植物生态学报 2026, **50** (1): 150-159 DOI: 10.17521/cjpe.2024.0457
Chinese Journal of Plant Ecology CSTR: 32100.14.cjpe.2024.0457

戴云山南坡海拔梯度上木本植物性系统分布特征及其影响因素

韦 鑫[1,2] 江 蓝[1,2] 郑晨成[1,2] 朱 静[1,2] 陈 博[1,2] 李文周[3] 赖淑瑜[4] 刘金福[1,2] 何中声[1,2*]

[1]福建农林大学林学院, 福州 350002; [2]生态与资源统计福建省高校重点实验室, 福州 350002; [3]福建戴云山国家级自然保护区管理局, 福建德化 362503; [4]德化县国有生态林场, 福建德化 362503

摘 要 植物性系统是影响植物交配、遗传、进化与物种分布的重要繁殖器官, 根据花器官雌蕊与雄蕊分布位置的不同, 可将性系统分为两性花、雌雄异株与雌雄同株。该研究以戴云山南坡不同海拔(900–1 600 m)森林群落为研究对象, 分析木本植物性系统数量特征随海拔梯度的变化, 采用Mantel相关性分析探讨性系统与环境因子之间的相关关系。结果表明: 1)样地内共有木本植物85种, 其中两性花植物47种(55.3%), 雌雄异株植物29种(34.1%), 雌雄同株植物9种(10.6%)。2)随着海拔升高, 雌雄异株植株数和物种比例呈现“单峰”模式, 雌雄同株植株数先下降后上升, 雌雄同株物种比例显著下降, 两性花的植株数和物种比例无明显变化。3)随海拔升高, 性系统Shannon-Wiener多样性指数与Pielou均匀度指数总体下降, Simpson优势度指数无明显变化。4)土壤有效磷含量与土壤温度是驱动木本植物性系统数量特征随海拔梯度变化的最重要因子。综上, 戴云山南坡木本植物性系统数量特征沿海拔梯度存在显著差异, 性系统的海拔分布对环境变化高度敏感, 表明植物通过调节性系统组成适应环境变化, 从而确保种群持续生存和繁衍。

关键词 戴云山; 海拔梯度; 性系统; 数量特征; 环境因子

韦鑫, 江蓝, 郑晨成, 朱静, 陈博, 李文周, 赖淑瑜, 刘金福, 何中声 (2026). 戴云山南坡海拔梯度上木本植物性系统分布特征及其影响因素. 植物生态学报, 50, 150-159. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0457

Distribution and influencing factors of woody plant sexual systems along elevational gradient on the south slope of Daiyun Mountain

WEI Xin[1,2], JIANG Lan[1,2], ZHENG Chen-Cheng[1,2], ZHU Jing[1,2], CHEN Bo[1,2], LI Wen-Zhou[3], LAI Shu-Yu[4], LIU Jin-Fu[1,2], and HE Zhong-Sheng[1,2*]

[1]College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; [2]Key Lab of Ecology and Resources Statistics of Fujian Colleges, Fuzhou 350002, China; [3]Administration Bureau of Daiyun Mountain National Nature Reserve of Fujian, Dehua, Fujian 362503, China; and [4]Dehua County State-owned Ecological Forestry Farm, Dehua, Fujian 362503, China

Abstract

Aims Plant sexual systems are important reproductive characteristics that affects plant mating, genetics, evolution, and species distribution. They are classified into three main categories based on the floral organ’s pistil and stamen arrangement: hermaphroditism, dioecy, and monoecy.

Methods We divided forest communities on the south slope of Daiyun Mountain (Fujian Province, China) into eight elevations along the elevational range of 900–1 600 m. Then we analyzed changes in the quantitative characteristics of woody plant sexual systems and investigated their correlation with environmental factors via Mantel correlation analysis.

