浙 江 农 林 大 学 学 报, 2026, **43**(5): 1015−1024 https://zlxb.zafu.edu.cn
Journal of Zhejiang A&F University DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20250623

引用格式: 孙智, 尤民其, 郑语眉, 等. 亚热带浙东南地区主要森林类型群落结构分析[J]. 浙江农林大学学报, 2026, **43**(5): 1015−1024. SUN Zhi, YOU Minqi, ZHENG Yumei, *et al*. Analysis of community structures of main forest types in the subtropical region of Southeastern Zhejiang[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, **43**(5): 1015−1024.

亚热带浙东南地区主要森林类型群落结构分析

孙 智[1]，尤民其[2]，郑语眉[3]，朱 昳[4]，孙苒祎[1]，李莹玮[1]，
卢嘉鸣[1]，刘家乐[1]，张 军[5]，王 江[1]

（1. 台州学院 生命科学学院，浙江 台州 318000；2. 台州市黄岩区森林病虫防治检疫站，浙江 台州 318025；
3. 台州市生态环境局黄岩分局，浙江 台州 318025；4. 台州市黄岩区林业技术推广总站，浙江 台州 318025；
5. 三门县林业技术推广总站，浙江 三门 317300）

摘要：【目的】揭示浙东南地区常绿阔叶林群落结构特征及演替状态，为生物多样性保护和森林经营管理提供依据。**【方法】**在台州地区山地森林植被区域设置 31 个 400 m^2 固定样地，调查乔木种类、胸径和树高等指标，统计群落多样性指数、径级结构、生态位及种间关联性等参数。**【结果】**共记录乔木物种 47 科 88 属 128 种，木荷 *Schima superba* 为建群种 (重要值为 14.83%)，杉木 *Cunninghamia lanceolata*、青冈栎 *Quercus glauca*、窄基红褐柃 *Eurya rubiginosa* 等物种重要值次之。根据群落物种组成及结构特征将群落分为常绿落叶阔叶混交林、常绿阔叶林、针阔混交林，Margalef 丰富度、Simpson 优势度和 Shannon-Wiener 多样性指数在各群落间差异不显著，Pielou 均匀度常绿落叶阔叶混交林最高，常绿阔叶林最低，存在显著差异 (P＜0.05)。径级结构总体呈倒“J”型。15 个优势树种 Levins 生态位宽度为 2.97~12.62，生态位重叠指数平均值为 0.26，种间关系以正联结为主。**【结论】**浙东南台州地区森林群落以木荷为建群种，壳斗科 Fagaceae、杜鹃花科 Ericaceae 和山茶科 Theaceae 为主要优势科。群落径级结构呈倒“J”型分布，表明群落自然更新良好。种间生态位重叠较低，种间关系以正联结为主，群落整体结构趋于稳定。图 5 表 3 参 40

关键词：常绿阔叶林；物种多样性；群落结构；生态位；种间关系；浙东南
中图分类号：S718.5 **文献标志码：**A **文章编号：**2095-0756(2026)05-1015-10

Analysis of community structures of main forest types in the subtropical region of Southeastern Zhejiang

SUN Zhi[1]，YOU Minqi[2]，ZHENG Yumei[3]，ZHU Yi[4]，SUN Ranyi[1]，LI Yingwei[1]，LU Jiaming[1]，
LIU Jiale[1]，ZHANG Jun[5]，WANG Jiang[1]

（1. College of Life Sciences, Taizhou University, Taizhou 318000, Zhejiang, China; 2. Forest Pest Control and Quarantine Station of Huangyan District, Taizhou, Taizhou 318025, Zhejiang, China; 3. Huangyan Branch of Taizhou Municipal Bureau of Ecology and Environment, Taizhou 318025, Zhejiang, China; 4. Forestry Technology Promotion Station of Huangyan District, Taizhou, Taizhou 318025, Zhejiang, China; 5. Forestry Technology Promotion Station of Sanmen County, Sanmen 317300, Zhejiang, China）

Abstract: ［**Objective**］ The study aims to reveal the community structure characteristics and succession status of evergreen broad-leaved forests in Southeastern Zhejiang, and provide a basis for biodiversity conservation and forest management. ［**Method**］ In the mountainous forest vegetation area of Taizhou, 31 fixed plots of 400 m^2 were established. Tree species, diameter at breast height, and tree height were surveyed. Parameters such as community diversity indices, diameter class structure, niche, and interspecific associations were calculated. ［**Result**］ A total of 128 tree species belonging to 88 genera and 47 families were recorded. *Schima superba* was the constructive species (importance value 14.83%), followed by *Cunninghamia lanceolata*, *Quercus*

收稿日期：2025-12-23；修回日期：2026-04-21
基金项目：国家自然科学基金项目 (32571948)；三门县社会发展项目 (25202)
作者简介：孙智 (ORCID: 0009-0008-3857-3062)，从事植物生态学研究。E-mail: 2675309174@qq.com。通信作者：张军 (ORCID: 0009-0003-2742-2596)，工程师，从事森林培育研究。E-mail: 3584574538@qq.com

glauca, and *Eurya rubiginosa*. Based on community species composition and structural characteristics, the communities were classified into evergreen-deciduous broad-leaved mixed forest, evergreen broad-leaved forest, and coniferous-broadleaved mixed forest. Margalef richness, Simpson dominance, and Shannon-Wiener diversity indices showed no significant differences among communities. Pielou evenness was highest in evergreen-deciduous broad-leaved mixed forest and lowest in evergreen broad-leaved forest, with a significant difference ($P<0.05$). The diameter class structure generally exhibited a reverse "J" shape. The Levins niche breadth of 15 dominant tree species ranged from 2.97 to 12.62, with an average niche overlap index of 0.26. Interspecific relationships were mainly positive. [**Conclusion**] The forest communities in the Taizhou area of Southeastern Zhejiang take *S. superba* as the constructive species, with the families Fagaceae, Ericaceae, and Theaceae being the dominant taxa. The diameter-class structure of the communities exhibits an inverse "J" distribution pattern, indicating favorable natural regeneration of the communities. The interspecific niche overlap is relatively low, and the interspecific relationships are dominated by positive associations, suggesting that the overall structure of the communities tends to be stable. [Ch, 5 fig. 3 tab. 40 ref.]

