

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第10期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.10.015

论文标题： 广州从化典型常绿阔叶林木本植物物种组成与群落结构特征

作　　者： 胡洪江，王春胜，常宇涵，等

收稿日期： 2025-11-05

引文格式： 胡洪江,王春胜,常宇涵,等.广州从化典型常绿阔叶林木本植物物种组成与群落结构特征[J].中南林业科技大学学报,2026,46(10):166-176.

Hu H J, Wang C S, Chang Y H, et al. Species composition and community structure of woody species in typical evergreen broad-leaved forests in Conghua, Guangzhou, China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):166-176.

相关论文推荐

Recommended articles

小兴安岭典型阔叶红松林幼树的群落结构动态

The dynamics of sapling community structure of typical broad -leaved korean pine forest in the Lesser Khingan mountains

东北中东部山区天然次生林乔木物种组成和群落结构特征

Tree species composition and community structure of natural secondary forests in the middle-eastern mountainous area of northeast China

裕河次生乔木群落分类及其物种多样性与土壤理化性质的关系

Relationship between the classification of secondary arbor community and its species diversity and the physicochemical properties of soil in Yuhe

湘中丘陵地区4种植物群落的物种组成和数量特征

Species composition and quantitative characteristics of four plant communities in hilly region of central Hunan province, China

坡向和海拔对张家界国家森林公园植物群落多样性的影响及其驱动力分析

Effects of slope and altitude on plant community diversity in Zhangjiajie national forest park and analysis of its driving forces

梵净山森林群落林下草本植物组成及多样性格局

Understory herbaceous composition and diversity patterns of forest community in Fanjingshan mountain

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.10.015
http: //qks.csuft.edu.cn

广州从化典型常绿阔叶林木本植物物种组成与群落结构特征

胡洪江[1, 2]，王春胜[1]，常宇涵[1]，刘雨倩[1]，尹海锋[1]，赵志刚[3]，唐　诚[2]，曾　杰[1]

（1. 中国林业科学研究院热带林业研究所，广东 广州 510520；2. 石河子大学城市与环境学院，新疆 石河子 832003；3. 广州市林业和园林科学研究院，广东 广州 510405）

摘　要：【目的】研究南亚热带典型常绿阔叶林的木本植物物种组成与群落结构特征，阐明其演替特征、物种多样性及发展趋势，为该区域森林生态系统精细化管理与生物多样性保护提供科学依据。【方法】于广州从化 20 世纪 90 年代经采伐后自然恢复形成的次生林内，设置 16 个面积为 1 200 m^2 的固定样地，调查每个样地内所有胸径（DBH）≥ 5 cm 的木本植物，系统分析群落的物种组成、多样性特征、径级和垂直结构。【结果】1）样地内共记录到木本植物 4 095 株，隶属 34 科 46 属 58 种，以樟科 Lauraceae、柿科 Ebenaceae 和壳斗科 Fagaceae 为优势科；2）科和属的分布区类型分别有 8 种和 11 种，以热带成分为主，分别占总科数和总属数的 64.71% 和 65.22%；3）重要值≥ 1% 的优势树种共 23 种，华润楠 *Machilus chinensis*、罗浮柿 *Diospyros morrisiana*、木荷 *Schima superba*、罗浮锥 *Castanopsis faberi*、山乌桕 *Triadica cochinchinensis*、黄樟 *Camphora parthenoxylon* 位居前 6，其中华润楠为绝对优势种（重要值为 22.36%）；4）林木径级结构呈典型倒“J”形分布，群落更新良好；5）垂直结构可划分为幼树层（2.5 ～ 9.3 m）、林冠下层（9.4 ～ 12.9 m）、林冠中层（13.0 ～ 16.5 m）和林冠上层（16.6 ～ 25.8 m），林冠中、下层林木合计占比 64.96%，且物种多样性随林冠高度上升而显著降低；6）群落整体多样性中等偏高，但个体数量在各物种间分配不均，集中于少数优势树种。【结论】该群落是珠三角地区典型的南亚热带常绿阔叶林，目前处于演替中期阶段，林木径级整体偏小，群落结构稳定并呈增长趋势；宜通过目标树经营以及补植演替中晚期的珍贵树种实现林分质量快速提升。

关键词：亚热带常绿阔叶林；物种组成；物种多样性；群落结构；演替特征

中图分类号：S718.54+2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)10-0166-11

Species composition and community structure of woody species in typical evergreen broad-leaved forests in Conghua, Guangzhou, China

Hu Hongjiang[1,2], Wang Chunsheng[1], Chang Yuhan[1], Liu Yuqian[1], Yin Haifeng[1], Zhao Zhigang[3], Tang Cheng[2], Zeng Jie[1]

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China;
2. College of Urban and Environmental Sciences, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China;
3. Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture, Guangzhou 510405, Guangdong, China)

Abstract:【Objective】This study aimed to characterize the woody species composition and community structure of a typical southern subtropical evergreen broad-leaved forest in China, elucidate its succession pattern, species diversity, and development trend, and to provide a scientific basis for the refined management and biodiversity conservation of forest ecosystems in this region.【Method】Sixteen permanent plots, each covering an area of 1 200 m^2, were established in a secondary forest in Conghua, Guangzhou, which had naturally regenerated after logging in the 1990s. All woody plants with a diameter at breast height (DBH) ≥ 5 cm were surveyed within each plot. The species composition, species diversity, diameter-class structure, and vertical stratification of the community were systematically analyzed.【Result】1) A total of 4 095 woody individuals (DBH ≥ 5 cm) were recorded in the plots, belonging to 58 species, 46 genera and 34 families; and the families Lauraceae, Ebenaceae and Fagaceae were predominant; 2) Eight family and 11 genus distribution

收稿日期（Received）：2025-11-05　　**修订日期**（Revised）：2026-01-26

基金项目：广东省林业科技创新项目（2024KJCX001）。

第一作者：胡洪江（3011508572@qq.com），硕士研究生。**通信作者：**曾杰（zengj69@caf.ac.cn），研究员，博士，博士研究生导师。

引文格式：胡洪江 , 王春胜 , 常宇涵 , 等 . 广州从化典型常绿阔叶林木本植物物种组成与群落结构特征 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2026,46(10):166-176.

Hu H J, Wang C S, Chang Y H, et al. Species composition and community structure of woody species in typical evergreen broad-leaved forests in Conghua, Guangzhou, China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):166-176.

area types were identified, with tropical elements predominantly accounting for 64.71% of families and 65.22% of genera; 3) Twenty-three species had an importance value above 1%; the top six dominant tree species were *Machilus chinensis*, *Diospyros morrisiana*, *Schima superba*, *Castanopsis faberi*, *Triadica cochinchinensis* and *Camphora parthenoxylon;* and *M. chinensis* was absolutely dominant (importance value: 22.36%); 4) The diameter-class structure showed a typical reverse "J"-shaped distribution, indicating favorable community regeneration; 5) The vertical structure was stratified into four layers: sapling (2.5-9.3 m), sub-canopy (9.4-12.9 m), mid-canopy (13.0-16.5 m), and upper-canopy layers (16.6-25.8 m), trees in the sub- and mid-canopy layers together accounted for 64.96%, and species diversity decreased significantly with increasing canopy height; 6) The overall species diversity of the community was moderately high, but individual abundance was unevenly distributed among species, concentrated in a few dominant tree species. 【Conclusion】This community represents a typical warm subtropical evergreen broad-leaved forest in the Pearl River Delta region. Currently in a mid-succession stage, it is characterized by generally small tree diameters, a stable structure, and a growing trend. Forest quality can be rapidly improved through target-tree management and enrichment planting with valuable tree species characteristic of middle and late succession stages.