Important findings The study area encompassed 85 woody plant species, with 47 (55.3%) hermaphroditic, 29 (34.1%) dioecious, and 9 (10.6%) monoecious species. With increasing elevation, the number of individuals and species diversity of dioecious plants show a “unimodal” pattern. The number of monoecious individuals first decreases and then increases, while the species diversity of monoecious plants significantly decreases. The number and species proportion of hermaphroditic plants show no significant changes. The Shannon-Wiener index and Pielou evenness index for sexual systems generally decreased with elevation, whereas the Simpson

收稿日期Received: 2024-12-16 接受日期Accepted: 2025-02-26
基金项目: 福建省林业科技研究项目(2022FKJ11)。Supported by the Forestry Technology Research Project of Fujian Province (2022FKJ11).
* 通信作者Corresponding author (jxhzs85@fafu.edu.cn)

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

dominance index remained stable. Effective phosphorus and soil temperature were the primary drivers of elevational changes in sexual systems. In conclusion, the quantitative characteristics of the sexual systems of woody plants along elevational gradient on the south slope of Daiyun Mountain showed significant differences, and the elevational distribution of the sexual systems was highly sensitive to environmental changes, indicating that plants adapt to environmental changes by regulating the composition of their reproductive systems, thereby ensuring the continuous survival and reproduction of their populations.

Key words Daiyun Mountain; elevational gradient; sexual system; quantitative characteristic; environmental factor

Wei X, Jiang L, Zheng CC, Zhu J, Chen B, Li WZ, Lai SY, Liu JF, He ZS (2026). Distribution and influencing factors of woody plant sexual systems along elevational gradient on the south slope of Daiyun Mountain. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 50, 150-159. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0457

性系统决定了有性繁殖的方式, 进而影响植物种群遗传特征、自交程度以及对新环境的适应速度, 对种群生态与进化过程起着关键作用(Tree of Sex Consortium, 2014; Wang et al., 2021)。依据雌雄功能组合形式不同, 植物性系统类型可划分为: 两性花(每朵花同时具备雌蕊与雄蕊)、雌雄异株(雌花与雄花分别生长在不同植株上)与雌雄同株(雌花与雄花生长在同一植株上) (张大勇, 2003; 吉乃提汗•马木提和谭敦炎, 2014)。不同性系统植物具有各自独特的繁殖策略, 这些策略对于物种繁衍具有关键作用。性系统不仅是植物繁殖的关键特征, 更是影响物种分布、生物多样性以及群落演替等生态过程的重要因素, 对其进行深入研究具有重要科学价值与生态意义(王芸芸和郝占庆, 2022)。

山地生态系统由于海拔差异显著, 导致在较小的空间范围内出现微气候、土壤理化性质的垂直差异, 有较为丰富的群落类型和连续的环境梯度, 间接影响植物群落性系统的分布情况(吴小刚等, 2020)。与两性花植物相比, 雌雄异株植物(雌株或雄株)通过性别特化, 能将资源集中分配于特定功能, 使其在特定的生态环境中获得更强的适应性优势(胥晓等, 2007)。环境适应性假说认为, 雌雄异株植物具有更强的环境耐受能力(王芸芸和郝占庆, 2022), 更适合在环境压力较大的地区生存(Varga & Soulsbury, 2020)。一般来说, 海拔的增高多数情况下会增强环境压力(吴墨栩等, 2022)。因此根据这一假说, 随着海拔升高雌雄异株植物出现频率增加。然而, 也有研究表明雌雄异株植物出现频率不随海拔增高而增加, 而是呈现“单峰”模式(先增加后减少) (Lin et al., 2020)。总之, 目前关于海拔梯度上雌雄异株植物出现频率如何变化仍具有不确定性, 这种不确定性很可能与植物生长的环境条件(例如温度或水分)以及植物自身的生殖策略有关。相较于雌雄异株植物, 两性花和雌雄同株植物的海拔分布格局很大程度上被忽视。因此, 开展植物性系统在海拔梯度上的变化规律及其影响因素研究, 对维持生态系统稳定性和合理利用森林资源具有重要意义。