Key words: evergreen broad-leaved forest; species diversity; community structure; niche; interspecific relationships; Southeastern Zhejiang

森林群落作为生态系统的主体，在维持区域生态平衡、水源涵养、生物多样性保育及碳汇功能等方面具有重要作用[1]。其中亚热带群落类型丰富、结构复杂，具有优越的水热条件与丰富的物种组成，并随地形与气候梯度变化形成明显的植被类型分异[2]。常绿落叶阔叶混交林、常绿阔叶林与针阔混交林作为亚热带森林的主要林分类型，不仅在空间上呈过渡性与镶嵌性分布格局，也在时间尺度上反映了气候变迁与植被演替的动态过程。浙江东南部属中亚热带湿润季风气候，水热条件优越，是常绿阔叶林分布的典型区域[3]。然而，受长期人类活动干扰，该地区原生性常绿阔叶林多已退化为次生林或混交林[4]。对现存森林植被结构特征进行研究，对揭示其演替机制、指导森林保护与修复具有重要意义。

森林演替过程中，物种组成、径级分布、生态位及种间关系是判断其演替特征与稳定性的关键指标[5]。物种组成能够反映群落对环境过滤与干扰历史的综合响应，并指示优势种的形成与替代过程，从而揭示群落潜在的演替方向与结构演变趋势。HE 等[6] 认为随着演替推进，群落结构逐渐复杂化，物种多样性及功能分化程度提高，种间关系也由简单竞争转向多维度的互补与协同，体现生态系统对资源利用效率与抗干扰能力的增强。盘远方等[7] 研究发现：径级结构作为表征种群更新与生长动态的核心指标，可用于评估森林的年龄结构与更新连续性。小径级个体占优势通常意味着更新补充充分、群落处于动态维持状态，而大径级个体匮乏则可能暗示历史扰动导致的结构重置或演替尚未达到成熟阶段。HARDY 等[8]、徐锦海等[9] 则认为生态位特征可揭示物种资源利用策略，宽生态位物种环境适应性强，具竞争优势；窄生态位物种则多依赖特定生境，对环境变化较为敏感。种间联结性则从空间共现角度反映物种间相互依存或排斥关系，正联结通常意味着共同生境偏好、正相互作用或扩散限制导致的聚集分布，而负联结则可能与资源竞争、生境分化或演替阶段差异有关[10]。综合上述指标可系统诊断群落演替状态并预测其发展方向。

台州市西部山区作为浙江东南部重要的生态节点，拥有典型的人为影响后的次生演替植被。已有研究多集中于物种编目与多样性描述，缺乏从结构、生态位与种间关系等多维度的系统量化分析[11]。本研究以台州市黄岩区西部山地植被为研究对象，采用固定样方调查方法，设置了 31 个 20 m×20 m 的固定样方，对每个样方的物种组成特征、径级结构、生态位以及种间关系进行分析，探讨该区域森林群落的物种共存机制与演替规律。研究结果将为深入理解区域生物多样性的形成与维持机制提供数据支持，并为森林群落的生态恢复、多样性维持、稳定性提升及树种结构优化等提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于浙江省东南地区，靠近沿海，东与椒江区、路桥区相连，南与温岭市、乐清市毗连，

西接永嘉县，北接临海市。地理坐标介于 28°27′~28°41′N，120°47′~121°20′E，区境形状狭长，东西长约 55 km，南北宽约 25 km，面积为 988 km^2。该地区属于中亚热带季风气候，年均气温为 17.6 ℃ (极端高温为 38.2 ℃，极端低温为–4.5 ℃)，年均降水量为 1 523 mm，其中 5—9 月降水量占全年降水量的 68%，年均相对湿度为 78%。无霜期长达 265 d (初霜日在 11 月下旬，终霜日在 3 月上旬)。受台风频繁影响 (年均 2.3 次)，最大风速可达 32 m·s^{-1}。区域土壤以红壤和黄壤为主，原生植被为中亚热带常绿阔叶林。

1.2　样地设置及调查

2023 年和 2024 年 9—12 月，在台州黄岩区自然保护地范围内，选取受人类干扰较少且林分比较均一的区域，设立 31 个 20 m×20 m 固定样地 (表 1)。样地使用 RTK 测量仪定位，以西南角为原点，从原点出发，横轴 (x 轴) 向正东方向，纵轴 (y 轴) 向正北方向，设置 20 m×20 m 的正方形，并划分为 16 个 5 m×5 m 的小样方，调查每个样方内胸径 (D_{BH})≥1 cm 的木本植物个体的种名、树高、胸径及相对位置。依据研究区森林群落的物种组成与结构特征，将群落分为 3 类：常绿落叶阔叶混交林、常绿阔叶林、针阔混交林。

表 1　固定样地信息

Table 1　Permanent plot information

样地编号	中心点纬度N/(°)	中心点经度E/(°)	海拔/m	优势种	植被类型	样地编号	中心点纬度N/(°)	中心点经度E/(°)	海拔/m	优势种	植被类型
1	28.685 278 15	121.117 041 60	305.46	木荷	常绿阔叶林	17	28.531 432 57	121.164 078 40	213.46	木荷	针阔混交林
2	28.696 807 18	121.121 234 20	369.11	白栎	常绿落叶阔叶混交林	18	28.531 614 58	121.164 283 30	210.74	木荷	针阔混交林
3	28.687 075 24	121.146 160 50	112.24	柏木	针阔混交林	19	28.531 799 56	121.164 488 60	217.79	木荷	针阔混交林
4	28.519 155 54	120.964 042 50	284.49	少叶黄杞	常绿落叶阔叶混交林	20	28.527 613 56	121.238 331 80	78.45	杉木	针阔混交林
5	28.523 588 70	120.964 625 60	296.82	青冈栎	针阔混交林	21	28.527 794 56	121.238 492 70	68.08	杉木	针阔混交林
6	28.634 171 67	121.279 002 20	312.77	木荷	常绿阔叶林	22	28.527 976 23	121.238 653 50	60.58	杉木	针阔混交林
7	28.629 007 71	121.278 936 90	426.40	青冈栎	针阔混交林	23	28.528 159 62	121.238 814 50	54.07	杉木	针阔混交林
8	28.549 152 17	121.162 193 20	160.74	杉木	针阔混交林	24	28.528 333 15	121.238 975 60	49.43	杉木	针阔混交林
9	28.552 828 82	121.158 197 10	145.55	枫香	针阔混交林	25	28.506 585 27	120.961 054 60	690.47	木荷	针阔混交林
10	28.682 204 63	121.123 045 40	119.30	木荷	常绿阔叶林	26	28.506 763 49	120.961 234 50	677.72	木荷	针阔混交林
11	28.682 207 60	121.123 244 30	132.16	木荷	常绿阔叶林	27	28.506 944 70	120.961 415 60	663.63	木荷	针阔混交林
12	28.682 210 57	121.123 443 20	150.43	木荷	常绿阔叶林	28	28.507 123 25	120.961 595 40	658.49	木荷	针阔混交林
13	28.682 213 53	121.123 642 10	168.54	木荷	常绿阔叶林	29	28.507 305 19	120.961 775 00	651.39	木荷	针阔混交林
14	28.682 216 48	121.123 839 60	168.88	木荷	常绿阔叶林	30	28.549 045 67	121.291 133 80	15.61	桑	常绿阔叶林
15	28.531 074 60	121.163 668 70	213.78	木荷	针阔混交林	31	28.549 303 97	121.291 583 30	15.85	榔榆	常绿落叶阔叶混交林
16	28.531 257 17	121.163 873 60	214.12	木荷	针阔混交林						