Keywords: subtropical evergreen broad-leaved forests; species composition; species diversity; community structure; succession characteristics

森林群落的物种组成与结构是理解其生态功能与演替动态的基础，亦是制定森林经营决策的依据。南亚热带常绿阔叶林作为我国重要的森林植被类型，具有独特的生态功能和研究价值。然而，长期高强度的采伐和开垦等人为干扰，已致南亚热带地区原生林大面积退化为次生林或转变为人工林 [1-2]，显著改变了群落的物种组成与结构。一方面，干扰通常造成对生境敏感的顶极物种衰退或丧失，而先锋种、阳生种和广布种比例相应增加，物种组成趋于简单化，本地特有种或稀有物种受到威胁 [3]；另一方面，干扰亦会导致乔木层优势种更替、层次结构简化、林木径级分布偏向小径级 [4]。研究次生林在自然演替过程中的物种组成与群落结构，对于理解南亚热带森林生态系统的恢复力、稳定性及演替机制具有重要意义，不仅有助于揭示不同演替阶段群落构建的关键驱动因子，还可为退化森林生态系统的近自然经营提供科学依据。

长期以来，生态学者通过对比原生林与不同恢复阶段的次生林，以揭示干扰后森林的恢复轨迹及其限度。已有研究表明，次生林在物种组成上往往难以在短期内恢复至原生林状态，尤其是在特定功能类群或稀有物种的恢复上存在明显滞后 [5-6]。次生林的恢复过程受干扰历史、种源距离、地形因子、土壤特性以及经营措施等多种因素共同影响 [7]，导致不同区域、不同演替阶段的次生林在物种组成、立木结构及恢复速度等方面存在差异，其群落构建机制和生物多样性特征也往往存在明显的空间分异 [8]。因此，系统研究各区域次生林物种组成与群落结构，对于揭示其演替规律、准确评估其恢复状态并制定针对性保护与恢复策略至关重要。

广州从化地处南亚热带季风气候区，位于南岭山地与珠江三角洲平原的过渡地带 [9]。作为珠三角的生态屏障，从化森林植被对维护区域水源和空气质量具有重要作用。受历史人为干扰影响，该区域现存常绿阔叶林以次生林为主，是研究南亚热带森林自然恢复的理想场所。目前研究多集中于保存相对完好的原生林或特定自然保护区内的森林 [9-11]，而对广泛分布、处于不同恢复阶段的次生林关注相对较少。本研究以广州从化一处早期受人为干扰较重的次生林为对象，系统开展物种组成及群落结构研究，旨在为深入理解南亚热带次生林的演替动态和恢复过程提供基础数据，并为该区域退化森林生态系统的恢复重建、生物多样性保护以及可持续经营提供科学依据和技术参考。

1　研究区概况

研究区位于广州市从化区东北部吕田镇东坑村境内（23°43′～23°56′N，113°48′～114°03′E），属于典型的南亚热带季风气候，夏季高温多雨，冬季温和少雨。年平均气温 22 ℃，年平均降水量 2 104 mm，降水主要集中在夏季，雨热同期，年均相对湿度 79%。研究区海拔为 458.76～575.36 m，土壤以赤红壤为主。调查林分为常绿阔叶林，系由当地原生林皆伐后，于 20 世纪 60 年代通过飞播马尾松和种植杉木更新成林，90 年代采伐后自然恢复至今。该林分乔木主要包括华润楠 *Machilus chinensis*、木荷 *Schima superba*、罗浮锥 *Castanopsis faberi*、黄樟 *Camphora parthenoxylon*、罗浮柿 *Diospyros morrisiana* 等；灌木主要有草珊瑚 *Sarcandra glabra*、山血丹 *Ardisia lindleyana*、鹅掌柴 *Heptapleurum heptaphyllum*、毛冬青 *Ilex pubescens* 等；草本主要包括芒萁 *Dicranopteris pedata*、狗脊 *Woodwardia japonica*、扇叶铁线蕨 *Adiantum flabellulatum* 等；

藤本主要有玉叶金花 *Mussaenda pubescens*、马甲菝葜 *Smilax lanceifolia*、酸藤子 *Embelia laeta* 等。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

2024 年 12 月，于上述林分内布设了 16 个面积为 1 200 m^2（40 m×30 m）的固定样地。记录每个样地的海拔、坡向、坡位、坡度、土壤类型和郁闭度等信息，各样地基本概况见表 1。调查样地内所有胸径≥ 5 cm 的乔木，识别物种并利用实时动态载波相位差分技术（RTK）进行每木定位，调查和记录物种名称、胸径、树高、枝下高和冠幅等信息。

2.2 数据分析

2.2.1 物种组成

参考《中国植物志》《中国生物物种名录》《广东植物志》、中国数字植物标本馆（https://www.cvh.ac.cn）、中国植物物种信息系统（https://www.iplant.cn）等对植物种类进行鉴定，并依据吴征镒 [12] 提出的世界植物区系地理分区划分植物区系成分。

2.2.2 重要值

乔木层重要值计算公式为：

$$\text{物种重要值}=(\text{相对多度}+\text{相对频度}+\text{相对优势度})/3\times100\% \quad (1)$$

式中：相对多度为所有样地内某一物种的个体总数与所有物种总数量之比；相对频度为某一物种在所有样地内出现的次数与所有物种出现的总次数之比；相对优势度为某一物种的胸高断面积与样地总胸高断面积之比。

2.2.3 径级结构

根据胸径分布情况（5.0 ～ 47.5 cm），采用上限排外法划分群落木本植物径级。以 5.0 cm 为起始径级，以 5 cm 为递增单元，共划分 9 个径级，绘制径级结构图。

2.2.4 垂直结构

参考楼一恺等 [13] 的方法，综合 CCH 的分层效应（树冠光竞争法）和组内平方和变化情况确定最佳分层数，将其应用于 K-means 聚类分析，确定每个层次的树高范围，进而根据实际树高将样地内所有个体划分至相应的层次中。C_{CH} 指数计算公式如下：

$$C_{CH}=aC_L+H_{CB} \quad (2)$$

式中：a 为截止系数（通常在 0.3 ～ 0.5 之间），C_L 为树冠长度，H_{CB} 为枝下高。

2.2.5 物种多样性

采用物种丰富度指数（R）、Shannon-Wiener 多样性指数（H'）、Simpson 多样性指数（D_s）、Pielou 均匀度指数（J）、Margalef 丰富度指数（D）量化样地物种多样性；统计得出各垂直分层物种多样性的平均值和标准差，并通过单因素方差分析进行差异显著性检验。计算公式 [11] 分别为：