戴云山自然保护区地处我国南亚热带与中亚热带交界地带, 是东南沿海典型的山地森林生态系统, 植被在保护区呈现出明显的垂直分布梯度(Jiang et al., 2019), 这为研究植物性系统的海拔变化提供了理想平台。前期研究发现, 戴云山南坡植物物种和系统发育多样性沿海拔梯度呈现单峰格局, 物种周转在β多样性中占据重要成分, 且随海拔上升逐渐增加, 并受土壤有效磷含量和气温影响(李梦佳等, 2021; Jiang et al., 2023)。海拔梯度上植物多样性维持机制主要受环境过滤控制(Jiang et al., 2023)。然而, 植物性系统沿海拔梯度的分布模式是否与植物多样性相匹配, 以及是否同样受到环境过滤的限制, 目前尚不明确。为此, 基于戴云山自然保护区南坡海拔梯度固定监测样地, 以群落内胸径大于1 cm的木本植物为研究对象, 分析植物性系统数量特征与性系统多样性的海拔变化, 运用Mantel相关性分析进一步探究性系统与环境因子之间的关联性, 旨在解决以下问题: (1)戴云山南坡木本植物性系统组成如何? (2)木本植物性系统与多样性具有怎样的海拔格局, 是否与物种和系统发育多样性呈现类似格局? (3)环境如何驱动木本植物性系统的海拔分布?

1 材料和方法

1.1 研究区概况

戴云山国家级自然保护区(25.63°–25.72° N, 118.08°–118.33° E), 地处福建省德化县境内, 总面积达13 473 hm^2。该保护区属南亚热带与中亚热带

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

过渡区域, 海拔650–1 856 m, 保护区年平均气温15.6–19.5 ℃, 年降水量1 700–2 000 mm。土壤主要类型有腐殖质强酸土、铁质强酸土与雏形暗色土等(何中声等, 2022a)。植物区系兼具中、南亚热带性质, 主要保护对象是东南沿海典型的山地森林生态系统(李梦佳等, 2021)。

1.2 样地设置

2018年7月, 从戴云山自然保护区南坡海拔900 m处开始, 每间隔100 m设置一个20 m × 30 m的固定样地, 每个样地划分3个10 m × 20 m样方, 共24个小样方。利用GPS定位系统记录每个样地经纬度、海拔等地形因子, 调查并记录样方内胸径≥1 cm的所有木本植物的种名、胸径(李梦佳等, 2021)。

1.3 木本植物性系统的确定

植物名称和植物性系统参考《中国植物志》在线数据库(http://frps.iplant.cn/)查阅获取。根据花器官雌蕊与雄蕊的有无, 将木本植物性系统分为两性花、雌雄异株(雄全异株、雌全异株、三性花异株)与雌雄同株(雄全同株、雌全同株、三性花同株) (李同华等, 2004; Chen & Li, 2008a; Renner, 2014)。部分植物的性别系统描述稀缺, 通过阅读文献进行划分(Chen & Li, 2008b)。

1.4 土壤采样及测定

在每个样方内采用五点取样法采集土壤并进行充分混合, 共计24份土壤样品。土壤理化性质测定方法: 土壤pH采用pH计测定; 土壤含水量(SWC)采用环刀法测定; 土壤温度(ST)采用纽扣式温度记录器(iButton DS1923-F5, Maxim Intergrated, San Jose, USA)监测; 水解氮(HN)含量采用碱解扩散法测定; 有效磷(AP)含量采用钼锑抗比色法测定; 全磷(TP)与全钾(TK)含量采用硫酸-高氯酸消煮法测定; 土壤全碳(TC)与全氮(TN)含量采用碳氮分析仪(vario MAX, Elementar, Langenselbold, Germany)测定, 测定方法见《森林土壤分析方法》(国家林业局, 1999)。

1.5 数据处理与统计分析

在Excel 2023中计算不同物种的重要值、性系统的物种比例、相对多度与多样性。

重要值计算公式如下:

$$\mathrm{IV}_i = \frac{\mathrm{DR}_i + \mathrm{FR}_i + \mathrm{CR}_i}{3} \quad (1)$$