说明：木荷 *Schima superba*；白栎 *Quercus fabri*；柏木 *Cupressus funebris*；少叶黄杞 *Engelhardia roxburghiana*；青冈栎 *Quercus glauca*；杉木 *Cunninghamia lanceolata*；枫香 *Liquidambar formosana*；桑 *Morus alba*；榔榆 *Ulmus parvifolia*。

1.3　数据处理

1.3.1　重要值　重要值是反映物种在群落中重要性的定量指标，用于比较不同群落间某一物种在群落中的重要性，通过重要值分析树种在森林群落中的地位和优势程度，计算公式参考文献 [12]。

1.3.2　物种多样性　物种多样性指数用于刻画群落的物种多样性，本研究采用 4 类常用指标：Margalef 指数可以量化群落的物种数量[13]；Simpson 指数可以评估群落的优势种集中程度[14]；Shannon-Wiener 指数可以衡量群落的综合物种多样性水平[15]；Pielou 指数可以分析群落中物种个体数分布的均匀性[16]。计算公式参见文献 [17]。

1.3.3　径级结构　径级结构是反映森林群落种群年龄结构、更新状况与演替阶段的重要指标[18]，依据植被径级的调查结果，分为 6 个等级：Ⅰ级 (1 cm≤D_{BH}<5 cm)，Ⅱ级 (5 cm≤D_{BH}<10 cm)，Ⅲ级 (10 cm≤

D_{BH}<20 cm)，Ⅳ级 (20 cm≤D_{BH}<30 cm)，Ⅴ级 (30 cm≤D_{BH}<40 cm)，Ⅵ级 (D_{BH}≥40 cm)。

1.3.4 生态位 采用 Levins 生态位宽度指数 (B_L) 和 Shannon-Wiener 生态位宽度 (B_{SW}) 2 种度量方法，并使用 Pianka 生态位重叠指数 (O_{ik}) 评估群落优势种之间的生态位重叠[19]。O_{ik}的值域为 [0, 1]，值越小，生态位重叠度越小，值越大，生态位重叠度越大。

1.3.5 种间关系 采用物种联结性 χ^2 统计量测定种间关联性，以确定实测值与期望值之间偏差的显著程度。以联结系数 (A_C) 检验种间联结强度，对 χ^2 检验结果进一步补充。计算公式参考文献 [20]。

χ^2 检验：

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

其中，n 为总样地数；a 为两物种同时出现的样地数；b 和 c 为任一物种单独出现的样地数；d 为两物种均未出现的样地数。当 2×2 联列表中 $ad>bc$，两物种间为正联结；$ad<bc$，两物种间为负联结；$ad=bc$，两物种相互独立。查表可知：若$\chi^2>6.63$，则种间联结为极显著 ($P<0.01$)，$3.84\leqslant\chi^2<6.63$，则种间联结为显著 ($0.01<P<0.05$)，$\chi^2<3.84$，则种间联结为不显著 ($P>0.05$)。

联结系数 (A_C)：

$$ad\geqslant bc，A_C=\frac{ad-bc}{(a+b)(b+d)}；$$

$$ad<bc且d\geqslant a，A_C=\frac{ad-bc}{(a+b)(b+c)}；$$

$$ad<bc且d<a，A_C=\frac{ad-bc}{(b+d)(c+d)}。$$

其中，A_C 的值域为 [−1, 1]，A_C 越接近−1 则种对间联结程度越趋向负联结；A_C 为 0 表示种对间没有联结；A_C 越接近 1 则种对间联结程度越趋向正联结。

1.3.6 统计分析 根据重要值对样地内优势种进行统计分析，计算每个样方 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数，采用 KRUSKAL-WALLIS[21] 方法分析群落多样性指数差异。采用 Pianka 生态位重叠指数评估群落优势种之间的生态位重叠，χ^2 检验与联结系数 (A_C) 分析种间关系，采用 Origin 2024 绘图。

2 结果与分析

2.1 物种组成及多样性分析

共记录乔木植物 47 科 88 属 128 种，共计 6 176 株。其中优势物种主要有木荷 *Schima superba*、杉木 *Cunninghamia lanceolata*、青冈栎 *Quercus glauca*、窄基红褐柃 *Eurya rubiginosa*、薄叶山矾 *Symplocos anomala*、赤楠 *Syzygium buxifolium* 等。优势科为杜鹃花科 Ericaceae、壳斗科 Fagaceae，其次是山茶科 Theaceae、山矾科 Symplocaceae 等。优势属为冬青属 *Ilex*、山矾属 *Symplocos*，其次是山茶属 *Camellia*、杜鹃花属 *Rhododendron* 等。

木荷重要值为 14.83%，是主要优势种，其次是杉木、青冈栎、窄基红褐柃、薄叶山矾、赤楠等，重要值为 3.42%~3.67% (图 1)。其余树种如赤楠、檵木 *Loropetalum chinense* 等 10 余种的重要值均低于 3%，属于亚乔木层和灌木层的主要物种。Margalef 丰富度、Simpson 优势度、Shannon-Wiener 多样性

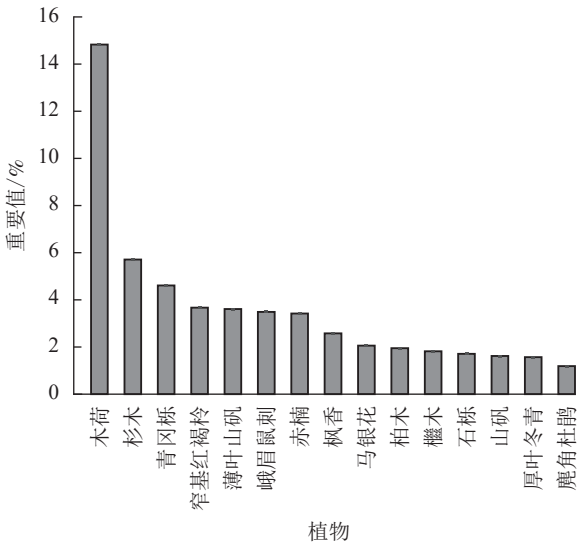


图 1 森林群落相对重要值前 15 的植物

Figure 1 Top 15 species by relative importance value in the forest

指数在 3 类群落间均不存在显著差异，而 Pielou 均匀度指数则存在显著差异 (表 2)。常绿落叶阔叶混交林 Pielou 均匀度指数显著高于亚热带常绿阔叶林和亚热带针阔混交林 ($P<0.05$)，而亚热带常绿阔叶林与亚热带针阔混交林之间差异不显著。

