

海南五指山不同海拔梯度下药用植物组成及分布特征

陈佳欣¹, 杜尚嘉^{2,3*}, 吴海霞^{2,3}, 符生波^{2,3}, 符明珠^{2,3}, 涂志华¹, 郭霞^{2,3**}

1. 海南大学热带农林学院, 海南海口 570228; 2. 海南省林业科学研究院(海南省红树林研究院), 海南海口 571100;
3. 海南省热带林业资源监测与应用重点实验室, 海南海口 571100

摘要: 热带山地生态系统是药用植物资源的重要宝库, 解析热带山地生态系统中药用植物资源的海拔分布格局对资源可持续利用、生物多样性保护及药用活性成分环境驱动机制研究具有重要价值。为揭示海南五指山药用植物沿海拔梯度的分布规律, 本研究基于不同海拔梯度(低海拔 200~400 m、中海拔 400~600 m、中高海拔 600~800 m、高海拔 800~1100 m)设置样方调查, 共记录药用植物 99 科 260 属 447 种, 其中被子植物占总种数的 93.51%。结果表明: (1) 热带分布科、属分别占 83.35% 和 86.55% (排除世界广布成分), 温带成分随海拔升高显著增加; 被子植物在各海拔段均占据绝对优势, 低海拔蕨类植物仅占 1.80%; 随海拔升高, 蕨类植物比例显著增加, 中高海拔和高海拔分别占 4.79% 和 6.50%, 成为关键类群; (2) 乔木层综合重要值呈双峰分布, 优势物种由低海拔热带种向高海拔温带过渡种演替, 体现热带向温带区系的过渡特征; 灌木层重要值沿海拔升高呈波动下降, 反映其对上层乔木结构的协同响应; 草本层优势类型沿海拔升高从耐阴草本向药用蕨类显著转变。(3) α 多样性分析显示, 乔木层物种丰富度、Shannon 多样性指数在中高海拔达到峰值, 符合“中域效应”; 草本层多样性在中海拔形成显著峰值, Simpson 优势度指数显著高于乔灌木层。(4) β 多样性分析表明, 乔木层物种更替受水热梯度驱动, 而灌草层主要受微生境异质性调控。本研究系统阐明了五指山药用植物的垂直分布格局, 不仅为热带山地药用植物资源保护与利用提供理论依据, 同时为探究药用植物品质形成的环境驱动机制奠定基础。后续可重点加强中高海拔(600~1100 m)药用蕨类富集区的生态因子解析。

关键词: 药用植物; 区系成分; 多样性指数; 五指山; 热带山地; 分布特征

中图分类号: S567 文献标志码: A

Composition and Distribution Characteristics of Medicinal Plants under Different Altitude Gradients in Wuzhishan, Hainan, China

CHEN Jiabin¹, DU Shangjia^{2,3*}, WU Haixia^{2,3}, FU Shengbo^{2,3}, FU Mingzhu^{2,3}, TU Zhihua¹, GUO Xia^{2,3**}

1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Hainan Academy of Forestry (Hainan Academy of Mangrove), Haikou, Hainan 571100, China; 3. Key Laboratory of Tropical Forestry Resources Monitoring and Application of Hainan, Haikou, Hainan 571100, China

Abstract: Tropical mountain ecosystems are vital repositories of medicinal plant resources, and understanding the altitudinal distribution patterns is crucial for sustainable resource utilization, biodiversity conservation, and research into environmental drivers of medicinal bioactive compounds. To elucidate the altitudinal distribution patterns of the medicinal plants in Wuzhishan Mountain, Hainan, this study conducted quadrat surveys across different elevation gradients (low: 200–400 m; mid: 400–600 m; mid-high: 600–800 m; high: 800–1100 m), documenting 447 species from 260 genera and 99 families, with angiosperms comprising 93.51% of the total species. Tropical families and genera accounted for 83.35% and 86.55%, respectively (excluding cosmopolitan elements), while temperate components increased significantly with elevation. Angiosperms dominated across all elevations, whereas ferns, initially comprising only 1.80% at low

收稿日期 2025-06-26; 接受日期 2025-08-16

基金项目 海南省省属科研院所技术创新项目 (No. KYYSLK2023-022)。

作者简介 陈佳欣 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 热带雨林生物多样性保护及恢复; *同等贡献作者: 杜尚嘉 (1991—), 男, 学士, 林业工程师, 研究方向: 植物资源保护利用及病虫害监测。**通信作者 (Corresponding author): 郭霞 (GUO Xia), E-mail: lengning77@126.com。

elevations, increased significantly to 4.79% and 6.50% at mid-high and high elevations, emerging as a key group. The comprehensive importance value of the tree layer exhibited a bimodal distribution, with dominant species transitioning from tropical at low elevations to temperate transitional species at high elevations, reflecting a tropical-to-temperate floristic shift. The shrub layer's importance value fluctuated downward with elevation, indicating a synergistic response to the overlying tree structure, while the herb layer shifted from shade-tolerant herbs to medicinal ferns with increasing elevation. α -diversity analysis revealed that tree layer species richness and Shannon diversity peaked at mid-high elevations, aligning with the "mid-domain effect", while herb layer diversity peaked at mid-elevations, with Simpson dominance significantly higher than in the tree and shrub layers. β -diversity indicated that tree layer species turnover was driven by hydrothermal gradients, whereas shrub and herb layers were primarily influenced by microhabitat heterogeneity. In summary, this study systematically elucidated the vertical distribution patterns of medicinal plants in Wuzhishan Mountain, providing a theoretical foundation for the conservation and utilization of tropical mountain medicinal plant resources and insights into the environmental drivers of medicinal plant quality. Future research should focus on ecological factor analysis in the mid-high elevation (600–1100 m) fern-rich zones.

Keywords: medicinal plants; floristic components; diversity index; Wuzhishan Mountain; tropical mountain; distribution characteristics

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.12.023

药用植物是生物多样性的的重要组成部分,也是我国传统中药资源的核心要素,对人类健康、传统医药传承以及新药研发具有不可替代的价值。据统计,我国具有药用价值的植物约占中药资源总量的 87%^[1],是全球药用植物资源最丰富的国家之一。海南岛作为我国重要的热带生物多样性热点区域,其药用植物资源尤为丰富。目前记录显示,海南岛植物种类达 6036 种(含栽培种),隶属 243 科 1895 属,其中本地野生植物 4579 种(含 211 变种,26 亚种),隶属于 225 科 1429 属;已整理记录的药用植物共 2954 种^[2],包含 483 种海南特有植物^[3],开发潜力巨大。如此丰富的植物多样性,其分布格局可能随海拔梯度呈现独特模式。海拔梯度显著改变温度、降水、光照强度、紫外线辐射、湿度以及土壤理化性质等关键环境因子,形成复杂的生境异质性^[4-7],成为驱动山地生态系统物种组成、群落结构和多样性空间分异的核心机制。环境因子不仅影响药用植物的分布与多度,还可能通过调控次生代谢过程,显著影响其药用活性成分的含量与组成(如特定药味、药性与海拔的相关性)^[8]。在陕南秦巴山区^[9]和湘西地区^[10]的研究均表明,药用植物物种丰富度常随海拔升高呈单峰格局(先增后减)。然而,关于海南岛植物群落,尤其是药用植物的海拔分布规律,目前学界仍存在明显分歧,并且缺乏针对五指山等核心山地的系统性研究。现有研究对物种多样性垂直分异模式存在不同观点,部分学者支持“中域效应”假说,证实中等海拔存在多样性峰值^[11-13],而另一些学者则认为多样性随海

拔升高呈线性下降或无显著梯度规律^[14-15]。这种空间异质性可能与研究区域的水热阈值及采样尺度的差异密切相关。这些差异表明,不同山地生态系统中,物种多样性的海拔梯度分布格局存在显著特异性。