式中, IV_i表示物种i的重要值, DR_i、FR_i、CR_i分别为物种i的相对密度、相对频度与相对胸高断面积。相对密度为某个种的株数与所有种总株数的比值; 相对频度为某个种在所有样方中出现的次数与所有种在所有样方中出现的次数的比值; 相对胸高断面积为某个种的胸高断面积与所有种的胸高断面积之和的比值(龙茹, 2011)。

性系统物种比例(%) =样方内某一性系统植物物种数/样方内总物种数× 100

相对多度P_i (%) =样方内某一性系统植株数/样方植株总数× 100

性系统多样性选取Shannon-Wiener多样性指数(H)、Simpson优势度指数(D)与Pielou均匀度指数(J)进行评价(马克平, 1994)。

$$H = -\sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (3)$$

$$J = H / \ln S \quad (4)$$

式中, P_i为第i种性系统的相对多度, S为植物性系统类型总数(龙茹, 2011)。

采用SPSS 22.0软件进行统计学分析, 首先用Shapiro-Wilk检验检查数据正态性。正态分布的数据用单因素方差分析。若数据满足正态分布和方差齐性, 用LSD检验; 否则用Dunnett's T3检验, 比较不同海拔的性系统多样性差异。用配对样本的t检验分析性系统数量特征之间的差异性。在Origin 2021中完成作图。采用Mantel相关性分析环境因子彼此之间以及性系统与环境因子之间的相关性, Mantel相关性分析与可视化使用R语言4.3.3的"ggcor"包完成。在进行Mantel相关性分析前, 通过方差膨胀因子(VIF)来判读环境因子是否具有共线性。由于海拔、土壤全氮含量、气温与其他环境因子相关(VIF > 10), 为了避免多重共线性的潜在影响, 将其排除在分析之外。

2 结果

2.1 戴云山南坡木本植物性系统的物种组成特征

两性花、雌雄异株与雌雄同株植物分别有47、29与9种, 分别占比55.3%、34.1%与10.6%。两性花、雌雄异株与雌雄同株植物分别有2 599、1 619与1 652株, 分别占植株总数的44.3%、27.6%与28.1%。雌雄同株植物植株数比例(28.1%)大于物种数比例(10.6%) (表1)。

由图1可知, 两性花与雌雄异株植物在植株数

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

比例上存在显著差异, 但两性花与雌雄异株植物在植株数上无显著差异, 两性花与雌雄同株植物, 以及雌雄同株与雌雄异株植物在植株数与植株数比例上均无显著差异。两性花与雌雄异株植物、两性花与雌雄同株植物在物种数和物种比例上存在显著差异, 但雌雄同株与雌雄异株植物之间无显著差异。

2.2 与国内外其他森林群落的比较

通过对比不同纬度研究区的植物性系统物种比例, 由表2可知, 两性花植物物种比例为: 巴尔加斯州热带森林>云南西双版纳热带雨林>澳大利亚热带森林>云南哀牢山亚热带森林>海南尖峰岭热带雨林>河南白云山温带森林>福建戴云山亚热带森林>吉林长白山温带森林。雌雄异株与雌雄同株植物物种比例没有呈现出明显的纬度梯度分布规律, 但亚热带森林雌雄异株植物物种比例大于雌雄同株植物, 温带森林则相反。

表1 戴云山南坡木本植物性系统的植株数、物种数及其比例
Table 1 Number of individuals, species, and their proportions of woody plant sexual systems on the south slope of Daiyun Mountain

性系统 Sexual system	植株数 No. of individuals	比例 Proportion (%)	物种数 No. of species	比例 Proportion (%)
两性花 Hermaphroditism	2 599	44.3	47	55.3
雌雄异株 Dioecy	1 619	27.6	29	34.1
雌雄同株 Monoecy	1 652	28.1	9	10.6
总计 Total	5 870	100.0	85	100.0