表 2　常绿阔叶林不同林分群落物种多样性

Table 2　Species diversity of different stand communities in evergreen broad-leaved forests

林分	Margalef 丰富度	Simpson 优势度	Shannon-Wiener多样性	Pielou 均匀度
常绿落叶阔叶混交林	3.39±1.86	0.84±0.07	2.09±0.64	0.83±0.03
常绿阔叶林	5.77±1.57	0.86±0.07	2.48±0.46	0.71±0.09
针阔混交林	4.54±1.39	0.85±0.02	2.30±0.27	0.72±0.04
P	0.195	0.508	0.351	0.049*

说明：数据为平均值±标准差；*表示 3 种林分存在显著差异 ($P<0.05$)。

2.2　森林群落径级分布

径级结构总体呈现倒“J”型分布，集中于小径级个体 (图 2)。Ⅰ级 (1 cm≤D_{BH}<5 cm) 共有 4 087 株，远高于其他群落；Ⅱ级 (5 cm≤D_{BH}<10 cm) 和Ⅲ级 (10 cm≤D_{BH}<20 cm) 分别为 1 039 株和 840 株。Ⅳ级 (20 cm≤D_{BH}<30 cm)、Ⅴ级 (30 cm≤D_{BH}<40 cm) 和Ⅵ级 (D_{BH}≥40 cm) 分别为 188、19 和 3 株。

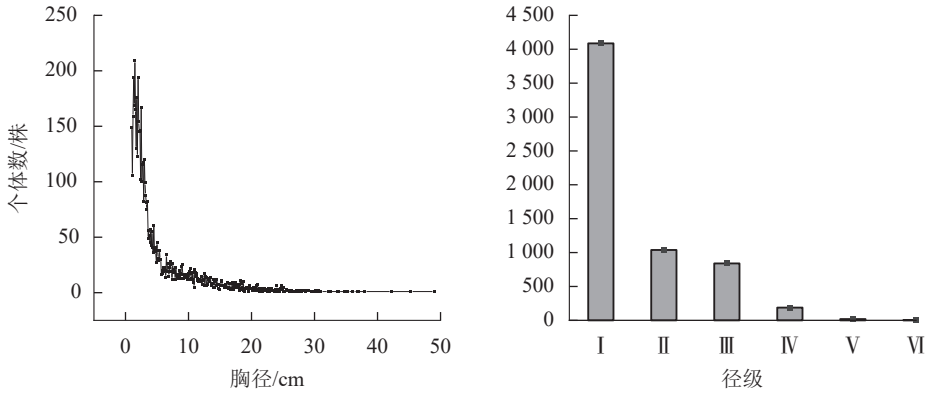


图 2　森林群落径级分布

Figure 2　Diameter class distribution of the forest communities

2.3　生态位分析

表 3 显示：15 个优势种的 Levins 生态位宽度为 2.97~12.62 (均值为 7.15)，Shannon-Wiener 生态位宽度为 1.28~2.67 (均值为 2.15)。峨眉鼠刺 *Itea omeiensis* 与檵木的 Shannon-Wiener 生态位宽度最高 (2.67)，木荷、窄基红褐柃次之 (2.60~2.66)，反映这些物种在资源利用上具有较高的均匀性与适应性；而柏木 *Cupressus funebris* (1.28) 与赤楠 (1.64) Levins 生态位宽度最低，表现出明显的生态专化特征。

表 3　森林群落优势物种生态位宽度

Table 3　Niche breadth of the dominant species in forest communities

物种名	Levins生态位宽度	Shannon-Wiener 生态位宽度	物种名	Levins生态位宽度	Shannon-Wiener 生态位宽度
木荷*Schima superba*	10.13	2.66	马银花*Rhododendron ovatum*	5.36	1.96
杉木*Cunninghamia lanceolata*	10.01	2.53	柏木*Cupressus funebris*	2.97	1.28
青冈栎*Quercus glauca*	7.70	2.39	檵木*Loropetalum chinense*	11.04	2.67
窄基红褐柃*Eurya rubiginosa*	9.81	2.60	石栎*Lithocarpus glaber*	7.41	2.25
薄叶山矾*Symplocos anomala*	4.66	1.68	山矾*Symplocos sumuntia*	6.13	2.39
峨眉鼠刺*Itea omeiensis*	12.62	2.67	厚叶冬青*Ilex elmerrilliana*	4.15	1.78
赤楠*Syzygium buxifolium*	3.60	1.64	鹿角杜鹃*Rhododendron latoucheae*	4.26	1.53
枫香*Liquidambar formosana*	7.46	2.26			

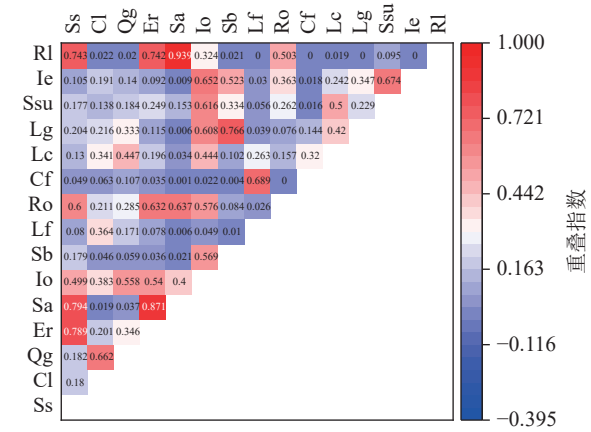
在 105 组种对中，存在生态位重叠的共计 100 对，占比 95.24%，重叠指数均值为 0.26 (图 3)。重叠指数≥0.50 的种对占 21.90% (23 对)，<0.50 的种对占 78.10% (82 对)。薄叶山矾与鹿角杜鹃 *Rhododendron latoucheae* 重叠指数最高 (0.94)。木荷与其余 14 个优势种均存在不同程度重叠，平均重叠指数为 0.30，其中与薄叶山矾重叠最高 (0.91)。杉木平均重叠指数为 0.27，与峨眉鼠刺 (0.72)、檵木 (0.65)

及马银花 *Rhododendron ovatum* (0.59) 等重叠较明显。鹿角杜鹃平均重叠指数仅 0.12，除与山矾 *Symplocos sumuntia*、檵木存在中等重叠 (约 0.30) 外，与多数物种生态位高度分化。