物种丰富度指数：

$$R=S \quad (3)$$

Shannon-Wiener 多样性指数：

$$H'=-\sum P_i\ln P_i \quad (4)$$

Simpson 多样性指数：

$$D_s=1-\sum P_i^2 \quad (5)$$

Pielou 均匀度指数：

$$J=H'/\ln S \quad (6)$$

Margalef 丰富度指数：

$$D=(S-1)/\ln N \quad (7)$$

式中：P_i 为物种 i 的个体数与所有物种总个体数之比；S 为样地内物种总数；N 为所有物种的个体数量之和。

表 1 广州从化典型常绿阔叶林样地基本概况

Table 1 Outline of 16 plots in typical evergreen broad-leaved forests in Conghua, Guangzhou

样地 Plot	海拔 Elevation /m	坡向 Aspect	坡位 Position	坡度 Slope /(°)	郁闭度 Canopy density	样地 Plot	海拔 Elevation /m	坡向 Aspect	坡位 Position	坡度 Slope /(°)	郁闭度 Canopy density
1	506.3	南坡	下坡	23	0.8	9	510.86	西坡	中坡	26	0.85
2	551.35	东坡	上坡	30	0.8	10	491.53	西坡	下坡	27	0.8
3	521.42	东坡	中坡	30	0.85	11	516.74	西北坡	中坡	16	0.8
4	519.15	东坡	中坡	23	0.8	12	575.36	西北坡	上坡	36	0.8
5	521.47	南坡	中坡	30	0.8	13	466.01	西北坡	下坡	23	0.8
6	501.44	西南坡	下坡	22	0.8	14	458.76	西北坡	下坡	28	0.78
7	505.89	西北坡	下坡	31	0.8	15	530.26	西北坡	上坡	22	0.7
8	516.28	西北坡	中坡	30	0.8	16	520.74	东北坡	上坡	26	0.73

采用 R 4.2.0、Past 5.2.1、SPSS 23.0 和 Origin 2021 软件进行数据处理和分析作图。

3　结果与分析

3.1　物种组成

样地内记录到 DBH ≥ 5 cm 的木本植物共 4 095 株，隶属于 34 科 46 属 58 种（表 2）。其中，裸子植物有 2 科 2 属 2 种，为马尾松 *Pinus massoniana* 和杉木 *Cunninghamia lanceolata*；被子植物有 32 科 44 属 56 种，占科、属、种总数量的 94.12%、95.65%、96.55%，且均为双子叶植物。物种数最多的科为樟科 Lauraceae，共 7 个种，其次为壳斗科 Fagaceae、山矾科 Symplocaceae、五列木科 Pentaphylacaceae 和虎皮楠科 Daphniphyllaceae，各 3 个种；物种数最多的属为润楠属 *Machilus*，共 4 个种，其次为山矾属 *Symplocos* 和虎皮楠属 *Daphniphyllum*，各有 2 个种；19 个科和 38 个属仅有 1 个物种。株数最多的科为樟科，共有 1 583 株，其次为柿科 Ebenaceae（476 株）和壳斗科（451 株）；株数最多的属为润楠属，共有 1 305 株，其后为柿属 *Diospyros*（476 株）和锥属 *Castanopsis*（342 株）。在物种层面上来看，华润楠 *Machilus chinensis* 数量最多，达到 1 276 株，占个体总数的 31.16%；其后依次为罗浮柿 *Diospyros morrisiana*（476 株，11.62%）、罗浮锥 *Castanopsis faberi*（342 株，8.35%）、木荷 *Schima superba*（321 株，7.84%）和山乌桕 *Triadica cochinchinensis*（268 株，6.54%）。

表 2　广州从化典型常绿阔叶林物种组成
Table 2　Species composition in typical evergreen broad-leaved forests in Conghua, Guangzhou

类别 Category	科（占比） Family number (proportion)	属（占比） Genus number (proportion)	种（占比） Species number (proportion)	株数（占比） Individual number (proportion)
裸子植物 Gymnosperms	2（5.88%）	2（4.35%）	2（3.45%）	120（2.93%）
被子植物 Angiosperms	32（94.12%）	44（95.65%）	56（96.55%）	3 975（97.07%）
双子叶植物 Dicotyledons	32（94.12%）	44（95.65%）	56（96.55%）	3 975（97.07%）
合计 Total	34	46	58	4 095

分析其区系特征（表 3），木本植物科的分布区类型共有 8 种。其中，世界广布有 4 科，占总科数的 11.76%；热带成分有 22 科，占总科数的 64.71%，以泛热带和东亚及热带南美间断分布居多；温带成分有 8 科，占总科数的 23.53%。属的分布区类型有 11 种，热带成分有 30 属，占总属数的 65.22%；其中，热带亚洲 11 属（23.91%），泛热带 10 属（21.74%）。温带成分 14 属，占总属数的 30.43%；其中，东亚及北美间断 6 属（13.04%）。中国特有共 2 属，仅占总属数的 4.35%。

表 3　广州从化典型常绿阔叶林木本植物区系特征
Table 3　Floristic characteristics for woody plants in typical evergreen broad-leaved forests in Conghua, Guangzhou

分布区类型 Distribution type	科 Family number	属 Genus number
1. 广布 Widespread	4	0
2. 泛热带 Pantropic	12	10
3. 东亚及热带南美间断 Trop. & Subtr. E. Asia Amer. disjuncted	5	2
4. 旧世界热带 OW Trop	0	2
5. 热带亚洲至热带大洋洲 Trop. Asia to Trop. Australasia Oceania	2	3
6. 热带亚洲至热带非洲 Trop. Asia to Trop. Africa	1	2
7. 热带亚洲 Trop. Asia	2	11
8. 北温带 North temperate	6	4
9. 东亚及北美间断 E. Asia & N. Amer. disjuncted	2	6
10. 旧世界温带 Old World Temp.	0	1
14. 东亚 E. Asia	0	3
15. 中国特有 Endemic to China	0	2
总计 Total	34	46

3.2　物种重要值

58 种木本植物中，重要值≥ 1% 的物种共 23 个（表 4），其相对优势度占比 96.88%，重要值占比 88.17%。其中，华润楠在所有样地内均有分布，不仅其多度最高，其相对优势度也位居所有物种之首，重要值为 22.36%，是群落的绝对优势种；其次为罗浮柿、木荷和罗浮锥，其重要值分别为 8.21%、7.51%、7.39%。山乌桕和黄樟的重要值亦超过 6%，上述 6 个种重要值显著高于其他树种。罗浮柿的相对优势度虽小于木荷，但其个体数量更多、分布更广，因此重要值排在第 2；罗浮锥个体数量多于木荷，但分布范围和相对优势度稍小，故其重要值略低于木荷。另外，竹叶青冈 *Quercus neglecta*、红皮糙果茶 *Camellia*

