



### 珍稀濒危植物江南油杉群落乔木层主要树种种间关联性分析

陈绪辉, 叶宝鉴, 潘标志, 林碧华, 罗敏贤, 肖丽芳, 刘宝, 何宗明, 郑世群

#### 引用本文:

陈绪辉, 叶宝鉴, 潘标志, 林碧华, 罗敏贤, 肖丽芳, 刘宝, 何宗明, 郑世群. 珍稀濒危植物江南油杉群落乔木层主要树种种间关联性分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2023, 31(1): 21–30.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4682>

---

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 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>

#### 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>

#### 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>

#### 井冈山植物群落优势种空间分布格局与种间关联

Spatial Pattern and Interspecific Relationship of Dominant Species in Plant Community in Jinggang Mountain  
热带亚热带植物学报. 2015, 23(1): 74–80 <https://doi.org/10.11926/j.issn.1005-3395.2015.01.011>

#### 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>

向下翻页, 浏览PDF全文

# 珍稀濒危植物江南油杉群落乔木层主要树种间关联性分析

陈绪辉<sup>1a,1b</sup>, 叶宝鉴<sup>2</sup>, 潘标志<sup>3</sup>, 林碧华<sup>1a,1b</sup>, 罗敏贤<sup>1a,1b</sup>, 肖丽芳<sup>1a,1b</sup>, 刘宝<sup>1a</sup>, 何宗明<sup>1a</sup>, 郑世群<sup>1a,1b\*</sup>

(1. 福建农林大学, a. 林学院; b. 海峡自然保护区研究中心, 生态与资源统计福建省高校重点实验室, 福州 350002; 2. 福建工程学院建筑与城乡规划学院, 福州 350118; 3. 福建省林业调查规划院, 福州 350003)

**摘要:** 基于 2×2 列联表, 采用方差比率法( $R_v$ )、 $\chi^2$  检验、Pearson 相关系数检验和 Spearman 秩相关系数检验等方法, 对福建君子峰国家级自然保护区江南油杉(*Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis*)群落乔木层主要树种进行种间关联性分析, 并通过主成分分析(PCA)划分生态种组。结果表明, 21 种主要树种总体表现为不显著负关联, 且江南油杉与其他物种多呈不显著相关。210 个种对中, 正相关的有 110 对, 负相关的有 81 对, 不相关的有 19 对, 正负比 1.36。绝大多数种对间呈不显著相关, 显著率仅为 0.48%, 物种间相互独立。Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数检验结果具有一致性, 负相关种对数大于正相关种对数, 绝大多数种对不显著, 显著率分别为 6.19%和 7.14%。与  $\chi^2$  检验相比, Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数检验方式更加灵敏。运用 PCA 二维排序可将主要树种划分为 4 个生态种组, 同一生态种组内物种的生态习性和资源需求相似, 多呈正相关, 种对间相互依赖共存; 不同生态种组间物种多呈负相关, 种对间相互竞争。江南油杉群落乔木层主要树种的种间关联性较为松散, 大多数物种为独立分布, 幼苗存在更新障碍, 且幼树个体竞争压力较大, 种群规模呈逐渐缩小的趋势。为促进江南油杉种群正常生长与更新, 应对江南油杉幼苗进行重点保护。

**关键词:** 江南油杉; 珍稀濒危植物; 种间关联; 生态种组

doi: 10.11926/jtsb.4682

## Interspecific Association Analysis of Dominant Tree Species of Rare and Endangered Plant in *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* Community

CHEN Xuhui<sup>1a,1b</sup>, YE Baojian<sup>2</sup>, PAN Biaozi<sup>3</sup>, LIN Bihua<sup>1a,1b</sup>, LUO Minxian<sup>1a,1b</sup>, XIAO Lifang<sup>1a,1b</sup>, LIU Bao<sup>1a</sup>, HE Zongming<sup>1a</sup>, ZHENG Shiqun<sup>1a,1b\*</sup>

(1a. College of forestry; 1b. Cross-strait Nature Reserve Research Center, Key Laboratory of Fujian Universities for Ecology and Resource Statistics, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Architecture and Urban Planning, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 3. Forest Investigation and Planning Institute of Fujian Province, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** The correlations of dominant tree species of *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* community in Junzifeng Nature Reserve, Fujian Province were analyzed by using 2×2 contingency table, variance ratio ( $R_v$ ),  $\chi^2$ -test, Pearson correlation coefficient test and Spearman rank correlation coefficient test, and the ecological species groups were divided based on principal component analysis (PCA). The results showed that there was not significant negative correlations existed among the 21 dominant tree species, and *Keteleeria fortunei* var.

收稿日期: 2022-05-30 接受日期: 2022-09-15

**基金项目:** 福建君子峰自然保护区维管植物资源调查项目(KH200237A); 福建省特色林木种质资源评价与监测信息应用项目(2021FKJ17)资助  
This work was supported by the Project for Vascular Plant Resources Survey in Junzifeng Nature Reserve of Fujian (Grant No. KH200237A), and the Project for Evaluation and Monitoring Information Application of Characteristic Forest Germplasm Resources in Fujian (Grant No. 2021FKJ17).

作者简介: 陈绪辉(1996 年生), 男, 硕士研究生, 主要从事珍稀植物保护与利用研究。E-mail: fafucxh123@126.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fjzsq@126.com

*cyclolepis* had not significant association with other species. Among 210 species pairs, 110 species pairs were positively correlated, 81 species pairs were negatively correlated, and 19 species pairs were unrelated, with a positive-negative ratio of 1.36. Most species pairs were not significantly correlated each other, and the significantly correlated rate was only 0.48%. The results of Pearson and Spearman rank correlation coefficient test were similar. The number of negative correlation species pairs was greater than that of positive correlation species pairs, and most species pairs were not significantly, and the significantly rates were 6.19% and 7.14%, respectively. Compared with  $\chi^2$ -test, the other two test were more sensitive. The dominant tree species could be divided into four ecological species groups by PCA two-dimensional sequence. The ecological habits and resource requirements of species in the same group were similar, most of them were positively correlated, and interdependence coexisted. There was a negative correlation among species in different ecological species groups, and species pairs competed with each other. The interspecific association of dominant tree species of *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* community was relatively non-significant, and most species were independently distributed. The seedlings were difficult to renew, saplings face greater competitive pressure, and population size is gradually shrinking trend. In order to promote the normal growth and regeneration of *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* population, the seedlings should be protected.