五指山地处海南岛地理中心,作为岛屿生态系统的核心枢纽,其复杂的地形与垂直气候分异形成了独特的生境梯度。这种垂直异质性不仅孕育了丰富的生物多样性,也蕴藏着特殊的药用植物类群。具体而言,相较于同纬度低海拔区域,高海拔地区年均温显著降低(海拔每升高 100 m,气温下降 0.5~0.6 °C),并伴随降水格局、空气湿度、云雾频率、光照条件和风力等因子的系统性变化^[16]。前期研究主要集中于五指山地区濒危稀有药用植物组成评价,以及黎族传统药用植物资源的整理与保护研究,尚未系统开展五指山不同海拔梯度下药用植物群落组成、分布格局及其与环境梯度关系的综合研究。这一领域的欠缺,限制了对药用植物空间分布特征及其可持续利用潜力的有效评估,此外,关于环境因子(尤其是海拔相关因子)如何影响药用植物资源量及品质形成的基础数据仍较为缺乏。因此,本研究在五指山沿海拔梯度(200~1100 m)布设系统调查样地,整合植物区系分析、群落生态学及多样性测度方法,旨在解析五指山不同海拔梯度下药用植物的种类组成与区系特征,揭示优势物种的分化规律及群落结构的海拔响应模式,阐明物种多样性(α 、 β 多样性)沿海拔梯度的分布格局及其驱动机制。研究结果将为科学认知五指山药用植物资源分布

规律、制定针对性保护策略及实现热带山地药用植物资源可持续利用提供关键理论支撑，并为深入探究药用植物资源量与品质形成的环境驱动机制奠定重要的生态学基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

五指山位于海南岛中南腹地，其气候受热带季风与地形抬升协同作用，形成明显的垂直分异。海拔 800 m 以下属热带季风气候，旱雨季明显；海拔 800~1200 m 过渡为热带山地气候；海拔 1200 m 以上（尤其山顶）属亚热带湿润山地气候，区域多年平均径流深 1000 mm，但降雨年内分配不均匀，集中分布于 5—10 月^[17]。五指山主峰海拔 1867 m，是海南岛地形隆升与水文循环的关键枢纽，年均温为 22.4 ℃，极端低温为 10 ℃，极端高温为 35.9 ℃，年降水量为 1860 mm，相对湿度为 84%，年日照时数为 2000 h^[18-19]。土壤以山地黄壤和山地赤红壤为主，局部分布山地灌丛草甸土。植被垂直带谱完整，从低海拔枫香次生林依次演替为低地雨林、山地雨林、热带亚高山矮

林和山顶灌丛。复杂的地形和保存完好的原生植被共同形成了多样化的微生境，为药用植物提供了理想的生长条件。

1.2 方法

基于前期踏查和历史样地数据整合，采用系统性网格抽样法，以 1 km×1 km 网格为基本单元，通过机械抽样在五指山地区布设样地。于 2023 年 8 月至 2024 年 1 月（覆盖夏、秋、冬三季）共设置 80 个 20 m×20 m 的永久样方（总面积 3.2 hm²），确保样方空间分布涵盖不同海拔梯度与植被类型，且无重复调查干扰。每个样方均记录环境参数，地理信息包含经纬度、海拔、坡位、坡向、坡度；植被类型参照《中国植被分类系统》^[20]划分热带雨林、山地常绿阔叶林等类型。乔木层中，采用每木检尺法，记录所有胸径≥1 cm 个体的种名、胸径、树高及冠幅；灌草层中，在每个样方四角设置嵌套样方，灌木层：5 m×5 m，草本层：1 m×1 m，记录物种组成、高度及盖度。样方按海拔梯度归类（表 1），并依据《全国中药资源普查技术规范》^[21]进行数据校验，确保物种鉴定和指标测量的标准化。

表 1 样地类型基本信息
Tab. 1 Basic information of plot types

样地类型 Plot type	海拔 Elevation/m	样方数量 Number of quadrats	经度 Longitude	纬度 Latitude	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	坡位 Slope position
低海拔	200~400	15	109°25'1"~109°46'16"E	18°49'58"~18°56'44"N	东坡	25~35	中
中海拔	400~600	22	109°25'28"~109°46'00"E	18°56'42"~18°46'20"N	东坡	15~25	中
中高海拔	600~800	24	109°27'36"~109°45'48"E	18°56'70"~18°46'20"N	东坡	5~15	中
高海拔	800~1100	19	109°29'30"~109°41'50"E	18°50'24"~18°54'26"N	西南坡	25~35	中

1.3 数据处理

1.3.1 重要值计算 相对多度（RA）表示目标物种个体数量在群落总个体数中的占比，计算公式为：

$$RA = \left(\frac{N_i}{N_{\text{总}}} \right) \times 100\%$$

式中， N_i 为第 i 物种的个体数， $N_{\text{总}}$ 为所有物种个体总数。

相对频度（RF）表征物种在空间上的分布广度，定义为该物种出现的样方数占样方总数的比例：

$$RF = \left(\frac{F_i}{F_{\text{总}}} \right) \times 100\%$$

式中， F_i 为第 i 物种的样方数， $F_{\text{总}}$ 为总样方数。

相对显著度（RD）基于群落结构权重，反映物种在资源竞争中的优势地位，通过胸高断面积（BA）占比计算：

$$RD = \left(\frac{BA_i}{BA_{\text{总}}} \right) \times 100\%$$

式中， BA_i 为第 i 物种的胸高断面积总和， $BA_{\text{总}}$ 为所有物种胸高断面积合计。

相对盖度（RC）描述物种对地表空间的占据能力，

$$RC = \left(\frac{C_i}{C_{\text{总}}} \right) \times 100\%$$

式中， C_i 为第 i 物种的垂直投影覆盖面积， $C_{\text{总}}$ 为

所有物种盖度总和。

物种重要值（IV）计算公式如下^[22]：IV_{乔木层}=(RA+RF+RD)/3；IV_{灌木层}=(RA+RF)/2；IV_{草本层}=(RF+RC)/2。

1.3.2 多样性测度 采用 α 多样性测度指标，使用 R 4.5.0 软件计算 Margalef 物种丰富度指数（ R ）、Shannon-Wiener 多样性指数（ H ）、Simpson 优势度指数（ D ）、Pielou 均匀度指数（ E ）和 Simpson diversity 多样性指数。使用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析（ANOVA）和最小显著差异（LSD）法多重比较，检验不同海拔梯度下的差异显著性，使用 Origin 2024 软件作图，计算公式为^[23]：

$$R=\frac{S-1}{\ln N}$$
$$H=-\sum_{i=1}^S\frac{P_i\ln P_i}{2}$$
$$D=1-\sum_{i=1}^SP_i^2$$
$$E=\frac{H}{\ln S}$$

Simpson diversity 多样性指数= $\frac{1}{\sum p_i^2}$

式中， S 为样地内物种总数； N 为所有物种的总个体数； $P_i=N_i/N$ ， N_i 为物种 i 的个体数。

采用 β 多样性反映群落间的物种组成差异，使用 R 4.5.0 软件计算 Bray-Curtis 距离，量化 2

个样方间物种组成相似性，同时考虑物种有无和丰度差异，计算公式为^[24]：

$$BC_{ij}=1-\frac{2\sum\min(X_i,X_j)}{\sum X_i+\sum X_j}$$

式中， X_i 、 X_j 为样方 i 和 j 中所有物种的丰度向量。使用 R 4.5.0 软件的“vegan”^[25]程序包进行主坐标分析（PCoA）作图，以揭示不同海拔梯度下药用植物物种群落组成的相似性或相异性的可视化坐标，该方法是一种非约束性的数据降维分析方法。

2 结果与分析

2.1 药用植物种类组成及其区系成分特点

根据五指山固定样地实地调查的结果，依据《Flora of China》^[26]、《中国植物志》^[27]、《海南植物志》^[3]和《中国高等植物图鉴》^[28]等资料，进一步确定其科、属、种，整理出五指山植物调查名录，以《中国药典》^[29]为主，《中华本草》^[30]和《中药鉴定学》^[31]为辅，确定药用植物名录。结果显示，调查样方内共有 99 科 260 属 447 种维管药用植物，包括被子植物 82 科 240 属 418 种，裸子植物 5 科 5 属 5 种，蕨类植物 12 科 15 属 24 种（表 2）。可见，被子植物是当前调查维管药用植物中物种组成的主要部分，而且其科数占总科数的 82.83%，其属数占总属数的 92.31%，其种数占总种数的 93.51%。

表 2 样地内药用植物物种组成
Tab. 2 Species composition of medicinal plants within sample plot