表 4 广州从化典型常绿阔叶林重要值≥ 1% 的主要优势物种

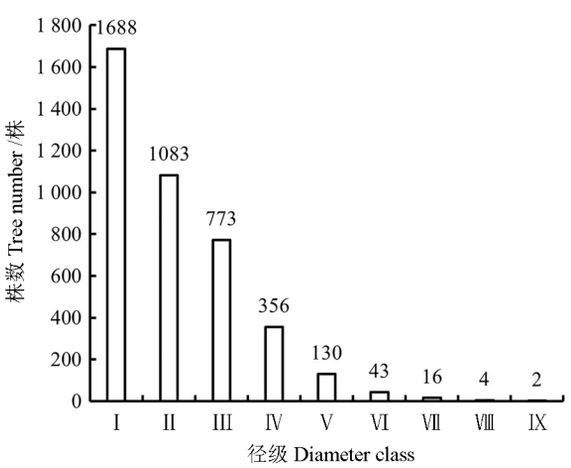
Table 4 The dominant species with importance value ≥ 1% in typical evergreen broad-leaved forests in Conghua, Guangzhou

物种 Species	相对多度 Relative abundance /%	相对频度 Relative frequency /%	相对优势度 Relative dominance /%	重要值 Important value /%
华润楠 *Machilus chinensis*	31.16	4.76	31.15	22.36
罗浮柿 *Diospyros morrisiana*	11.62	4.76	8.24	8.21
木荷 *Schima superba*	7.84	4.46	10.21	7.51
罗浮锥 *Castanopsis faberi*	8.35	3.87	9.96	7.39
山乌桕 *Triadica cochinchinensis*	6.54	4.76	8.16	6.49
黄樟 *Camphora parthenoxylon*	5.71	4.76	7.54	6.01
鹅掌柴 *Heptapleurum heptaphyllum*	4.49	4.46	2.63	3.86
光叶山矾 *Symplocos lancifolia*	3.13	4.76	1.69	3.19
青冈 *Quercus glauca*	2.49	2.38	1.94	2.27
杉木 *Cunninghamia lanceolata*	2.08	1.79	1.96	1.94
马尾松 *Pinus massoniana*	0.85	2.38	2.49	1.91
杨梅 *Morella rubra*	0.88	3.57	0.85	1.77
蓝果树 *Nyssa sinensis*	1.03	3.27	0.88	1.73
枫香树 *Liquidambar formosana*	0.59	2.98	1.46	1.67
鼠刺 *Itea chinensis*	1.34	2.98	0.41	1.58
南酸枣 *Choerospondias axillaris*	0.54	2.38	1.44	1.45
笔罗子 *Meliosma rigida*	1.27	1.49	1.35	1.37
香叶树 *Lindera communis*	0.81	1.49	1.73	1.34
密花山矾 *Symplocos congesta*	0.68	2.98	0.30	1.32
木油桐 *Vernicia montana*	1.17	1.79	0.90	1.28
香冬青 *Ilex suaveolens*	1.39	1.49	0.69	1.19
刨花润楠 *Machilus pauhoi*	0.51	2.38	0.66	1.19
岗柃 *Eurya groffii*	0.54	2.68	0.24	1.15

crapnelliana、赛山梅 *Styrax confusus*、细齿叶柃 *Eurya nitida*、黄杞 *Engelhardia roxburghiana*、半枫荷 *Semiliquidambar cathayensis*、肥皂荚 *Gymnocladus chinensis*、香楠 *Aidia canthioides*、黄背越橘 *Vaccinium iteophyllum*、檵木 *Loropetalum chinense*、交让木 *Daphniphyllum macropodum*、两广梭罗树 *Reevesia thyrsoidea*、栓叶安息香 *Styrax suberifolius*、弯蒴杜鹃 *Rhododendron henryi* 等物种仅在 1 个样地中有记录，为该群落的稀有种。

3.3 径级结构

从图 1 可以看出，林木径级分布呈典型倒“J”形分布，即随着径级增大，林木数量逐渐减少。其中，径级 I 林木数量最多，共 1 688 株，占总株数的 41.22%；I ～ III 级占总株数的 86.54%，以华润楠和罗浮柿为主；IV ～ VI 级和 VII ～ IX 级分别占总株数的 12.92% 和 0.54%，主要为华润楠、木荷和罗浮锥。林木径级分布未出现明显断层，且各主要树种在不同径级均有分布。此外，林分胸径总体较小，平均值仅为 12.85 cm。



Ⅰ，5 cm ≤ DBH ＜ 10 cm；II，10 cm ≤ DBH ＜ 15 cm；III，15 cm ≤ DBH ＜ 20 cm；IV，20 cm ≤ DBH ＜ 25 cm；V，25 cm ≤ DBH ＜ 30 cm；VI，30 cm ≤ DBH ＜ 35 cm；VII，35 cm ≤ DBH ＜ 40 cm；VIII，40 cm ≤ DBH ＜ 45 cm；IX，45 cm ≤ DBH ＜ 50 cm。下同。

Ⅰ, 5 cm ≤ DBH ＜ 10 cm; II, 10 cm ≤ DBH ＜ 15 cm; III, 15 cm ≤ DBH ＜ 20 cm; IV, 20 cm ≤ DBH ＜ 25 cm; V, 25 cm ≤ DBH ＜ 30 cm; VI, 30 cm ≤ DBH ＜ 35 cm; VII, 35 cm ≤ DBH ＜ 40 cm; VIII, 40 cm ≤ DBH ＜ 45 cm; IX, 45 cm ≤ DBH ＜ 50 cm. The same below.

图 1 广州从化典型常绿阔叶林总体径级分布

Fig. 1 Overall diameter-class distribution in typical evergreen broad-leaved forests in Conghua, Guangzhou

林分中重要值≥ 5% 的 6 个树种的径级结构如图 2 所示。这些树种的径级结构与林分总体基本

一致，除山乌桕外，均呈倒“J”形分布，其中 I ～ II 径级个体占比均超过 55.55%。另外，罗浮柿胸径整体偏小，I ～ II 径级个体占比高达 80.04%，且未发现胸径大于 30 cm 的个体。山乌桕以 II ～ III 径级个体数较多，占比 66.42%，最小径级个体数次之，中、大径级个体数较少，虽有别于典型倒“J”形分布，但仍以中小径级个体为主。

3.4　垂直结构

由图 3A 可知，随着截止系数的变化，分层数均为 4 或 5；而从图 3B 可以看出，当分层数为 4 时，组内平方和的变化开始趋缓。综合以上 2 个指标的变化特征，确定最佳分层数为 4，即将群落垂直结构划分为幼树层、林冠下层、林冠中层和

