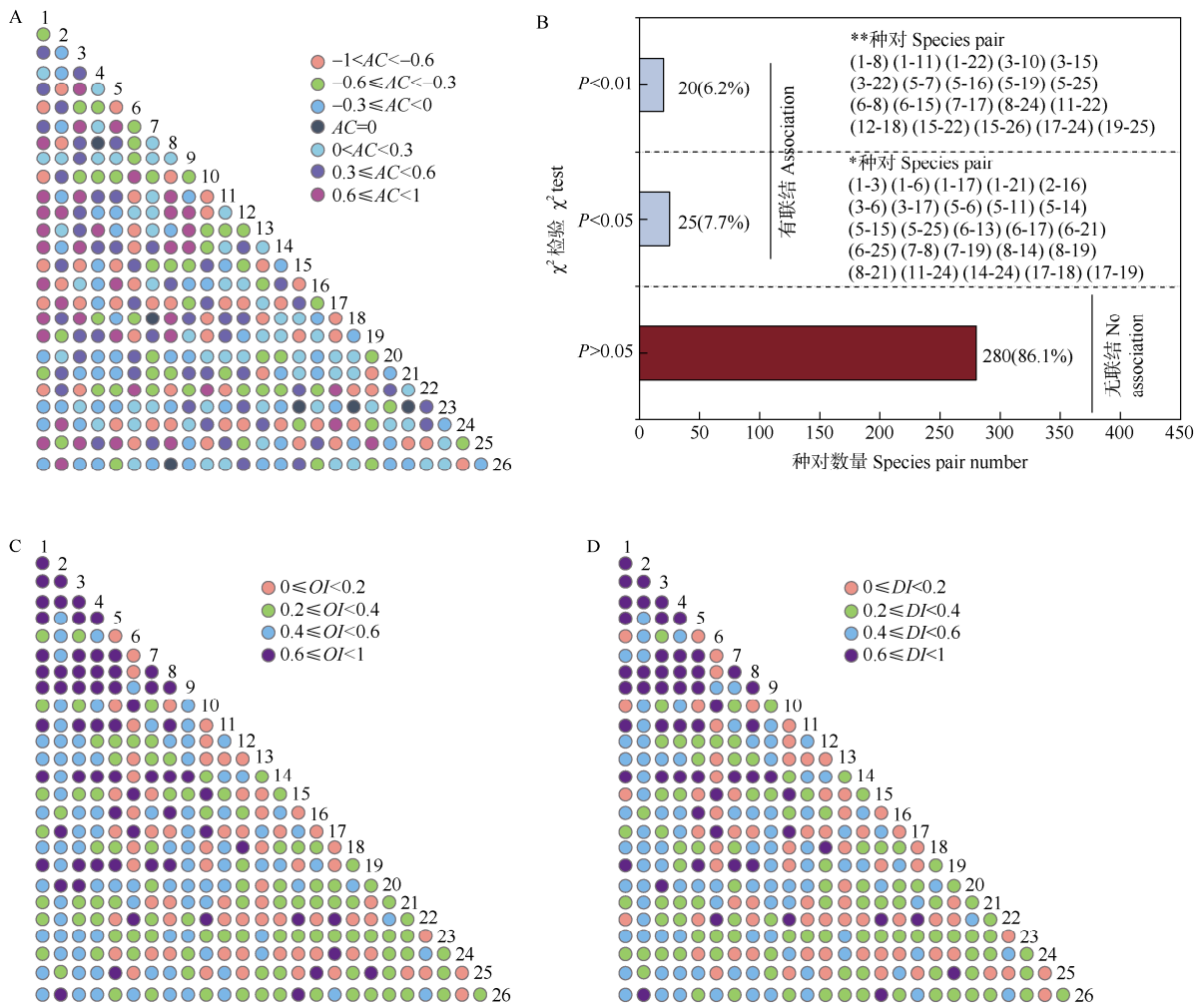


图 2 常绿阔叶林群落主要优势种的联结系数(A)、 χ^2 检验(B)、OI (C)和 DI 指数(D)

