



木林子国家级自然保护区天然林群落优势木本植物种间联结和稳定性

陈锦世, 郭秋菊, 姚兰, 朱江, 刘西尧, 向钦, 赵免敦, 艾训儒

引用本文:

陈锦世, 郭秋菊, 姚兰, 朱江, 刘西尧, 向钦, 赵免敦, 艾训儒. 木林子国家级自然保护区天然林群落优势木本植物种间联结和稳定性[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(5): 601–610.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4815>

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>

不同样方尺度下鄱阳湖湿地典型草洲植物种间关联性

Species Relationship among Typical Marshland Plants in Poyang Lake Region on Different Sample Scale

热带亚热带植物学报. 2018, 26(5): 449–456 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3862>

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>

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>

极小种群博罗红豆的群落物种组成和空间分布格局

Species Composition and Spatial Distribution Pattern of *Ormosia boluoensis* with Extremely Small Population

热带亚热带植物学报. 2020, 28(3): 301–309 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4151>

向下翻页，浏览PDF全文

木林子国家级自然保护区天然林群落优势木本植物种间联结和稳定性

陈锦世^{1,2}, 郭秋菊^{1,2}, 姚兰^{1,2}, 朱江^{1,2}, 刘西尧³, 向钦^{1,2}, 赵奂敦^{1,2}, 艾训儒^{1,2*}

(1. 生物资源保护与利用湖北省重点实验室, 湖北 恩施 445000; 2. 湖北民族大学林学院, 湖北 恩施 445000; 3. 利川市农业农村局, 湖北 利川 445400)

摘要: 为探究木林子国家级自然保护区天然林群落结构变化, 在原始老龄林(恢复 100 a 及以上)、皆伐后恢复 40 a 和 25 a 的次生林 3 个恢复阶段, 设置 45 个 20 m×20 m 样地, 采用方差比率法(VR)、 χ^2 检验、Pearson 相关检验、Spearman 秩相关检验和 M-Godron 稳定性测定等方法研究优势木本植物的种间联结和群落稳定性。结果表明, 恢复 25 a、40 a 的次生林植物群落在总体上呈现不显著正关联, 恢复 100 a 的原始老龄林植物群落呈现显著正关联。 χ^2 检验结果表明 25 a、40 a 植物群落均为不显著, 100 a 植物群落中只有 2 个种对联结性显著, 种间联结较为松散。Pearson 相关检验和 Spearman 秩相关检验结果表明大部分物种的种对间相关性不显著, 呈现独立分布的格局。M-Godron 稳定性结果表明不同恢复阶段植物群落均处于不稳定状态, 但随着恢复年限的增加, 群落的稳定性逐渐提高。不同恢复阶段种间联结性较弱, 各物种呈现独立分布的状态, 群落中的物种更迭较为频繁, 说明植物群落仍处于演替进程中, 正朝着稳定阶段发展。

关键词: 植物群落; 种间联结; 群落稳定性; 木林子

doi: 10.11926/jtsb.4815

Interspecific Associations and Community Stability Changes of Dominant Woody Species of Natural Forest Communities in Mulinzi National Nature Reserve

CHEN Jinshi^{1,2}, GUO Qiuju^{1,2}, YAO Lan^{1,2}, ZHU Jiang^{1,2}, LIU Xiyao³, XIANG Qin^{1,2}, ZHAO Huandun^{1,2}, AI Xunru^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Biological Resources Protection and Utilization of Hubei Province, Enshi 445000, Hubei, China; 2. School of Forest and Horticulture, Hubei Minzu University, Enshi 445000, Hubei, China; 3. Lichuan Agricultural and Rural Affairs Bureau, Lichuan 445400, Hubei, China)

Abstract: In order to explore the changes of natural forest community structure in the national nature reserve, fourty-five 20 m×20 m plots were set up in three restoration stages, including original old forest (restored for 100 years or more), secondary forest restored for 40 and 25 years after clear-cutting. The interspecific association and community stability of dominant woody plants were studied by using Variance ratio (VR), χ^2 test, Pearson correlation test, Spearman rank correlation test and M-Godron stability test. The results showed that there was no significant positive association on the whole of dominant woody species in secondary forest restored for 25 and

收稿日期: 2023-06-07 接受日期: 2023-08-11

基金项目: 湖北省教育厅科学研究项目(Q20221903); 生物资源保护与利用湖北省重点实验室开放基金项目(PT012006); 湖北民族大学高水平科研成果校内培育项目(4205022)资助

This work was supported by the Project for Scientific Research of Education Department in Hubei (Grant No. Q20221903), the Open Project of Key Laboratory of Biologic Resources Protection and Utilization of Hubei (Grant No. PT012006), and the Project for High-level Scientific Research Achievements On-campus Cultivation of Hubei Minzu University (Grant No. 4205022).

作者简介: 陈锦世(1998 年生), 男, 硕士研究生, 研究方向为森林生态系统结构与功能。E-mail: 805355392@qq.com

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

40 years, but the significant positive association appeared in original aged forest restored for 100 years. The χ^2 test showed that the interspecific associations were not significant in 25 and 40 years plant communities, and only 2 species pairs in 100 years plant communities were significantly associated, and the interspecific associations were loose. The Pearson's correlation coefficient test and Spearman's rank correlation coefficient test also showed that the correlations among species pairs of most species were not significant, and displayed an independent distribution pattern. The M-Godron stability analysis showed that the plant community was in an unstable state at different stages, but the stability of the community gradually increased with restoration time. Therefore, interspecific correlation in the natural forest communities was weak at different restoration stages, and the species distributed independently and changed frequently, indicating that the community was still in the process of succession and was developing towards a stable stage.