**Key words:** *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis*; Rare and endangered plant; Interspecific association; Ecological species group

种间关系包括种间关联和种间相关性, 两者都是指不同种群在空间上的相互关联性<sup>[1]</sup>, 一直以来是生态研究的热点。种间关联是植物群落中重要的结构和数量特征之一, 是不同种群间相互关系的表达形式以及群落形成和演替的基础<sup>[2]</sup>。研究不同种群间的关联性, 有利于正确认识各物种间的竞争关系, 客观反映物种对环境的适应程度, 对认识群落内部结构、预测种群动态及群落演替趋势有重要意义<sup>[3]</sup>。生态种组是群落中生活型相似物种的集合, 划分生态种组有利于探究不同种群之间的生境隔离机制, 对认识种群间的连通性和维护生态完整性具有重要指导作用<sup>[4]</sup>。近年来, 人们对闽桦(*Betula fujianensis*)<sup>[5]</sup>、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)<sup>[6]</sup>和麻栎(*Quercus acutissima*)<sup>[7]</sup>等植物群落的种间关联性进行研究, 并划分生态种组, 揭示这些植物在群落中的功能地位和种群动态, 为该种群保护提供了科学依据。

江南油杉(*Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis*)系松科(Pinaceae)油杉属常绿乔木, 是油杉(*K. fortunei*)的变种, 为中国特有树种, 国家二级重点保护野生植物<sup>[8]</sup>, 主要分布在我国东南、华南和西南地区, 大多呈散生或局部分布<sup>[9]</sup>。喜光、较耐旱, 根系发达, 树干通直, 材质耐腐, 为建筑、桥梁和家具等优质用材, 具有很高的经济价值<sup>[10]</sup>。目前对江南油杉的研究主要集中在种源<sup>[11]</sup>、幼苗<sup>[12]</sup>、细根生物量<sup>[13]</sup>和

基因<sup>[14]</sup>等方面, 由于野生种群数量少, 生态学相关研究甚为欠缺, 仅李强等<sup>[15]</sup>和罗金旺等<sup>[16]</sup>对其群落结构和物种多样性方面有初步探讨, 难以反映出种群间的共生关系; 另一方面由于生物学特性较特殊, 加上群落干扰严重及环境变化等多方面影响, 导致江南油杉处于濒危状态, 因此亟需开展种群和群落生态学研究, 对其野生种群进行保护。福建君子峰国家级自然保护区残存一处保存较完好的江南油杉天然群落, 群落总面积约为 0.6 hm<sup>2</sup>, 以 6 株江南油杉古树为主, 冠幅大, 树干通直, 平均胸径 113.3 cm, 平均树高达 27.5 m, 最大树龄 700 a。本文研究其乔木层主要树种的种间关联性, 划分生态种组, 并分析江南油杉种群年龄结构, 旨在探明江南油杉与其他树种的种间关系及群落演替趋势, 从而为制定江南油杉种群保护措施提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

福建君子峰国家级自然保护区地处明溪县, 区内江南油杉仅有零星几个分布点, 种群数量稀少, 多不成群落, 唯有夏阳乡紫云村的罗坊水尾(26°21'00" N, 117°28'51" E)江南油杉群落保存较完好。该区域为典型的低山地貌, 海拔 754~756 m, 地势较平坦。属中亚热带海洋性季风气候, 年均温 18 °C,

极端最高温 39.1 °C, 极端最低温 -8 °C, 年均降水量 1 737 mm, 无霜期 260 d。土壤为花岗岩发育成的微酸性土壤, 土层较深厚, 腐殖质层 4~8 cm。群落分层明显, 江南油杉位居第一主林层。乔木层以江南油杉、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、甜槠(*Castanopsis eyrei*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、赤杨叶(*Alniphyllum fortunei*)和南酸枣(*Choerospondias axillaris*)等树种为主; 灌木层种类丰富, 以箬竹(*Indocalamus tessellatus*)为主, 其盖度达 70%, 还有红皮糙果茶(*Camellia crapanelliana*)、光叶山矾(*Symplocos lancifolia*)、褐毛石楠(*Photinia hirsuta*)和杜茎山(*Maesa japonica*)等树种。草本层较单调, 主要由里白(*Diplopterygium glaucum*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)和藁草属(*Carex*)植物等组成。

## 1.2 样地设置与调查

根据群落范围特点, 设置 6 个相邻样地(2 排×3 列), 按“S”形依次编号为 I~VI, 每个样地为 20 m×20 m, 总面积 2 400 m<sup>2</sup>。每个样地划分为 4 个 10 m×10 m 乔木样方, 记录乔木树种(胸径≥5 cm)的种名、株数、胸径、树高、冠幅和坐标等信息。在每个样地四角和中心处取 5 个 5 m×5 m 的灌木样方和 5 个 2 m×2 m 的草本样方, 调查并记录每个小样方中所有植物的种名、株(丛)数、高度和盖度等。计算乔木层各物种在样地中的重要值, 选取重要值大于 1 的物种为研究对象。

## 1.3 数据处理

### 1.3.1 重要值计算

重要值是表征物种在群落中作用和地位的指标<sup>[17]</sup>, 乔木重要值(IV)=(相对多度+相对频度+相对显著度)/3。

### 1.3.2 种群年龄结构划分

根据江南油杉种群的胸径范围, 采用“空间代替时间”的研究方法<sup>[18]</sup>, 用径级代替年龄级, 划分为 9 个龄级。I 级幼苗: DBH<5 cm, 且 H<0.5 m; II 级幼树: DBH<5 cm, 且 H>0.5 m; III 级小树: 5 cm≤DBH<15 cm; IV 级中树: 15 cm≤DBH<25 cm; V 级中树: 25 cm≤DBH<35 cm; VI 级大树: 35 cm≤DBH<45 cm; VII 级大树: 45 cm≤DBH<55 cm; VIII 级老树: 55 cm≤DBH<65 cm; IX 级老树: 65 cm≤DBH。以龄级为横坐标, 对应株数为纵坐标, 绘制江南油杉种群年龄结构图。

### 1.3.3 总体关联性检验

采用 Schluter<sup>[19]</sup>提出的方差比率法(variance ratio,

$R_v$ )测定乔木层主要树种的总体关联性, 并通过统计量( $W$ )检验是否显著<sup>[5]</sup>。计算公式为:  $\delta_T^2 = \sum_{i=1}^S P_i(1-P_i)$ ,  $S_T^2 = (1/N) \sum_{j=1}^N (T_j - t)^2$ ,  $P_i = n_i/N$ ,  $R_v = S_T^2 / \delta_T^2$ , 式中,  $\delta_T^2$  为所有物种出现频度的方差,  $S_T^2$  为物种数的方差,  $P_i$  为物种  $i$  出现的频度,  $S$  为总物种数,  $N$  为总样方数,  $T_j$  为  $j$  样方内出现的物种总数,  $t$  为每个样方的平均物种数,  $n_i$  为物种  $i$  出现的样方数,  $R_v$  为总体关联指数。