Fig. 2 Association coefficients (A), χ^2 test (B), OI index (C) and DI index (D) of dominant species in evergreen broad-leaved forest

$[x_{0.95}^2(25), x_{0.05}^2(25)] = (26.51, 55.76)$, 统计量 W 不在 χ^2 值区间, 表征群落主要物种间显著相关联。常绿阔叶林群落主要物种之间显著负关联, 表明主要物种对环境资源等存在激烈的竞争关系。由主要物种(重要值大于 1 且频数大于 15 的物种)的累积相对频度 (y)与相对应物种数的累积倒数百分数(x)得到的 Godron 稳定性曲线为 $y = -0.05x^2 + 3.05x + 16.21$ ($R^2 = 0.94$), 将其与 $y = 100 - x$ 的交点坐标取整, 为(34, 66); 与群落稳定性参考点(20, 80)的欧氏距离约达 16, 距离相差较大, 表征该群落处于不稳定状态(图 3)。

3 讨论和结论

3.1 群落主要优势种及其生态位

物种重要值和生态位宽度均表征物种在群落

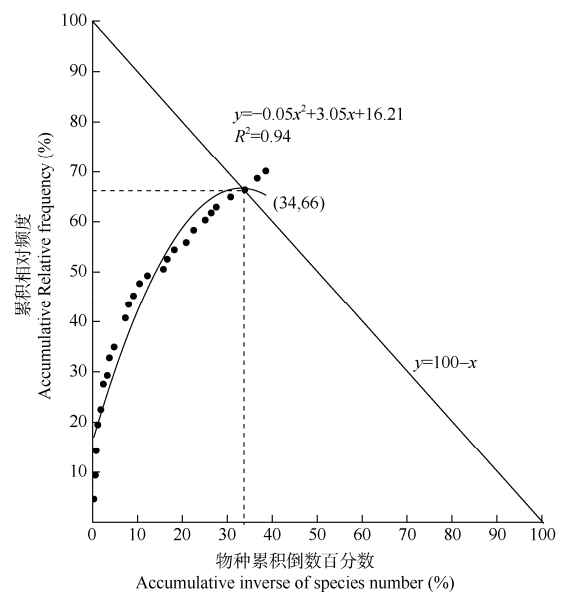


图 3 常绿阔叶林群落稳定性分析

Fig. 3 Community stability of evergreen broad-leaved forest

中的地位,但涵义有所不同,前者诠释了植物在群落中的优势程度,后者则倾向于植物对资源的适应利用能力或生态适应性等特征,生态位宽度值越大,对于资源的利用程度越高^[11]。由于相邻植物个体对有限资源(光照和养分)的共同需求,植物种间存在相互竞争^[30],竞争关系又分为高阶相互作用(两物种间的竞争系数受到第3物种的调节)和非传递性竞争(多物种之间相互制约,形成竞争回环)^[31]。物种共存理论中,物种间存在时间生态位分化、空间生态位分化、资源分化和物种特异性天敌等,且存在均等化机制(通过降低物种之间的适合度差异或者物种在竞争能力方面的差异来促进共存的)。以R值表征某物种在群落中能够维持下去所需的最低的资源水平,当多物种同时利用相同的限制性资源时,R值最低的物种具有竞争优势,通过竞争排除其他物种。物种的竞争、生态位分化和共存机制等因素使得群落物种间存在复杂的生态关系,这种关系导致空间相邻物种生态位通常是不离散的,而是倾向于分享其他物种的基础生态位^[2,32],导致2种乃至更多的物种对一些生存资源的需求相似,使得物种间的生态位存在不同程度的重叠^[12]。本研究中,木荷、华润楠、鸭脚木、罗浮柿和黄杞重要值和生态位宽度大,群落竞争中占据优势地位,但也与群落其他物种间存在较高的生态重叠,这与群落中占据优势地位的物种与其他多数物种间存在较高的生态位重叠的研究结果^[5,19]相似,也与刘润红等^[29]认为生态位宽度越广的物种易形成越高的生态位重叠的观点相同。本研究中物种生态位重叠为0~0.5的种对共241对,占总数的74.15%,虽研究的林分存在差异,但与裴顺祥等^[8]报道油松(*Pinus tabulaeformis*)林分群落中大部分物种间(77.70%)的生态位重叠低的研究结果相似。其原因是物种高的生态位宽度代表着其对资源利用能力强,分布范围广,导致与群落大多数植物间重叠大^[6,13]。也有研究指出,生态位宽度和生态位重叠之间非绝对正相关关系,受空间异质性、植物生长需求的差异或互补等影响^[15]。本研究中野含笑(*Michelia skinneriana*)和赤杨叶(*Alniphyllum fortunei*)具有相对较大的生态位宽度,但野含笑与其它物种间形成的种对间,有21个生态位重叠系数小于0.5,占总对数的84%;赤杨叶则是23对,占92%,证实了生态位宽度和生态位重叠之间非绝对正相关关系的观点。

