

# 江西三清山华东黄杉群落物种多样性及生态位特征

赵红梅<sup>1a,2</sup>, 白益军<sup>1a</sup>, 刘影<sup>1b</sup>, 徐孟宇<sup>2</sup>, 谢思华<sup>1a</sup>, 赵玉<sup>1a,①</sup>

(1. 上饶师范学院: a. 文化旅游产业学院, b. 化学与环境科学学院, 江西上饶 334001;  
2. 伊犁师范大学生物科学与技术学院, 新疆伊宁 835000)

**摘要:** 基于野外群落调查, 对分布于江西三清山的国家二级重点保护野生植物华东黄杉 (*Pseudotsuga gaussenii* Flous) 群落的多样性及生态位特征进行分析。结果显示: 三清山华东黄杉群落共记录维管植物 54 种, 隶属于 34 科 47 属, 乔木层优势种为华东黄杉、台湾松 (*Pinus taiwanensis* Hayata) 和青冈 (*Quercus glauca* Thunb.), 灌木层优势种为玉山竹 [*Yushania nütakayamensis* (Hayata) P. C. Keng] 和猴头杜鹃 (*Rhododendron simiarum* Hance), 草本层优势种不明显。总体上看, 结须岩样地乔木层的  $\alpha$  多样性指数最高, 结须岩和泸泉井样地灌木层的  $\alpha$  多样性指数较高, 泸泉井样地草本层的  $\alpha$  多样性指数较高, 玉光亭样地各层次的  $\alpha$  多样性指数较低。从  $\beta$  多样性指数看, 结须岩样地与玉光亭样地的相异性最高, 而泸泉井样地与清都亭样地的相异性最低, 群落差异主要由周转组分驱动。华东黄杉群落物种生态位呈现明显分化特征, 多数种对间的 Pianka 指数处于较低水平。综上, 三清山华东黄杉群落具有较高的物种多样性, 群落构建主要受物种替代过程驱动, 生态位分化是维持物种共存的重要机制。

**关键词:** 华东黄杉; 三清山;  $\alpha$  多样性;  $\beta$  多样性; 生态位

中图分类号: Q948.15; S718.54 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2026)03-0083-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2026.03.09

**Species diversity and niche characteristics of the *Pseudotsuga gaussenii* communities in Sanqing Mountain of Jiangxi Province** ZHAO Hongmei<sup>1a,2</sup>, BAI Yijun<sup>1a</sup>, LIU Ying<sup>1b</sup>, XU Mengyu<sup>2</sup>, XIE Sihua<sup>1a</sup>, ZHAO Yu<sup>1a,①</sup> (1. Shangrao Normal College: a. School of Culture and Tourism Industry, b. School of Chemistry and Environmental Science, Shangrao 334001, China; 2. College of Biological Science and Technology, Yili Normal University, Yining 835000, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2026, 35(3): 83-91

**Abstract:** Based on field community surveys, the diversity and niche characteristics of the national second-class key protected wild plant *Pseudotsuga gaussenii* Flous communities in Sanqing Mountain of Jiangxi Province were analyzed. The results show that a total of 54 vascular plant species are recorded in the *P. gaussenii* communities in Sanqing Mountain, belonging to 47 genera of 34 families. The dominant species in the arbor layer are *P. gaussenii*, *Pinus taiwanensis* Hayata, and *Quercus glauca* Thunb., the dominant species in the shrub layer are *Yushania nütakayamensis* (Hayata) P. C. Keng and *Rhododendron simiarum* Hance, while no obvious dominant species is observed in the herb layer. Overall, the  $\alpha$ -diversity indices of the arbor layer are the highest in the Beard Rock plot, the  $\alpha$ -diversity indices of the shrub layer are relatively high in the Beard Rock and Luquan Well plots, the  $\alpha$ -diversity indices of the herb layer are relatively high in the Luquan Well plot, while the  $\alpha$ -diversity indices of all layers in the Yuguang Pavilion plot are relatively low. In terms of  $\beta$ -diversity indices, the Beard Rock and Yuguang Pavilion plots exhibit the highest dissimilarity, while the Luquan Well and Qingdu Pavilion plots show the lowest dissimilarity, and the community differences are primarily driven by the turnover component. The species niches in the *P. gaussenii* communities exhibit a distinct differentiation pattern, and the Pianka

收稿日期: 2025-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(32360265); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ201701); 江西省大学生创新训练项目(S202510416016)

作者简介: 赵红梅(1999—), 女, 青海海东人, 硕士研究生, 主要从事植物资源保护与利用方面的研究。

①通信作者 E-mail: satz2017@163.com

引用格式: 赵红梅, 白益军, 刘影, 等. 江西三清山华东黄杉群落物种多样性及生态位特征[J]. 植物资源与环境学报, 2026, 35(3): 83-91.

index of most species pairs are relatively low. In conclusion, the *P. gaussenii* communities in Sanqing Mountain exhibit relatively high species diversity, its community assembly is primarily driven by species turnover processes, and niche differentiation serves as an important mechanism for maintaining species coexistence.