在独立性假设条件下,  $R_v$  的期望值为 1。若  $R_v = 1$ , 表示群落物种间无关联; 若  $R_v > 1$ , 表示正关联; 若  $R_v < 1$ , 表示负关联。采用统计量  $W$  ( $W = R_v \times N$ ) 来检验  $R_v$  值偏离 1 的显著程度。如  $x^2_{0.95}(N) \leq W \leq x^2_{0.05}(N)$  的概率为 90%, 则种间关联不显著;  $W < x^2_{0.95}(N)$  或  $W > x^2_{0.05}(N)$ , 种间关联显著。

### 1.3.4 种间关联性分析

参照王伯荪<sup>[20]</sup>的研究方法, 将主要树种相关数据列入 2×2 列联表, 计算  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  的值。 $a$  为 2 物种均出现的样方数,  $b$ 、 $c$  为仅有 1 个物种出现的样方数,  $d$  为 2 个物种都不出现的样方数。由于样方为非连续性取样, 需采用 Yates 连续校正公式

进行校正。  $x^2 = \frac{N[|ad - bc| - 0.5N]^2}{(a+b)(b+d)(c+d)(a+c)}$ , 式中,  $N$

为总样方数。若  $ad > bc$ , 种对间为正相关; 若  $ad < bc$ , 为负相关; 若  $ad = bc$ , 为不相关。当  $x^2 < 3.841$  时, 则  $P > 0.05$ , 说明种对间相互独立; 当  $3.841 < x^2 < 6.635$  时, 则  $0.01 \leq P \leq 0.05$ , 说明关联性显著; 当  $x^2 > 6.635$  时, 则  $P < 0.01$ , 说明关联性极显著。

### 1.3.5 种间相关性分析

以重要值为依据, 采用 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关系数对主要树种间相关性进行测定<sup>[21]</sup>。Pearson 相关系数检验计算公式为:  $r_P(i, k) =$

$\frac{\sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \sum_{j=1}^N (x_{kj} - \bar{x}_k)^2}}$ , 式中,  $r_P(i, k)$  为种  $i$  和种  $k$  在  $j$  样方中的 Pearson 相关系数;  $x_{ij}$  和  $x_{kj}$  分别为种  $i$  和种  $k$  在  $j$  样方中的重要值;  $\bar{x}_i$  和  $\bar{x}_k$  为种  $i$  和种  $k$  在  $j$  样方重要值的平均值;  $N$  为总样方数。

Spearman 秩相关系数检验计算公式为:  $r_S(i, k) = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^N (x_{ij} - x_{kj})^2}{N^3 - N}$ , 式中,  $r_S(i, k)$  为种  $i$  和种  $k$  在  $j$  样方中的 Spearman 秩相关系数;  $x_{ij}$  和  $x_{kj}$  分别为种

$i$  和种  $k$  在  $j$  样方中的秩;  $N$  为总样方数。

### 1.3.6 生态种组划分

根据主要树种在各样方中的重要值, 结合 Pearson 和 Spearman 相关性检验结果, 运用 PCA 二维排序划分生态种组<sup>[22]</sup>, 数据处理在 Excel 2019 和 Origin 2022 软件中完成。

## 2 结果和分析

### 2.1 物种组成及重要值

江南油杉群落乔木层共调查到植物 31 科 50 属 77 种, 其中含 2 种以上的有 15 科, 最多的是樟科 (Lauraceae, 10 种) 和壳斗科 (Fagaceae, 8 种), 其次为冬青科 (Aquifoliaceae)、蔷薇科 (Rosaceae) 和山茶科 (Theaceae) 各 5 种, 漆树科 (Anacardiaceae) 和山矾科 (Symplocaceae) 各 4 种, 安息香科 (Styracaceae)、杜鹃花科 (Ericaceae)、金缕梅科 (Hamamelidaceae) 和五列木科 (Pentaphylacaceae) 各 3 种, 杜英科 (Elaeocarpaceae)、木兰科 (Magnoliaceae)、柿科 (Ebenaceae) 和松科 (Pinaceae) 各 2 种, 其他为单科单属单种。江南油杉的重要值最大 (11.58), 其次是杉木 (11.05) 和甜槠 (10.11), 为该群落的共同优势种; 马尾松 (6.56)、赤杨叶 (5.46) 和南酸枣 (5.32) 为亚优势种; 重要值大于 1 的还有虎皮楠 (*Daphniphyllum oldhamii*, 3.44)、薄叶山矾 (*Symplocos anomala*, 2.40) 和苦槠 (*Castanopsis sclerophylla*, 2.18) 等 15 种 (表 1)。

### 2.2 种群年龄结构

江南油杉种群年龄结构见图 1, 群落内江南油杉共 334 株。第 I 龄级幼苗 288 株, 占总株数的 86.23%, 林分密度为 1 200 ind./hm<sup>2</sup>; 第 II 龄级幼树

仅 17 株, 占总株数的 5.09%, 林分密度为 78.8 ind./hm<sup>2</sup>; 从第 III 龄级后 DBH ≥ 5 cm 的乔木 29 株, 仅占总株数的 8.68%, 其中小树 (第 III 龄级) 13 株, 中树和大树 (第 VI~VIII 龄级) 共 6 株, 老树 (第 VIII~IX 龄级) 7 株, 胸径最大达 159.5 cm。总体来看, 第 I 到 II 龄级株数骤减, 幼苗死亡率极高, 很难向幼树阶段发展; 第 III 龄级后株数减少趋势明显, 表明小树难以通过环境的筛选, 大多数个体在小树阶段就已淘汰。

### 2.3 总体关联性

根据乔木层 21 种主要树种在样方中是否存在

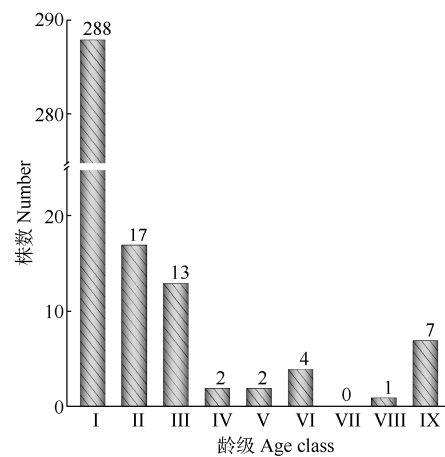


图 1 江南油杉种群年龄结构。I: DBH < 5 cm, H < 0.5 m; II: DBH < 5 cm, H > 0.5 m; III: 5 cm ≤ DBH < 15 cm; IV: 15 cm ≤ DBH < 25 cm; V: 25 cm ≤ DBH < 35 cm; VI: 35 cm ≤ DBH < 45 cm; VII: 45 cm ≤ DBH < 55 cm; VIII: 55 cm ≤ DBH < 65 cm; IX: 65 cm ≤ DBH。

Fig. 1 Age structure of *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis*. I: DBH < 5 cm, H < 0.5 m; II: DBH < 5 cm, H > 0.5 m; III: 5 cm ≤ DBH < 15 cm; IV: 15 cm ≤ DBH < 25 cm; V: 25 cm ≤ DBH < 35 cm; VI: 35 cm ≤ DBH < 45 cm; VII: 45 cm ≤ DBH < 55 cm; VIII: 55 cm ≤ DBH < 65 cm; IX: 65 cm ≤ DBH.