3.2 群落主要物种的种间联结及群落稳定性

联结系数可量化分析群落物种之间联结紧密

的程度^[12],确定群落中与目标植物对光照和养分等生存资源竞争激烈的物种^[30]。物种种间正或负联结主要与自身的生物学特性有关,正关联说明生物学特性、生态适应性和生境相似,负关联则反之^[33]。种间联结也可反映群落稳定性,种对的正负联结之比越大,群落越稳定^[34]。本研究中26个主要物种间的正联结种对小于负联结种对数,这与陈泓宇等^[14]对85 a生常绿阔叶林群落中负联结种对数量高于正联结的研究结果相似,即负联结种对高于正联结,这可能是处于演替后期常绿阔叶林的共性。此外,本研究表明群落间主要优势种间显著负关联,群落处于不稳定状态,说明物种间耦合关系不紧密,群落的结构和功能不稳定,物种数量也处于动态变化调节中。有研究指出森林演替前期,物种间存在对于相同资源的竞争,到了演替后期,物种会进行资源分割,相互作用强度伴随着演替进行而变小,物种间显著关联的种对减少,资源逐渐得到最佳分配和充分的利用,物种趋向于相对独立^[35]。这解释了本研究中种间联结松散,独立性强的原因,但研究林分为常绿阔叶林顶级群落属自然演替后期,种间联结却为显著负联结,群落处于不稳定状态。其原因可能是植物种间关联形成过程受环境和植物生命阶段的影响^[36],本研究林分为近100 a的处于过度阶段(近熟和过熟)的林分,上层优势大树的倒下,使得更多的光照和水分等向下输入至中下层树木,森林生态系统结构和层次复杂,系统内部各组分间存在反馈和自我调节^[29],更多光照和水分向中下层的输入可能会打破原有的平衡,这种不稳定可能是与森林的自我调节有关。另一方面的原因可能是伴随着长时间的演替进程中,群落中物种彼此适应、协调共生,形成了良好的环境资源利用机制,但随着群落的成熟,因生态位的分离和物种生长习性差异,导致物种间产生竞争排斥作用,到了演替的后期,资源的逐渐消耗加剧了这种竞争^[19],物种间对于生存资源的竞争使得竞争双方或某一方植物的生长和发育受到阻碍,从而对森林群落物种的更新、分布格局、多样性和结构等方面产生影响,进而影响群落的稳定性^[37-38]。因此,群落的不稳定可能与演替阶段、物种生物学特性和环境资源有关。

本研究中,联结系数、OI和DI指数数值高于0.6的种对数均占总数的15%以上,而 χ^2 检验中,显著联结的仅占总数13.9%,低于前3种检验的结果。鸭脚木-黄杞(3-5)联结系数高于0.6,但 χ^2 检验不显

著,其原因可能是偶见伴生种和物种多度等的影响,也可能是这些种对都不出现的样方数 d 值偏大,导致联结系数值偏高^[39],说明结合联结系数、 OI 、 DI 和 χ^2 综合评价种间联结更具科学性。本研究中仅解析 100 a 的常绿阔叶林植物的种间关系及群落稳定性,但是否其它阶段的林分也存在相同的种间效应,需更多的研究证实。