植物类群 Plant group			科 Family		属 Genus		种 Species	
			数量 Number	占比 Percentage/%	数量 Number	占比 Percentage/%	数量 Number	占比 Percentage/%
蕨类植物			12	12.12	15	5.77	24	5.37
种子植物	裸子植物		5	5.05	5	1.92	5	1.12
	被子植物	双子叶植物	73	73.74	212	81.54	381	85.23
		单子叶植物	9	9.09	28	10.77	37	8.28
总计			99	100	260	100	447	100

根据植物区系的科、属分布型，参考文献[32-36]分布区类型可大致划分为世界分布型、热带分布型、温带分布型、东亚和中国特有 4 类，五指山所调查样地群落内的种子植物科可划分为 10 个分布区类型和 4 个亚型（表 3）。世界广布的科有蔷薇科（Rosaceae）、桑科（Moraceae）和菊科（Compositae）等 15 科；热带分布的科占比最

大，有葡萄科（Vitaceae）、天南星科（Araceae）和防己科（Menispermaceae）等 60 科，占总科数的 83.35%（占比不含世界分布的科，下同）；其次是温带分布的科共 9 个，占 12.50%，如胡桃科（Juglandaceae）、猕猴桃科（Actinidiaceae）和金缕梅科（Hamamelidaceae）等。

样地群落内的种子植物属划分为 12 个分布

表 3 五指山药用种子植物科、属的区系成分

Tab. 3 Floristic composition of medicinal spermatophyte families and genera in Wuzhishan Mountain

分布区类型 Distribution type	科 Family		属 Genus	
	数量 Number	占比 Percentage/%	数量 Number	占比 Percentage/%
1 世界分布	15		7	
2 泛热带	34	47.22	62	26.05
2-1 热带亚洲、大洋洲和热带美洲	2	2.78	1	0.42
2-2 热带亚洲、非洲和南美洲间断	2	2.78	1	0.42
2s 泛热带分布，主产南半球	4	5.56		0.00
3 热带亚洲和热带美洲间断分布	7	9.72	5	2.10
4 旧世界热带	3	4.17	28	11.76
4-1 热带亚洲、非洲和大洋洲间断		0.00		0.00
5 热带亚洲至热带大洋洲	4	5.56	32	13.45
6 热带亚洲至热带非洲	2	2.78	17	7.14
6-2 热带亚洲和东非间断		0.00		0.00
7 热带亚洲(印度-马来西亚)		0.00	60	25.21
7-1 爪哇、喜马拉雅和星散分布于华南、西南		0.00		0.00
7-4 越南至华南		0.00		0.00
7d 全分布区东达新几内亚	2	2.78		0.00
8 北温带	2	2.78	8	3.36
8-4 北温带和南温带(全温带)间断	6	8.33		0.00
9 东亚和北美洲间断	1	1.39	3	1.26
10 旧世界温带		0.00		0.00
11 温带亚洲分布		0.00	1	0.42
12 地中海区、西亚至中亚		0.00		0.00
12-3 地中海区至温带、热带亚洲、大洋洲和南美洲间断		0.00		0.00
(12)s.s 地中海区或环地中海		0.00		0.00
14 东亚（东喜马拉雅-日本）	3	4.17	12	5.04
14-1 中国-喜马拉雅（SH）				0.00
14-2 中国-日本（SJ）				0.00
15 中国特有			8	3.36
合计	87	100	245	100

区类型 2 个亚型（表 3），世界分布的有菝葜属（*Smilax*）、悬钩子属（*Rubus*）和虎皮楠属（*Daphniphyllum*）等 7 属，热带分布的属占较大比例，占总属数的 86.55%，其中热带分布中以泛热带分布的属最多，有 62 属，如草珊瑚属（*Lysimachia*）、刺篱木属（*Berchemia*）和谷木属（*Memecylon*）等；温带分布的属占总属数的 5.04%，如栲属（*Fraxinus*）、鹅耳枥属（*Carpinus*）和卫矛属（*Euonymus*）等 12 属。

根据五指山设置的 80 个固定样方群落的科、属分布可知，科、属分布主要以热带分布为主，且以泛热带分布为主，温带地理成分在该群落内数量占比较少，表明五指山药用植物区系具典型热带性，温带成分随海拔梯度递增而增加，反映

了气候垂直分异对物种组成的塑造作用。

2.2 不同海拔梯度药用植物物种组成特征

基于 80 个样方的调查数据，对不同海拔梯度药用植物的物种组成进行统计分析。结果显示，五指山药用植物物种总数随海拔升高呈先增后减的趋势。其中，被子植物在各海拔段均占据绝对优势，其物种数占比均在 90.00%以上；裸子植物种类稀少且分布零散，在各海拔段占比均低于 2.00%；低海拔蕨类物种数占比仅为 1.80%，而随着海拔升高，蕨类植物的比例持续增加，在中高海拔达到 4.79%，并在高海拔达到峰值 6.50%（表 4）。总体而言，不同海拔梯度下药用植物的物种组成存在明显差异，特别是蕨类植物比例随海拔升高呈明显增加的特征，是五指山药用植物垂直

表 4 不同海拔梯度药用植物物种组成
Tab. 4 Species composition of medicinal plants across different altitudinal gradients

海拔梯度 Altitude gradient	总种数 Total species	被子植物 Angiosperms				裸子植物 Gymnosperms				蕨类植物 Pteridophytes			
		科数 Number of fami- lies	属数 Number of genera	种数 Number of spe- cies	占比 Percent- age/%	科数 Number of fami- lies	属数 Number of genera	种数 Number of spe- cies	占比 Percent- age/%	科数 Number of fami- lies	属数 Number of genera	种数 Number of spe- cies	占比 Percent- age/%
低海拔	167	57	128	164	98.20	0	0	0	0.00	2	2	3	1.80
中海拔	245	66	157	233	95.10	1	1	1	0.41	8	8	11	4.49
中高海拔	292	71	175	276	94.52	2	2	2	0.68	8	9	14	4.79
高海拔	246	66	146	226	91.87	4	4	4	1.63	8	11	16	6.50

注：由于不同海拔间存在相同的树种，所以科数、属数、种数之间有重复。
Note: Due to the presence of the same tree species at different elevations, there are overlaps in the counts of families, genera and species.

分布格局的重要组成部分。

2.3 不同海拔梯度药用植物分布特征分析

2.3.1 不同海拔梯度乔灌木层药用植物物种重要值分析 利用重要值（IV）作为物种生态优势度的综合量化指标，系统解释了五指山药用植物群落的不同海拔梯度物种分异规律。群落为典型的热带次生林类型，群落空间层次可分为乔木层、灌木层和草本层。不同海拔梯度乔灌木层药用植物排名前 5 的物种重要值如图 1，结果表明，在乔木层中，低海拔的滨木患（*Arytera littoralis*）重要值最大，为 0.348，其次是窄叶半枫荷（*Pterospermum lanceifolium*）重要值为 0.295，说明滨木患和窄叶半枫荷为低海拔乔木层优势种。中海拔的黄牛木（*Cratoxylum cochinchinense*）重要值最大，为 0.289，其次是岭南山竹子（*Garcinia oblongifolia*），重要值为 0.283，说明黄牛木和岭南山竹子为中海拔乔木层优势种。中高海拔的橄榄（*Canarium album*）重要值最大，为 0.212，其次是黄杞（*Engelhardia roxburghiana*），重要值为 0.181，说明橄榄和黄杞为中海拔乔木层优势种。高海拔的狭叶泡花树（*Meliosma angustifolia*）重要值最大，为 0.224，其次是海南鹅掌柴（*Heptapleurum hainanense*），重要值为 0.211，说明狭叶泡花树和海南鹅掌柴为高海拔乔木层优势种。综上所述，乔木层药用植物分布特征为在低海拔以喜热广布种为主，随着海拔的升高表现出过渡带物种更替，乔木层物种更替集中于中海拔过渡带，指示温度阈值效应。

在灌木层中，低海拔的滨木患重要值最大，为 0.293，其次是窄叶半枫荷，重要值为 0.291，说明滨木患和窄叶半枫荷为低海拔灌木层优势种。中海拔的九节（*Psychotria asiatica*）重要值