表 1 乔木层主要树种的重要值 (IV)

Table 1 Importance value (IV) of dominant tree species

编号 No.	植物 Species	IV	编号 No.	植物 Species	IV
1	江南油杉 <i>Keteleeria fortunei</i> var. <i>cyclolepis</i>	11.58	12	红皮糙果茶 <i>Camellia crapnelliana</i>	1.88
2	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	11.05	13	红楠 <i>Machilus thunbergii</i>	1.83
3	甜槠 <i>Castanopsis eyrei</i>	10.11	14	榿木 <i>Loropetalum chinense</i>	1.78
4	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	6.56	15	树参 <i>Dendropanax dentiger</i>	1.61
5	赤杨叶 <i>Alniphyllum fortunei</i>	5.46	16	浙江润楠 <i>Machilus chekiangensis</i>	1.48
6	南酸枣 <i>Choerospondias axillaris</i>	5.32	17	米槠 <i>Castanopsis carlesii</i>	1.46
7	虎皮楠 <i>Daphniphyllum oldhamii</i>	3.44	18	芬芳安息香 <i>Styrax odoratissimus</i>	1.41
8	薄叶山矾 <i>Symplocos anomala</i>	2.40	19	黄丹木姜子 <i>Litsea elongata</i>	1.39
9	苦槠 <i>Castanopsis sclerophylla</i>	2.18	20	尖叶川杨桐 <i>Adinandra bockiana</i> var. <i>acutifolia</i>	1.36
10	光叶山矾 <i>Symplocos lancifolia</i>	2.14	21	秀丽锥 <i>Castanopsis jucunda</i>	1.03
11	柯 <i>Lithocarpus glaber</i>	2.00			

的二元矩阵, 计算方差比率( $R_v$ ), 得  $R_v=0.780 < 1$ , 表明 21 个种对间呈负关联。其检验统计量  $W=4.683$ 。根据自由度查  $\chi^2$  表<sup>[23]</sup>, 得  $\chi^2_{0.95}(N)=1.636$ ,  $\chi^2_{0.05}(N)=12.592$ , 检验统计量  $W$  居于两者之间, 说明 21 种主要树种间表现为不显著负关联( $P>0.05$ ), 各物种间虽然有一定联系, 但尚未形成稳定搭配, 存在竞争排斥关系, 对环境资源的利用未达到最佳状态。

### 2.4 主要树种种间关联性

$\chi^2$  检验统计表明(表 2, 图 2), 在 210 个种对中, 正相关的有 110 对, 占 52.38%, 其中仅有苦槠-米槠(*Castanopsis carlesii*)为极显著正相关, 占 0.48%, 其余均为不显著正相关。负相关的有 81 对, 占 38.57%, 均为不显著。不相关的有 19 对, 占 9.05%, 包括杉木-芬芳安息香(*Styrax odoratissimus*)、杉木-黄丹木姜子(*Litsea elongata*)、甜槠-黄丹木姜子和赤杨叶-苦槠等。正负比 1.36, 显著率为 0.48%。 $\chi^2$  检验结果表明江南油杉与其他种群呈不显著相关, 说

明大多数物种为独立分布, 且主要树种对环境的要求有较大差异。

### 2.5 主要树种的种间相关性

Pearson 检验结果表明(表 2, 图 3), 正相关的种对有 95 对, 占 45.24%, 其中极显著、显著和不显著正相关的种对分别为 1、5 和 89 对。负相关的种对有 115 对, 占 54.76%, 其中极显著、显著和不显著负相关的种对分别为 1、6 和 108 对。正负比 0.83, 检验显著率为 6.19%, 说明种间关联极其松散, 大多物种独立分布, 这与  $\chi^2$  检验结果相似。

Spearman 检验结果表明(表 2, 图 4), 乔木层正相关的种对有 96 对, 占 45.72%, 其中极显著、显著和不显著正相关的种对分别为 4、2 和 90 对。负相关的种对有 112 对, 占 53.33%, 其中极显著、显著和不显著负相关的种对分别为 7、2 和 103 对。不相关的种对有 2 对, 占 0.95%。正负比 0.86, 检验显著率为 7.14%。负相关种对数大于正相关种对数,

表 2 乔木层主要树种对间的  $\chi^2$  检验、Pearson 相关检验和 Spearman 秩相关检验

Table 2 Coefficients of  $\chi^2$ -test, Pearson correlation and Spearman rank correlation of dominant tree species

检验方法 Test methods	正相关 Positive correlation				负相关 Negative correlation				不相关 No correlation
	极显著 Most significant	显著 Significant	不显著 No significant	总数 Sum	极显著 Most significant	显著 Significant	不显著 No significant	总数 Sum	
$\chi^2$	1(0.48)	0(0)	109(51.90)	110(52.38)	0(0)	0(0)	81(38.57)	81(38.57)	19(9.05)
Pearson	1(0.48)	5(2.38)	89(42.38)	95(45.24)	1(0.48)	6(2.85)	108(51.43)	115(54.76)	0(0)
Spearman	4(1.91)	2(0.95)	90(42.86)	96(45.72)	7(3.33)	2(0.95)	103(49.05)	112(53.33)	2(0.95)

括号中的数值为百分率。

The values in brackets are percentages.