**Key words:** *Pseudotsuga gaussenii* Flous; Sanqing Mountain;  $\alpha$ -diversity;  $\beta$ -diversity; niche

物种多样性及其在资源轴上的配置格局(即生态位特征)是厘清森林群落构建机制、评估生态系统功能与稳定性的核心议题<sup>[1-2]</sup>。在温带森林演替过程中,环境异质性通过生态位互补效应与生物量比率效应共同影响群落生产力<sup>[3-4]</sup>。然而,亚热带山地森林中,地形-土壤-小气候耦合导致的环境异质性如何通过多维生态位空间维系群落功能,仍需进一步验证。中国亚热带原始林普遍呈片段化分布,珍稀特有树种往往局限于面积狭小、生境特殊的“天空岛”式山巅或沟谷,其群落尺度的多样性格局与生态位策略仍缺乏系统量化,成为区域生物多样性保护的关键知识缺口<sup>[5-6]</sup>。

华东黄杉(*Pseudotsuga gaussenii* Flous)隶属于东亚和北美间断分布的黄杉属(*Pseudotsuga* Carrière),为中国亚热带特有的第三纪孑遗针叶树种,仅星散分布于皖南、浙西北、赣东北海拔600~1700 m的陡峭山脊或沟谷,被列为国家二级重点保护野生植物(<https://www.forestry.gov.cn/c/www/gkml/11057.jhtml>)。位于赣东北的三清山是中国大陆东部生物多样性极为丰富的区域,该区域植物群落保存完好,具有特殊性、稀有性、典型性和代表性,是一个不可多得的自然地理和自然资源区域<sup>[7]</sup>。三清山保存了国内面积较大、结构较完整的华东黄杉天然群落,其生境跨度涵盖了常绿落叶阔叶混交林至针阔混交林,为探讨狭域特有树种的群落构建与生态位分化提供了理想平台。尽管已有研究关注华东黄杉的遗传多样性<sup>[8]</sup>和种群结构<sup>[9]</sup>,但对其群落整体 $\alpha$ 多样性和 $\beta$ 多样性格局以及与共存物种的生态位关系仍缺少定量解析。

厘清华东黄杉群落的物种组成、物种多样性、生态位宽度及重叠度,不仅可评估其生态系统的功能冗余与稳定性,也能为识别“多样性热点-生境特异性”耦合区提供关键参数,进而指导未来的精准保护实践<sup>[10]</sup>。此外,在全球变暖与极端干旱事件频发的背景下<sup>[11]</sup>,系统量化群落多样性对环境变化的响应路径,也是预测该孑遗树种潜在迁移或收缩的前提。因

此,本研究以江西三清山华东黄杉典型群落为研究对象,通过样方调查,并结合群落学调查华东黄杉群落的 $\alpha$ 多样性、 $\beta$ 多样性及其垂直分层特征,定量分析华东黄杉与共存物种的生态位宽度与重叠度,揭示其资源利用策略,以期丰富华东黄杉群落的研究资料,为华东黄杉群落的保护和管理提供科学依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

三清山(北纬28°54'13"~28°58'02"、东经118°02'05"~118°06'47")位于中亚热带北缘的黄山与中亚热带南缘的武夷山之间,兼具南、北亚热带常绿落叶阔叶混交林的优势植物区系成分,加之其地势陡峻,自然群落得以保护,形成了典型的、物种丰富的中亚热带森林系统<sup>[12]</sup>。针叶林中主要树种有台湾松(*Pinus taiwanensis* Hayata)、铁杉[*Tsuga chinensis* (Franch.) E. Pritz.]、华东黄杉、南方红豆杉[*Taxus wallichiana* var. *mairei* (Lemée et H. Lév.) L. K. Fu et Nan Li]等。三清山华东黄杉群落总面积达533 hm<sup>2</sup>,分布在海拔1100~1700 m的山地和山脊,在风门至结须岩一段有大面积天然林分布,面积约160 hm<sup>2</sup>。三清山是中国华东地区华东黄杉天然林分布面积较大的区域之一;华东黄杉为中国特有珍稀孑遗裸子植物,其形成的群落是亚热带山地针叶林的重要类型<sup>[13]</sup>。华东黄杉林中常混生有铁杉、台湾松、青冈(*Quercus glauca* Thunb.)、鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii* Hance)、猴头杜鹃(*Rhododendron simiarum* Hance)、山柳(*Salix pseudotangii* C. Wang et C. Y. Yu)、合轴荚蒾(*Viburnum sympodiale* Graebn.)、岩柃(*Eurya saxicola* Hung T. Chang)、灯笼花(*Agapetes lacei* Craib)、玉山竹[*Yushania niitakayamensis* (Hayata) P. C. Keng]等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设计 基于Sentinel-2时序影像与无人机可见光-多光谱融合数据(空间分辨率0.1 m),辅

以2023—2024年2轮地面踏查,于2025年,在华东黄杉聚集分布的面积为20 hm<sup>2</sup>的典型林地内,沿沟谷泉水线两侧、山脊风廊及游步道边缘,选择结须岩、泸泉井、清都亭和玉光亭4个样地,共设置21个面积为20 m×20 m的调查样方,用GPS仪测定样方地理

坐标和海拔,同步记录坡度、郁闭度(表1),确保覆盖微地形(坡向、凹凸度、凋落物厚度)与干扰梯度(旅游踩踏、边缘效应)完整变异范围。每条样带按“S”型布点,相邻样方中心点水平间距大于或等于20 m,以消除空间自相关。

表1 江西三清山华东黄杉群落调查样方概况

Table 1 General status of the survey quadrats of *Pseudotsuga gaussonii* Flous communities in Sanqing Mountain of Jiangxi Province