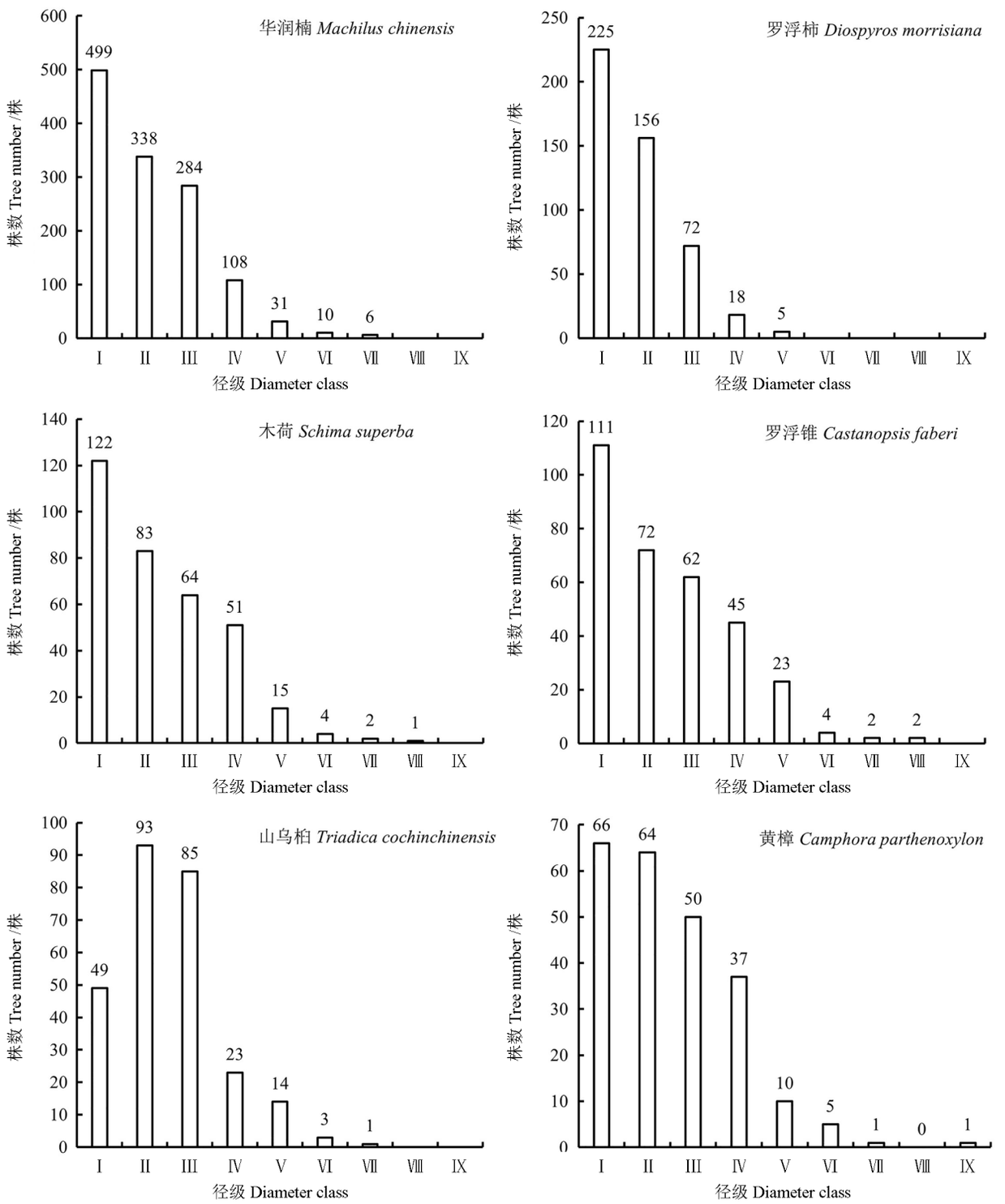


图 2　广州从化典型常绿阔叶林重要值≥ 5% 的优势树种径级分布

Fig. 2　Diameter-class distribution of the main dominant tree species with important value ≥ 5% in typical evergreen broad-leaved forests in Conghua, Guangzhou

林冠上层，相应的树高范围依次为 2.5 ～ 9.3 m、9.4 ～ 12.9 m、13.0 ～ 16.5 m 和 16.6 ～ 25.8 m。

各层的林木数量、平均高度及优势树种组成如表 5 所示。总体而言，林木主要集中于林冠下层与中层，两者占比均超过 32%；其次为幼树层，植株占比为 22.20%，林冠上层数量最少，占比仅为 12.82%。从主要树种组成来看，华润楠在所有层次中均占优势地位，其占比随垂直分层略有波动；林冠中层占比最高达 35.5%，幼树层最低（23.30%）。此外，木荷、罗浮柿等树种亦在各分层内占有较高比例，山乌桕和黄樟在树冠下层以上均为主要树种，而幼树层中以鹅掌柴和光叶山矾为主。

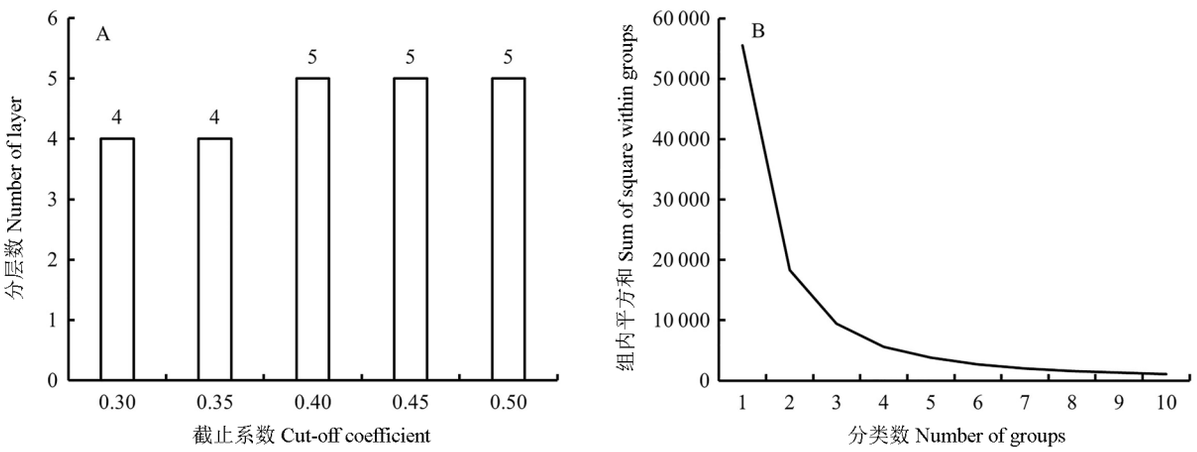


图 3　广州从化典型常绿阔叶林最佳分层确定

Fig. 3　Determination of optimal stratification in typical evergreen broad-leaved forests in Conghua, Guangzhou

表 5　广州从化典型常绿阔叶林垂直分层概况

Table 5　Vertical stratification in typical evergreen broad-leaved forests in Conghua, Guangzhou

垂直分层 Vertical stratification	植株数量（占比） Individuals number (Proportion)	平均高度 Mean height /m	主要树种占比 Proportion of principal species /%
幼树层 Sapling layer	910 （22.20%）	7.42	华润楠 (23.3)、鹅掌柴 (14.3)、罗浮锥 (9.0)、光叶山矾 (7.0)、木荷 (6.4)、罗浮柿 (5.2)
林冠下层 Lower canopy	1 325（32.36%）	11.23	华润楠 (32.7)、罗浮柿 (13.4)、木荷 (8.4)、黄樟 (5.5)、山乌桕 (5.5)
林冠中层 Middle canopy	1 335（32.60%）	15.43	华润楠 (35.5)、罗浮柿 (16.0)、山乌桕 (10.2)、罗浮锥 (7.9)、木荷 (7.4)、黄樟 (6.9)
林冠上层 Upper canopy	525（12.82%）	18.39	华润楠 (29.9)、木荷 (18.7)、黄樟 (8.8)、罗浮锥 (8.2)、罗浮柿 (7.2)、山乌桕 (7.2)