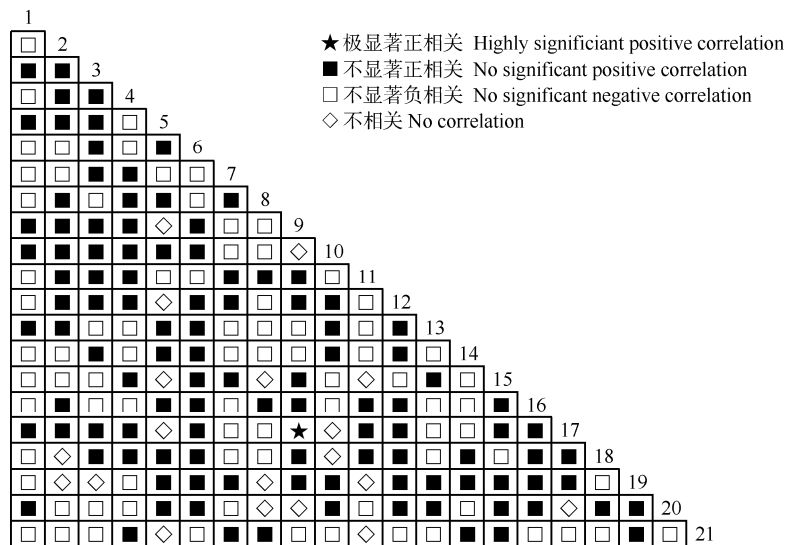


图 2 乔木层主要树种  $\chi^2$  检验半矩阵图。1~21 见表 1。下同

Fig. 2 Semi-matrix diagram of  $\chi^2$ -test of dominant tree species. 1-21 see Table 1. The same below

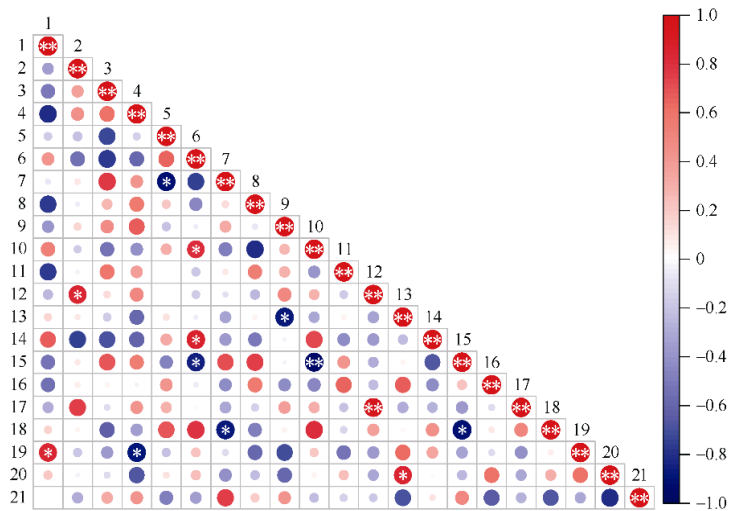


图 3 乔木层主要树种 Pearson 相关性热力图。红色: 正相关; 蓝色: 负相关; 颜色越深, 圆形越大, 表示相关性越强; \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ 。下同  
 Fig. 3 Pearson correlation heat map of dominant tree species. Red: Positive correlation; Blue: Negative correlation. The darker color and larger circle represent a stronger correlation. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ . The same below

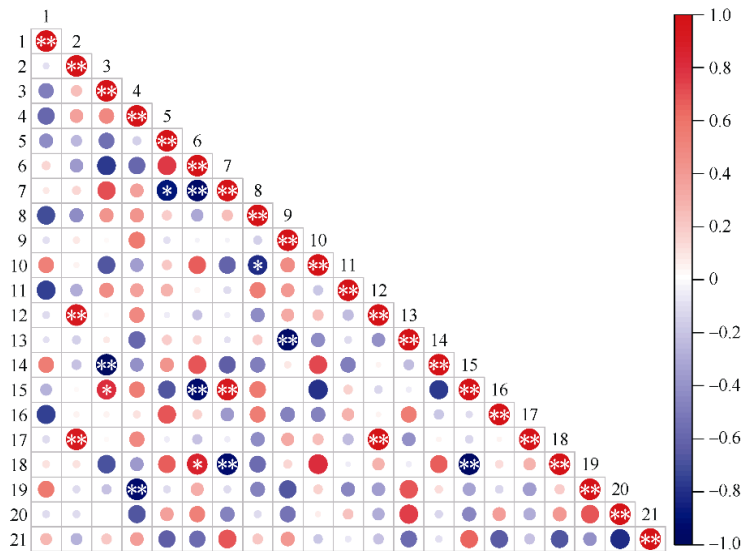


图 4 乔木层主要树种 Spearman 相关性热力图  
 Fig. 4 Spearman correlation heat map of dominant tree

表明物种间彼此存在竞争, 生态位互相分离。这与  $\chi^2$  检验和 Pearson 相关系数检验的结果一致。

**2.6 生态种组的划分**

乔木层主要树种大致可划分为 4 个生态种组(图 5)。第 I 生态种组有虎皮楠、马尾松、秀丽锥 (*Castanopsis jucunda*)、杉木、苦槠、红皮糙果茶和米槠, 该组植物除马尾松外普遍较耐荫, 喜暖湿气候, 适应性较强, 杉木多与其他树种形成针阔混交林。第 II 生态种组有光叶山矾、芬芳安息香、欏木 (*Loropetalum chinense*)、南酸枣和赤杨叶, 该组植物个体数量最多, 生态幅较广, 生境趋于一致,

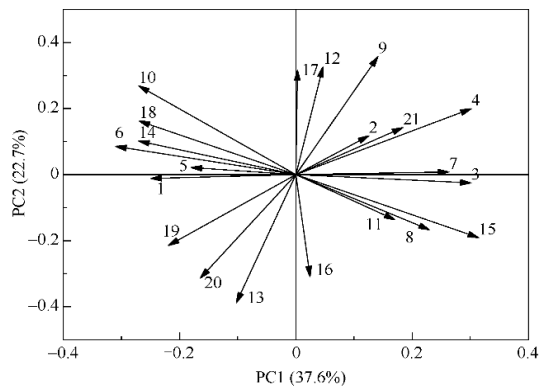


图 5 乔木层主要树种 PCA 二维排序图  
 Fig. 5 PCA two-dimensional sequence diagram of dominant tree species

多生于微酸性土壤,且种间绝大多数呈正相关。第III生态种组包括江南油杉、黄丹木姜子、尖叶杨桐(*Adinandra bockiana* var. *acutifolia*)和红楠(*Machilus thunbergii*),该组植物喜阳又略耐荫,其中江南油杉重要值最大。第VI生态种组有浙江润楠(*Machilus chekiangensis*)、柯(*Lithocarpus glaber*)、薄叶山矾、树参(*Dendropanax dentiger*)和甜槠,该组植物较耐荫,耐寒,萌发力较强,在群落中出现的样方数较少,与其他生态种组树种多呈负相关。