最大，为 0.317，其次是海南鹅掌柴，重要值为 0.258，说明九节和海南鹅掌柴为中海拔灌木层优势种。中高海拔的肉实树（*Sarcosperma laurinum*）重要值最大，为 0.243，其次是橄榄，重要值为 0.221，说明灌木层中肉实树和橄榄为中海拔灌木层优势种。高海拔的鹅掌柴（*Heptapleurum heptaphyllum*）重要值最大，为 0.264，其次是海南鹅掌柴，重要值为 0.258，说明鹅掌柴和海南鹅掌柴为高海拔灌木层优势种。综上所述，灌木层药用植物分布特征为在低海拔以阳性耐旱灌木为主，中海拔以耐阴湿灌木为主，随海拔升高以矮生抗风灌木为主，灌木层体现海拔生态位泛化特性，重要值排名变化随海拔升高更平缓。

在草本层中，低海拔的九节重要值最大，为 0.222，其次是银柴（*Aporosa dioica*）重要值为 0.212，说明九节和银柴为低海拔草本层优势种。中海拔的海南草珊瑚（*Sarcandra glabra brachystachys*）重要值最大，为 0.166，其次是菝葜（*Smilax china*）重要值为 0.144，说明海南草珊瑚和菝葜为中海拔草本层优势种。中高海拔的黑顶卷柏（*Selaginella picta*）重要值最大，为 0.245，其次是单叶新月蕨（*Pronephrium simplex*），重要值为 0.189，说明黑顶卷柏和单叶新月蕨为中海拔草本层优势种。高海拔的深绿卷柏（*Selaginella doederleinii*）重要值最大，为 0.290，其次是海南草珊瑚，重要值为 0.199，说明草本层中深绿卷柏和海南草珊瑚为高海拔草本层优势种。综上所述，草本层药用植物分布特征为在低海拔以大型喜湿草本为主，中海拔是多样性峰值区，随海拔升高以卷柏属为主，草本层重要值峰值出现在高湿度中海拔带，分布主要受地表温湿度梯度控制，反映林下微生境过滤。

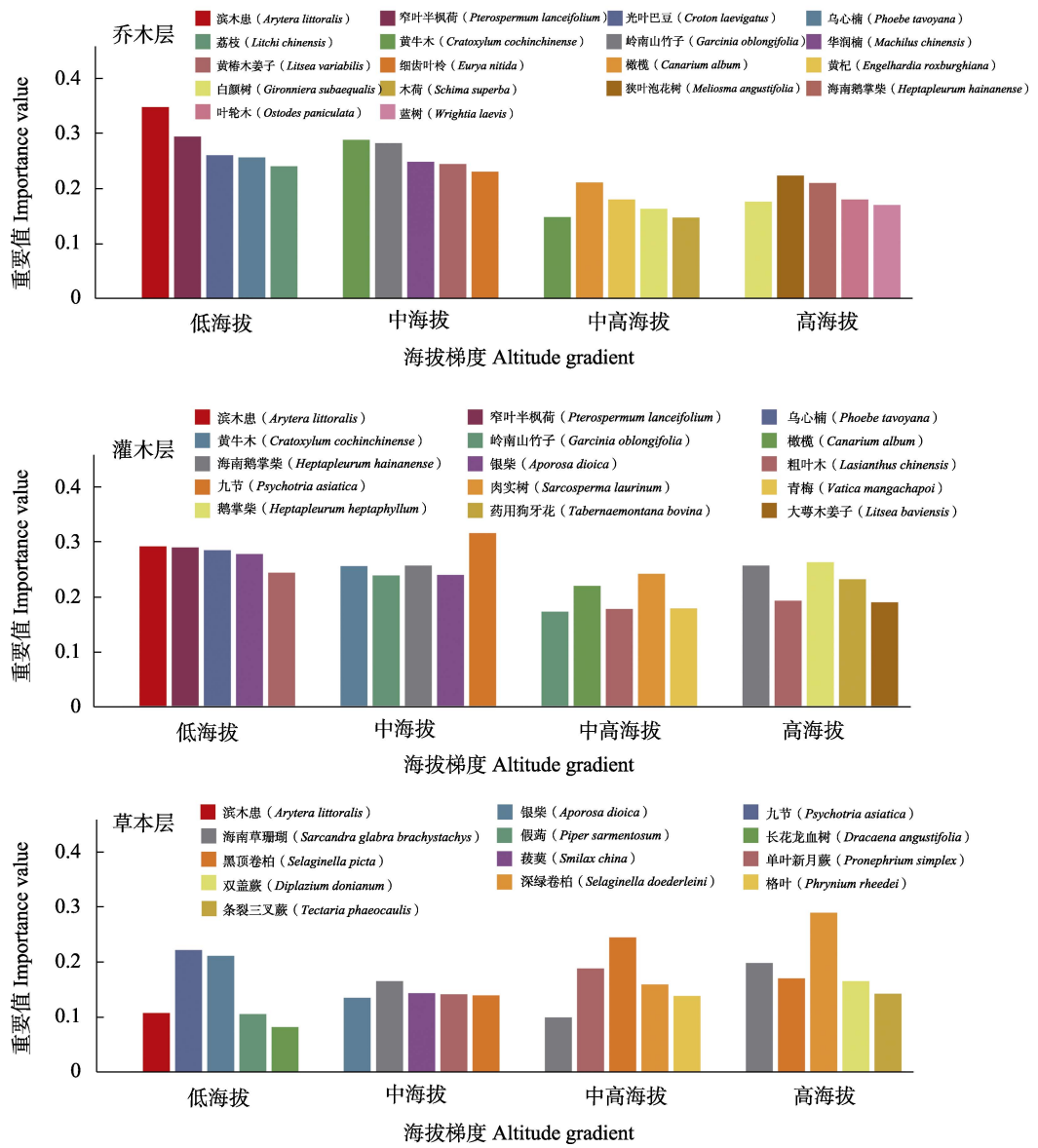


图 1 不同海拔乔灌木层药用植物前 5 物种重要值

Fig. 1 Important values of top five medicinal plant species in tree/shrub/herb layer at different elevations

2.3.2 不同海拔梯度植物群落组成的变化特征

五指山药用植物群落组成沿海拔梯度呈显著的层级分异特征可从空间层次说明。乔木层低海拔以热带性物种为主导，如滨木患和窄叶半枫荷，而中海拔优势种更替为过渡性类群，如狭叶泡花树和海南鹅掌柴，高海拔温带成分显著增加，印证科、属区系分析中温带成分随海拔提升的增量趋势。灌木层优势种沿海拔升高呈协同变化，低海拔以滨木患和窄叶半枫荷为主，中海拔转为九节和海南鹅掌柴，中高海拔和高海拔则以肉实树和橄榄为优势类群，反映物种更替对海拔的响应。草本层低海拔以九节和银柴为主，随着海拔的升高蕨类优势凸显，中海拔以海南草珊瑚和菝葜为

主，中高海拔和高海拔则以卷柏属为主导，如深绿卷柏和黑顶卷柏。不同海拔群落综合重要值见图 2，优势种更替揭示环境梯度对群落的筛选作用，乔木层综合重要值呈双峰分布，峰值分踞低海拔和高海拔处，指示热带向温带区系的过渡；灌木层重要值沿海拔升高先大幅度下降后缓慢升高，反映其对乔木冠层结构的协同响应；草本层随海拔升高呈波动式先降后升的趋势，向耐湿蕨类转变凸显林下微生境调控。