3.5　物种多样性

该林分的物种丰富度（R）、Shannon-Wiener 指数（H'）、Simpson 指数（D_s）、Pielou 均匀度指数（J）和 Margalef 丰富度指数（D）分别为 58、2.63、0.86、0.65 和 3.16。由此可知，H' 与 D_s 均维持在较高水平，说明群落整体上物种多样性呈中度偏高；而 J 明显偏低，说明个体数量在各物种间的分配高度不均。

从垂直分层来看，随林冠层升高，物种多样性呈显著递减趋势（表 6）。幼树层和林冠下层 H'、D_s、D 均显著高于林冠上层（$P < 0.05$），且幼树层与林冠中层间亦存在显著差异。幼树层 R 显著高于林冠中、上层，林冠下层亦显著高于林冠上层。垂直分层对于 Pielou 指数无显著影响（$P \geqslant 0.05$），各层间 Pielou 指数为 0.78 ～ 0.82。

4　讨　论

4.1　物种组成与群落演替特征

本研究在 16 个样地（面积共 1.92 hm^2）中共记录到 DBH ≥ 5 cm 的木本植物 58 种，隶属于 34 科 46 属，物种数量远远低于同处于广东南亚热带的常绿阔叶林样地，如陈禾洞自然保护区（289 种 /3.92 hm^2）[9]、青云山（130 种 /2.24 hm^2）[10]。这种差异主要源于人为干扰对群落恢复的影响，本研究的林分为尚未形成稳定成熟群落的次生林，恢复前曾经历马尾松飞播和杉木补植，早期遭受的人为干扰较强，且保护力度和恢复时间远低于自然保护区。此外，样地内林木起测直径与调查尺度不同也可能导致物种数偏低。

表 6　广州从化典型常绿阔叶林垂直各层物种多样性 †

Table 6　Species diversity of each canopy in typical evergreen broad-leaved forests in Conghua, Guangzhou

垂直分层 Vertical stratification	物种丰富度 Species richness (*R*)	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index (*H'*)	Simpson 指数 Simpson index (D_s)	Pielou 指数 Pielou index (*J*)	Margalef 指数 Margalef index (*D*)
幼树层 Sapling layer	15.06±2.62 a	2.20±0.23 a	0.84±0.05 a	0.82±0.06 a	3.39±0.59 a
林冠下层 Sub-canopy	14.44±2.61 ab	2.08±0.25 ab	0.82±0.06 ab	0.78±0.06 a	3.01±0.57 ab
林冠中层 Mid-canopy	12.75±3.24 b	1.89±0.27 bc	0.78±0.06 bc	0.81±0.12 a	2.61±0.63 bc
林冠上层 Upper-canopy	9.06±3.26 c	1.74±0.39 c	0.76±0.13 c	0.79±0.08 a	2.17±0.69 c

† 表中数据为平均值 ± 标准差；同列中不同字母表示差异达显著水平（$P < 0.05$）。
Data in the table were mean value ± SD; different lowercase letters in the same column indicate significant difference between canopy layers ($P < 0.05$).

本林分优势种主要来自樟科、柿科、壳斗科、山茶科等亚热带常绿阔叶林的典型类群，与同纬度带的东莞大屏嶂森林公园 [1]、从化陈禾洞自然保护区 [9]、翁源青云山自然保护区 [10] 等南亚热带常绿阔叶林群落具有相似性。尽管稀有物种个体数量较少，却是森林生物多样性的重要组成部分 [14]。本研究中，稀有种占比为 24.14%，低于翁源青云山（28.70%）[10]、鼎湖山（52.38%）[11] 等南亚热带常绿阔叶林。究其原因，可能与稀有物种的分布特性有关，亦受人为干扰、生境异质性、区系交汇特征及地形条件等因素的共同作用 [15]。相比于上述研究，本研究的群落取样面积相对较小，可能降低了样地内稀有物种比例 [10]。

从区系特征来看，热带性质分别占总科、属数的 64.71% 和 65.22%，温带性质分别占 23.53% 和 30.43%，表明其木本植物区系以热带成分为主，兼具温带成分，呈现典型的热带向温带过渡的亚热带特征，与纬度相近的广州大岭山和白云山 [16]、东莞马山和银屏山 [17] 及翁源青云山 [10] 等南亚热带常绿阔叶林具有较高的相似性。

群落演替在很大程度上受历史干扰的影响 [18]。本研究中林分的干扰历史可追溯至 20 世纪 50 年代的原生林皆伐，随后于 20 世纪 60 年代通过飞播马尾松和种植杉木得以更新，90 年代再次经历采伐后进入封山育林阶段。经过 30 多年自然恢复，目前已形成以华润楠为绝对优势种，罗浮锥、黄樟等中性偏阳生树种和罗浮柿、木荷、山乌桕等阳生树种 [19] 共同占优的常绿阔叶林群落。从树种组成来看，该林分处于演替中期 [20]，少数竞争力强的树种逐渐占据优势并形成明显的建群层，对光照和空间等资源的垄断可能导致林下更新环境改变，致使物种丰富度与均匀度暂时下降，这可能是该林分物种多样性低于同气候带其他林分的重要原因之一 [21]。温远光 [22] 对退化林分恢复的研究表明，若无马尾松入侵，退化林分经约 20 a 自然恢复可发展为阳性与中性阔叶树种共优的群落，60 ～ 100 a 可演替为中性常绿阔叶林。相比之下，本研究林分演替至相应阶段的时间略长，可能与林分内残留的针叶树种有关（马尾松与杉木重要值合计仍为 3.85%）。华润楠之所以占据绝对优势，主要归因于其较强的萌蘖能力和环境适应性 [23]，使其在恢复过程中迅速占据主导地位。

4.2　径级结构与群落稳定性

径级结构是评估群落稳定性与发展阶段的重要指标 [18]。在本研究中，林分整体径级分布呈倒“J”形，以小径级林木为主，中、大径级个体相对较少，但未出现明显断层，表现为增长型群落特征，说明群落更新良好，种群处于稳定增长状态。这与广东从化陈禾洞 [9]、翁源青云山 [10] 和十万大山 [24] 等南亚热带常绿阔叶林样地的研究结果类似。然而，相较于上述 3 个群落，本研究中小径级林木比例更高，反映出林分具有明显的次生林特性，处于相对早期的演替阶段。华润楠、罗浮柿、罗浮锥和木荷等优势树种的径级结构亦呈倒“J”形，小径级个体占比超 50%，表明这些树种具备良好的林下更新和早期耐阴能力，幼树储备丰富，将在未来林分演替中持续占据优势。山乌桕当前虽然以中小径级为主，但因其多为小乔木，其最小径级个体比例较低，种群在未来演替过程中可能趋于衰退。这与其强阳性及先锋树种特性有关 [19]。随着林分郁闭度增加，中性和耐阴树种将逐渐占据竞争优势，而先锋树种则逐渐退出。该衰退过程与具体演替轨迹，有待后续长期监测予以阐明。