Key words: Plant community; Interspecies association; Community stability; Mulinzi

种间关系是指物种间相互作用而形成的关系,是在各种因素的综合影响下形成稳定的有机结合体^[1]。群落内复杂的种间关系对物种的天然更新、分布格局以及群落的稳定性和演替过程等均会产生重要影响^[2]。种间关系可通过种间联结性和种间相关性来进行分析^[3]。种间联结是指不同物种在空间分布上的相互关联性,是群落演替过程中物种间相互影响而引起的^[4],是生态群落最重要的数量和结构特征之一^[5]。通过种间联结分析可以定性检验群落各物种之间是否存在关联,而种间相关涉及到种与种之间的数量对比关系,是定量物种间关系的一种体现^[6]。群落稳定性则是群落结构与功能的综合反映,不仅可以揭示群落的演替进程,而且有利于认识群落的维持状况和演替规律^[7]。因此,通过对群落种间联结性、相关性以及稳定性进行系统研究分析,可充分了解群落发展与稳定状况,预测群落的演替趋势,对植被的恢复经营管理具有重要意义^[8]。

木林子国家级自然保护区核心区因为其独特的地理位置和重要的生态价值,被列入我国重点优先保育区域和具有世界意义的生物多样性重要区域,有着巨大的生态意义。由于经历了自然恢复与人为干预后的周期更替,该区已成为森林群落研究的重要场所,已有研究主要集中在植物多样性^[9]、群落动态^[10]和空间分布格局^[11]等方面,对不同恢复时期的优势种的种间联结,以及群落稳定性的研究相对较少。研究表明,山矾属(*Symplocos*)幼树、小树种对中主要呈负关联,中树成年树种对中多为无关联^[11];木姜子属(*Litsea*)不同径级间表现为无关联,偶尔出现正关联或负关联^[12]。因此,为充分了解木林子国家级自然保护区内植物群落动态变化和发展,本研究在野外调查的基础上,以不同恢复

阶段优势木本植物为研究对象,采用有关数量分析方法,分析其种间关联性与稳定性,以期解决以下问题:(1)不同恢复阶段木本植物种间关联性如何变化?(2)不同恢复阶段植物群落的稳定性如何?(3)不同恢复阶段种间联结性与稳定性的关系。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域位于湖北恩施土家族苗族自治州境内的鹤峰县东北部,坐标 109°59'30"~110°17'58" N, 29°55'59"~30°10'47" E。地势主要是南北部高、中部较低,是从南向北伸展的一段陡峭地段,海拔 1 100~2 096 m,平均海拔在 1 200 m 以上,属亚热带湿润季风气候,雨热同期,但空间分配不均,夏季降水较多,冬天则雨少雾多,年平均气温 15.5 °C,年平均降水量 1 700~1 900 mm,年均相对湿度 82%,无霜期 270~279 d^[13]。木林子国家级自然保护区内种子植物有 171 科 867 属 2 514 种,分别占湖北省种子植物科、属、种总数的 85.50%、63.99%、44.50%,其中裸子植物有 7 科 19 属 28 种,被子植物有 164 科 848 属 2 486 种。有 30 种被国家列为重点保护植物(I 级 6 种,II 级 24 种),占湖北省国家重点保护植物总数的 85.86%。

1.2 样地设置和调查

从 2013 年 9 月—2014 年 6 月,在木林子国家级自然保护区用全站仪设置永久森林动态监测样地 45 个,样地建立方法参照热带林业科学研究中心(CTFS)的标准和技术规范执行^[14],每个样地面积均为 20 m×20 m。应用 TWINSPAN 分类和 DCA 排序将 45 个样地分为 3 个植物群落类型^[15],分别为原

始老龄林(恢复 100 a 及以上)、皆伐后恢复 40 a 和恢复 25 a 的次生林, 每个类型样地各 15 个。在每个样地中, 对胸径(DBH)≥1 cm 以上的木本植物做标记并挂牌、编号, 进行分类鉴定, 同时测量坐标、DBH、树高(H)等参数。

1.3 方法

物种重要值计算 重要值(IV)=(相对多度+相对频度+相对显著度)/3。

总体关联性检验 采用 Schluter^[16]提出的方差比率法(VR)检验群落多物种间的总体关联性。VR 值在独立性零假设条件下, 期望值为 1^[17]。VR>1 时为净的正联结, 反之则为净的负联结; VR=1 时符合所有种间无联结的零假设^[18]。根据统计量 W 来检验物种联结性的显著程度, 物种不显著关联时 W 落入 $\chi^2_{0.95(N)} < W < \chi^2_{0.05(N)}$ 的概率为 90%, 否则, 总体相关^[19]。

χ^2 检验统计量 采用经过 Yates 矫正的 χ^2 检验物种之间是否存在显著关联^[20]。 $\chi^2 < 3.841$ ($P > 0.05$) 时种间基本独立; $3.841 \leq \chi^2 < 6.635$ ($0.01 < P \leq 0.05$), 联结性显著; $\chi^2 \geq 6.635$ ($P \leq 0.01$), 联结性极显著^[21]。因为 χ^2 值本身并没有负值, 所以本研究使用 V 比值判断种间关联性。V>0 时为正联结, 反之则为负联结^[22]。当某些物种在所有样地中都出现时, 会导致分母变为 0, 无法正确表达物种之间的联结情况, 所以要赋予物种一个加权值, 避免公式失去计算意义^[23]。

相关性检验 χ^2 统计量检验是趋近于定性描述物种之间的相关性, 对物种间相关性程度的定量分析比较欠缺, 而 Pearson 相关检验和 Spearman 秩相关检验是基于数量基础计算的, 对 χ^2 统计量检验在一定程度上能起到弥补的作用。

群落稳定性分析 采用改进的 M-Godron 法^[24]测定群落稳定性。以横轴 x 为种累积倒数百分数, 纵轴 y 为累积相对频度做散点图, 用平滑曲线模拟方程: $y = ax^2 + bx + c$ 进行拟合。通过平滑曲线与 $y = 100 - x$ 的交点到(20,80)的欧氏距离来进行评估, 距离越小稳定性越好, 反之则稳定性越差。

1.4 数据统计和分析

利用 Origin2021 和 R4.2.0 中的 spaa 程序包对数据进行计算、分析和制图。

2 结果和分析

2.1 物种重要值

在分析处理数据时考虑到物种过多和计算问题, 根据重要值排序结果, 选择不同恢复阶段中重要值排名前 20 的物种进行种间联结性和相关性分析(表 1)。3 个恢复阶段重要值排名前 20 的物种中仅有 6 种为共有物种, 其余物种随植物群落的演替发生了一定变化; 每个阶段只有 1/4 的物种重要值超过 5.00, 绝大部分物种重要值在 2.00 左右。25 a 和 40 a 植物群落中鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)的重要值最大, 100 a 植物群落中青冈(*Quercus glauca*)重要值最大。