2.4 种间关系分析

χ^2 检验显示：在 15 个优势种构成的 105 个物种对中，正关联种对达 73 对，负关联为 32 对，正负关联比为 2.28∶1.00 (图 4)。其中 16 对呈显著或极显著关联，15 对为正关联，仅枫香 *Liquidambar formosana*-峨眉鼠刺 (χ^2=3.95) 呈显著负关联。在正关联种对中，木荷-青冈栎 (χ^2=13.001)、木荷-窄基红褐柃 (χ^2=6.99) 等 5 对表现为极显著正关联，占显著正关联总数的 33.3%。

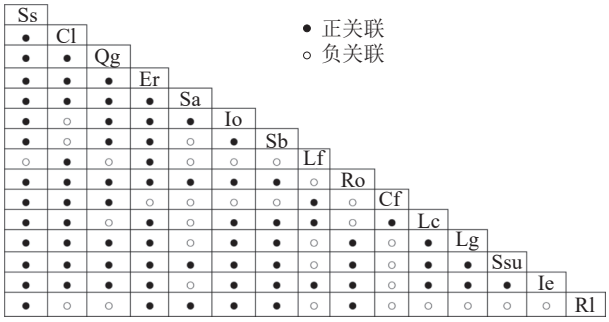
种间联结系数 (A_C) 分析结果显示：正联结种对共 73 对，占 69.52%；负联结种对共 32 对，占 30.48%；正负联结比为 2.28∶1.00 (图 5)，与 χ^2 检验结果一致。正联结种对包括木荷与杉木、青冈栎、窄基红褐柃、薄叶山矾、峨眉鼠刺、赤楠；青冈栎与窄基红褐柃、厚叶冬青 *Ilex elmerrilliana*；窄基红褐柃与薄叶山矾、峨眉鼠刺；峨眉鼠刺与厚叶冬青、檵木、马银花等。负联结种包括木荷与枫香；杉木与峨眉鼠刺、赤楠、鹿角杜鹃；青冈栎与枫香、檵木、鹿角杜鹃；窄基红褐柃与柏木等。



Ss. 木荷；Cl. 杉木；Qg. 青冈栎；Er. 窄基红褐柃；Sa. 薄叶山矾；Io. 峨眉鼠刺；Sb. 赤楠；Lf. 枫香； Ro. 马银花；Cf. 柏木；Lc. 檵木；Lg. 石栎；Ssu. 山矾；Ie. 厚叶冬青；Rl. 鹿角杜鹃。

图 3 森林群落优势种生态位重叠指数

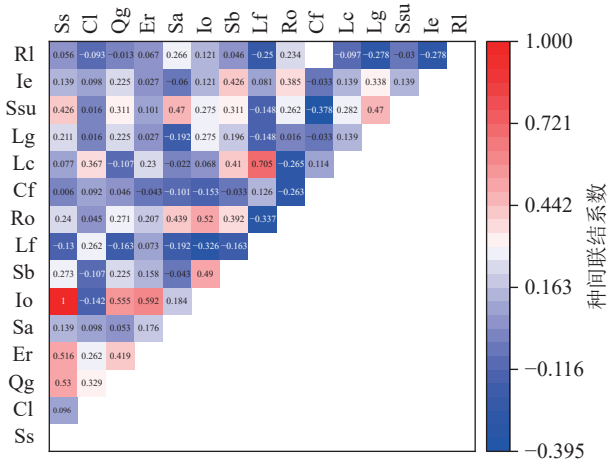
Figure 3 Niche overlap indices of the dominant species in forest communities



Ss. 木荷；Cl. 杉木；Qg. 青冈栎；Er. 窄基红褐柃；Sa. 薄叶山矾；Io. 峨眉鼠刺；Sb. 赤楠；Lf. 枫香； Ro. 马银花；Cf. 柏木；Lc. 檵木；Lg. 石栎；Ssu. 山矾；Ie. 厚叶冬青；Rl. 鹿角杜鹃。

图 4 台州地区森林群落优势种 χ^2 检验半矩阵

Figure 4 Semi-Matrix of χ^2 test for dominant species in forest communities



Ss. 木荷；Cl. 杉木；Qg. 青冈栎；Er. 窄基红褐柃；Sa. 薄叶山矾；Io. 峨眉鼠刺；Sb. 赤楠；Lf. 枫香； Ro. 马银花；Cf. 柏木；Lc. 檵木；Lg. 石栎；Ssu. 山矾；Ie. 厚叶冬青；Rl. 鹿角杜鹃。

图 5 优势物种种间联结系数半矩阵热图

Figure 5 Semi-matrix heatmap of interspecific association coefficient of dominant species

3 讨论

3.1 物种多样性

本研究共记录乔木植物 47 科 88 属 128 种，优势科为壳斗科、杜鹃花科和山茶科，优势属为冬青属和山矾属。这与浙江乌岩岭[22] 及江西九连山[23] 等地的研究结论一致，体现了亚热带常绿阔叶林的优势组成特征。木荷重要值达 14.83%，是明显的建群种，在受干扰林分中表现出较强的适应能力，常作为次生演替的优势种出现[24]。在群落多样性方面，常绿落叶阔叶混交林、常绿阔叶林、针阔混交林的 Margalef 丰富度、Simpson 优势度和 Shannon-Wiener 多样性指数均无显著差异，但 Pielou均匀度在常绿落叶阔叶混交林中显著高于常绿阔叶林 (P<0.05)。这一结果反映了不同林分结构对物种分布均匀性的影响。在本研究中，常绿阔叶林中木荷等

重要值突出，导致物种分布不均；而常绿落叶阔叶混交林因落叶树种参与，林隙增多、光环境异质性增强，为更多树种提供了生态位机会，从而提高了均匀度[25–26]。这一现象也印证了结构复杂度与光环境异质性对物种共存的影响[27]。因此，本研究发现物种多样性的差异主要受群落结构复杂度与优势种主导程度的影响，而非单纯的物种数量差异。这对于理解该区域森林的演替阶段及制定多样性保护策略具有参考价值。

3.2　群落径级结构特征

森林群落的径级结构是揭示其空间格局、动态演替及生态稳定性的关键指标，反映物种在空间占据、资源利用和种群更新方面的协调关系[28]。本研究径级分析显示：群落胸径结构呈典型倒“J”型分布，小径级个体 (D_{BH}＜5 cm) 共计 4 087 株，占总数 66.2%，而大径级个体 (D_{BH}≥20 cm) 仅占 3.5%。这种结构表明群落自然更新活跃，种群补充充分。与典型山地常绿阔叶林相比 (如乌岩岭[29] 地区大径级个体比例可达 10%~15%)，本研究中大径级个体明显偏少，表明该地区森林可能仍处于次生演替中前期[30]，或曾受人为干扰导致老龄大树缺失。此外，优势种如木荷、杉木、青冈栎在各径级均有分布，显示它们兼具先锋与建群特性，有助于维持群落结构的连续性与稳定性[31]。综上，本研究的径级数据支持该区域森林处于恢复性演替阶段的判断，建议在经营中注重大径级个体的保留与促进，以加速群落向顶极状态发展。