### 3 结论和讨论

#### 3.1 不同检验方法的比较

比较 $\chi^2$ 检验、Pearson 相关系数检验和 Spearman 秩相关系数检验结果表明,3种检验方法结果虽具有一致性,但也存在一定差异,本研究主要反映在以下2个方面:(1) $\chi^2$ 检验中,210个种对间正相关种对数大于负相关种对数,但Pearson 相关系数和Spearman 秩相关系数检验则表现出相反结果;(2) $\chi^2$ 检验显著率仅为0.48%,Pearson 相关系数检验显著率为6.19%,Spearman 秩相关系数检验显著率为7.14%,后两者的显著率略高于 $\chi^2$ 检验。造成差异的原因在于 $\chi^2$ 检验是基于主要树种在该群落样方中是否存在的0、1二元数据作为判断标准,未考虑多度、频度和重要值等信息,仅能判断2物种间是否存在关联性,无法判断关联程度的大小,属于定性检验;而Pearson 相关系数检验和Spearman 秩相关系数检验则是以主要树种在群落样方中的重要值为依据,考虑到了物种在样方中的功能与地位,属于定量检验,能够较准确地反映出 $\chi^2$ 检验中不显著种对的关联程度,如杉木-红皮糙果茶、苦槠-红楠、树参-芬芳安息香等。此外,Pearson 相关系数检验和Spearman 秩相关系数检验也不尽相同,前者属于参数检验,要求物种必须符合正态分布,存在一定局限性;而后者则是一种非参数检验方法,对物种的分布形式没有要求,应用起来相对灵活方便,灵敏度高,如甜槠-榿木、甜槠-树参和薄叶山矾-光叶山矾等种对,在Pearson 相关系数检验中不显著,但Spearman 秩相关系数检验中均表现为显著相关。涂洪润等<sup>[24]</sup>对桂林岩溶石山青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)群落的研究也证实了这一点。由此可见,应将Spearman 秩相关系数检验和Pearson 相关系数检验与 $\chi^2$ 检验充分结合,才能更全面、准确反

映出江南油杉群落主要树种之间的种间关联性。

#### 3.2 种间关联与群落演替的关系

种间关联性与群落演替密切相关,种群间的总体关联性反映群落演替的阶段及其稳定性<sup>[25]</sup>。相关研究认为,随着演替的进行,种对间的正负相关比例也伴随着发生变化,负相关种对呈下降趋势,正相关种对则可能大幅度上升,物种间逐渐趋于独立分布,多物种在群落中共存,群落稳定性逐渐变强,因此越趋向顶级群落演替<sup>[26-27]</sup>。本研究中,江南油杉群落主要树种的总体关联性表现为不显著负关联,负相关种对数大于正相关种对数,表明种间关联性较弱,物种对生境需求具有较大差异,物种组成尚未达到稳定和完善,这与山西五鹿山自然保护区暴马丁香(*Syringa reticulata*)群落木本物种间联结性结果相似<sup>[28]</sup>。主要有以下几方面原因:一是各树种在生长发育和群落演替过程中,受到各方面因素的影响,包括土壤、水分、动物和微生物等<sup>[29]</sup>;二是乔木之间也存在激烈竞争,如江南油杉、马尾松、赤杨叶和南酸枣等树高多在15 m以上,而下木层树高相对较低,树种垂直分层明显,且多以阳性树种为主,对环境资源尤其是光照竞争激烈,各树种在群落中占据不同的生态位。由此可见,江南油杉群落处于演替中期。

江南油杉与杉木和甜槠无显著相关性,且与其他绝大多数树种相关性都不强,与群落中其他树种尚未达到稳定共存格局,这是因为乔木层中的绝对优势种能够充分利用资源和环境,与其他树种不会产生强烈的竞争,有其最适宜的生态位<sup>[30]</sup>。本研究绝大多数种对未达到显著水平,各物种间互相独立。但一些物种之间也存在显著相关,如杉木、红皮糙果茶和米槠彼此间呈极显著正相关或显著相关,原因可能是3树种都较耐荫,喜暖湿气候和深厚酸性土壤,生态学特性具有相似性,能够适应相同生境,在群落中共存。马尾松-黄丹木姜子则表现为显著负相关,两者存在竞争关系。实地调查发现,群落中马尾松多为大型乔木,树形高大,位于第一乔木层,且多集中在V和VI号样地中;而黄丹木姜子多为中小型乔木,在V和VI号样地中均未出现。这可能与树种本身特性的差异有关,马尾松为针叶树,其针叶细小、稀疏,顶端优势明显,因此高生长显著;黄丹木姜子则为阔叶树,叶片长圆状披针形,生长较缓慢,相比之下马尾松更适宜该生境。此外,南酸枣-树参、赤杨叶-虎皮楠也表现为极显著负相关或



显著负相关, 原因可能是南酸枣与赤杨叶为落叶树种, 树参与虎皮楠为常绿树种, 由于两者间的生态学特性不同, 对环境具有不同的生态适应性或相互分离的生态位所致, 也可能与他感作用有关<sup>[31]</sup>。其他影响种间关系的因素很多, 如群落发展演替的不同阶段, 不同树种个体的发育时间、功能性状和谱系多样性的差异等, 今后可对这些因素进行深入探讨, 进一步探究群落中物种种间关系的形成机制。

### 3.3 主要树种生态种组

划分生态种组有利于探讨不同物种间的彼此协同适应机制, 准确表达物种对环境资源和生态因子的适应策略<sup>[32]</sup>。相同生态种组内物种多呈正相关, 如杉木、红皮糙果茶和米槠, 它们处于第I生态种组, 彼此间关联性较强, 对资源利用方式、环境适应能力以及植物群落结构影响等方面具有相似性, 在群落中相互促进和依赖<sup>[24]</sup>。相反, 不同生态种组间的物种则有不同的生物学习性, 这些物种长期适应环境并占据不同资源空间, 马尾松-黄丹木姜子、赤杨叶-虎皮楠、南酸枣-树参、虎皮楠-芬芳安息香等表现为极显著或显著负相关, 因物种生物学特性的差异和相互重叠的生态位, 导致物种间相互排斥, 在群落中表现为竞争关系, 分布在不同的生态种组。这与刘润红等<sup>[33]</sup>对漓江河岸带枫杨(*Pterocarya stenoptera*)群落种间关联的研究结果一致。此外, 在不同生态种组间也发现呈正相关的种对, 相同生态种组间也存在部分负相关种对, 说明重要值和物种生态学特性不是影响生态种组划分的决定因素。由于某些物种频度较小, 或因干扰导致在某些样方中已淘汰, 对生态种组的划分将产生一定影响。此外, 群落面积大小、环境变化、种群变异和演替进程等都可能造成差异的因素<sup>[34]</sup>, 只有充分考虑这些因素, 与植物生态习性结合分析, 才能更加准确地划分生态种组。

本研究中乔木层植物共有 792 株, 而江南油杉只有 29 株, 仅占 3.67%。在母树周围有大量更新幼苗, 但幼树极少, 说明该群落中江南油杉幼苗死亡率高, 长成幼树的可能性较低。江南油杉属阳性树种, 幼苗多集中生于箬竹丛下, 常年处于庇荫环境, 难以获得充足的光照, 导致幼苗过早死亡, 天然更新困难, 这是江南油杉濒危的主要原因<sup>[15]</sup>。其次, 江南油杉种子败育率高、质量低<sup>[35]</sup>, 也可能是导致其濒危的原因之一。江南油杉幼苗对环境的敏感度高, 存活率低, 制约了该种群的自然更新与发展, 如