2.2 总体关联性

由表 2 可知不同恢复阶段总体关联性的方差比率(VR)均大于 1, 其中 25 a 和 40 a 植物群落检验统计量均落入界限 $\chi^2_{0.95(N)} < W < \chi^2_{0.05(N)}$, 表明其在总体上呈现不显著正关联, 种群间联结程度较低, 独立性较强; 100 a 植物群落的检验统计量没有落入界限 $\chi^2_{0.95(N)} < W < \chi^2_{0.05(N)}$, 说明其在总体上呈现显著正关联。

表 1 主要优势木本植物(20 种)的重要值

Table 1 Importance value of top 20 dominant woody species

优势种 Dominant species	缩写 Abbreviation	重要值 Importance value		
		25 a	40 a	100 a
青冈 <i>Quercus glauca</i>	Qg	7.93	5.75	13.19
鹅耳枥 <i>Carpinus turczaninowii</i>	Ct	10.35	10.58	1.20
马桑 <i>Coriaria nepalensis</i>	Cn	6.53	1.90	-
小叶青冈 <i>Cyclobalanopsis myrsinifolia</i>	Cm	5.06	-	1.31
四照花 <i>Cornus kousa subsp</i>	Ck	4.89	4.41	1.98
亮叶桦 <i>Betula luminifera</i>	Bl	4.77	5.01	1.32
灰柯 <i>Lithocarpus henryi</i>	Lh	4.25	-	1.24
山鸡椒 <i>Litsea cubeba</i>	Lc	4.00	-	-
云南桫欏叶树 <i>Clethra delavayi</i>	Cd	2.91	1.28	-

续表(Continued)

优势种 Dominant species	缩写 Abbreviation	重要值 Importance value		
		25 a	40 a	100 a
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	Rc	2.60	—	—
青榨槭 <i>Acer davidii</i>	Ad	2.59	—	—
石灰花楸 <i>Sorbus folgeri</i>	Sf	2.11	1.40	—
漆 <i>Toxicodendron vernicifluum</i>	Tv	2.03	—	—
白檀 <i>Symplocos paniculata</i>	Sp	2.00	—	—
锥栗 <i>Castanea henryi</i>	Ch	1.58	2.73	7.13
小叶石楠 <i>Photinia parvifolia</i>	Pp	1.52	—	—
三桠乌药 <i>Lindera obtusiloba</i>	Lo	1.41	—	—
美脉花楸 <i>Sorbus caloneura</i>	Sc	1.23	—	—
山矾 <i>Symplocos sumuntia</i>	Ss	1.07	8.54	6.08
光叶水青冈 <i>Fagus lucida</i>	Fl	1.05	—	—
翅柃 <i>Eurya alata</i>	Ea	—	4.16	6.13
檫木 <i>Sassafras tzumu</i>	St	—	2.98	—
枫香树 <i>Liquidambar formosana</i>	Lf	—	2.61	—
灯台树 <i>Cornus controversa</i>	Cc	—	2.09	—
黄丹木姜子 <i>Litsea elongata</i>	Le	—	1.90	4.12
光亮山矾 <i>Symplocos lucida</i>	Sl	—	1.81	2.83
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	Cl	—	1.49	—
楝木 <i>Cornus macrophylla</i>	Cma	—	1.45	—
红枝柴 <i>Meliosma oldhamii</i>	Mo	—	1.31	—
薄叶山矾 <i>Symplocos anomala</i>	Sa	—	1.20	2.94
大叶杨 <i>Populus lasiocarpa</i>	Pl	—	1.18	—
木荷 <i>Schima superba</i>	Ssu	—	—	5.40
尖连蕊茶 <i>Camellia cuspidata</i>	Ccu	—	—	4.90
白辛树 <i>Pterostyrax psilophyllus</i>	Pps	—	—	1.55
香椿 <i>Toona sinensis</i>	Ts	—	—	1.44
宜昌润楠 <i>Machilus ichangensis</i>	Mi	—	—	1.27
长蕊杜鹃 <i>Rhododendron stamineum</i>	Rs	—	—	1.18
粉椴 <i>Tilia oliveri</i>	To	—	—	1.18
米心水青冈 <i>Fagus engleriana</i>	Fe	—	—	1.43

表 2 植物群落总体关联性

Table 2 Overall association of plant communities

恢复时间 (a) Restoration time	方差比率 Variance ratio (VR)	检验统计量 Test statistic (W)	χ^2 临界值 χ^2 threshold ($\chi^2_{0.95}, \chi^2_{0.05}$)	正关联 Positive association
25	1.53	21.49	6.57, 23.68	不显著
40	1.27	17.83	6.57, 23.68	不显著
100	1.80	25.17	6.57, 23.68	显著

2.3 种对间关联性分析

从图 1 可见, 25 a 植物群落中有 104 个种对呈正联结, 占总数的 54.70%, 其中青冈与鹅耳枥、马桑(*Coriaria nepalensis*)与盐肤木(*Rhus chinensis*)等 20 组种对呈现显著正相关; 86 个种对呈负联结, 其中马桑与石灰花楸(*Sorbus folgeri*)、盐肤木与石灰花楸这 2 组种对呈现显著负相关。40 a 植物群落中有 93 个种对呈正联结, 占总数的 49.00%, 其中山矾(*Symplocos sumuntia*)与黄丹木姜子(*Litsea elongata*)、

枫香树(*Liquidambar formosana*)与杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等 16 个种对呈现显著正相关; 97 个种对呈负联结, 其中翅柃(*Eurya alata*)与灯台树(*Cornus controversa*)、锥栗(*Castanea henryi*)与马桑、灯台树与石灰花楸这 3 组种对呈现显著负相关。100 a 植物群落中有 89 个种对呈正联结, 占总数的 46.80%, 其中青冈与锥栗、翅柃与光亮山矾(*Symplocos lucida*)等 17 组种对呈现显著正相关; 101 个种对呈负联结, 其中锥栗与尖连蕊茶(*Camellia cuspidata*)、翅柃与