3.3　生态位特征与物种共存机制

生态位宽度与重叠度是解析物种资源利用策略及潜在竞争的重要指标[31]。生态位分析表明：15 个优势种的 Levins 生态位宽度为 2.97~12.62，Shannon-Wiener 生态位宽度为 1.28~2.67，其中峨眉鼠刺、檵木、木荷等 Levins 生态位宽度较高 (＞10)，显示出较广的资源利用范围与较强的环境适应性；而柏木、赤楠等 Levins 生态位宽度较低 (＜4)，表现出明显的生态专化特征。这一结果与广西常绿阔叶林等研究中“广生态位种多分布于上层乔木”的结论相符[32]。提示冠层位置与资源可及性可能共同影响物种的生态位宽度。

在生态位重叠方面，105 个种对中平均重叠指数为 0.26，78.1% 的种对重叠值低于 0.5，表明多数物种在资源利用上存在明显分化。值得注意的是，木荷与薄叶山矾重叠最高 (0.91)，而鹿角杜鹃与多数物种重叠极低 (均值为 0.12)，该结果与洮河自然保护区[33] 多数物种通过生态位分化实现稳定共存，仅少数种对在特定资源维度重叠较高结果一致，说明群落中既存在资源利用高度相似的种对，也存在高度分化的物种。这种“广生态位种主导结构与窄生态位种互补共存[34]”的格局，反映了该群落通过生态位分化实现物种共存的机制，也为亚热带常绿阔叶林的多样性维持提供了本地案例支持。

3.4　种间关系

χ^2 检验显示：105 个种对中正关联种对占 73 对 (69.52%)，负关联占 32 对 (30.48%)，正负关联比为 2.28∶1.00。其中木荷-青冈栎、木荷-窄基红褐柃等种对呈极显著正关联，仅枫香-峨眉鼠刺呈显著负关联。联结系数 (A_C) 分析结果与 χ^2 检验一致，进一步验证了种间关系以正联结为主。这表明群落内多数物种具有相似的生境需求和资源利用策略，或存在一定的正相互作用，如光、水分资源的互补利用，或种子扩散的空间聚集效应。该结论与多个地区研究结论相符：陈婷婷等[35] 指出武夷山亚热带常绿阔叶林中环境过滤与尺度效应共同导致物种普遍正联结；陈材等[36] 认为扩散限制与生境异质性促进物种聚集分布；张炜平等[37] 则强调郁闭或胁迫环境下植物正相互作用可提高生存率与共现概率。正相关偏多的原因主要包括：其一，共同环境驱动，物种对温度、降水等年际变化响应一致；其二，层次互补效应，如木荷与下层树种在光、水、养分利用上形成互补，随环境改善同步增长[38]；其三，扩散限制与空间聚集促使物种在相似微生境中共同繁茂[39]。负关联种对较少且强度弱，可能与演替阶段差异或光照竞争有关[40]。综上，本研究中种间关系以弱正联结为主，群落整体处于相对稳定的演替阶段，物种间竞争缓和，有利于群落结构的维持与恢复。

4　结论

本研究基于浙东南台州地区 31 个固定样地的调查数据，系统分析了常绿阔叶林不同林分的群落结构特征，群落以木荷为建群种，壳斗科、杜鹃花科和山茶科为主要优势科。3 种林分群落 (常绿落叶阔叶混交林、常绿阔叶林、针阔混交林) 在 Margalef 丰富度、Simpson 优势度和 Shannon-Wiener 多样性指

数上无显著差异，但常绿落叶阔叶混交林的 Pielou 均匀度显著高于常绿阔叶林，反映其物种分布更均匀、结构更具异质性。径级结构总体呈倒“J”型分布，小径级个体 (D_{BH}＜5 cm) 占绝对优势 (4 087 株)，表明群落自然更新活跃，但大径级个体偏少，暗示群落可能处于次生演替中前期。生态位分析显示：峨眉鼠刺、檻木、木荷等具有较宽生态位 (Levins 生态位宽度为 2.97~12.62)，而柏木、赤楠等生态位较窄；种间生态位重叠较低 (均值为 0.26)，资源利用分化明显。种间关系以正联结为主 (正负关联比为 2.28∶1.00)，木荷与青冈栎、窄基红褐柃等呈现极显著正关联，仅少数种对 (如枫香-峨眉鼠刺) 为显著负关联，反映群落整体结构趋于稳定。总体而言，台州地区常绿阔叶林群落更新良好、种间竞争缓和、结构相对稳定，但仍保留次生演替特征。建议在森林经营中注重优势种保护与结构优化，促进群落向顶极状态恢复。

5 参考文献

[1] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(3): 529−534. ZHANG Biao, LI Wenhua, XIE Gaodi, *et al*. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(3): 529−534. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2009.0089.

[2] 高伟, 黄石德, 林建丽, 等. 亚热带 3 种森林类型的群落特征与物种多样性的耦合关系[J]. 热带作物学报, 2021, **42**(6): 1756−1763. GAO Wei, HUANG Shide, LIN Jianli, *et al*. Coupling relationships between community characteristics and species diversity of three forest types in subtropical China[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, **42**(6): 1756−1763. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2021.06.035.

[3] 金则新. 浙江天台山常绿阔叶林次生演替序列群落物种多样性[J]. 浙江林学院学报, 2002, **19**(2): 133−137. JIN Zexin. On species diversity of secondary successional community of evergreen broad-leaved forests at Mount Tiantai of Zhejiang[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2002, **19**(2): 133−137. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0756.2002.02.005.

[4] 王希华, 闫恩荣, 严晓, 等. 中国东部常绿阔叶林退化群落分析及恢复重建研究的一些问题[J]. 生态学报, 2005, **25**(7): 1796−1803. WANG Xihua, YAN Enrong, YAN Xiao, *et al*. Analysis of degraded evergreen broad-leaved forest communities in Eastern China and issues in forest restoration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(7): 1796−1803. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.07.037.

[5] 李子豪, 孙龙飞, 付前进, 等. 白云山国家森林公园木本植物空间分布及种间关系[J]. 河南农业大学学报, 2022, **56**(6): 947−957. LI Zihao, SUN Longfei, FU Qianjin, *et al*. Spatial distribution and interspecific relationships of woody plants in Baiyun Mountain National Forest Park[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2022, **56**(6): 947−957. DOI: 10.16445/j.cnki.1000-2340.20220704.001.

[6] HE Huan, REN Haibao, LI Guijing, *et al*. Common species in the subtropical evergreen broad-leaved forest: dominance in adaptation mechanisms and resource utilization capabilities[J]. *Forests*, 2024, **15**(12): 2239. DOI: 10.3390/f15122239.