样地 Plot	样方 Quadrat	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	郁闭度/% Canopy density
结须岩 Beard Rock	J1	N28°55'35"	E118°03'07"	1 273.0	42.5	79
	J2	N28°55'36"	E118°03'07"	1 280.9	37.6	50
	J3	N28°55'35"	E118°03'06"	1 270.9	37.9	75
	J4	N28°55'37"	E118°03'07"	1 274.4	38.2	50
	J5	N28°55'35"	E118°03'09"	1 307.7	28.7	85
泸泉井 Luquan Well	L1	N28°55'33"	E118°03'04"	1 207.2	28.1	60
	L2	N28°55'34"	E118°03'05"	1 241.2	41.6	85
	L3	N28°55'35"	E118°03'06"	1 265.9	38.2	68
清都亭 Qingdu Pavilion	Q1	N28°55'43"	E118°03'14"	1 199.2	34.5	65
	Q2	N28°55'43"	E118°03'13"	1 207.1	45.3	75
	Q3	N28°55'44"	E118°03'14"	1 195.2	50.8	30
	Q4	N28°55'45"	E118°03'12"	1 155.0	27.3	75
	Q5	N28°55'44"	E118°03'12"	1 212.0	43.2	80
	Q6	N28°55'44"	E118°03'11"	1 196.3	35.6	85
	Q7	N28°55'45"	E118°03'10"	1 192.2	29.5	75
	Q8	N28°55'44"	E118°03'13"	1 214.8	34.4	85
玉光亭 Yuguang Pavilion	Y1	N28°54'44"	E118°03'34"	1 619.0	21.1	80
	Y2	N28°54'50"	E118°03'26"	1 597.2	35.4	75
	Y3	N28°54'45"	E118°03'27"	1 634.3	37.1	80
	Y4	N28°54'50"	E118°03'26"	1 606.3	31.4	75
	Y5	N28°54'22"	E118°03'45"	1 519.1	19.7	75

1.2.2 乔木层、灌木层和草本层数据采集 对各样方中胸径大于或等于5 cm的乔木悬挂树牌并记录树种名称、胸径、树高以及冠幅。其中,胸径使用胸径尺(精度0.1 cm)在树干1.3 m处测量;树高使用测高仪(精度0.1 m)测量;冠幅使用卷尺(精度0.01 m)测量植株的东西向和南北向直径,结果取均值。在每块样方的四角及中心位置分别设置面积5 m×5 m的灌木层样方,记录灌木物种的名称、株(丛)数量以及盖度。其中,盖度采用目测法估算。在每个灌木层样方的四角及中心位置分别设置面积1 m×1 m的草本层样方,调查因子与灌木层样方相同。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 重要值计算 参考张维伟等<sup>[14]</sup>的方法计算乔木层、灌木层和草本层物种的重要值。

1.3.2 物种多样性测定 参考林阳等<sup>[15]</sup>的研究,物种 $\alpha$ 多样性采用Simpson优势度指数( $D$ )、Shannon-

Wiener多样性指数( $H$ )、Pielou均匀度指数( $J$ )及Margalef丰富度指数( $R$ )进行分析;物种 $\beta$ 多样性采用Jaccard相似性指数( $\beta_{JSI}$ )、Jaccard相异性指数( $\beta_{JDI}$ )、周转组分( $\beta_{ju}$ )、嵌套组分( $\beta_{jne}$ )及Cody指数( $\beta_C$ )进行分析。

1.3.3 生态位分析 参考Chai等<sup>[16]</sup>和Genitsaris等<sup>[17]</sup>的方法,采用Levins指数( $B_i$ )分析物种的生态位宽度,采用Pianka指数( $O_{ik}$ )分析物种间的生态位重叠度。因华东黄杉更新瓶颈主要发生在乔木层种间竞争和灌木层遮光压力阶段,草本层因高度差异对其幼苗光竞争的影响为非限制性因子,因此,生态位重叠分析仅针对乔木层和灌木层。

### 1.4 数据分析

利用EXCEL 2016软件整理和汇总调查数据,利用R 4.2.0中的spaa包进行数据检验及分析,利用SPSS 26.0软件进行单因素方差分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 物种组成和生态位宽度分析

江西三清山华东黄杉群落内共记录到维管植物54种,隶属于34科47属,包括蕨类植物3科5属6种、裸子植物2科4属4种、被子植物29科38属44种。调查结果(表2)显示:在乔木层中,华东黄杉在结须岩、泸泉井、清都亭、玉光亭样地的重要值均最高,分别达21.04%、29.74%、21.83%、31.13%。乔木层中华东黄杉的生态位宽度最大,Levins指数为18.71。台湾松和青冈在4个样地乔木层中的重要值也较高,为乔木层的优势种,与华东黄杉共同构成乔

木层的核心。在灌木层中,玉山竹和猴头杜鹃在4个样地的重要值均较高,为灌木层的优势种。灌木层中猴头杜鹃的生态位宽度最大(Levins指数为16.93);玉山竹的生态位宽度次之(Levins指数为13.33),表明猴头杜鹃对不同微生境的适应性更强。在草本层中,金钱蒲(*Acorus gramineus* Soland.)在结须岩、泸泉井、玉光亭样地的重要值最高(分别为11.57%、7.48%和19.72%),春兰[*Cymbidium goeringii* (Rchb. f.) Rchb. f.]在清都亭样地的重要值最高(9.20%),黑足鳞毛蕨(*Dryopteris fuscipes* C. Chr.)在结须岩和泸泉井样地的重要值也较高(分别为8.32%和4.13%)。草本层中玉山蔺蕨草[*Trichophorum subcapitatum* (Thwaites et Hook.) D. A. Simpson]的生态位宽度最

表2 江西三清山华东黄杉群落主要物种的重要值和 Levins 指数<sup>1)</sup>

Table 2 Importance value and Levins index of main species in *Pseudotsuga gaussonii* Flous communities in Sanqing Mountain of Jiangxi Province<sup>1)</sup>