4.3　垂直结构与物种多样性

本研究采用树冠光竞争法与组内平方和相结合的方法确定最佳分层数，将群落垂直结构划分为幼树层（2.5 ～ 9.3 m）、林冠下层（9.4 ～ 12.9 m）、林冠中层（13.0 ～ 16.5 m）和林冠上层（16.6 ～ 25.8 m）。林木主要集中于林冠中、下层，这与林分径级分布一致。小径级林木比例高，大

径级较少，而林木胸径和树高通常呈显著正相关，进一步说明当前林分处于演替中期阶段，且天然更新良好。

垂直分层引起的物种组成差异是维持与提高群落多样性的重要机制。幼树层为林冠下层、中层和上层持续提供个体补充，从而在时间尺度上维持群落的长期稳定和多样性[13]。在所有树种中，华润楠凭借其对林下弱光环境的耐受性、高效的资源利用能力以及较强的适应性[25]，在各分层中均占优势，表现出较宽的生态位和持续更新能力。木荷、罗浮柿、罗浮锥和黄樟等也在各分层中占优，说明这些树种与华润楠形成了较为稳定的共存关系。

本群落物种多样性处于中等偏高水平，但个体数量在物种间分配不均，反映优势类群对群落结构具有较强的支配作用，这与当前演替阶段相符[21]。物种丰富度、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数均随林冠高度上升而显著递减（$P < 0.05$），说明幼树层及林冠下层具有更高的物种多样性。这种现象可能与垂直结构所造成的微环境异质性有关[13]。演替初期生境苛刻，生态位类型单一；随着先锋树种与广适性树种的定居以及保留木的生长，林分内逐渐形成多样化的微环境（光照、温度、湿度等），为更多树种提供了生态位，从而显著提升幼树层和林冠下层的物种多样性[26]，为群落长期稳定发展奠定了基础。然而，从 Pielou 均匀度指数变化可以看出，各层次的物种分布均匀程度相对一致，这可能与林分内共存树种的生态位分化和互补有关。不同树种占据差异化的微生态位，减少直接竞争，从而促进均匀分布，反映了树种在长期共存过程中形成的生态适应与分化策略，对维持群落稳定性和生物多样性具有重要意义[13]。

4.4 对天然次生林管理的启示

理论上，退化生态系统具备通过自然过程逐步恢复的潜力[27]。当前，在我国经济社会快速发展的背景下，南亚热带常绿阔叶林作为我国森林资源的主体之一，其经营管理面临着多重挑战，诸如，如何提升林分质量，促进其向顶级群落演替。基于本研究调查结果和区域林分现状，本研究提出一条以目标树经营为核心，结构调控为手段，关键层保护为基础，珍贵树种引入为补充的综合管理路径。该路径立足于大径级目标树培育和生态服务功能提升，通过目标树选择与干扰树伐除等经营措施优化林分结构，改善林内环境，从而促进中下层林木的生长以及林下天然更新[28]，并针对性地补植红锥、格木和闽楠等珍贵阔叶乡土用材树种，这些树种多为演替中晚期种[29]。其引入有助于优化树种组成，加速林分向地带性常绿阔叶林顶级群落演替。

5 结 论

本研究基于广州从化典型常绿阔叶林 16 个固定监测样地调查，系统分析了其群落结构与多样性特征。结果表明：该群落目前处于演替中期阶段，以华润楠为绝对优势种；区系组成显示出典型的热带向温带过渡的亚热带区系特征；林木径级呈倒“J”形分布，以中小径级林木为主，群落结构稳定且呈现增长趋势；群落垂直结构分层明显，物种多样性随冠层升高而降低。本研究结果对于该区域森林质量提升与可持续经营具有指导意义，如基于目标树经营体系实施林分结构调控，针对性地补植乡土珍贵阔叶树种以促进群落正向演替。然而，本研究基于一次性调查，难以准确阐明群落长期演替规律。未来研究宜开展样地的长期定位观测，并结合环境因子与经营历史等信息，更深入地揭示其演替规律及内在机制。

参考文献：

[1] 王静宜 , 林育述 , 黄练忠 , 等 . 东莞大屏嶂森林公园次生常绿阔叶林种类组成与群落特征 [J]. 生态科学 ,2024,43(6):121-128.
Wang J Y, Lin Y S, Huang L Z, et al. Species composition and community characteristics of secondary evergreen broad-leaved forest in Dapingzhang forest park, Dongguan[J]. Ecological Science,2024,43(6):121-128.

[2] 徐凡迪 , 杨玉春 , 陈燕旋 , 等 . 南亚热带林地利用方式对土壤团聚体组成及碳、氮和磷化学计量的影响 [J]. 林业科学研究 , 2025,38(1):190-199.
Xu F D, Yang Y C, Chen Y X, et al. Effects of woodland use on soil aggregate composition and C, N and P stoichiometric characteristics in a southern subtropical region[J]. Forest Research, 2025,38(1):190-199.

[3] 江蓝 , 杨晶晶 , 韦鑫 , 等 . 南亚热带牛姆林群落常见种和稀有种的物种组成差异 [J]. 应用与环境生物学报 ,2026,32(1):39-47.
Jiang L, Yang J J, Wei X, et al. Species composition difference between common and rare species of Niumulin in south subtropical natural forest[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2026,32(1):39-47.

[4] 林建勇 , 唐复呈 , 何应明 , 等 . 人为干扰对闽楠群落结构及物种多样性的影响 [J]. 西部林业科学 ,2019,48(4):72-78.

Lin J Y, Tang F C, He Y M, et al. Effects of human disturbance on community structure and species diversity of *Phoebe bournei* community[J]. Journal of West China Forestry Science,2019, 48(4):72-78.

[5] 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):158-168.
Shan H, Lei Z P, Zheng F D, 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):158-168.

[6] Aryal D R, De Jong B H J, Sanchez-Silva S, et al. Biomass recovery along a tropical forest succession: trends on tree diversity, wood traits and stand structure[J]. Forest Ecology and Management,2024,555:121709.

[7] Bruelheide H, Böhnke M, Both S, et al. Community assembly during secondary forest succession in a Chinese subtropical forest[J]. Ecological Monographs,2011,81(1):25-41.

[8] Guclu C, Luk C L, Ashton L A, et al. Beta diversity subcomponents of plant species turnover and nestedness reveal drivers of community assembly in a regenerating subtropical forest[J]. Ecology and Evolution,2024,14:e70233.

[9] 余佩琪 , 陈焕锦 , 钟平生 , 等 . 广东从化陈禾洞省级自然保护区南亚热带常绿阔叶林群落结构和区系特征 [J]. 热带亚热带植物学报 ,2026,34(3):255-264.
Yu P Q, Chen H J, Zhong P S, et al. Community structure and floristic characteristics of subtropical evergreen broad-leaved forest in Chenhedong provincial nature reserve in Conghua, Guangdong[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2026,34(3):255-264.

[10] 陈晓熹 , 李群 , 黄久香 , 等 . 翁源青云山自然保护区亚热带常绿阔叶林群落结构和区系特征 [J]. 林业科学研究 ,2020,33(5): 77-85.
Chen X X, Li Q, Huang J X, et al. The community structure and floristic characteristics of subtropical evergreen broadleaved forest in Qingyunshan nature reserve, Guangdong[J]. Forest Research, 2020,33(5):77-85.