尖连蕊茶、木荷(*Schima superba*)与尖连蕊茶、四照花(*Cornus kousa*)与尖连蕊茶 4 组种对呈现显著负相关。而 25 a 和 40 a 植物群落的 χ^2 统计量检验结果表明均为不显著(表 3, 4), 100 a 群落的 χ^2 统计量检验显示没有达到显著水平的种对占绝大部分(表 5), 表明 Pearson 相关检验与 χ^2 统计量检验结果基本一致, 物种间呈独立分布的格局。

从图 2 可见, 25 a 植物群落中有 109 个种对呈正联结, 占总数的 57.40%, 其中小叶青冈(*Cyclobalanopsis myrsinifolia*)与灰柯(*Lithocarpus henryi*)、鹅耳枥与石

灰花楸等 11 组种对呈现显著正相关; 81 个种对呈负联结, 其中鹅耳枥与马桑、马桑与石灰花楸、盐肤木与石灰花楸、盐肤木与光叶水青冈(*Fagus lucida*) 4 组种对呈现显著负相关。40 a 植物群落中有 111 个种对呈正联结, 占总数的 58.40%, 其中青冈与枫香树、檫木(*Sassafras tzumu*)与黄丹木姜子等 10 组种对呈现显著正相关; 79 个种对呈负联结, 其中四照花与翅柃、翅柃与灯台树等 9 组种对呈现显著负相关。100 a 植物群落中 98 个种对呈正联结, 占总数的 51.60%, 其中翅柃与山矾、木荷与宜昌润楠等 17

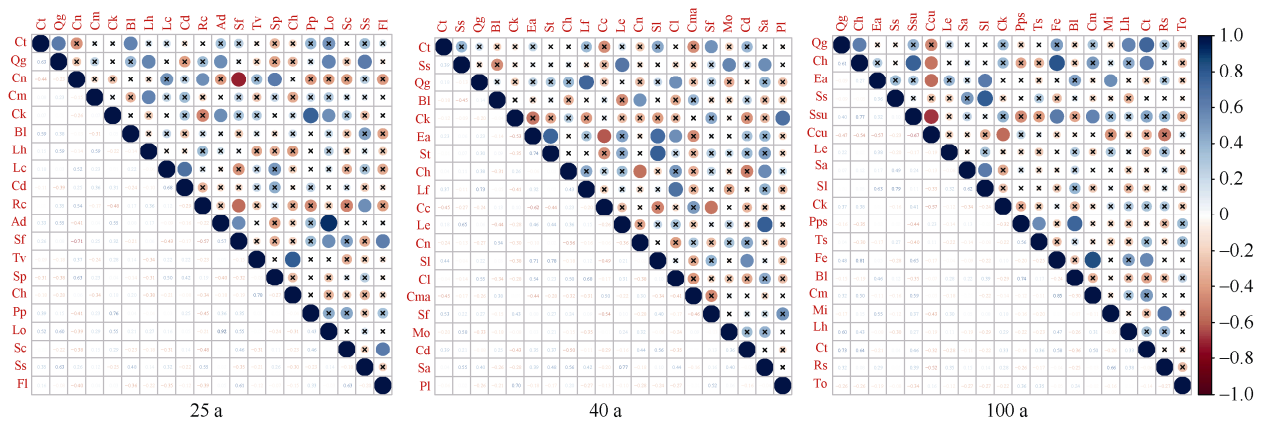


图 1 植物种对 Pearson 相关系数矩阵。x: $P \geq 0.05$, 其余为相关显著($P < 0.05$)。优势种缩写见表 1。下同

Fig.1 Pearson correlation coefficients matrix of plant pairs. x: $P \geq 0.05$, the rest: $P < 0.05$. Abbreviations for dominant species are shown in Table 1. The same below

表 3 25 a 植物群落主要优势种的 χ^2 统计量检验

Table 3 χ^2 correlation test of dominant species in 25 years plant community

	Ct	Qg	Cn	Cm	Ck	Bl	Lh	Lc	Cd	Rc	Ad	Sf	Tv	Sp	Ch	Pp	Lo	Sc	Ss
Qg	2.98																		
Cn	2.98	2.98																	
Cm	0.24	0.24	0.24																
Ck	2.98	2.98	2.98	0.24															
Bl	2.98	2.98	2.98	0.24	2.98														
Lh	2.98	2.98	2.98	0.24	2.98	2.98													
Lc	2.98	2.98	2.98	0.24	2.98	2.98	2.98												
Cd	2.98	2.98	2.98	0.24	2.98	2.98	2.98	2.98											
Rc	1.12	1.12	1.12	0.01	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12										
Ad	0.24	0.24	0.24	0.22	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.01									
Sf	2.98	2.98	2.98	0.24	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	1.12	0.24								
Tv	0.24	0.24	0.24	0.22	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.01	0.22	0.24							
Sp	2.98	2.98	2.98	0.24	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	1.12	0.24	2.98	0.24						
Ch	0.02	0.02	0.02	0.88	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.30	0.07	0.02	0.07	0.02					
Pp	1.12	1.12	1.12	0.01	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	0.22	0.01	1.12	0.01	1.12	0.30				
Lo	1.12	1.12	1.12	0.01	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	0.22	2.46	1.12	0.01	1.12	0.30	0.22			
Sc	0.24	0.24	0.24	0.22	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.01	3.16	0.24	0.71	0.24	0.07	0.01	2.46		
Ss	0.02	0.02	0.02	2.11	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.30	0.07	0.02	0.07	0.02	1.37	0.30	0.30	0.07	
Fl	0.02	0.02	0.02	0.07	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.98	0.07	0.02	0.07	0.02	0.01	0.30	0.30	0.07	0.01

表 4 40 a 植物群落主要优势种的 χ^2 统计量检验Table 4 χ^2 correlation test of dominant species in 40 years plant community