物种 Species	各样地的物种重要值/% Importance value of species in each plot				Levins 指数 Levins index
	结须岩 Beard Rock	泸泉井 Luquan Well	清都亭 Qingdu Pavilion	玉光亭 Yuguang Pavilion	
乔木层 Arbor layer					
华东黄杉 <i>Pseudotsuga gaussonii</i>	21.04	29.74	21.83	31.13	18.71
台湾松 <i>Pinus taiwanensis</i>	15.18	5.23	8.62	14.76	11.41
青冈 <i>Quercus glauca</i>	6.33	9.54	11.00	3.21	14.37
缺萼枫香树 <i>Liquidambar acalycina</i>	—	—	8.32	2.07	3.71
冬青 <i>Ilex chinensis</i>	1.01	2.17	—	3.59	3.66
铁杉 <i>Tsuga chinensis</i>	—	2.17	—	1.06	1.98
南方红豆杉 <i>Taxus wallichiana</i> var. <i>mairei</i>	—	1.00	1.61	—	2.61
薄叶山矾 <i>Symplocos anomala</i>	0.77	—	1.15	—	5.15
甜槠 <i>Castanopsis eyrei</i>	—	0.72	0.13	—	1.77
天女花 <i>Oyama sieboldii</i>	0.63	—	—	—	1.00
包果柯 <i>Lithocarpus cleistocarpus</i>	0.39	—	—	—	1.00
厚壳树 <i>Ehretia acuminata</i>	0.37	—	—	—	1.00
鹅耳枥 <i>Carpinus turczaninowii</i>	0.18	—	—	—	1.00
灌木层 Shrub layer					
玉山竹 <i>Yushania niitakayamensis</i>	18.72	10.38	17.62	21.47	13.33
猴头杜鹃 <i>Rhododendron simiarum</i>	12.14	11.74	17.92	21.72	16.93
显脉新木姜子 <i>Neolitsea phanerophlebia</i>	7.93	11.76	7.33	—	11.65
朱砂根 <i>Ardisia crenata</i>	4.71	7.71	2.09	—	8.08
浙江红山茶 <i>Camellia chekiangoleosa</i>	0.52	8.49	4.38	—	7.30
岩柃 <i>Eurya saxicola</i>	0.24	—	—	7.37	2.58
毛竹 <i>Phyllostachys edulis</i>	—	2.12	2.66	—	2.51
翅柃 <i>Eurya alata</i>	2.78	1.81	—	—	3.46
山柳 <i>Salix pseudotangii</i>	—	—	—	3.82	2.82
灯笼花 <i>Agapetes lacei</i>	—	—	—	2.91	2.70
格药柃 <i>Eurya muricata</i>	0.26	—	2.53	—	2.75
吴茱萸五加 <i>Gamblea ciliata</i> var. <i>evodiifolia</i>	1.50	—	—	—	1.54
合轴荚蒾 <i>Viburnum sympodiale</i>	—	0.94	—	—	1.00
毛樱桃 <i>Prunus tomentosa</i>	—	0.84	—	—	1.00
过路惊 <i>Tashiroea quadrangularis</i>	0.76	—	—	—	1.00

续表2 Table 2 (Continued)

物种 Species	各样地的物种重要值/% Importance value of species in each plot				Levins 指数 Levins index
	结须岩 Beard Rock	泸泉井 Luquan Well	清都亭 Qingdu Pavilion	玉光亭 Yuguang Pavilion	
草本层 Herb layer					
金钱蒲 <i>Acorus gramineus</i>	11.57	7.48	4.58	19.72	9.90
黑足鳞毛蕨 <i>Dryopteris fuscipes</i>	8.32	4.13	3.47	—	7.26
春兰 <i>Cymbidium goeringii</i>	1.52	3.94	9.20	—	8.83
玉山蕨草 <i>Trichophorum subcapitatum</i>	4.78	2.11	6.47	0.51	10.26
长瓣马铃苣苔 <i>Oreocharis auricula</i>	4.51	1.11	1.49	—	4.19
节肢蕨 <i>Selliguea lehmannii</i>	0.46	3.51	—	—	2.60
扁枝越橘 <i>Vaccinium japonicum</i> var. <i>sinicum</i>	—	3.03	—	—	1.00
浙皖佛肚苣苔 <i>Oreocharis chienii</i>	2.22	—	—	—	1.19
络石 <i>Trachelospermum jasminoides</i>	—	1.34	0.31	—	1.89
山莓 <i>Rubus corchorifolius</i>	1.16	—	—	—	1.00
槲蕨 <i>Drynaria roosii</i>	1.03	—	—	—	1.00
山柳菊 <i>Hieracium umbellatum</i>	0.87	—	—	—	1.00
华南舌蕨 <i>Elaphoglossum yoshinagae</i>	—	0.73	—	—	1.00
单叶双盖蕨 <i>Deparia lancea</i>	0.63	—	—	—	1.00
紫金牛 <i>Ardisia japonica</i>	—	0.50	—	—	1.00

<sup>1)</sup> 乔木层列出所有物种, 灌木层和草本层列出重要值排名前 15 的物种 The arbor layer lists all species, and the shrub layer and herb layer list the top 15 species with importance values. —: 无分布 No distribution.