2.3 戴云山南坡木本植物性系统的重要值

按重要值统计, 两性花、雌雄异株与雌雄同株植物的重要值累加分别为41.2、20.2、38.6。由表3可知, 样地内重要值≥2.0的物种有11个, 两性花植物有5种, 丁香杜鹃(*Rhododendron farrerae*)的重要值与相对多度最高; 雌雄异株植物有2种, 重要值与相对多度最高的为窄基红褐柃(*Eurya rubiginosa* var. *attenuata*); 雌雄同株植物有4种, 重要值最高的为黄山松(*Pinus hwangshanensis*), 相对多度最高的为青冈(*Quercus glauca*)。

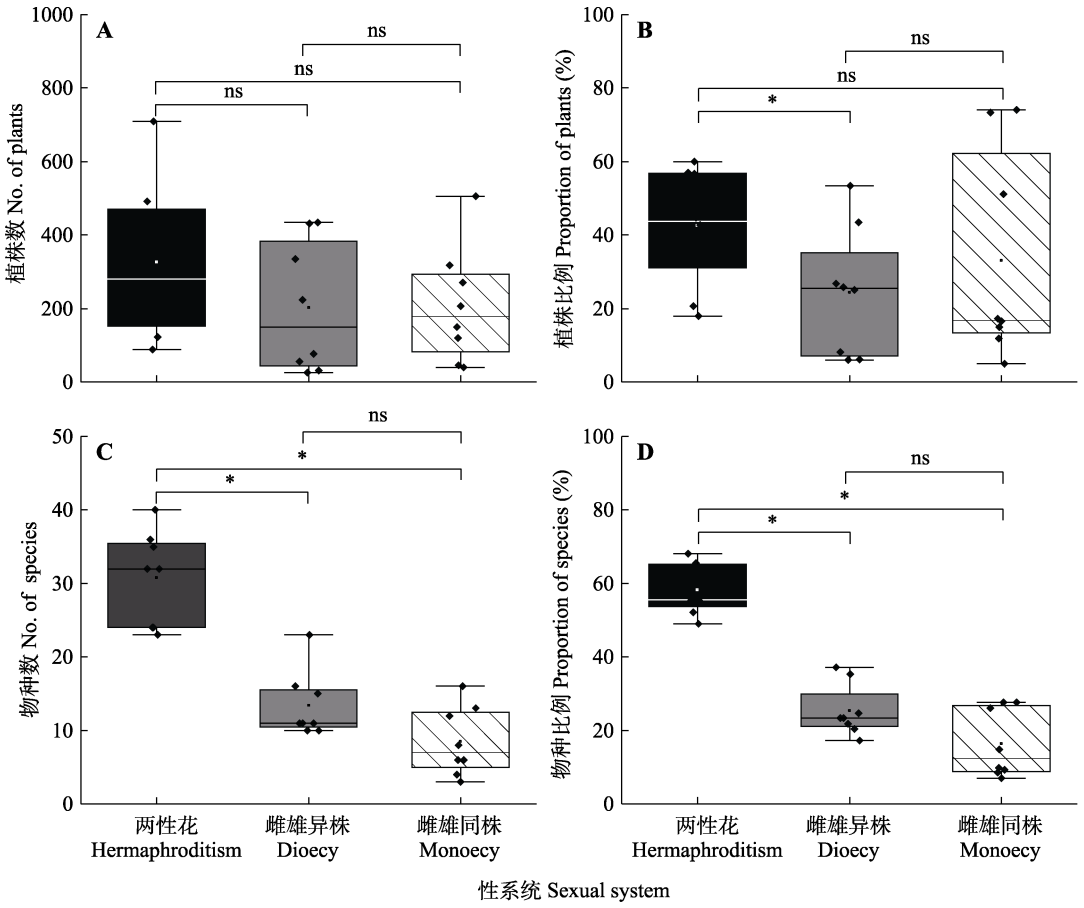


图1 戴云山南坡木本植物性系统数量特征的差异性分析。ns, $p \geq 0.05$; *, $p < 0.05$。
Fig. 1 Quantitative characteristics analysis of woody plant sexual systems on the south slope of Daiyun Mountain. ns, $p \geq 0.05$; *, $p < 0.05$.