	Ct	Ss	Qg	Bl	Ck	Ea	St	Ch	Lf	Cc	Le	Cn	Sl	Cl	Cma	Sf	Mo	Cd	Sa
Ss	2.98																		
Qg	2.98	2.98																	
Bl	2.98	2.98	2.98																
Ck	2.98	2.98	2.98	2.98															
Ea	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98														
St	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00													
Ch	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.29												
Lf	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.00	0.08											
Cc	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.35	0.07	0.27										
Le	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	2.98	0.00	0.02	0.52	0.24									
Cn	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.00	2.55	0.05	0.27	0.52								
Sl	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.53	0.34	0.01	0.10	0.60							
Cl	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.29	0.01	0.08	0.07	0.02	0.08	0.16						
Cma	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.35	0.07	0.27	3.16	0.24	0.27	0.01	2.11					
Sf	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.16	0.34	0.01	0.10	0.34	0.11	0.16	0.01				
Mo	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.16	0.60	0.01	0.10	0.34	0.11	0.16	0.01	0.11			
Cd	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	0.58	0.30	0.02	0.01	1.12	0.02	0.12	0.30	0.01	0.12	0.12		
Sa	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	1.70	1.07	0.05	0.27	0.52	0.05	0.34	0.08	0.27	0.34	0.34	0.02	
Pl	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.16	0.34	0.01	0.10	0.34	0.69	0.16	0.01	2.24	2.24	0.12	0.34

表 5 100 a 植物群落主要优势种的 χ^2 统计量检验Table 5 χ^2 correlation test of dominant species in 100 years plant community

	Qg	Ch	Ea	Ss	Ssu	Ccu	Le	Sa	Sl	Ck	Pps	Ts	Fe	Bl	Cm	Mi	Lh	Ct	Rs
Ch	0.00																		
Ea	1.12	0.58																	
Ss	1.12	0.58	7.02																
Ssu	0.24	3.15	0.01	0.01															
Ccu	0.52	1.70	0.02	0.02	0.27														
Le	2.98	0.00	1.12	1.12	0.24	0.52													
Sa	2.98	0.00	1.12	1.12	0.24	0.52	2.98												
Sl	2.98	0.00	1.12	1.12	0.24	0.52	2.98	2.98											
Ck	1.12	0.58	0.22	0.22	0.01	0.02	1.12	1.12	1.12										
Pps	0.24	3.15	0.01	0.01	3.16	0.27	0.24	0.24	0.24	0.01									
Ts	0.52	1.70	0.02	0.02	0.86	0.05	0.52	0.52	0.52	0.02	5.61								
Fe	0.02	0.29	0.98	0.98	0.07	1.07	0.02	0.02	0.02	0.30	0.07	0.08							
Bl	0.24	0.35	0.01	0.01	0.22	0.27	0.24	0.24	0.24	0.01	0.22	0.86	0.07						
Cm	0.10	1.24	0.12	0.12	1.31	0.34	0.10	0.10	0.10	0.12	1.31	0.60	0.16	0.01					
Mi	0.10	1.24	1.57	1.57	1.75	0.60	0.10	0.10	0.10	1.57	0.01	0.34	0.16	1.31	0.11				
Lh	0.10	0.00	0.12	0.12	0.01	0.60	0.10	0.10	0.10	0.12	0.01	0.34	2.34	0.01	0.11	0.11			
Ct	0.02	0.29	0.30	0.30	0.88	0.08	0.02	0.02	0.02	0.30	0.88	0.08	0.01	0.88	0.16	0.16	0.16		
Rs	0.02	0.29	0.98	0.98	0.88	1.07	0.02	0.02	0.02	0.98	0.07	0.08	0.01	0.07	0.16	2.34	0.53	1.03	
To	0.24	3.15	2.46	2.46	3.16	0.27	0.24	0.24	0.24	0.01	0.22	0.86	0.88	0.22	0.01	1.75	0.01	0.07	0.88

组种对呈现显著正相关；92 个种对呈负联结，其中锥栗与白辛树(*Pterostyrax psilophyllus*)、四照花与尖连蕊茶等 11 组种对呈现显著负相关。物种间的联结

性较弱且呈现独立分布的状态。Spearman 秩相关检验结果中呈正联结的种对数比 Pearson 相关检验多，表明 Spearman 秩相关检验灵敏度更高。

2.4 植物群落的稳定性

群落累积相对频度与种总数倒数累积对应, 绘制散点图, 并完成平滑曲线的模拟(图 3)。其中 25 a 植物群落模拟曲线为 $y=-0.004x^2+1.433x-2.3134$ ($R^2=0.99$), 与直线的交点坐标为(45.45, 54.55); 40 a 植物群落模拟曲线为 $y=-0.0051x^2+$

$1.5247x-1.2583$ ($R^2=0.99$), 与直线的交点坐标为(44.02, 55.98); 100 a 植物群落模拟曲线为 $y=-0.0063x^2+1.6443x-0.9144$ ($R^2=0.99$), 与直线的交点坐标为(42.46, 57.54), 其中 100 a 植物群落的稳定性相对最高(31.76), 40 a 次之(33.97), 25 a 最差(35.99)。