大 (Levins 指数为 10.26)。

### 2.2 α 多样性分析

江西三清山华东黄杉群落的 α 多样性指数见表 3。结果显示: 华东黄杉群落结须岩样地乔木层的 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数均高于泸

泉井、清都亭和玉光亭样地, 其中, 结须岩样地的 Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数显著高于 ( $P < 0.05$ ) 玉光亭样地。结须岩和泸泉井样地灌木层的 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数较高, 其中, 结须岩和泸泉井样地灌木层 Simpson 优

表 3 江西三清山华东黄杉群落 α 多样性指数比较 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Comparison of α-diversity indices of *Pseudotsuga gaussonii* Flous communities in Sanqing Mountain of Jiangxi Province ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

样地 Plot	Simpson 优势度指数 Simpson's dominance index	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	Pielou 均匀度指数 Pielou's evenness index	Margalef 丰富度指数 Margalef's richness index
乔木层 Arbor layer				
结须岩 Beard Rock	0.663±0.030a	1.227±0.091a	0.866±0.029a	1.128±0.166a
泸泉井 Luquan Well	0.567±0.042ab	0.940±0.096ab	0.791±0.080a	0.916±0.273a
清都亭 Qingdu Pavilion	0.553±0.029ab	0.998±0.057ab	0.763±0.049a	0.885±0.108a
玉光亭 Yuguang Pavilion	0.508±0.031b	0.858±0.099b	0.838±0.044a	0.736±0.153a
灌木层 Shrub layer				
结须岩 Beard Rock	0.639±0.046a	1.302±0.141a	0.722±0.036a	1.195±0.283a
泸泉井 Luquan Well	0.642±0.035a	1.258±0.044a	0.751±0.088a	1.082±0.311a
清都亭 Qingdu Pavilion	0.503±0.044ab	0.992±0.098ab	0.658±0.045a	0.829±0.110a
玉光亭 Yuguang Pavilion	0.430±0.060b	0.763±0.093b	0.677±0.090a	0.679±0.118a
草本层 Herb layer				
结须岩 Beard Rock	0.412±0.169ab	0.869±0.360ab	0.437±0.179ab	0.895±0.388ab
泸泉井 Luquan Well	0.619±0.177a	1.304±0.402a	0.736±0.140a	1.252±0.341a
清都亭 Qingdu Pavilion	0.500±0.061a	0.848±0.106ab	0.749±0.079a	0.662±0.070ab
玉光亭 Yuguang Pavilion	0.017±0.017b	0.039±0.039b	0.056±0.056b	0.075±0.075b

<sup>1)</sup> 同列中同一层次不同小写字母表示不同样地间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases of the same layer in the same column indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ) between different plots.

势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数显著高于玉光亭样地。泸泉井样地草本层的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数最高,结须岩和清都亭样地草本层这 2 个指标居中,玉光亭样地草本层这 2 个指标最低,且与泸泉井样地差异显著;泸泉井和清都亭样地草本层的 Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数较高,与结须岩样地差异不显著,但显著高于玉光亭样地。

### 2.3 $\beta$ 多样性分析

江西三清山华东黄杉群落的  $\beta$  多样性指数见表

4。结果显示:华东黄杉群落泸泉井样地与清都亭样地的相似性最高,Jaccard 相似性指数( $\beta_{JSI}$ )为 0.254;而结须岩样地与玉光亭样地的相似性最低, $\beta_{JSI}$  值为 0.150。结须岩样地与玉光亭样地的相异性最高,Jaccard 相异性指数( $\beta_{JDI}$ )为 0.850;而泸泉井样地与清都亭样地的相异性最低, $\beta_{JDI}$  值为 0.746。群落间差异主要由周转组分( $\beta_{ju}$ )主导,嵌套组分( $\beta_{jne}$ )普遍较低, $\beta_{jne}$  值最高仅为 0.107(结须岩样地与玉光亭样地)。结须岩样地与泸泉井样地的 Cody 指数( $\beta_C$ )最大,为 17.0;而泸泉井样地与清都亭样地的  $\beta_C$  值最小,为 8.0。

表 4 江西三清山华东黄杉群落的  $\beta$  多样性指数<sup>1)</sup>

Table 4  $\beta$ -diversity indices of *Pseudotsuga gausseii* Flos communities in Sanqing Mountain of Jiangxi Province<sup>1)</sup>

样地 Plot	$\beta_{JSI}$			$\beta_{JDI}$			$\beta_{ju}$			$\beta_{jne}$			$\beta_C$		
	J	L	Q	J	L	Q	J	L	Q	J	L	Q	J	L	Q
L	0.195			0.805			0.778			0.027			17.0		
Q	0.211	0.254		0.789	0.746		0.733	0.721		0.056	0.025		14.0	8.0	
Y	0.150	0.163	0.186	0.850	0.837	0.814	0.743	0.765	0.765	0.107	0.072	0.049	16.5	12.5	9.5

<sup>1)</sup>J: 结须岩 Beard Rock; L: 泸泉井 Luquan Well; Q: 清都亭 Qingdu Pavilion; Y: 玉光亭 Yuguang Pavilion.  $\beta_{JSI}$ : Jaccard 相似性指数 Jaccard similarity index;  $\beta_{JDI}$ : Jaccard 相异性指数 Jaccard dissimilarity index;  $\beta_{ju}$ : 周转组分 Turnover component;  $\beta_{jne}$ : 嵌套组分 Nestedness component;  $\beta_C$ : Cody 指数 Cody index.