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0457

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

表2 国内外不同森林群落植物性系统比较
Table 2 Comparison of plant sexual systems in different forest communities in China and abroad

森林群落 Plant community	物种数 No. of species	不同性系统物种比例 Proportion of different sexual systems of total number of species (%)		
		两性花 Hermaphroditism	雌雄异株 Dioecy	雌雄同株 Monoecy
委内瑞拉巴尔加斯州热带森林 Tropical forest of Vargas State, Venezuela (Ramírez, 2022)	144	72.9	4.2	22.9
澳大利亚热带雨林 Tropical rainforest of Australia (Gross, 2005)	1 100	60.5	17.0	22.5
中国云南西双版纳热带雨林 Tropical rainforest of Xishuangbanna, Yunnan, China (Chen & Li, 2008a)	685	60.6	25.1	14.3
中国海南尖峰岭热带雨林 Tropical rainforest in Jianfengling, Hainan, China (Wang et al., 2019)	290	60.0	21.5	17.7
中国云南哀牢山亚热带森林 Subtropical Forest of Ailao Mountains, Yunnan, China (Chen & Li, 2008b)	703	60.2	24.0	15.8
中国河南白云山温带森林 Temperate Forest of Baiyun Mountain, Henan, China (Zhang et al., 2021)	93	58.1	20.4	21.5
中国吉林长白山温度森林 Temperate Forest of Changbai Mountain, Jilin, China (Wang et al., 2017)	206	51.9	18.5	29.6
中国福建戴云山亚热带森林 Subtropical Forest of Daiyun Mountain, Fujian, China	85	55.3	34.1	10.6

表3 戴云山南坡木本植物性系统重要值≥2.0的物种。
Table 3 Species of woody plants with importance values ≥ 2.0 on the south slope of Daiyun Mountain

性系统 Sexual system	物种 Species	相对多度 Relative abundance	相对显著度 Relative prominence	相对频度 Relative frequency	重要值 Importance value	海拔 Elevation (m)
两性花 Hermaphroditism	丁香杜鹃 *Rhododendron farrerae*	0.12	0.02	0.04	5.94	900–1 000, 1 200–1 600
	杜鹃 *Rhododendron simsii*	0.09	0.01	0.03	4.61	1 000, 1 300–1 600
	大萼杨桐 *Adinandra glischroloma* var. *macrosepala*	0.05	0.03	0.04	3.86	1 000–1 600
	红楠 *Machilus thunbergii*	0.01	0.07	0.03	3.44	1 100–1 600
	杨桐 *Adinandra millettii*	0.04	0.01	0.04	2.95	900–1 600
雌雄异株 Dioecy	窄基红褐柃 *Eurya rubiginosa* var. *attenuata*	0.14	0.03	0.03	6.62	1 200–1 600
	岩柃 *Eurya saxicola*	0.05	0.01	0.03	2.82	1 300–1 600
雌雄同株 Monoecy	黄山松 *Pinus hwangshanensi*	0.09	0.36	0.03	15.74	1 300–1 600
	杉木 *Cunninghamia lanceolata*	0.06	0.22	0.03	10.39	900–1 200
	青冈 *Quercus glauca*	0.11	0.07	0.04	7.08	900–1 400
	马尾松 *Pinus massoniana*	0.01	0.06	0.02	2.94	900–1 100, 1 500

相对多度为相对密度, 相对显著度为相对胸高断面积。
Relative abundance is referred to as the relative density, and the relative dominance is referred to as the relative basal area.