[7] 盘远方, 梁志慧, 李嘉宝, 等. 桂林岩溶石山常绿落叶阔叶混交林群落结构与物种多样性[J]. 生态学报, 2021, **41**(6): 2451−2459. PAN Yuanfang, LIANG Zhihui, LI Jiabao, *et al*. Community structure and species diversity of evergreen deciduous broad-leaved mixed forest in karst hills of Guilin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(6): 2451−2459. DOI: 10.5846/stxb202002040192.

[8] HARDY O J, SONKÉ B. Spatial pattern analysis of tree species distribution in a tropical rain forest of Cameroon: assessing the role of limited dispersal and niche differentiation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **197**(1/3): 191−202. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.05.014.

[9] 徐锦海, 许冬焱, 王辉. 肇庆九龙湖水源涵养林黑桫椤群落主要灌木种群的种间联结性研究[J]. 安徽农业大学学报, 2008, **35**(3): 390−395. XU Jinhai, XU Dongyan, WANG Hui. Interspecific association of the main shrub population in the *Gymnosphaera podophylla* community at Jiulong Lake water-conservation forest, Zhaoqing City[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2008, **35**(3): 390−395. DOI: 10.13610/j.cnki.1672-352x.2008.03.026.

[10] 俞昀, 白小军, 王志一. 大兴安岭次生林区不同龄级落叶松 (*Larix gmelinii*) 生态位特征和竞争关系[J]. 生态学报, 2022, **42**(12): 4912−4921. YU Yun, BAI Xiaojun, WANG Zhiyi. Niche characteristics and competitive relationship of *Larix gmelinii* between different age classes in Greater Khingan Range secondary forest area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(12): 4912−4921. DOI: 10.5846/stxb202106231667.

[11] 苏志尧, 吴大荣, 陈北光. 粤北天然林优势种群生态位研究[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(1): 25−29. SU Zhiyao, WU Darong, CHEN Beiguang. Niche characteristics of dominant populations in natural forest in North Guangdong[J]. *Chinese*

Journal of Applied Ecology, 2003, **14**(1): 25−29. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2003.0006.

[12] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 2009, **17**(6): 533−548. FANG Jingyun, WANG Xiangping, SHEN Zehao, *et al*. Methods and protocols for plant community inventory[J]. *Biodiversity Science*, 2009, **17**(6): 533−548. DOI: 10.3724/SP.J.1003.2009.09253.

[13] 李青楠, 梁英辉, 穆丹, 等. 阿勒锦岛国家湿地公园植物多样性及群落特征[J]. 中国野生植物资源, 2022, **41**(2): 69−73, 80. LI Qingnan, LIANG Yinghui, MU Dan, *et al*. Plant diversity and community characteristics of Alejin Island National Wetland Park[J]. *Chinese Wild Plant Resources*, 2022, **41**(2): 69−73, 80. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9690.2022.02.011.

[14] 张卫红, 马娟, 赵睿智, 等. 宁夏森林生态系统植物多样性及群落稳定性[J]. 中国沙漠, 2025, **45**(3): 210−221. ZHANG Weihong, MA Juan, ZHAO Ruizhi, *et al*. Plant diversity and community stability in forest ecosystems of Ningxia, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2025, **45**(3): 210−221. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00087.

[15] GUO Pu, LU Qi, LI Shuai. Productivity and species diversity of plant communities are higher inside than outside the west Ordos National Nature Reserve, Northern China[J]. *Plants*, 2024, **13**(5): 660. DOI: 10.3390/plants13050660.

[16] 冯雪, 冯蕾, 欧阳汝欣, 等. 衡水湖湿地公园植物多样性调查与分析[J]. 农业与技术, 2023, **43**(9): 116−120. FENG Xue, FENG Lei, OUYANG Ruxin, *et al*. Investigation and analysis of plant diversity in Hengshui Lake Wetland Park[J]. *Agriculture and Technology*, 2023, **43**(9): 116−120. DOI: 10.19754/j.nyyjs.20230515027.

[17] 郑枭, 王通, 庞春梅, 等. 气候变化背景下天目山落叶阔叶林乔木层 1996—2017 年动态研究[J]. 浙江农林大学学报, 2023, **40**(6): 1250−1260. ZHENG Xiao, WANG Tong, PANG Chunmei, *et al*. Dynamic study on tree layer of deciduous broad-leaved forest in Mount Tianmu from 1996 to 2017 under climate change[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(6): 1250−1260. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20230185.

[18] 周建, 王焓. 森林径级结构研究: 从统计描述到理论演绎[J]. 植物生态学报, 2024, **48**(6): 675−689. ZHOU Jian, WANG Han. A review of forest size structure studies: from statistical description to theoretical deduction[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, **48**(6): 675−689. DOI: 10.1752/cjpe.2023.0301.

[19] 陈霞, 袁在翔, 金雪梅, 等. 紫金山针阔混交林主要植物种群生态位特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, **40**(8): 113−119. CHEN Xia, YUAN Zaixiang, JIN Xuemei, *et al*. Niche characteristic of main plant populations in a coniferous and broad-leaved mixed forest on Zijin Mountain[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, **40**(8): 113−119. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.08.014.

[20] 邓贤兰, 刘玉成, 吴杨. 井冈山自然保护区栲属群落优势种群的种间联结关系研究[J]. 植物生态学报, 2003, **27**(4): 531−536. DENG Xianlan, LIU Yucheng, WU Yang. Interconnection among dominant plant populations of *Castanopsis* community in Jinggang Mountain Nature Reserve[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2003, **27**(4): 531−536.

[21] 王婷, 习靓靓, 杨柳, 等. 太行山猕猴国家自然保护区木本植物群落结构和空间分布特征[J]. 生态学报, 2023, **43**(13): 5525−5535. WANG Ting, XI Liangliang, YANG Liu, *et al*. Community structure and spatial distribution characteristics of woody plants in Taihang Mountain Macaque National Nature Reserve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(13): 5525−5535. DOI: 10.5846/stxb202007261957.

[22] 仲磊, 张杨家豪, 卢品, 等. 次生常绿阔叶林的群落结构与物种组成: 基于浙江乌岩岭 9 ha 森林动态样地[J]. 生物多样性, 2015, **23**(5): 619−629. ZHONG Lei, ZHANG Yangjiahao, LU Pin, *et al*. Community structure and species composition of the secondary evergreen broad-leaved forest: the analyses for a 9 ha forest dynamics plot in Wuyanling Nature Reserve, Zhejiang Province, East China[J]. *Biodiversity Science*, 2015, **23**(5): 619−629. DOI: 10.17520/biods.2015110.