### 2.4 生态位重叠度分析

江西三清山华东黄杉群落乔木层物种的 Pianka 指数见表 5。结果显示:乔木层中 Pianka 指数为 0.00 的种对有 38 个,占总种对数的 48.7%;Pianka 指数处于(0.00,0.50)之间的种对有 34 个,占总种对数的

43.6%;Pianka 指数处于[0.50,1.00]之间的种对最少(6 个),占总种对数的 7.7%。乔木层中厚壳树(*Ehretia acuminata* R. Br.)-鹅耳枥种对的 Pianka 指数最高,达到 1.00;华东黄杉-青冈种对的 Pianka 指数次之,为 0.73。

表 5 江西三清山华东黄杉群落乔木层物种的 Pianka 指数<sup>1)</sup>

Table 5 Pianka index of species in the arbor layer of *Pseudotsuga gausseii* Flos communities in Sanqing Mountain of Jiangxi Province<sup>1)</sup>

物种 Species	Pianka 指数 Pianka index											
	Pg	Pt1	Qg	La	Ic	Tc	Twm	Sa	Ce	Os	Lc	Ea1
Pt1	0.62											
Qg	0.73	0.50										
La	0.21	0.21	0.43									
Ic	0.47	0.39	0.15	0.21								
Tc	0.39	0.08	0.22	0.00	0.56							
Twm	0.38	0.07	0.43	0.00	0.00	0.00						
Sa	0.45	0.29	0.45	0.12	0.09	0.00	0.53					
Ce	0.29	0.03	0.10	0.22	0.00	0.00	0.00	0.10				
Os	0.14	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
Lc	0.15	0.14	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Ea1	0.21	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	
Ct	0.21	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.00	1.00

<sup>1)</sup>Pg: 华东黄杉 *Pseudotsuga gausseii* Flos; Pt1: 台湾松 *Pinus taiwanensis* Hayata; Qg: 青冈 *Quercus glauca* Thunb.; La: 缺萼枫香树 *Liquidambar acalycina* H. T. Chang; Ic: 冬青 *Ilex chinensis* Sims; Tc: 铁杉 *Tsuga chinensis* (Franch.) E. Pritz.; Twm: 南方红豆杉 *Taxus wallichiana* var. *mairei* (Lemée et H. Lévy.) L. K. Fu et Nan Li; Sa: 薄叶山矾 *Symplocos anomala* Brand; Ce: 甜槠 *Castanopsis eyrei* (Champ. ex Benth.) Tutcher; Os: 天女花 *Oyama sieboldii* (K. Koch) N. H. Xia et C. Y. Wu; Lc: 包果柯 *Lithocarpus cleistocarpus* (Seemen) Rehder et E. H. Wilson; Ea1: 厚壳树 *Ehretia acuminata* R. Br.; Ct: 鹅耳枥 *Carpinus turczaninowii* Hance.

江西三清山华东黄杉群落灌木层主要物种的 Pianka 指数见表 6。结果显示:灌木层中 Pianka 指数为 0.00 的种对有 40 个,占总种对数的 38.1%;Pianka 指数处于(0.00,0.50)之间的种对有 53 个,占总种对数的 50.5%;Pianka 指数处于 [0.50,1.00] 之间的种

对最少(12 个),占总种对数的 11.4%。灌木层中合轴荚蒾-毛樱桃(*Prunus tomentosa* Thunb.) 种对的 Pianka 指数最高,达到 1.00;岩柃-山柳种对的 Pianka 指数次之,为 0.73。乔木层物种 Pianka 指数的平均值为 0.16,略低于灌木层(0.20)。

表 6 江西三清山华东黄杉群落灌木层主要物种的 Pianka 指数<sup>1)</sup>  
Table 6 Pianka index of main species in the shrub layer of *Pseudotsuga gaussonii* Ficus communities in Sanqing Mountain of Jiangxi Province<sup>1)</sup>

物种 Species	Pianka 指数 Pianka index													
	Yn	Rs	Np	Ac	Cc	Es	Pe	Ea2	Sp	Al	Em	Gce	Vs	Pt2
Rs	0.62													
Np	0.52	0.66												
Ac	0.43	0.44	0.50											
Cc	0.35	0.41	0.59	0.34										
Es	0.24	0.42	0.01	0.01	0.00									
Pe	0.36	0.13	0.32	0.40	0.21	0.00								
Ea2	0.18	0.23	0.49	0.34	0.40	0.03	0.00							
Sp	0.12	0.50	0.00	0.00	0.00	0.73	0.00	0.00						
Al	0.29	0.39	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.54					
Em	0.16	0.30	0.33	0.07	0.45	0.00	0.41	0.05	0.00	0.00				
Gce	0.13	0.15	0.16	0.40	0.00	0.04	0.00	0.70	0.00	0.00	0.08			
Vs	0.28	0.04	0.07	0.52	0.27	0.00	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Pt2	0.28	0.04	0.07	0.52	0.27	0.00	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	
Tq	0.22	0.13	0.20	0.13	0.09	0.00	0.00	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

<sup>1)</sup> 灌木层列出重要值排名前 15 的物种 The shrub layer lists the top 15 species with importance values. Yn: 玉山竹 *Yushania nitakayamensis* (Hayata) P. C. Keng; Rs: 猴头杜鹃 *Rhododendron simiarum* Hance; Np: 显脉新木姜子 *Neolitsea phanerophlebia* Merr.; Ac: 朱砂根 *Ardisia crenata* Sims; Cc: 浙江红山茶 *Camellia chekiangoleosa* Hu; Es: 岩柃 *Eurya saxicola* Hung T. Chang; Pe: 毛竹 *Phyllostachys edulis* (Carrière) J. Houz.; Ea2: 翅柃 *Eurya alata* Kobuski; Sp: 山柳 *Salix pseudotangii* C. Wang et C. Y. Yu; Al: 灯笼花 *Agapetes lacei* Craib; Em: 格药柃 *Eurya muricata* Dunn; Gce: 吴茱萸五加 *Gamblea ciliata* var. *evodiifolia* (Franch.) C. B. Shang, Lowry et Frodin; Vs: 合轴荚蒾 *Viburnum sympodiale* Graebn.; Pt2: 毛樱桃 *Prunus tomentosa* Thunb.; Tq: 过路惊 *Tashiroea quadrangularis* (Cogn.) R. Zhou et Ying Liu.