2.3.3 不同海拔梯度乔灌木层 α 多样性的变化特征

不同海拔乔灌木层 α 多样性指数如图 3，无论海拔高低，乔木层和灌木层的物种丰富度均明显高于草本层，其中低海拔和中高海拔乔木层的

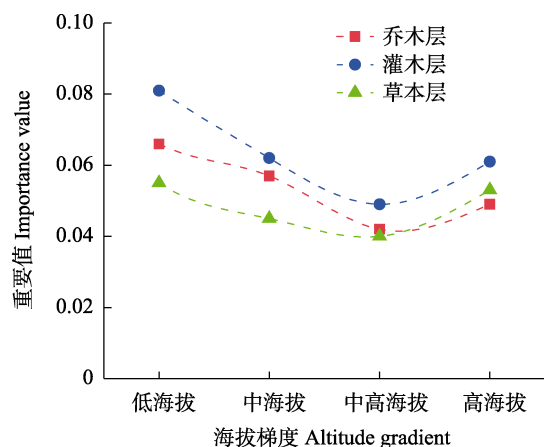
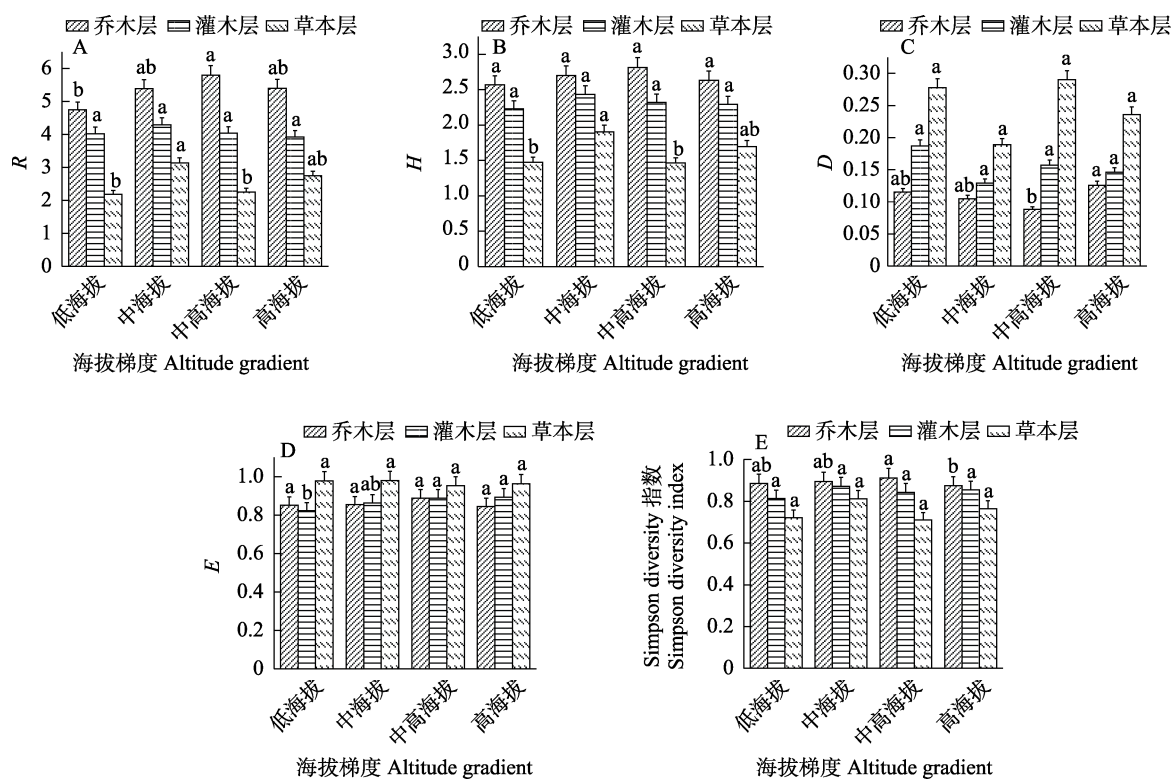


图 2 不同海拔植物群落综合重要值变化

Fig. 2 Variation in comprehensive importance values of plant communities at different elevations

Margalef 物种丰富度指数 (R) 具有显著差异, 中海拔与低海拔、中高海拔草本层的 R 指数具有显著差异 (图 3A)。乔木层的 Shannon-Wiener 多样性指数 (H) 在中高海拔处达到峰值, 随海拔梯度增加呈先升后降的单峰格局, 灌木层在中海拔处出现最大值的, 而后趋于稳定, 草本层随海拔梯度增加呈波动变化, H 指数出现 2 个峰值, 中

海拔与低海拔、中高海拔的草本层 H 指数具有显著差异 (图 3B)。不同海拔梯度中, 草本层的 Simpson 优势度指数 (D) 均显著大于乔木层和灌木层, 说明随着海拔梯度增加, 更有利于草本层药用植物的天然更新和生长发育; 中高海拔和高海拔的乔木层 D 指数具有显著差异, 其余层次 D 指数随海拔升高相差明显 (图 3C)。草本层的 Pielou 均匀度指数 (E) 显著大于乔木层和灌木层, 并且乔木层和草本层的 E 指数随海拔升高相差明显, 低海拔与中高海拔、高海拔的灌木层 E 指数具有显著差异 (图 3D)。Simpson diversity 多样性指数在同一海拔下, 乔木层最大, 灌木层次之, 草本层最小, 且只有中高海拔和高海拔的乔木层 Simpson diversity 多样性指数具有显著差异 (图 3E)。综上所述, 中高海拔是乔木多样性的热点区, Margalef 物种丰富度指数 (R)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H) 和 Simpson diversity 指数在中高海拔处均达峰值, 表明中高海拔最利于乔木层物种共存, 灌木层在中海拔的丰富度略优, 但整体无显著变化, 适应力强, 草本多样性指数峰值则依赖中层林窗资源。



不同小写字母表示不同海拔同一空间层次差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference in the same spatial level at different altitudes ($P < 0.05$).

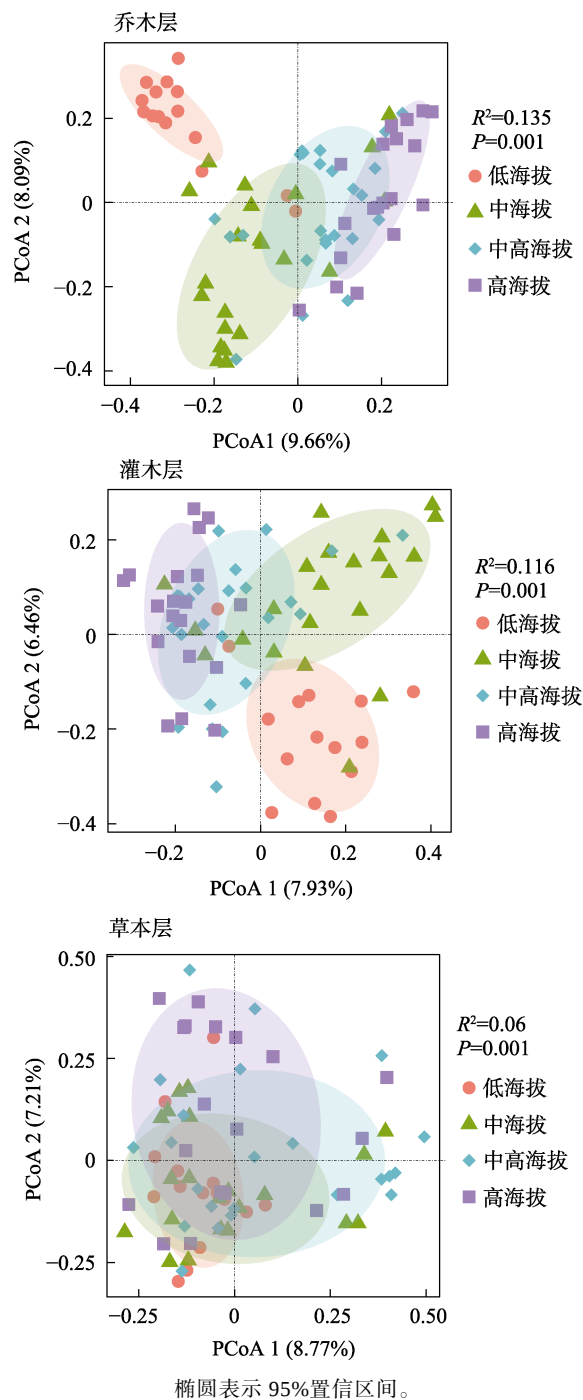
图 3 不同海拔乔灌木草本层 α 多样性指数Fig. 3 α -diversity indices across tree/shrub/herb layers at different altitudes