[23] 简敏菲, 刘琪璟. 江西九连山自然保护区常绿阔叶林的结构特征[J]. 江西科学, 2008, **26**(2): 198−203, 211. JIAN Minfei, LIU Qijing. Structural characteristics of evergreen broad-leaved forest in Jiulianshan mountain of subtropical China[J]. *Jiangxi Science*, 2008, **26**(2): 198−203, 211. DOI: 10.13990/j.issn1001-3679.2008.02.011.

[24] 余树全. 浙江淳安天然次生林演替的定量研究[J]. 林业科学, 2003, **39**(1): 17−22. YU Shuquan. The quantitative study on the secondary forest succession in Chun'an County, Zhejiang Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, **39**(1): 17−22. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7488.2003.01.003.

[25] HELBACH J, FREY J, MESSIER C, *et al*. Light heterogeneity affects understory plant species richness in temperate forests supporting the heterogeneity-diversity hypothesis[J]. *Ecology and Evolution*, 2022, **12**(2): e8534. DOI: 10.1002/ece3.8534.

[26] POORTER L, VAN DER SANDE M T, AMISSAH L, *et al*. A comprehensive framework for vegetation succession[J]. *Ecosphere*, 2024, **15**(4): e4794. DOI: 10.1002/ecs2.4794.

[27] CHEN Chen, BONGERS F J, SCHMID B, *et al*. Ecosystem consequences of functional diversity in forests and implications for restoration[J]. *New Phytologist*, 2025, **247**(3): 1081−1097. DOI: 10.1111/nph.70247.

[28] 庞春梅, 樊民亮, 王秀云, 等. 浙江天目山毛竹皆伐后次生林群落结构与物种组成[J]. 浙江林业科技, 2025, **45**(2): 8−16. PANG Chunmei, FAN Minliang, WANG Xiuyun, *et al*. Community structure and species composition of secondary forest after clear cutting of *Phyllostachys edulis* in Tianmu Mountain, Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2025, **45**(2): 8−16.

[29] 单航, 雷祖培, 郑方东, 等. 2013—2023 年浙江乌岩岭次生常绿阔叶林群落动态变化[J]. 生物多样性, 2024, **32**(12): 154−164. SHAN Hang, LEI Zupei, ZHENG Fangdong, *et al*. Dynamic changes in the community of a secondary evergreen broad-leaved forest in Wuyanling, Zhejiang Province from 2013 to 2023[J]. *Biodiversity Science*, 2024, **32**(12): 154−164. DOI: 10.17520/biods.2024372.

[30] 金超, 吴初平, 丁易, 等. 午潮山常绿次生阔叶林主要木本植物功能群及其演替特征[J]. 生态学报, 2021, **41**(8): 3053−3066. JIN Chao, WU Chuping, DING Yi, *et al*. The functional groups and succession characteristics of dominant populations in an evergreen secondary broad-leaved forest of Wuchao Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(8): 3053−3066. DOI: 10.5846/stxb202005051102.

[31] 肖艳梅, 解婧媛, 姚义鹏, 等. 桂林岩溶石山常绿落叶阔叶混交林乔木层优势物种生态位研究[J]. 生态学报, 2021, **41**(20): 8159−8170. XIAO Yanmei, XIE Jingyuan, YAO Yipeng, *et al*. Niche of dominant species in *Arbor* layer of evergreen deciduous broad-leaved mixed forest in karst hills of Guilin, Southwestern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(20): 8159−8170. DOI: 10.5846/stxb202010142614.

[32] HE Yan, LIANG Shichu, JIANG Yong, *et al*. The relative importance of niche and neutral processes for the community assembly of subtropical karst forest communities at different spatial scales[J]. *Forests*, 2022, **13**(11): 1930. DOI: 10.3390/f13111930.

[33] 赵阳, 曹家豪, 李波, 等. 洮河自然保护区大峪沟林区紫果云杉群落木本植物种群生态位特征[J]. 生态学报, 2022, **42**(5): 1865−1875. ZHAO Yang, CAO Jiahao, LI Bo, *et al*. Niche of woody plant populations of *Picea purpurea* community in Dayugou forest area, Taohe Nature Reserve, Gansu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(5): 1865−1875. DOI: 10.5846/stxb202102070395.

[34] FENG Jiayi, LIAN Juyu, MEI Qiming, *et al*. Vertical variation in leaf traits and crown structure promote the coexistence of forest tree species[J]. *Forests*, 2022, **13**(10): 1548. DOI: 10.3390/f13101548.

[35] 陈婷婷, 徐辉, 马方舟, 等. 武夷山亚热带常绿阔叶林物种多样性的尺度效应[J]. 生态与农村环境学报, 2016, **32**(5): 750−756. CHEN Tingting, XU Hui, MA Fangzhou, *et al*. Scale effects on species diversity of subtropical evergreen broad-leaved forest on Wuyi Mountains[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(5): 750−756. DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2016.05.010.

[36] 陈材, 唐光大, 董晓全, 等. 雷州半岛风水林灌木层优势种群空间分布格局与关联性[J]. 应用生态学报, 2024, **35**(2): 371−380. CHEN Cai, TANG Guangda, DONG Xiaoquan, *et al*. Spatial distribution pattern and correlation of dominant populations in the shrub layer of Fengshui forest in Leizhou Peninsula, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, **35**(2): 371−380. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202402.006.

[37] 张炜平, 潘莎, 贾昕, 等. 植物间正相互作用对种群动态和群落结构的影响: 基于个体模型的研究进展[J]. 植物生态学报, 2013, **37**(6): 571−582. ZHANG Weiping, PAN Sha, JIA Xin, *et al*. Effects of positive plant interactions on population dynamics and community structures: a review based on individual-based simulation models[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, **37**(6): 571−582. DOI: 10.3724/SP.J.1258.2013.00059.

[38] TIAN Yang, ZHOU Peng, ZHOU Lang, *et al*. Multi-ecosystem services differently affected by over-canopy and understory nitrogen additions in a typical subtropical forest[J]. *Global Change Biology*, 2024, **30**(2): e17192. DOI: 10.1111/gcb.17192.

[39] 柏爱琴, 陈韬, 罗应华, 等. 常绿阔叶林壳斗科植物的空间分布格局及其影响因素[J]. 东北林业大学学报, 2025, **53**(2): 75−85. BAI Aiqin, CHEN Tao, LUO Yinghua, *et al*. The spatial distribution patterns of Fagaceae plants in evergreen broadleaf forests and their influencing factors[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2025, **53**(2): 75−85. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2025.02.018.

[40] YI Xiaoxia, WANG Ningning, REN Haibao, *et al*. From canopy complementarity to asymmetric competition: the negative relationship between structural diversity and productivity during succession[J]. *Journal of Ecology*, 2022, **110**(2): 457−465. DOI: 10.1111/1365-2745.13813.