### 3 讨 论

调查结果显示:江西三清山华东黄杉群落结须岩、泸泉井、清都亭和玉光亭样地的海拔、坡度和郁闭度等生境条件差异明显,为华东黄杉群落创造了多样的微生境条件,研究区域具有多尺度生境异质性。生境异质性是驱动群落结构、物种组成和生态位分化的重要因子,通过环境要素直接或间接调控物种的分布格局、竞争关系与共存机制<sup>[18]</sup>。华东黄杉在 4 个样地中均占据优势地位,但其重要值在不同样地间存在波动,台湾松、青冈等共优种的重要值也随不同样地的生境变化而有所差异,反映出多优势种共存格局受生境异质性调节,这与中亚热带森林群落中优势种表现出明显的生境偏好、多优势种随微生境变化而更替的典型特征相吻合<sup>[19]</sup>。灌木层中猴头杜鹃的生态位宽度大于玉山竹,进一步印证了生境异质性对物种适

应性分化的驱动作用,即广生态位物种在不同微生境中表现出更强的资源利用能力与适应弹性<sup>[20-21]</sup>。草本层中玉山蕨草的生态位宽度最大,表明该物种在资源利用上具有较高的灵活性和适应性。

江西三清山华东黄杉群落不同样地间  $\alpha$  多样性指数呈现出明显的空间分异格局。结须岩样地乔木层的 Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均显著高于 ( $P < 0.05$ ) 玉光亭样地,表明该样地乔木层物种组成更为丰富、分布更为均匀。结须岩和泸泉井样地灌木层的  $\alpha$  多样性指数均高于玉光亭样地,这种差异可能是由于结须岩和泸泉井样地林冠开阔度适中,林下光照条件较好,有利于喜光灌木的生长与更新。林下光照条件和土壤养分含量是影响灌木层物种多样性的关键环境因子,光照强度的适度增加可显著提高灌木层物种丰富度<sup>[22]</sup>。草本层中,泸泉井样地的 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数均最高,玉光亭样地

最低。海拔通过影响光照、水分及土壤资源的再分配进而影响植物的分布及群落结构<sup>[23]</sup>。华东黄杉群落各样地草本层多样性的差异可能主要受海拔及相关环境因子的调控。泸泉井样地处于海拔适中区域,水热组合条件优越,这可能是其草本层多样性较高的原因;而玉光亭样地可能因海拔较高、温度较低、生长季较短,限制了部分草本物种的分布与定居。

基于 Baselga<sup>[24]</sup>的分解框架,本研究将 $\beta$ 多样性分解为周转组分( $\beta_{jw}$ )和嵌套组分( $\beta_{jne}$ )。江西三清山华东黄杉群落物种的周转组分是驱动群落物种组成差异的核心力量,其远高于嵌套组分,这与李大标等<sup>[25]</sup>对浙江遂昌马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)林 $\beta$ 多样性的研究结论一致,均证实物种替代是亚热带山地森林群落分化的主导过程,表明华东黄杉群落间差异主要源于物种更替,而非物种的净丢失或增加,支持了环境过滤理论对物种更替的筛选作用,与葛静茹等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。华东黄杉群落泸泉井和结须岩样地与清都亭样地的 Jaccard 相似性指数较高,暗示这些样地可能共享相似的环境条件或生态位;而结须岩样地与玉光亭样地的 Jaccard 相似性指数最低,反映出二者生境条件存在较大差异。华东黄杉群落嵌套组分普遍较低,表明选择性灭绝或人为干扰导致的物种贫乏现象在华东黄杉群落中并不明显,这也与李艳等<sup>[8]</sup>对华东黄杉遗传多样性的研究结论相吻合。

江西三清山华东黄杉群落乔木层物种的 Pianka 指数平均值略低于灌木层,可能与乔木层物种对光照资源的竞争更为激烈有关,而灌木层物种对林下弱光环境的适应能力更强,资源利用相似性更高<sup>[27]</sup>。这一结果与叶家桐等<sup>[28]</sup>的研究有所不同,广西银竹老山资源冷杉(*Abies ziyuanensis* L. K. Fu et S. L. Mo)群落乔木层优势树种 Pianka 指数均值为 0.699,种间竞争较强。值得注意的是,三清山华东黄杉群落中 Pianka 指数为 0.00 的种对较多,表明部分物种通过生态位分化实现共存,这有助于减少种间竞争。根据 Pianka<sup>[29]</sup>的生态位理论,竞争排斥原理认为生态位完全重叠的物种难以长期稳定共存,除非存在其他生态位维度的分化或环境异质性。华东黄杉群落中完全重叠的种对需引起关注,其长期共存机制可能涉及时间生态位分化或空间生态位分化。郭厚文等<sup>[30]</sup>在湿地植物群落中发现,时间生态位分离可有效促进物种共存。

## 4 结 论

江西三清山华东黄杉群落 4 个典型样地的调查和分析结果显示:乔木层以华东黄杉、台湾松和青冈为优势种;灌木层以玉山竹和猴头杜鹃为优势种;草本层物种组成复杂,优势种不明显。优势种具有较宽的生态位宽度,环境适应能力较强。群落的物种多样性在不同层次和样地间表现出差异。总体上看,结须岩样地乔木层的 $\alpha$ 多样性指数最高,结须岩和泸泉井样地灌木层的 $\alpha$ 多样性指数较高,泸泉井样地草本层的 $\alpha$ 多样性指数较高,玉光亭样地各层次的 $\alpha$ 多样性指数较低。三清山地区华东黄杉群落的 $\beta$ 多样性主要由物种周转驱动,表明不同样地间的物种组成差异较大,群落结构在空间上高度异质。乔木层和灌木层大多数种对的 Pianka 指数处于[0.00,0.50]之间,物种间资源利用差异较大,生态位分化明显。