忽视对幼苗的保护, 其种群在未来一段时间内可能被杉木这类进展种群取代。杉木萌芽更新能力强, 生长快, 且幼、中龄林个体数量多, 将逐步取代江南油杉在群落中的地位, 与甜槠、马尾松和赤杨叶等形成针阔混交林。

江南油杉群落乔木层主要树种的种间关联性较为松散, 大多数物种为独立分布, 幼苗存在更新障碍, 且幼树个体竞争压力较大, 种群规模呈逐渐缩小的趋势。为更有效地保护该地江南油杉天然种群, 建议人工促进江南油杉幼苗更新, 对群落内箬竹等盖度高的小灌木进行适当疏伐, 提高透光率, 改善幼苗生长环境; 同时应尽快建立江南油杉种质资源库, 确保种质资源得到有效保护; 加强人工育苗工作, 促进江南油杉种群的繁育与壮大。

**致谢** 在野外调查过程中, 得到福建君子峰国家级自然保护区管理局的大力支持, 在此深表谢意!

### 参考文献

- [1] ZHANG J, CAIWEN D J, SUONAN C R, et al. The correlation and niche of survival community of *Kengyilia thoroldiana* in Maduo County, Qinghai Province [J]. *Pratacult Sci*, 2019, 36(11): 2752–2765. [张静, 才文代吉, 索南才仁, 等. 青海玛多梭罗以礼草生存群落种间关联及生态位 [J]. *草业科学*, 2019, 36(11): 2752–2765. doi: 10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0310.]
- [2] WU P, PENG X Q, YANG S R, et al. Spatial distribution patterns and correlation of *Tamarix chinensis* population in coastal wetlands of Shandong, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2019, 43(9): 817–824. [吴盼, 彭希强, 杨树仁, 等. 山东省滨海湿地柽柳种群的空间分布格局及其关联性 [J]. *植物生态学报*, 2019, 43(9): 817–824. doi: 10.17521/cjpe.2018.0186.]
- [3] SU S J, LIU J F, HE Z S, et al. Ecological species groups and interspecific association of dominant tree species in Daiyun Mountain National Nature Reserve [J]. *J Mount Sci*, 2015, 12(3): 637–646. doi: 10.1007/s11629-013-2935-7.
- [4] LUO Y H, WU J S, WANG X Y, et al. Understanding ecological groups under landscape fragmentation based on network theory [J]. *Landscape Urban Plan*, 2021, 210: 104066. doi: 10.1016/j.landurbplan.2021.104066.
- [5] GAO W, HUANG Y R, LIN J L, et al. Interspecific correlations among dominant populations of natural forest of endangered species *Betula fujianensis* [J]. *Sci Silv Sin*, 2021, 57(10): 1–14. [高伟, 黄雍容, 林建丽, 等. 濒危树种闽樟天然林优势种群间相关性 [J]. *林业科学*, 2021, 57(10): 1–14. doi: 10.11707/j.1001-7488.20211001.]

- [6] WEN X H, WANG Q B, PAN H, et al. Interspecific associations of the main tree populations of the *Cryptomeria fortunei* community in Tianbaoyan [J]. *J Forest Environ*, 2022, 42(1): 1–10. [温鑫鸿, 王其炳, 潘辉, 等. 天宝岩柳杉群落主要乔木种群的种间联结性 [J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(1): 1–10. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2022.01.001.]
- [7] 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.]
- [8] National Forestry and Grassland Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic China. Perspectives from the list of national key protected wild plant [EB/OL]. (2021-09-08)[2022-05-13]. [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 [EB/OL]. (2021-09-08)[2022-05-13]. <http://www.forestry.gov.cn/main/5461/20210908/162515850572900.html>.]
- [9] YANG M M, HE W G, CHEN W R, et al. Phenotypic traits diversity analysis of seeds of candidate superior trees of *Keteleeria cyclolepis* [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2020, 47(4): 18–21. [杨淼淼, 何文广, 陈文荣, 等. 江南油杉优树种子表型性状的多样性分析 [J]. *福建林业科技*, 2020, 47(4): 18–21. doi: 10.13428/j.cnki.fjlk.2020.04.004.]
- [10] LIU X S, XIAO Y F, WANG Y, et al. Anatomical structures of vegetative organs of *Keteleeria fortunei* (Murr.) Carr. var. *cyclolepis* (Flous) Silba and its ecological adaptability [J]. *Plant Sci J*, 2020, 38(1): 39–46. [刘雄盛, 肖玉菲, 王勇, 等. 江南油杉营养器官的解剖结构及其生态适应性 [J]. *植物科学学报*, 2020, 38(1): 39–46. doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2020.10039.]
- [11] LIU F, ZHOU L T, JIANG Y, et al. Physiological response from different provenances of *Keteleeria fortunei* seedlings to drought stress [J]. *J CS Univ For Technol*, 2018, 38(11): 35–45. [刘菲, 周隆腾, 蒋焱, 等. 不同种源江南油杉幼苗对干旱胁迫的生理响应 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(11): 35–45. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.11.006.]
- [12] ZHANG P, PANG S J, LIU S L, et al. Effects of slow release fertilizer on growth of *Keteleeria fortunei* seedlings cultured in container [J]. *J NW Agric For Univ (Nat Sci)*, 2021, 49(9): 92–98. [张培, 庞圣江, 刘士玲, 等. 缓释肥对江南油杉容器苗生长的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(9): 92–98. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2021.09.011.]
- [13] HE Y H, JIANG Y, HUANG R L, et al. Spatial structure of fine root biomass and its response to soil moisture of *Keteleeria cyclolepis* Flous [J]. *J CS Univ For Technol*, 2021, 41(1): 151–158. [何应会, 蒋焱, 黄荣林, 等. 江南油杉细根生物量空间分布及其对土壤水分的响应 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(1): 151–158. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.01.016.]
- [14] LIU X S, JIANG Y, WEI S X, et al. Establishment of the ISSR-PCR reaction system and primers screening in *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* [J]. *Guangxi For Sci*, 2017, 46(3): 266–270. [刘雄盛, 蒋焱, 韦铄星, 等. 江南油杉 ISSR-PCR 反应体系建立与引物筛选 [J]. *广西林业科学*, 2017, 46(3): 266–270. doi: 10.19692/j.cnki.gfs.2017.03.007.]
- [15] LI Q, HUANG R L, LIU X S, et al. Community structure characteristics of *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* natural forest in Nandan County, Guangxi [J]. *Guangxi For Sci*, 2019, 48(2): 183–189. [李强, 黄荣林, 刘雄盛, 等. 广西南丹县江南油杉天然林群落结构特征 [J]. *广西林业科学*, 2019, 48(2): 183–189. doi: 10.19692/j.cnki.gfs.2019.02.009.]
- [16] LUO J W. Community structure and plant diversity of *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* in Guangze County of Fujian Province [J]. *Prot For Sci Technol*, 2016(4): 11–16. [罗金旺. 福建光泽江南油杉群落结构与植物多样性 [J]. *防护林科技*, 2016(4): 11–16. doi: 10.13601/j.issn.1005-5215.2016.04.003.]
- [17] SUN J J, SHEN A H, HUANG Y J, et al. Quantitative classification and ordination of *Zelkova schneideriana* habitat in Zhejiang Province [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2019, 43(4): 85–93. [孙杰杰, 沈爱华, 黄玉洁, 等. 浙江省大叶榉树生境地群落数量分类与排序 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(4): 85–93. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.201809027.]
- [18] WANG C H, CHEN X, WANG B Z, et al. Population structure and dynamics of *Reevesia pubescens* var. *xuefengensis* in the Gaowangjie National Nature Reserve of Hunan Province [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2022, 46(3): 57–64. [王春晖, 陈昕, 王本忠, 等. 湖南高望界国家级自然保护区雪峰山梭罗种群结构与动态特征 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(3): 57–64. doi: 10.12302/j.issn.1000-2006.202105012.]
- [19] SCHLUTER D. A variance test for detecting species associations, with some example applications [J]. *Ecology*, 1984, 65(3): 998–1005. doi: 10.2307/1938071.
- [20] WANG B S, PENG S L. Studies on the measuring techniques of interspecific association of lower-subtropical evergreen-broadleaved forests. I. The exploration and the revision on the measuring formulas of interspecific association [J]. *Acta Phytocool Geobot Sin*, 1985, 9(4): 274–285. [王伯荪, 彭少麟. 南亚热带常绿阔叶林种间联结测定技术研究. I. 种间联结测式的探讨与修正 [J]. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1985, 9(4): 274–285.]