综上,广东大峡谷常绿阔叶林群落中以木荷重要值和生态位宽度最大,华润楠、鸭脚木、罗浮栎和黄杞次之。该 5 优势种在群落资源竞争中占据优势地位,对环境资源的利用更为充分,拥有较强的竞争力并且与群落中其它植物产生了较高的生态位重叠,在以后区域的森林植被恢复中可选择上述 5 树种。本研究中,群落主要 26 优势种间相对独立性强,联结较为松散。群落中多数物种间呈现显著负关联,群落处于不稳定状态。种间联结可作为森林经营中树种配置的量化依据,通过种间联结关系优化树种配置可以改善林分的稳定性,可依据研究中种间联结分析结果,调整群落结构,改善林分稳定性,促进森林群落健康、持续发展。

参考文献

- [1] ZHANG M X, WANG M X, KANG B, et al. Interspecific associations of dominant plant populations in secondary forest of *Pinus armandii* in Qinling Mountains [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, 51(1): 12–21. [张明霞, 王得祥, 康冰, 等. 秦岭华山松天然次生林优势种群的种间联结性 [J]. *林业科学*, 2015, 51(1): 12–21. doi: 10.11707/j.1001-7488.20150102.]
- [2] CHU C J, WANG Y S, LIU Y, et al. Advances in species coexistence theory [J]. *Biodiv Sci*, 2017, 25(4): 345–354. [储诚进, 王酉石, 刘宇, 等. 物种共存理论研究进展 [J]. *生物多样性*, 2017, 25(4): 345–354. doi: 10.17520/biods.2017034.]
- [3] QIAN Y F, YI L T, HU J F, et al. Niche characteristics of main plant species in Putuo Mountain, Zhejiang Province of East China [J]. *Chin J Ecol*, 2012, 31(3): 561–568. [钱逸凡, 伊力塔, 胡军飞, 等. 普陀山主要植物种生态位特征 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31(3): 561–568. doi: 10.13292/j.1000-4890.2012.0122.]
- [4] FANG F, HU Y K, ZHANG W, et al. Numerical analysis of interspecific relationships in Alpine steppe community in Bayanbulak [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, 32(6): 1898–1907. [房飞, 胡玉昆, 张伟, 等. 高寒草原植物群落种间关系的数量分析 [J]. *生态学报*, 2012, 32(6): 1898–1907. doi: 10.5846/stxb201102170182.]
- [5] JIANG H, ZHANG H, LONG W X, et al. Interspecific associations and niche characteristics of communities invaded by *Decalobanthus boisianus* [J]. *Biodiv Sci*, 2019, 27(4): 388–399. [江焕, 张辉, 龙文兴, 等. 金钟藤入侵群落的种间联结及生态位特征 [J]. *生物多样性*, 2019, 27(4): 388–399. doi: 10.17520/biods.2019007.]
- [6] XIAO J H, XIONG K H, CHEN Y L, et al. Niche and interspecific association of main species in shrub layer of *Acacia confusa* community in Langqi Island, Fujian Province [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2023, 31(6): 805–815. [肖集泓, 熊宽洪, 陈越琳, 等. 福建琅岐岛台湾相思群落灌木层主要物种生态位与种间联结 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2023, 31(6): 805–815. doi: 10.11926/jtsb.4687.]
- [7] LIU H, DU R W, WANG Y, et al. Effects of *Eupatorium adenophorum* on interspecific association and the stability of companion species in Liangshan Prefecture of Sichuan Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37(15): 5031–5038. [刘海, 杜如万, 王勇, 等. 紫茎泽兰对四川省凉山州共生植物种间联结性及稳定性的影响 [J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 5031–5038. doi: 10.5846/stxb201605070876.]
- [8] PEI S X, FA L, DU M Y, et al. Effects of interspecific relationship on natural regeneration and community stability of *Pinus tabuliformis* plantation in Zhongtiao Mountain [J]. *For Res*, 2022, 35(1): 150–157. [裴顺祥, 法蕾, 杜满义, 等. 种间关系对中条山油松人工林天然更新及群落稳定性的影响 [J]. *林业科学研究*, 2022, 35(1): 150–157. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.01.017.]
- [9] ZHANG D M, ZHAO W Z, LUO W C. Niche and interspecific association of dominant plant species in saline-alkaline soils of desert steppe zone [J]. *Chin J Ecol*, 2018, 37(5): 1307–1315. [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 [J]. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1307–1315. doi: 10.13292/j.1000-4890.2018.05.027.]
- [10] ZOU S, ZHOU G Y, ZHANG Q M, et al. Long-term (1992–2015) dynamics of interspecific associations among tree species in a monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, 39(17): 6362–6371. [邹顺, 周国逸, 张倩媚, 等. 1992—2015 年鼎湖山季风常绿阔叶林群落种间关联动态 [J]. *生态学报*, 2019, 39(17): 6362–6371. doi: 10.5846/stxb201804030753.]
- [11] DENG X L, CAO Y S, LIANG Q, et al. Study on niche of dominant species at arbor layer in montane elfin forest of Jinggangshan [J]. *J Plant Resour Environ*, 2016, 25(1): 88–93. [邓贤兰, 曹裕松, 梁琴, 等. 井冈山山顶矮林乔木层优势种的生态位研究 [J]. *植物资源与环境学报*, 2016, 25(1): 88–93. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2016.01.11.]
- [12] JIAN M F, LIU Q J, ZHU D, et al. Inter-specific correlations among dominant populations of tree layer species in evergreen broad-leaved forest in Jiulianshan mountain of subtropical China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, 33(4): 672–680. [简敏菲, 刘琪琛, 朱笃, 等. 九连山常绿阔叶林乔木优势种群的种间关联性分析 [J]. *植物生态学报*,