未来对华东黄杉群落的研究需要进一步扩大范围,加强长期野外监测,深入探究物种间相互作用机制,将 $\alpha$ 多样性、 $\beta$ 多样性与生态位有机结合,从整体上把握华东黄杉群落的生态特征,为制定科学合理的保护策略提供有力支撑,推动华东黄杉保护与生态修复工作的深入开展。

### 参考文献:

- [1] LOREAU M, DE MAZANCOURT C, DUFFY E. Biodiversity and ecosystem stability: a synthesis of underlying mechanisms [J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(Suppl. 1): 106-115.
- [2] 周 来,程小芳,张梦晔. 林窗对华北落叶松天然次生林林下物种多样性的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(6): 48-56.
- [3] TILMAN D, ISBELL F, COWLES J M. Biodiversity and ecosystem functioning [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 2014, 45: 471-493.
- [4] 袁鹤洋,郝珉辉,何怀江,等. 长白山物种丰富度与物种组成对森林生产力的影响及其随演替的变化[J]. *植物生态学报*, 2024, 48(12): 1602-1611.
- [5] LI D, YUAN T, YANG J, et al. Positive effects of forest fragmentation *per se* on bryophyte diversity in subtropical fragmented forests: evidence from land-bridge islands [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1539513.
- [6] MYERS N, MITTERMEIER R A, MITTERMEIER C G, et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities [J]. *Nature*, 2000, 403: 853-858.
- [7] 郭 微,沈如江,吴金火,等. 江西三清山华东黄杉群落的组成及结构分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2007, 16(3): 46-52.

- [8] 李艳,鲁顺保,刘晓燕,等.濒危植物华东黄杉种群遗传多样性 ISSR 分析[J]. 武汉植物学研究, 2010, 28(1): 38-42.
- [9] 田胜尼,陈鑫,李仁远,等.安徽宁国珍稀濒危植物华东黄杉的种群动态研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(4): 385-393.
- [10] MARGULES C R, PRESSEY R L. Systematic conservation planning[J]. *Nature*, 2000, 405: 243-253.
- [11] HUANG S, LENG G, HUANG Q, et al. The asymmetric impact of global warming on US drought types and distributions in a large ensemble of 97 hydro-climatic simulations[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 5891.
- [12] 彭少麟,廖文波,王英永,等.中国三清山生物多样性综合科学考察[M]. 北京:科学出版社, 2008: 51.
- [13] 廖文波,王英永,贾凤龙,等.中国三清山生物多样性彩色图谱[M]. 北京:科学出版社, 2008: 6.
- [14] 张维伟,薛文艳,杨斌,等.桥山栎林群落结构特征与物种多样性相关关系分析[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 3991-4001.
- [15] 林阳,李时轩,周伟龙,等.百山祖国家公园植物群落 $\alpha$ 和 $\beta$ 多样性对海拔梯度的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(17): 7700-7712.
- [16] CHAI Z, SUN C, WANG D, et al. Interspecific associations of dominant tree populations in a virgin old-growth oak forest in the Qinling Mountains, China [J]. *Botanical Studies*, 2016, 57(1): 23.
- [17] GENITSARIS S, STEFANIDOU N, LEONTIDOU K, et al. Bacterial communities in the rhizosphere and phyllosphere of halophytes and drought-tolerant plants in Mediterranean ecosystems [J]. *Microorganisms*, 2020, 8(11): 1708.
- [18] CHEN D, LIAO J, BEARUP D, et al. Habitat heterogeneity mediates effects of individual variation on spatial species coexistence[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2020, 287(1919): 20192436.
- [19] 刘啸林,吴友贵,张敏华,等.浙江百山祖 25 ha 亚热带森林动态监测样地群落组成与结构特征[J]. 生物多样性, 2024, 32(2): 25-35.
- [20] 莫金凤,曾睿楷,周庆,等.广东鹅凰嶂省级自然保护区圆籽荷所在群落乔木层优势种的生态位及种间联结性[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(6): 74-82.
- [21] 高亮,江子涵,洪子辰,等.武夷山国家公园甜槠林主要树种生态位与种间联结分析[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(6): 65-73.
- [22] YU J, ZHANG X, XU C, et al. Thinning can increase shrub diversity and decrease herb diversity by regulating light and soil environments[J]. *Frontiers Plant Science*, 2022, 13: 948648.
- [23] 李欣怡,张丽芳,吴友贵,等.不同海拔高度下百山祖冷杉幼苗的生长特征及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2025, 49(4): 610-623.
- [24] BASELGA A. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(1): 134-143.
- [25] 李大标,钟毓萍,龚笑飞,等.浙江遂昌马尾松林物种和谱系 $\beta$ 多样性驱动因子分析[J]. 广西植物, 2023, 43(7): 1258-1267.
- [26] 葛静茹,张荣霞,杨济萍,等.长白山阔叶红松林植物 $\beta$ 多样性组分分解及其驱动机制[J]. 干旱区资源与环境, 2025, 39(12): 145-154.
- [27] 李星,隋莹莹,辛智鸣,等.内蒙古阿拉善梭梭人工林林下主要植物的生态位特征和种间联结性[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(3): 79-87.
- [28] 叶家桐,邓涛,岑华飞,等.广西银竹老山资源冷杉群落乔木优势树种生态位与种间联结[J]. 生态学报, 2025, 45(8): 3921-3932.
- [29] PIANKA E R. The structure of lizard communities [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 53-74.
- [30] 郭厚文,付为国.基于时空生态位分布的长江下游滨江湿地藓草和芦苇资源互补利用[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(15): 82-85.

(责任编辑:张明霞)