- [21] ZHANG J T. Quantitative Ecology [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2011: 105–109. [张金屯. 数量生态学 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2011: 105–109.]
- [22] JIN S, WU K S. Niche and interspecific association of dominant species in herb layer of burned *Pinus tabulaeformis* forest in the southern Taihang Mountain of northern China [J]. J Beijing For Univ, 2021, 43(4): 35–46. [金山, 武楷帅. 太行山南段油松林火烧迹地优势草本生态位及种间关系 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(4): 35–46. doi: 10.12171/j.1000-1522.20210044.]
- [23] DU R Q. Biostatistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 277–278. [杜荣骞. 生物统计学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 277–278.]
- [24] TU H R, LI J F, YANG L T, et al. Interspecific associations of the main tree populations of the *Cyclobalanopsis glauca* community in Karst hills of Guilin, southwest China [J]. Chin J Appl Ecol, 2019, 30(1): 67–76. [涂洪润, 李娇凤, 杨丽婷, 等. 桂林岩溶石山青冈群落主要乔木树种的种间关联 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 67–76. doi: 10.13287/j.1001-9332.201901.018.]
- [25] 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.]
- [26] 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 [J]. Sci Rep, 2017, 7(1): 6604. doi: 10.1038/s41598-017-06689-9.
- [27] LIU L T, WANG X D, WEN Q, et al. Interspecific associations of plant populations in rare earth mining wasteland in southern China [J]. Int Biodeteriorat Biodegradat, 2017, 118: 82–88. doi: 10.1016/j.ibiod.2017.01.011.
- [28] YANG Z J, ZHANG Q D, LI H, et al. Inter-specific correlations among dominant populations of woody *Syringa reticulata* communities in Wulu Mountain Nature Reserve, Shanxi Province of China [J]. Plant Sci J, 2013, 31(1): 42–48. [杨兆静, 张钦弟, 李豪, 等. 山西五鹿山自然保护区暴马丁香群落木本植物种间联结性分析 [J]. 植物科学学报, 2013, 31(1): 42–48. doi: 10.3724/SPJ.1142.2013.10042.]
- [29] JIN J Y, QIN W G, TAN W N, et al. Interspecific association among dominant populations in endangered plant *Kmeria septentrionalis* communities [J]. J W China For Sci, 2013, 42(3): 86–94. [金俊彦, 覃文更, 谭卫宁, 等. 濒危植物单性木兰群落主要种群种间联结性研究 [J]. 西部林业科学, 2013, 42(3): 86–94. doi: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2013.03.001.]
- [30] JIAN M F, LIU Q, 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, 朱筠, 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.]
- [31] ZHU L J, SU Z X, WANG W W, et al. Numerical analysis on inter-specific relationships in *Davidia involucrata* community in Sanjiang Wolong Nature Reserve [J]. Chin J Ecol, 2005, 24(10): 1167–1171. [朱利君, 苏智先, 王伟伟, 等. 卧龙自然保护区三江珙桐群落种间关系的数量分析 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1167–1171.]
- [32] CHEN Q, CHEN J, ZHONG J J, et al. Interspecific association and functional group classification of the dominant populations in shrub layer in secondary forest of *Pinus tabulaeformis* in Qinling Mountain, China [J]. Chin J Appl Ecol, 2018, 29(6): 1736–1744. [陈倩, 陈杰, 钟娇娇, 等. 秦岭山地油松天然次生林灌木层主要种群种间联结性与功能群划分 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1736–1744. doi: 10.13287/j.1001-9332.201806.004.]
- [33] 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.]
- [34] DING W H, LI X Z, JIANG J Y, et al. Numerical analysis of inter-specific relationships in the estuary salt marsh plant community of southern Chongming Dongtan, Shanghai [J]. Chin J Appl Ecol, 2016, 27(5): 1417–1426. [丁文慧, 李秀珍, 姜俊彦, 等. 崇明东滩南部河口盐沼植物群落种间关系的数量分析 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1417–1426. doi: 10.13287/j.1001-9332.201605.006.]
- [35] JIANG Y, LIU F, LIU X S, et al. Preservation and evaluation of germplasm resources of precious local tree species *Keteleeria fortune* var. *cyclolepis* and construction of strong seedling breeding system [J]. Guangxi For Sci, 2022, 51(1): 1–9. [蒋焱, 刘菲, 刘雄盛, 等. 珍贵乡土树种江南油杉种质资源保存评价及壮苗繁育体系构建技术 [J]. 广西林业科学, 2022, 51(1): 1–9. doi: 10.19692/j.issn.1006-1126.2022.0101.]