- 2009, 33(4): 672–680. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.04.005.]
- [13] CHEN Y K, YANG Q, MO Y N, et al. A study on the niches of the state's key protected plants in Bawangling, Hainan Island [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2014, 38(6): 576–584. [陈玉凯, 杨琦, 莫燕妮, 等. 海南岛霸王岭国家重点保护植物的生态位研究 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38(6): 576–584. doi: 10.3724/SP.J.1258.2014.00053.]
- [14] CHEN H Y, LAN M Y, SUN C X, et al. Community structure and interspecific association in different forest successional stages in north Guangdong [J]. *J For Environ*, 2022, 42(5): 465–473. [陈泓宇, 兰明钰, 孙传玺, 等. 粤北不同演替阶段森林群落结构与种间关联 [J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(5): 465–473. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2022.05.003.]
- [15] ZHANG B W, QIN J, REN Z M, et al. Effects of slope aspect on understory plant diversity of *Pinus massoniana* pure forest and different coniferous and broad-leaved mixed forest types in north subtropical region [J]. *Ecol Environ Sci*, 2022, 31(6): 1091–1100. [张博文, 秦娟, 任忠明, 等. 坡向对北亚热带区马尾松纯林及不同针阔混交林型林下植物多样性的影响 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31(6): 1091–1100. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.06.003.]
- [16] ZHANG Z H, LIANG S C, HU G. Niche characteristics of dominant populations in *Cinnamomum burmannii* community on karst hills of Guilin [J]. *For Res*, 2009, 22(1): 63–68. [张忠华, 梁士楚, 胡刚. 桂林岩溶石山阴香群落主要种群生态位研究 [J]. *林业科学研究*, 2009, 22(1): 63–68. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2009.01.011.]
- [17] ZHONG Y, ZHANG J, LIU Q B, et al. Niche characteristics of main herbage populations in *Eucalyptus grandis* plantation [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2010, 19(4): 16–21. [钟宇, 张健, 刘泉波, 等. 巨桉人工林草本层主要种群的生态位分析 [J]. *草业学报*, 2010, 19(4): 16–21.]
- [18] LIU J H, WANG Z W, HAN G D. Effects of heavy grazing on the interspecific relationship of main plant species and community stability in a desert steppe [J]. *Chin J Ecol*, 2019, 38(9): 2595–2602. [刘菊红, 王忠武, 韩国栋. 重度放牧对荒漠草原主要植物种间关系及群落稳定性的影响 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(9): 2595–2602. doi: 10.13292/j.1000-4890.201909.012.]
- [19] GUO J Q, CHEN J C, HUANG X, et al. Niche characteristics and interspecific associations of the dominant species of the communities invaded by *Alternanthera philoxeroides* [J]. *Ecol Environ Sci*, 2021, 30(8): 1607–1616. [郭佳琦, 陈俊辰, 黄旬, 等. 喜旱莲子草入侵群落主要物种生态位和种间联结研究 [J]. *生态环境学报*, 2021, 30(8): 1607–1616. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.08.007.]