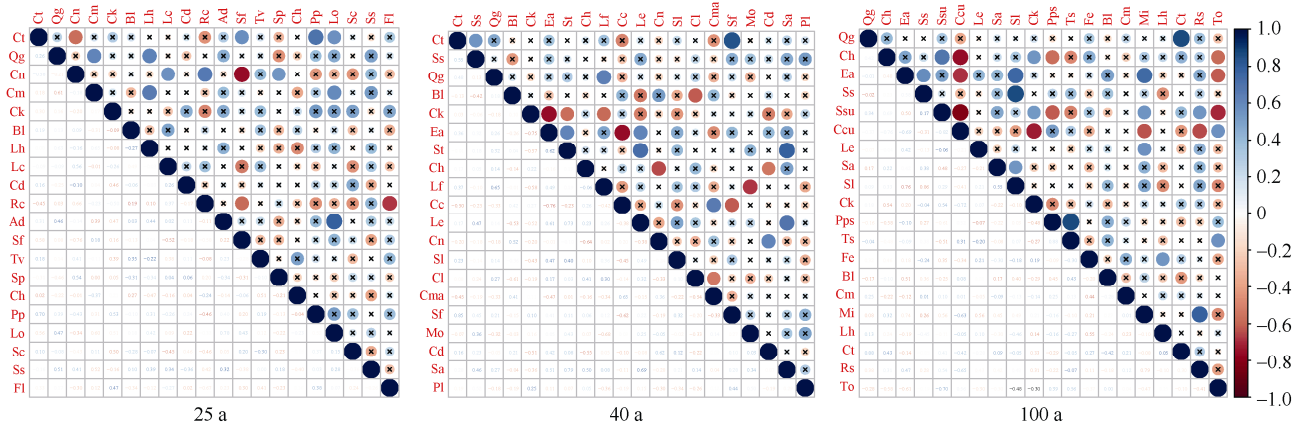


图 2 物种对的 Spearman 秩相关系数矩阵

Fig. 2 Spearman rank correlation coefficient matrix of plant pairs

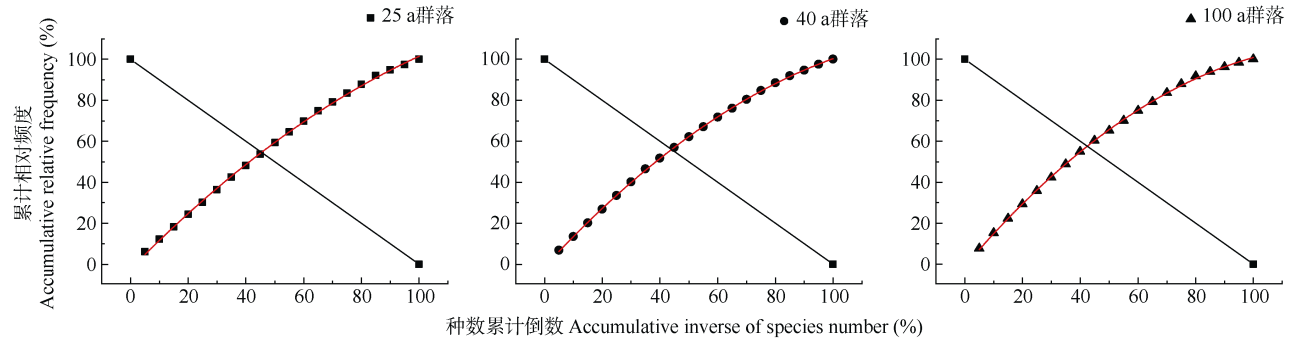


图 3 不同恢复阶段群落的稳定性

Fig. 3 Stability of communities at different restoration stages

3 讨论和结论

3.1 不同恢复阶段主要优势木本植物种间联结性

群落演替与种间联结性相互关联, 群落中各物种的种间关系随着群落的演替会逐渐发生变化^[4]。众多研究表明, 当群落逐渐发展成为顶级群落时, 种间联结性会发生 2 种变化, 一种是群落结构和物种组成随着演替的进展将逐渐趋向于完善和稳定, 种对间正联结占比增加, 以寻求物种间的稳定共存^[25]; 而另一种是群落中的物种整体随着演替的进展逐渐趋向于无关联^[26]。不同恢复阶段植物群

落总体关联性呈“不显著正关联→不显著正关联→显著正关联”, 且 Pearson 相关检验和 Spearman 秩相关检验结果都表明不同恢复阶段中大部分木本植物的种对间联结性不显著, 此研究结果与陈俊等^[27]对木林子川陕鹅耳枥+青冈-水马桑群落优势种生态位与种间关联研究结果一致。25 a 植物群落处于演替早期, 物种组成较为复杂, 对环境资源利用不均匀, 呈显著正相关的种对相互依赖, 促进生长, 而呈显著负相关的种对相互排斥, 对资源和环境的竞争比较激烈。恢复到 40 a 时, 种间联结性有所增强, 但仍表现为不显著正联结, 可能是植物群落高度增

加,郁闭度增强,耐荫物种逐渐增加,群落结构逐渐完善。恢复到 100 a 时,物种组成和群落结构趋于复杂化,逐渐向稳定状态发展,且呈现显著正相关的种对逐渐增多。不同恢复阶段优势种种间联结性不尽相同,可能与其所处的环境条件、物种的生态学特性以及外界的人为干扰有关,如小叶青冈与灰柯、青冈与鹅耳枥等物种始终呈现正联结,小叶青冈与灰柯都可在酸性土壤上生长,要求土层深厚、肥沃湿润,且萌芽力极强,具有相似的生态习性。各阶段群落内物种出现此消彼长的动态变化,表明 3 个植物群落均处于动态演替过程中,群落组成不断发生变化。

3.2 不同恢复阶段植物群落的稳定性

本研究利用改进的 M-Godron 法对稳定性分析表明不同恢复阶段植物群落均处于不稳定状态,说明 3 个植物群落均未发展到成熟阶段,正处在动态发育的过程中,随着恢复进展,植物群落稳定性逐渐增强。群落稳定性受种内和种间竞争、环境以及人为干扰等多重因素的影响^[1]。研究表明不同恢复阶段植物群落的稳定性除了受到恢复过程的影响外,也与外部的环境条件有关系。25 a 植物群落在演替初期,环境资源丰富,且海拔高、光照条件充足,一些喜光树种如盐肤木、小叶青冈等在生长过程中占有很大优势,适应环境的同时也为其他树种的定居创造了有利的条件,但因其位于森林防火隔离带附近,受到一定程度的人为干扰,多重因素的影响导致群落的稳定性较差。40 a 植物群落中高大乔木逐渐增多,较高的林分郁闭度使一些物种在光照的竞争处于劣势地位,灰柯、山鸡椒(*Litsea cubeba*)等耐荫能力差的物种逐渐表现出衰退趋势;且其位于低海拔区域,极易遭受到人类农耕等活动的危害,进而导致群落的稳定性较差。100 a 植物群落内早期的一些强阳性、寿命短的物种逐渐退出群落,而青冈、黄丹木姜子等对资源利用能力以及环境适应能力强的物种迅速生长发育,物种的不断更替导致群落稳定性较差。本研究只是揭示出不同恢复阶段植物群落的稳定性较差,对稳定性影响的具体因素和生态学机制尚不清楚,未来可从影响因素等途径深入研究。同时,应加强植被资源的监测和管理,制定相应的保护措施和政策,并通过合理的利用方式来促进资源的可持续利用。