[11] 叶万辉 , 曹洪麟 , 黄忠良 , 等 . 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林 20 公顷样地群落特征研究 [J]. 植物生态学报 ,2008,32(2): 274-286.
Ye W H, Cao H L, Huang Z L, et al. Community structure of a 20 hm^2 lower subtropical evergreen broadleaved forest plot in Dinghushan, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2008, 32(2):274-286.

[12] 吴征镒 . 中国种子植物区系地理 [M]. 北京 : 科学出版社 , 2011:54.
Wu Z Y. Floristics of seed plants from China[M]. Beijing: China Science Publishing,2011:54.

[13] 楼一恺 , 范忆 , 戴其林 , 等 . 天目山常绿落叶阔叶林群落垂直结构与群落整体物种多样性的关系 [J]. 生态学报 , 2021,41(21):8568-8577.
Lou Y K, Fan Y, Dai Q L, et al. Relationship between vertical structure and overall species diversity in an evergreen deciduous broad-leaved forest community of Tianmu mountain natural reserve[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(21):8568-8577.

[14] White H J, McKeon C M, Pakeman R J, et al. The contribution of geographically common and rare species to the spatial distribution of biodiversity[J]. Global Ecology and Biogeography, 2023,32:1730-1747.

[15] 戴冬 , 邢华 , 杨佳绒 , 等 . 植物群落稀有种维持机制与土壤反馈的研究进展 [J]. 生物多样性 ,2021,29(12):1687-1699.
Dai D, Xing H, Yang J R, et al. Advances in mechanisms of rare species maintenance and plant-soil feedback in plant communities[J]. Biodiversity Science,2021,29(12):1687-1699.

[16] 易慧琳 , 郭颖涛 , 刘玲 , 等 .3 个南亚热带季风常绿阔叶林群落主要性状特征比较 [J]. 生态科学 ,2017,36(6):137-146.
Yi H L, Guo Y T, Liu L, et al. A comparative study on the community main morphological characteristics of three lower subtropical monsoon evergreen broad-leaved forests[J]. Ecological Science,2017,36(6):137-146.

[17] 冯铭淳 , 谢惠燕 , 邓宁桄 , 等 . 东莞市亚热带常绿阔叶次生林优势种生态位特征研究 [J]. 热带亚热带植物学报 ,2024, 32(6):747-756.
Feng M C, Xie H Y, Deng N L, et al. Niche characteristics of dominant tree species of subtropical evergreen broad-leaved secondary forest in Dongguan City, Guangdong Province, China[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2024,32(6):747-756.

[18] 骆丹 , 王春胜 , 刀保辉 , 等 . 云南德宏州西南桦天然林物种组成及多样性研究 [J]. 林业科学研究 ,2021,34(5):159-167.
Luo D, Wang C S, Dao B H, et al. Species composition and diversity of *Betula alnoides* natural forests at Dehong Prefecture, Yunnan Province[J]. Forest Research,2021,34(5):159-167.

[19] 黄久香 , 王通 , 庄雪影 . 广东增城主要森林群落优势种群的生态位研究 [J]. 华南农业大学学报 (自然科学版),2003,24(4): 52-55.
Huang J X, Wang T, Zhuang X Y. Study on niche of the woody species in the major forest communities in Zengcheng City[J]. Journal of South China Agricultural University (Natural Science Edition),2003,24(4):52-55.

[20] 袁金凤 , 胡仁勇 , 慎佳泓 , 等 .4 种不同演替阶段森林群落物种组成和多样性的比较研究 [J]. 植物研究 ,2011,31(1):61-66.
Yuan J F, Hu R Y, Shen J H, et al. Comparison of species composition and diversity of four successional forest

communities in Zhejiang Province, east China[J]. Bulletin of Botanical Research,2011,31(1):61-66.

[21] 张田田 , 王璇 , 任海保 , 等 . 浙江古田山次生与老龄常绿阔叶林群落特征的比较 [J]. 生物多样性 ,2019,27(10):1069-1080.
Zhang T T, Wang X, Ren H B, et al. A comparative study on the community characteristics of secondary and old-growth evergreen broad-leaved forests in Gutianshan, Zhejiang Province[J]. Biodiversity Science,2019,27(10):1069-1080.

[22] 温远光 . 常绿阔叶林退化生态系统恢复过程物种多样性的发展趋势与速率 [J]. 广西农业大学学报 ,1998,17(2):93-106.
Wen Y G. Restorative trend and rate of the species diversity of recovering process in degraded ecosystem of evergreen broad leaved forest[J]. Journal of Guangxi Agricultural University, 1998,17(2):93-106.

[23] 俞正超 , 刘晓涛 , 黄烜栋 , 等 . 夏季南亚热带森林演替中后期优势种幼叶花色素苷的光保护作用 [J]. 热带亚热带植物学报 , 2018,26(4):363-374.
Yu Z C, Liu X T, Huang X D, et al. Photoprotection of anthocyanins in young leaves of dominant tree species at mid-and late-successional stages of low subtropical forest in summer[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2018,26(4):363-374.

[24] 姜冬冬 , 罗应华 , 林建勇 , 等 . 广西十万大山山地常绿阔叶林优势种空间分布格局与关联性 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2024,44(1):151-161.
Jiang D D, Luo Y H, Lin J Y, et al. Spatial distribution pattern and correlation of dominant species of evergreen broad-leaved forest in Shiwandashan mountain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(1):151-161.

[25] 赵厚本 , 周光益 , 李兆佳 , 等 . 南亚热带常绿阔叶林 4 个常见树种的生物量分配特征与异速生长模型 [J]. 林业科学 ,2022, 58(2):23-31.
Zhao H B, Zhou G Y, Li Z J, et al. Biomass allocation and allometric growth models of four common tree species in southern subtropical evergreen broad-leaved forest[J]. Scientia Silvae Sinicae,2022,58(2):23-31.

[26] Xu Y Z, Chen H Y H, Qiao X J, et al. The control of external and internal canopy structural heterogeneity on diversity and productivity relationship in a subtropical forest[J]. Forest Ecosystems,2024,11:100246.

[27] 刘祥宏 , 尹勤瑞 , 辛建宝 , 等 . 生态植被自然修复及其人工促进技术研究进展与展望 [J]. 生态环境学报 ,2022,31(7):1476-1488.
Liu X H, Yin Q R, Xin J B, et al. Technology research progress and prospects of natural vegetation restoration and its artificial promotion[J]. Ecology and Environmental Sciences,2022,31(7): 1476-1488.

[28] 刘雨倩 , 尹海锋 , 王春胜 , 等 . 林窗改造对马尾松人工林林下植物多样性和土壤理化性质的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(2):70-79.
Liu Y Q, Yin H F, Wang C S, et al. Effects of forest gap remodeling on understory plant diversity and soil physicochemical property in *Pinus massoniana* plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2026,46(2):70-79.

[29] Li X B, Liu C C, Chen J X, et al. Leaf plasticity of the subtropical evergreen tree *Phoebe bournei* increases with ontogeny in response to sun and shade[J]. Forests,2023,14:1683.

[本文编校：吴　彬]