2.3.4 不同海拔梯度乔灌草层 β 多样性的变化特征 五指山药用植物群落结构随海拔梯度升高呈显著的层级分异，不同海拔乔灌草层 β 多样性的 PCoA 排序如图 4。乔木层中，低海拔与其他海拔样地类型群落在 PCoA1 上完全分离（解释率 9.66%），具有很强的异质性，反映了泛亚热带向温带区系的明显生态过渡；除低海拔外，其他海拔样地类型群落间均有部分重叠，群落之间具有相似性，说明相邻海拔梯度的乔木群落存在一定相似性，但低海拔与高海拔间差异显著，可能因乔木物种的海拔生态幅较窄，表明乔木群落结构随海拔升高呈梯度变化，中海拔生境过滤作用较弱，与温度递减、风力增强等环境筛选有关，生态系统的驱动机制表现为水热条件沿海拔梯度变化，即低海拔高温高湿，高海拔低温低湿，建群种由滨木患到狭叶泡花树更替。灌木层所有样地类型在排序空间内广泛重叠，可能因灌木对光照和水分的适应性较强，受乔木层遮阴影响显著，导致海拔直接效应被削弱，其中中高海拔和高海拔尤其显著，证实高海拔灌木层群落结构稳定性高于低海拔群落。中高海拔和高海拔样本点向 PCoA 负轴集中，可能与乔木层郁闭度降低、灌木获得更多光照有关。高海拔灌木可能通过矮化、丛生等形态适应抵御寒风，而低海拔灌木更多受乔木竞争排斥，物种组成差异体现“环境筛选+层间竞争”的复合作用。草本层所有样地类型在排序空间呈分散分布，且高海拔点集范围显著大于低海拔，说明高海拔草本群落异质性更高，可能因微地形，如石缝、土坡和土壤养分斑块化导致物种分布随机性强。草本层作为群落底层，受乔木层与灌木层的遮阴、凋落物覆盖影响更大，海拔气候的直接作用被植被层过滤，如，低海拔草本可能因乔木郁闭度高而以耐阴物种为主，高海拔则因乔木稀疏而出现喜光草本。组内高变异，如高海拔点分散反映此处草本对极端气候的多种适应策略，如多年生草本与一年生草本混生，导致群落结构更复杂。综上所述， β 多样性响应强度为乔木层>灌木层>草本层，体现“自上而下”的级联调控机制。

3 讨论

3.1 药用植物物种组成及区系分析

海南五指山山地群落物种组成丰富，维管束植物多样性高，共记录药用植物 447 种。被子植



椭圆表示 95% 置信区间。

Ellipses show 95% confidence intervals.

图 4 不同海拔乔灌草层 β 多样性的 PCoA 排序

Fig. 4 PCoA ordination of β -diversity across tree/shrub/herb layers at different altitudes

物在各海拔段均占据绝对优势。蕨类植物比例随海拔升高显著增加，成为高海拔关键类群，这与其对高湿、弱光林下环境的适应性密切相关，如卷柏属等通过 C_3 光合途径和耐阴形态结构提升资源利用。该结果印证五指山作为热带生物多样性热点和传统药用植物资源宝库的重要地位。地理区系呈现显著的热带属性：热带科属占比均大

于 83.00%，远超温带成分。其中，泛热带分布型（34 科）是最主要的科级分布类型；热带分布属占总属数的 86.55%（排除世界分布属），主导性更为突出。丰富的热带亚洲分布属表明该地区与东南亚在药用植物资源上存在广泛的共有种或近缘种。此结论与黄世能等^[37]、邢福武等^[38]和张荣京等^[39]对海南植物区系的研究一致。值得注意的是，温带成分比例随海拔升高显著增加，其原因可能是高海拔低温环境筛选出具有耐寒机制（如叶片角质层增厚、次生代谢物积累）的温带物种，而低海拔热带物种依赖高温高湿，导致物种垂直更替，呈现“热带向温带区系过渡”模式^[40]。第四纪冰期-间冰期旋回中，低海拔区域可能成为热带物种避难所，而高海拔则容纳了来自东亚大陆的温带成分^[39]。本研究发现高海拔温带属多属于东亚-北美间断分布型，暗示其可能是古北区系南迁的孑遗成分^[36]。海南岛山地加剧了生境片段化。高海拔温带成分因地理隔离难以基因交流，可能加速局部适应进化；低海拔广布热带成分则扩散能力较强^[39]。综上所述，五指山药用植物区系鲜明的热带属性（以被子植物为主体）反映了其热带北缘地理位置及复杂地形的综合影响。这一认识对于科学评估该地区药用植物资源禀赋、指导可持续开发利用、制定针对性保护策略及开展区域性比较研究具有重要的理论和实践意义。研究结果揭示了垂直梯度通过驱动生态位分化与地质历史进程的协同作用，塑造生物多样性格局。

3.2 关键优势种与群落稳定性关系

本研究发现各层优势种均具有药用价值，印证热带次生林生态系统与药用植物存在显著的协同进化关系，滨木患在低海拔乔木层、灌木层及草本层均占显著地位，揭示其强生态幅与跨层次适应能力，可能为区域关键药用植物。低海拔乔木层以泛热带种主导，随着海拔升高逐渐过渡至热带-亚热带成分，印证科属区系中温带成分随海拔的增量趋势，乔木层重要值呈双峰分布，进一步指示热带向温带区系的过渡特征，这与海南霸王岭^[41]等热带山地的研究一致，表明海拔梯度驱动的温度阈值是热带树种向温带成分更替的关键因子。灌木层优势种从低海拔的滨木患和窄叶半枫荷，到中海拔的黄牛木，最后到中高海拔和高海拔的肉实树，体现其对乔木层冠层结构及温度梯度的协同响应，重要值随海拔升高呈波动下降反映灌木层对上层乔木遮蔽的敏感性。低海拔草

本层以耐阴草本为主，随着海拔升高蕨类优势度显著提升，符合药用蕨类植物对高湿、弱光生境的生理需求。这些结果表明低海拔需优先保护热带性优势种，中高海拔应关注温带过渡成分及药用蕨类植物，其分布狭窄且对湿度敏感。

3.3 海拔梯度对药用植物 α 多样性的影响

群落特征可通过物种丰富度指数、多样性指数和均匀度指数等指标进行量化表征，这些参数能够有效反映植被群落的生境异质性、结构特征、演替进程及稳定状态^[42]。通常而言，具有较高多样性指数的群落往往表现出更强的生态稳定性^[43]。本研究揭示的不同海拔梯度药用植物的 α 多样性垂直分异印证“海拔梯度范围决定格局类型”的经典假说，乔木层在中高海拔的多样性峰值与“中域效应”预测一致，暗示地形复杂性驱动的物种重叠最适区，这与李波等^[44]的研究结论一致。乔木层的 Shannon-Wiener 指数在中高海拔的单峰分布与热带山地多样性随海拔升高逐渐递减的预期相悖，其成因可能是中高海拔水热条件处于热带向温带物种生态幅重叠区，促进物种共存。灌木层多样性沿海拔升高无显著变化，体现灌木对光资源竞争的灵活性，乔木冠层遮蔽抑制灌木层微气候变异，削弱海拔梯度的影响。草本层的 α 多样性沿海拔梯度升高呈波动式变化，该结果与 ZHANG 等^[45]、CHUN 等^[46]和 YAKINMOV 等^[47]的研究结果相似，该现象与东亚热带地区植被垂直分布规律一致——低海拔草本群落随海拔升高逐渐被蕨类群落替代，符合典型的海拔梯度更替模式，但草本层在中海拔的显著峰值与乔木层错位，其依赖林窗尺度资源，凸显层间资源分配异质性，草本层 Simpson 优势度指数显著高于乔灌木层，反映其强优势种主导的群落构建模式；Pielou 均匀度指数较高，且随 Simpson 优势度指数上升，揭示微生境筛选作用促使少数药用蕨类植物填补生态位空缺，形成布局优势分布。

3.4 药用植物 β 多样性的海拔分异规律

尽管已有研究对 β 多样性沿海拔梯度的变化模式尚未达成一致结论，但部分证据表明， β 多样性可能随海拔升高而逐渐降低^[48]，这可能与高海拔地区环境过滤作用增强及物种库收缩有关。本研究发现，乔木层 PCoA1 轴上低海拔与高海拔的完全分离，体现热带-温带区系过渡的环境筛选机制，建群种从滨木患到狭叶泡花树的更替，反