3.3 种间联结性与群落稳定性之间的关系

种间联结与群落的稳定性有密切关系,物种间

的总体关联性反映出群落的演替阶段及其稳定性,而群落稳定性则是种间联结性的集中体现^[28]。伴随着演替的进行,物种组成和群落结构将趋向于复杂化,种间联结性也将趋于以正关联为主,正负关联比值增大,无关联的占比也渐渐提高,促使群落内各种群稳定共存,群落稳定性也会逐渐提升^[29-30]。结合 M-Godron 法分析结果,进一步证实不同恢复阶段植物群落虽处于不稳定的阶段,但随着恢复年限增加,稳定性逐渐增强。本研究结果与陈泓宇等^[31]对粤北不同演替阶段的森林群落结构与种间关联分析的结果不同,可能是随着恢复年限的增加,植物群落逐渐适应环境并开始占据不同的资源空间,盐肤木、小叶青冈等喜阳先锋物种生活范围收缩、个体数目衰减,四照花、亮叶桦(*Betula luminifera*)都是喜光、喜温暖湿润环境的物种,有相似的生态适应性,这些物种在植物群落发展到一定阶段时会逐渐衰退;高大乔木为一些灌木、小乔木等提供荫蔽的环境,耐阴树种获得更大的生存空间,而植物群落中频繁的物种更替、气候变化以及人为干扰等会导致群落的结构遭到破坏,群落稳定性较低。

综上,木林子不同恢复阶段天然林群落主要优势木本植物种间不显著关联的种对占绝大部分,种对间的联结较为松散,独立性相对较强,植物群落均处于不稳定状态,但总体朝着正向演替阶段发展。随着恢复演替的进行,植物群落中的物种组成、群落结构会逐渐变得复杂,稳定性也会随之增强。因此,在自然恢复过程中,应保护植物群落所在的原生环境,减少人为干扰,以促进恢复;此外,可根据优势种的种间联结规律,增强群落的总体资源利用效率,维持和提升植物群落的稳定性。

参考文献

- [1] TU H R, NONG J L, ZHU J, et al. Interspecific associations of main species and community stability of *Myrsine seguinii* community in karst hills of Guilin, southwestern China [J]. Acta Ecol Sin, 2022, 42(9): 3688-3705. [涂洪润, 农娟丽, 朱军, 等. 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 [J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3688-3705. doi: 10.5846/stxb202105061175.]
- [2] WAN Y Y, LI H Y, MO X Q, et al. Analysis of inter-specific relationships among community dominant species after vegetation restoration in coastal saline alkali area [J]. J Arid Land Res Environ, 2017, 31(2): 147-154. [万媛媛, 李洪远, 莫训强, 等. 滨海盐碱区湿地植被恢复后群落优势种种间关系分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2):