- [20] JIAN Z J, LI T Z, GUO Q S, et al. Interspecific association of main plants in the water level fluctuation zone of canyon landform area of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2016, 36(10): 2086–2093. [简尊吉, 李堂中, 郭泉水, 等. 三峡水库峡谷地貌区消落带主要植物种间关联性研究 [J]. *西北植物学报*, 2016, 36(10): 2086–2093. doi:10.7606/j.issn.1000-4025.2016.10.2086.]
- [21] WEN P C, WANG L J, SHENG M Y. Characteristics of Plant community and its relationships with soil physic-chemical properties in the rocky desertification ecosystem of Karst Plateau Canyon, southwest China [J]. *J Sichuan Agric Univ*, 2018, 36(2): 175–184. [温培才, 王霖娇, 盛茂银. 西南喀斯特高原峡谷石漠化生态系统植物群落特征及其与土壤理化性质的关系 [J]. *四川农业大学学报*, 2018, 36(2): 175–184. doi: 10.16036/j.issn.1000-2650.2018.02.008.]
- [22] ZHANG W. Basic researches conservation biology of endangered species *Juglans cathayensis* in Tianshan valley in Xinjiang, China [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2016. [张维. 新疆天山峡谷渐危植物野核桃保护生物学基础研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2016.]
- [23] ZOU J P, LIN S H, XU G Y, et al. Investigation on birds resources in Ruyuan grand canyon provincial nature reserve in Guangdong Province [J]. *Trop For*, 2021, 49(3): 51–56. [邹建平, 林顺和, 许根有, 等. 广东乳源大峡谷省级自然保护区鸟类资源调查 [J]. *热带林业*, 2021, 49(3): 51–56. doi: 10.3969/j.issn.1672-0938.2021.03.013.]
- [24] ZHENG F Z, LIN S H, XU Y G, et al. Survey of amphibians and reptiles resources in Guangdong Ruyuan Grand Canyon Provincial Nature Reserve [J]. *Trop For*, 2021, 49(3): 64–69. [郑飞舟, 林顺和, 许根有, 等. 广东乳源大峡谷省级自然保护区两栖爬行动物资源概况 [J]. *热带林业*, 2021, 49(3): 64–69. doi: 10.3969/j.issn.1672-0938.2021.003.016.]
- [25] YU F, WANG Y, ZHANG G G, et al. Plant diversity and interspecific associations of different floodplains in the wandering Yellow River [J]. *Acta Ecol Sin*, 2023, 43(6): 2429–2439. [于飞, 王洋, 张岗岗, 等. 游荡黄河滩涂植物群落多样性及种间联结性 [J]. *生态学报*, 2023, 43(6): 2429–2439. doi: 10.5846/stxb202108202317.]
- [26] FENG H H, WEN S Z, XIAO Y T, et al. Analysis about the vegetation landscape of Guangdong Ruyuan Grand Canyon Nature Reserve [J]. *J CS Univ For*, 2006, 26(1): 90–94. [冯汉华, 文仕知, 肖育檀, 等. 广东乳源大峡谷自然保护区植被景观特征分析 [J]. *中南林学院学报*, 2006, 26(1): 90–94. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2006.01.008.]
- [27] VALLADARES F, NIINEMETS Ü. Shade tolerance, a key plant feature of complex nature and consequences [J]. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2008, 39: 237–257. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173506.
- [28] SCHLUTER D. A variance test for detecting species associations, with some example applications [J]. *Ecology*, 1984, 65(3): 998–1005. doi: 10.2307/1938071.