映乔木物种对水热梯度的敏感性，中海拔与中高海拔群落重叠可能源于地形复杂性缓冲了气候压力，支持生境异质性促进物种共存，灌木层样方广泛重叠，尤其中高海拔和高海拔向 PCoA 负轴集中，说明乔木冠层遮阴抑制海拔的直接作用，导致灌木响应弱于乔木层。草本层 β 多样性微生物随机性主导，高海拔草本层点集分散，表明异质性高，其原因可能是石缝、凋落物斑块驱动物种随机组装，导致草本 β 多样性与海拔弱相关，高海拔草本的高变异可能反映历史干扰的遗留效应。乔木层与草本层 β 多样性的海拔分异可能源于其对环境因子的选择性响应，木本物种的分布边界主要受温度限制^[40]，而草本层 β 多样性变化更依赖于局域尺度的水分有效性、光照条件及土壤养分异质性^[49]。乔灌木层 β 多样性对海拔的响应强度顺序为乔木层>灌木层>草本层，乔木层作为生态系统骨架，通过冠层结构调控驱动下层群落构建，从热带转向温带物种组成，灌木层兼具过渡与缓冲作用，由微生物主导局部适应，草本层则受微环境调控更强，体现药用蕨类植物逐渐占主导地位，该结果为山地生态系统的垂直带谱构建、物种分布模型优化提供了分层依据。

4 结论

通过研究海南五指山不同海拔梯度药用植物组成及分布特征，得出以下结论：

(1) 样地调查共记录药用植物 99 科 260 属 447 种，被子植物在各海拔段均占据绝对优势，低海拔蕨类植物仅占 1.80%；随海拔升高，蕨类植物比例显著增加，高海拔达到峰值 (6.50%)，成为关键类群；地理区系分析表明，该区域呈现显著的热带属性，热带科属占比均大于 83.00%，但温带成分随海拔升高显著增加，印证不同海拔梯度气候对植物区系的塑造作用。

(2) 乔木层优势种从热带种向温带过渡种更替，重要值呈双峰分布，体现热带向温带区系的过渡特征；灌木层与草本层分别通过形态适应和功能群转变，如由以耐阴草本转向药用蕨类为主，响应环境梯度。

(3) α 多样性在中海拔达峰值，符合“中域效应”； β 多样性揭示乔木层受水热梯度主控，灌木层则依赖微生物异质性，体现“自上而下”的级联调控。本研究为热带山地药用植物资源的保护与可持续利用提供理论依据，并阐明垂直气候

梯度驱动生物多样性形成的生态机制，未来需重点解析中高海拔药用蕨类富集区的环境驱动因子。

参考文献

- [1] 王丽华, 丁沫冲, 刘全儒. 北京市门头沟区野生药用植物区系及药用功能多样性分析[J]. 中国药学杂志, 2022, 57(15): 1255-1260.
WANG L H, DING M C, LIU Q R. Floristic geography and medical function diversity of wild medicinal plants in Mentougou district of Beijing[J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2022, 57(15): 1255-1260. (in Chinese)
- [2] 范南虹, 李君玲, 贺澜起. 海南搜集整理药用植物近 3000 种[N]. 中国医药报, 2010-08-14.
FAN N H, LI J L, HE L Q. Hainan collects and compiles nearly 3000 species of medicinal plants[N]. China Pharmaceutical News, 2010-08-14. (in Chinese)
- [3] 杨小波. 海南植物图志: 第 8 卷[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
YANG X B. Illustrated handbook of plants in Hainan: volume 8[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [4] XU S, EISEN H N, FER L O, ZHANG J, ZHOU G, LU X, LIU C, ZHANG D. Species richness promotes ecosystem carbon storage: evidence from biodiversity-ecosystem functioning experiments[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2020, 287: 20202063.
- [5] YANG T, ADAMS J M, SHI Y, HE J, JING X, CHEN L, TEDERSOO L, CHU H. Soil fungal diversity in natural grasslands of the Tibetan Plateau: associations with plant diversity and productivity[J]. New Phytologist, 2017, 215: 756-765.
- [6] YANG Y, LIU B R. Testing relationship between plant productivity and diversity in a desertified steppe in northwest China[J]. PeerJ, 2019, 7: e7239.
- [7] 杨永, 卫伟, 王琳, 刘泽漫. 中国旱区样带尺度植物多样性和生产力与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1563-1571.
YANG Y, WEI W, WANG L, LIU Z M. Relationship between plant diversity, productivity and environmental factors at a transect scale in the dryland of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1563-1571. (in Chinese)
- [8] 田方, 陈学林, 廉永善. 药用植物地理成分及海拔与中药性味的相关性研究[J]. 时珍国医国药, 2010, 21(2): 326-328.
TIAN F, CHEN X L, LIAN Y S. Correlation analysis between geographical components and altitude of medicinal plants and TCM taste characteristics in Gansu province[J]. Journal of Li-shizhen Traditional Chinese Medicine, 2010, 21(2): 326-328. (in Chinese)

- [9] 乔亚玲, 刘政鸿, 郝文芳, 张泉将, 李凤娇. 陕南秦巴山区药用植物群落物种多样性研究[J]. 植物科学学报, 2016, 34(2): 200-210.
QIAO Y L, LIU Z H, HAO W F, ZHANG X J, LI F J. Species diversity of the medicinal plant community in the Qin-Ba mountainous area of southern Shaanxi[J]. Plant Science Journal, 2016, 34(2): 200-210. (in Chinese)
- [10] 肖佳伟, 孙林, 陈功锡. 湘西药用植物分布格局研究[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2015, 27(3): 37-41, 67.
XIAO J W, SUN L, CHEN G X. Research on distribution patterns of medicinal plants in western Hunan[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Science and Technology), 2015, 27(3): 37-41, 67. (in Chinese)
- [11] 陈睿, 洪伟, 吴承祯. 闽北常绿阔叶林物种多样性海拔梯度分析[J]. 福建林学院学报, 2004, 24(1): 12-16.
CHEN R, HONG W, WU C Z. Analysis of the evergreen broad-leaf forest through the change of elevation gradient in the north of Fujian[J]. Journal of Forest and Environment, 2004, 24(1): 12-16. (in Chinese)
- [12] 田怀珍, 邢福武. 南岭国家级自然保护区兰科植物物种多样性的海拔梯度格局[J]. 生物多样性, 2008, 16(1): 75-82.
TIAN H Z, XING F W. Elevational diversity patterns of orchids in Nanling National Nature Reserve, northern Guangdong province[J]. Biodiversity Science, 2008, 16(1): 75-82. (in Chinese)
- [13] 岳明, 周虹霞. 太白山北坡落叶阔叶林物种多样性特征[J]. 云南植物研究, 1997, 19(2): 171-176.
YUE M, ZHOU H X. Diversity of higher plants in deciduous broadleaved forests on the northern slope of Taibai Mountain[J]. Acta Botanica Yunnanica, 1997, 19(2): 171-176. (in Chinese)
- [14] STEVENS G C. The elevational gradient in altitudinal range: an extension of Rapoport's latitudinal rule to altitude[J]. American Naturalist, 1992, 140: 893-911.
- [15] 郝占庆, 于德永, 杨晓明, 丁之慧. 长白山北坡植物群落 α 多样性及其随海拔梯度的变化[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 785-789.
HAO Z Q, YU D Y, YANG X M, DING Z H. α diversity of communities and their variety along altitude gradient on northern slope of Changbai Mountain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(7): 785-789. (in Chinese)
- [16] 王楠, 李栋梁, 张杰. 青藏高原气温变化的研究进展[J]. 干旱气象, 2010, 28(3): 265-269.
WANG N, LI D L, ZHANG J. Research advance of surface temperature change over Tibetan Plateau[J]. Journal of Arid Meteorology, 2010, 28(3): 265-269. (in Chinese)
- [17] 郝晨飞. 基于深度学习的气象温度和风场订正方法研究[D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2023.
HAO C F. Research on meteorological temperature and wind field correction methods based on deep learning[D]. Beijing: China Academy of Electronics and Information Technology, 2023. (in Chinese)
- [18] 钟圣赞, 陈国德, 张伟, 吴海霞, 符生波, 符溶. 不同遮荫处理对海南大叶种茶叶产量和品质季节变化的影响[J]. 现代农业科技, 2019(17): 5-7, 9.
ZHONG S Y, CHEN G D, ZHANG W, WU H X, FU S B, FU R. Effects of different shading treatments on seasonal changes in tea yield and quality of *C. sinensis* var. *asamica*[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(17): 5-7, 9. (in Chinese)
- [19] 段娜, 杨贵羽, 游进军. 五指山市近 60 年降雨量时空演变规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 60-67, 79.
DUAN N, YANG G Y, YOU J J. Temporal and spatial evolution of precipitation in Wuzhishan city in recent 60 years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 60-67, 79. (in Chinese)
- [20] 方精云, 郭柯, 王国宏, 唐志尧, 谢宗强, 沈泽昊, 王仁卿, 强胜, 梁存柱, 达良俊, 于丹. 《中国植被志》的植被分类系统, 植被类型划分及编排体系[J]. 植物生态学报, 2020, 44(2): 96-110.
FANG J Y, GUO K, WANG G H, TANG Z Y, XIE Z Q, SHEN Z H, WANG R Q, QIANG S, LIANG C Z, DA L J, YU D. Vegetation classification system and classification of vegetation types used for the complication of vegetation of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(2): 96-110. (in Chinese)
- [21] 黄璐琦, 王永炎. 全国中药资源普查技术规范[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2014.
HUANG L Q, WANG Y Y. National technical specifications for survey of Chinese medicinal material resources[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2014. (in Chinese)
- [22] 王牌, 苟志辉, 农寿千, 黄川腾, 林玲, 余雪标. 海南中部丘陵区热带次生林物种多样性及区系分析[J]. 热带作物学报, 2018, 39(4): 802-808.
WANG P, GOU Z H, NONG S Q, HUANG C T, LIN L, YU X B. Species diversity and floristic components of tropical secondary forest in hilly area of central Hainan[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(4): 802-808. (in Chinese)
- [23] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II. 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1995, 15(3): 268-277.
MA K P, HUANG J H, YU S L, CHEN L Z. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: II. Species diversity in Dongling Mountain, Beijing, China: II. Spe-