- 147–154. doi: 10.13448/j.cnki.jalre.2017.059.]
- [3] LI X, ZHU W Z, SHU S M, et al. Interspecific association and stability of vegetation in the dry-warm valley of the middle reaches of Dadu River [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2021, 27(2): 325–333. [李霞, 朱万泽, 舒树森, 等. 大渡河中游干暖河谷植被种间关系与稳定性 [J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(2): 325–333. doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2021.01032.]
- [4] LIU R H, JIANG Y, CHANG B, et al. Interspecific associations and correlations among the main woody plants in a *Pterocarya stenoptera* community in a riparian zone of Lijiang River, Guilin, southwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, 38(19): 6881–6893. [刘润红, 姜勇, 常斌, 等. 漓江河岸带枫杨群落主要木本植物种间联结与相关分析 [J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6881–6893. doi: 10.5846/stxb201802270396.]
- [5] WANG H M, PANG C H, ZHANG F, et al. Interspecific association of dominant species of wetland vegetation in the middle and lower reaches of Fenhe River, Shanxi Province of China [J]. *Chin J Ecol*, 2012, 31(10): 2507–2512. [王慧敏, 庞春花, 张峰, 等. 汾河流域中下游湿地植被优势种间关联性分析 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31(10): 2507–2512. doi: 10.13292/j.1000-4890.2012.0386.]
- [6] ZHOU L L, ZHANG Q Q, ZHAO Y T, et al. Species association and correlation between vertical layers in the *Liquidambar formosana* community in Tiantong region, Zhejiang Province [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, 39(12): 1136–1145. [周刘丽, 张晴晴, 赵延涛, 等. 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 [J]. *植物生态学报*, 2015, 39(12): 1136–1145. doi: 10.17521/cjpe.2015.0110.]
- [7] DING M, WANG Y K, HE Y R, et al. Changes of species diversity, interspecific associations and community stability for the deciduous broad-leaved forest in Yaoluoping National Nature Reserve, Anhui Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2023, 43(7): 2818–2830. [丁茂, 汪宇坤, 何煜然, 等. 安徽鹞落坪国家级自然保护区落叶阔叶林树种多样性、种间联结及群落稳定性变化 [J]. *生态学报*, 2023, 43(7): 2818–2830. doi: 10.5846/stxb202204191059.]
- [8] ROSENTHAL G. Selecting target species to evaluate the success of wet grassland restoration [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2003, 98(1/2/3): 227–246. doi: 10.1016/S0167-8809(03)00083-5.
- [9] YAO L, CUI G F, YI Y M, et al. Species diversity of woody plants in Mulinzi Nature Reserve of Hubei Province [J]. *Sci Silv Sin*, 2016, 52(1): 1–9. [姚兰, 崔国发, 易咏梅, 等. 湖北木林子保护区大样地的木本植物多样性 [J]. *林业科学*, 2016, 52(1): 1–9. doi: 10.11707/j.1001-7488.20160101.]
- [10] CHEN J, AI X R, YAO L, et al. Population dynamics and point pattern analysis of *Cyclobalanopsis multinervis* in large plot, Mulinzi Nature Reserve [J]. *J For Environ*, 2017, 37(4): 459–464. [陈俊, 艾训儒, 姚兰, 等. 木林子大样地多脉青冈种群动态及点格局 [J]. *森林与环境学报*, 2017, 37(4): 459–464. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2017.04.014.]
- [11] WANG J, ZHU J, AI X R, et al. Spatial distribution pattern and intraspecific and interspecific relationships of genus *Symplocos* in Mulinzi Nature Reserve, Hubei Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, 40(21): 7709–7720. [王进, 朱江, 艾训儒, 等. 湖北木林子保护区山矾属植物空间分布格局及其关联性 [J]. *生态学报*, 2020, 40(21): 7709–7720. doi: 10.5846/stxb201905231066.]
- [12] HUANG X, YAO L, AI X R, et al. Spatial distribution patterns and correlations of two species of *Litsea* in large sample plot in Mulinzi National Nature Reserve [J]. *Guihaia*, 2021, 41(8): 1333–1345. [黄小, 姚兰, 艾训儒, 等. 木林子大样地两个木姜子属物种空间分布格局及关联性 [J]. *广西植物*, 2021, 41(8): 1333–1345. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201909005.]
- [13] LIN Y, AI X R, YAO L, et al. Niches of main dominant species of different community types in Mulinzi Nature Reserve [J]. *J Nat Res*, 2017, 32(2): 223–234. [林勇, 艾训儒, 姚兰, 等. 木林子自然保护区不同群落类型主要优势种群的生态位研究 [J]. *自然资源学报*, 2017, 32(2): 223–234. doi: 10.11849/zrzyxb.20160305.]
- [14] LAN G Y. Research progress on large, long-term plot of tropical forest ecosystem in the world [J]. *Acta Boreali-Occid Bot*, 2007, 27(10): 2140–2145. [兰国玉. 世界热带森林生态系统大样地定位研究进展 [J]. *西北植物学报*, 2007, 27(10): 2140–2145. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2007.10.033.]
- [15] HUANG Y T, YAO L, AI X R, et al. Quantitative classification of the subtropical evergreen-deciduous broadleaved mixed forest and the deciduous and evergreen species composition structure across two national nature reserves in the southwest of Hubei, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, 39(10): 990–1002. [黄永涛, 姚兰, 艾训儒, 等. 鄂西南两个自然保护区亚热带常绿落叶阔叶混交林类型及其常绿和落叶物种组成结构分析 [J]. *植物生态学报*, 2015, 39(10): 990–1002. doi: 10.17521/cjpe.2015.0096.]
- [16] SCHLUTER D. A variance test for detecting species associations, with some example applications [J]. *Ecology*, 1984, 65(3): 998–1005. doi: 10.2307/1938071.
- [17] YANG Q Q, YANG Z Y, CHEN X H, et al. Interspecific associations of dominant plant populations in secondary forest of *Syzygium odoratum* in tropical coast [J]. *Sci Silv Sin*, 2017, 53(9): 105–113. [杨青青, 杨众养, 陈小花, 等. 热带海岸香蒲桃天然次生林群落优势种群种间联结性 [J]. *林业科学*, 2017, 53(9): 105–113. doi: 10.11707/j.1001-7488.20170913.]
- [18] 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与方法评述 [J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8224–8233. doi: 10.5846/stxb201505311092.]
- [19] YUE P P, ZHOU J J, WANG H. Interspecific association analysis of *Artemisia ordosica* community in eastern edge of Mu Us sandy land [J]. Ecol Sci, 2017, 36(6): 147–152. [岳鹏鹏, 周静静, 王华. 毛乌素沙地东缘黑沙蒿群落种间联结性分析 [J]. 生态科学, 2017, 36(6): 147–152. doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2017.06.020.]
- [20] PEI S X, FA L, DU M Y, et al. Effects of interspecific relationship on natural regeneration and community stability of *Pinus tabulaeformis* 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.]
- [21] SONG Y C. Vegetation Ecology [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2017: 44–84. [宋永昌. 植被生态学 [M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2017: 44–84.]
- [22] JIANG N H, ZHANG S H. Interspecific association and environmental interpretation of dominant herbaceous species in *Pinus yunnanensis* forest in the western suburbs of Chuxiong City [J]. Ecol Environ Sci, 2021, 30(11): 2109–2120. [姜倪皓, 张诗函. 楚雄市西郊云南松林下草本优势种种间联结及环境解释 [J]. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2109–2120. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.11.001.]
- [23] ZHOU Q J, ZHAO C M, SHU H W, et al. Interspecific association of natural mixed needle- and broad-leaved forest community in Shennongjia [J]. Guihaia, 2020, 40(2): 255–263. [周秋静, 赵常明, 舒化伟, 等. 神农架天然针阔混交林群落的种间联结性 [J]. 广西植物, 2020, 40(2): 255–263. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201903029.]
- [24] ZHENG Y R. Comparison of methods for studying stability of forest community [J]. Sci Silv Sin, 2000, 36(5): 28–32. [郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探 [J]. 林业科学, 2000, 36(5): 28–32. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2000.05.005.]
- [25] ZHANG M X, WANG D 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.]
- [26] HUANG S N, LI Y D, LUO T S, et al. Dynamics of associations between tree species in a secondary tropical montane rain forest at Jianfengling on Hainan Island [J]. Acta Phytoecol Sin, 2000, 24(5): 569–574. [黄世能, 李意德, 骆士寿, 等. 海南岛尖峰岭次生热带山地雨林树种间的联结动态 [J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 569–574.]
- [27] CHEN J, AI X R, YAO L, et al. Niche characteristics and interspecific association of dominant species of the *Carpinus fargesiana*+*Cyclobalanopsis glauca*-*Weigela japonica* community in Mulinzi Nature Reserve [J]. J Hubei Univ Nat (Nat Sci), 2017, 35(3): 255–260. [陈俊, 艾训儒, 姚兰, 等. 木林子川陕鹅耳枥+青冈-水马桑群落优势种生态位与种间关联 [J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2017, 35(3): 255–260. doi: 10.13501/j.cnki.42-1569/n.2017.09.003.]
- [28] 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.]
- [29] YU X Y, YU R, HUANG J, et al. Analysis on interspecific associations among dominant populations in each layer of *Loropetalum subcordatum* community in Maolan National Nature Reserve of Guizhou [J]. J Plant Res Environ, 2018, 27(2): 24–32. [俞筱押, 余瑞, 黄娟, 等. 贵州茂兰国家级自然保护区四药门花群落各层次优势种群的种间联结性分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27(2): 24–32. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2018.02.04.]
- [30] VALENCIA E, DE BELLO F, GALLAND T, et al. Synchrony matters more than species richness in plant community stability at a global scale [J]. Proc Nat Acad USA, 2020, 117(39): 24345–24351. doi: 10.1073/pnas.1920405117.
- [31] 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.]