- [29] LIU R H, CHEN L, TU H R, et al. Niche and interspecific association of main species in shrub layer of *Cyclobalanopsis glauca* community in karst hills of Guilin, southwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, 40(6): 2057–2071. [刘润红, 陈乐, 涂洪润, 等. 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 [J]. *生态学报*, 2020, 40(6): 2057–2071. doi: 10.5846/stxb201904090689.]
- [30] ZHANG W P, LIU G C, SUN J H, et al. Temporal dynamics of nutrient uptake by neighbouring plant species: Evidence from intercropping [J]. *Funct Ecol*, 2017, 31(2): 469–479. doi: 10.1111/1365-2435.12732.
- [31] LEVINE J M, BASCOMPTE J, ADLER P B, et al. Beyond pairwise mechanisms of species coexistence in complex communities [J]. *Nature*, 2017, 546(7656): 56–64. doi: 10.1038/nature22898.
- [32] TILMAN D. *Resource Competition and Community Structure* [M]. Princeton: Princeton University Press, 1982.
- [33] HAN J T, LI S Q, ZHAO D H, et al. Interspecific relationships among dominant species in the planted vegetation communities in sandy hill regions of northwestern Shanxi, China [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2016, 30(12): 164–169. [韩锦涛, 李素清, 赵德怀, 等. 晋西北丘陵风沙区人工植物群落优势种种间关系研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(12): 164–169. doi: 10.13448/j.cnki.jalre.2016.400.]
- [34] YE Q P, ZHANG W H, YU S C, et al. Interspecific association of the main tree populations of the *Quercus acutissima* community in the Qiaoshan forest area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38(9): 3165–3174. [叶权平, 张文辉, 于世川, 等. 桥山林区麻栎群落主要乔木种群的种间联结性 [J]. *生态学报*, 2018, 38(9): 3165–3174. doi: 10.5846/stxb201706131071.]
- [35] ZHOU R W, PENG M C, WANG C Y, et al. Study on interconnections among main tree populations of *Davidia involucrate* community of Qiaojia Yaoshan Mountain in Yunnan [J]. *J W China For Sci*, 2015, 44(1): 51–57. [周瑞伍, 彭明春, 王崇云, 等. 云南巧家药山珙桐群落主要树种间联结研究 [J]. *西部林业科学*, 2015, 44(1): 51–57. doi: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2015.01.019.]
- [36] HE D, BISWAS S R. Negative relationship between interspecies spatial association and trait dissimilarity [J]. *Oikos*, 2019, 128(5): 659–667. doi: 10.1111/oik.05876.
- [37] JIA C X Z, LI S F, SU J R, et al. Effects of selective logging on inter- and intra-specific interactions of trees in a natural *Pinus kesiya* forest [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2014, 38(12): 1296–1306. [贾呈鑫卓, 李帅锋, 苏建荣, 等. 择伐对思茅松天然林乔木种间与种内关系的影响 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38(12): 1296–1306. doi: 10.3724/SP.J.1258.2014.00124.]
- [38] MAO Z K, HAO Z Q, YUAN Z Q, et al. Abundance-asymmetry in conspecific aggregation and interspecific interaction [J]. *Sci Sin Vitae*, 2020, 50(4): 381–390. [毛子昆, 郝占庆, 原作强, 等. 物种聚集分布与种间关系的多度不对称性 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2020, 50(4): 381–390. doi: 10.1360/N052018-00101.]
- [39] XU M H, LIU M, ZHAI D T, et al. A review of contents and methods used to analyze various aspects of plant interspecific associations [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36(24): 8224–8233. [徐满厚, 刘敏, 翟大彤, 等. 植物种间联结研究内容与方法评述 [J]. *生态学报*, 2016, 36(24): 8224–8233. doi: 10.5846/stxb201505311092.]