- cies richness, evenness and species diversities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 268-277. (in Chinese)
- [24] 刘志君. 葡萄霜霉病菌的致病性与遗传多样性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- LIU Z J. Study on pathogenicity and genetic diversity of *Plasmopara viticola*[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [25] DIXON P. VEGAN, a package of R functions for community ecology[J]. *Journal of vegetation science*, 2003, 14(6): 927-930.
- [26] LI J. Flora of China[J]. *Harvard Papers in Botany*, 2007, 13(2): 301-302.
- [27] 中国科学院植物研究所. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences. Flora of China[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [28] 中国高等植物图鉴[J]. *植物杂志*, 2002(2): 46.
- Higher plants of China illustrated[J]. *Plants*, 2002(2): 46. (in Chinese)
- [29] 国家药典委员会. 中国药典: 一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
- Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: volume I[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2015. (in Chinese)
- [30] 国家中医药管理局《中华本草》编委会. 中华本草[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1999.
- Editorial Board of "Zhonghua Bencao", State Administration of Traditional Chinese Medicine. Zhonghua Bencao (Chinese materia medica)[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1999. (in Chinese)
- [31] 康廷国. 中药鉴定学[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2003.
- KANG T G. Identification of Chinese materia medica[M]. Beijing: China Press of Chinese Medicine, 2003. (in Chinese)
- [32] 吴征镒. 《世界种子植物科的分布区类型系统》的修订[J]. *云南植物研究*, 2003, 25(5): 535-538.
- WU Z Y. Revision of the "Areal-types of the families of seed plants of the world"[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2003, 25(5): 535-538. (in Chinese)
- [33] 吴征镒. 中国种子植物属的分布区类型[J]. *云南植物研究*, 1991(增刊 IV): 1-139.
- WU Z Y. Areal-types of genera of seed plants in China[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1991(Suppl. IV): 1-139. (in Chinese)
- [34] 吴征镒, 王荷生. 中国自然地理—植物地理(上)[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- WU Z Y, WANG H S. Physical geography of China: phytogeography (Part I)[M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese)
- [35] 吴征镒. 论中国植物区系的分区问题[J]. *云南植物研究*, 1979, 1(1): 1-20.
- WU Z Y. On the regionalization of Chinese flora[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 1979, 1(1): 1-20. (in Chinese)
- [36] 吴征镒, 周浙昆, 孙航, 李德铎, 彭华. 种子植物分布区类型及其起源和分化[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2006: 146-451.
- WU Z Y, ZHOU Z K, SUN H, LI D Z, PENG H. Areal-types of seed plants and their origin and differentiation[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2006: 146-451. (in Chinese)
- [37] 黄世能, 张宏达, 王伯荪. 海南岛尖峰岭地区种子植物区系组成及地理成分研究[J]. *广西植物*, 2000, 20(2): 97-106.
- HUANG S N, ZHANG H D, WANG B S. Composition and geographical elements of the spermatophytic flora from Jianfengling area of Hainan Island[J]. *Guihaia*, 2000, 20(2): 97-106. (in Chinese)
- [38] 邢福武, 李泽贤, 吴德邻. 海南岛南部甘什岭植物区系的初步研究[J]. *植物研究*, 1993, 13(3): 227-242.
- XING F W, LI Z X, WU D L. A preliminary study on the flora of Ganshiling, southern Hainan[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 1993, 13(3): 227-242. (in Chinese)
- [39] 张荣京, 邢福武, 萧丽萍, 刘演, 叶育石, 吴世捷, 陈红锋, 王发国. 海南鹦哥岭的种子植物区系[J]. *生物多样性*, 2007, 15(4): 382-392.
- ZHANG R J, XING F W, XIAO L P, LIU Y, YE Y S, WU S J, CHEN H F, WANG F G. Spermatophyte flora of Yingge-ling Mountain, Hainan[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(4): 382-392. (in Chinese)
- [40] PAUSAS J G, AUSTIN M P. Patterns of plant species richness in relation to different environments: an appraisal[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2001, 12(2): 153-166.
- [41] 余世孝, 臧润国, 蒋有绪. 海南岛霸王岭垂直带热带植物多样性的空间分析[J]. *生态学报*, 2001(9): 1438-1443.
- YU S X, ZANG R G, JIANG Y X. Spatial analysis of species diversity in the tropical vegetations along the vertical belt in Bawangling Natyure Reserve, Hainan Island[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001(9): 1438-1443. (in Chinese)
- [42] 王伯荪. 试论“植物群落学”的名称、对象和内容[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 1965, 4(1): 74-85.
- WANG B S. Debate on the name, object and matter phytocoenology[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1965, 4(1): 74-85. (in Chinese)
- [43] SONG Y C. The essential characteristics and main types of the broad-leaved evergreen forest in China[J]. *Phytocoenologia*, 1988, 16(1): 105-123.
- [44] 李波, 赵阳, 齐瑞, 曹家豪, 陈学龙, 刘婷, 高本强, 单立山. 海拔梯度对甘肃洮河国家级自然保护区紫果云杉林

- 下草本植物多样性的影响[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 43-50.
- LI B, ZHAO Y, QI R, CAO J H, CHEN X L, LIU T, GAO B Q, SHAN L S. Effects of altitude gradient on understory herbdiversity of *Picea purpurea* forest in the Taohe National Nature Reserve, Gansu province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 43-50. (in Chinese)
- [45] ZHANG W X, HUANG D Z, WANG R Q, LIU J, DU N. Altitudinal patterns of species diversity and phylogenetic diversity across temperate mountain forests of northern China[J]. PLoS One, 2016, 11: e0159995.
- [46] CHUN J K, LEE C B. Diversity patterns and phylogenetic structure of vascular plants along elevational gradients in a mountain ecosystem, South Korea[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(2): 280-295.
- [47] YAKIMOV B N, GERASIMOVA A S, ZHANG S, MA K, ZHANG Y. Phylogenetic α - and β -diversity elevational gradients reveal consistent patterns of temperate forest community structure[J]. Acta Oecologica, 2020, 109: 103657.
- [48] 何斌, 李青, 陈群利, 李望军, 游萍. 黔西北黄杉群落物种多样性的海拔梯度格局[J]. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1111-1120.
- HE B, LI Q, CHEN Q L, LI W J, YOU P. Altitudinal pattern of species diversity of *Pseudotsuga sinensis* community in northwestern Guizhou, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(6): 1111-1120. (in Chinese)
- [49] QIAN H, JIN Y. An updated megaphylogeny of plants, a tool for generating plant phylogeny and an analysis of phylogeny community structure[J]. Journal of Plant Ecology, 2016, 9(2): 233-239.