2.4 戴云山南坡木本植物性系统数量特征沿海拔梯度的变化

随海拔升高, 两性花植物植株数与植株数比例总体呈单调上升趋势; 雌雄异株植物植株数与植株数比例随海拔升高呈先上升后下降的“单峰”模式, 在海拔1 300 m达到最大值; 雌雄同株植物植株数与植株数比例随海拔升高先下降后升高, 在海拔1 300 m达到最小值(图2A、2B)。

随海拔升高, 两性花植物物种数与物种比例无明显变化规律。雌雄异株植物物种数与物种比例随海拔上升先升高后下降, 在海拔1 300 m达到最大值; 雌雄同株植物物种数与物种比例随海拔上升总体呈单调递减趋势(图2C、2D)。

2.5 戴云山南坡木本植物性系统多样性的变化

由图3可知, 性系统多样性指数在海拔间差异显著。中高海拔(1 200–1 600 m)的性系统Shannon-Wiener多样性指数显著高于低海拔(900–1 100 m)。Simpson优势度指数在海拔900 m最低, 显著低于海拔1 000与1 200–1 600 m。性系统Pielou均匀度指数总体上与性系统Shannon-Wiener

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

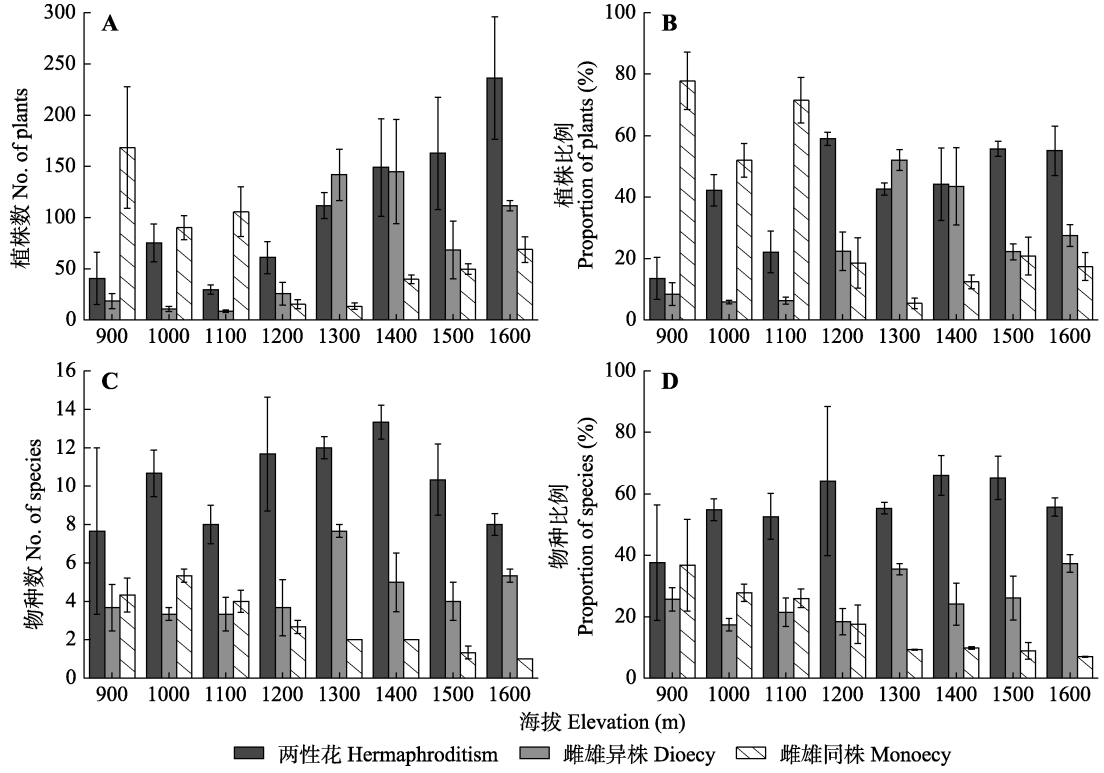


图2 戴云山南坡木本植物性系统植株数和物种数及其比率沿海拔梯度的变化(平均值±标准差)。

Fig. 2 Number and proportion of individual and species of woody plant sexual systems along the elevational gradient on the south slope of Daiyun Mountain (mean ± *SD*).

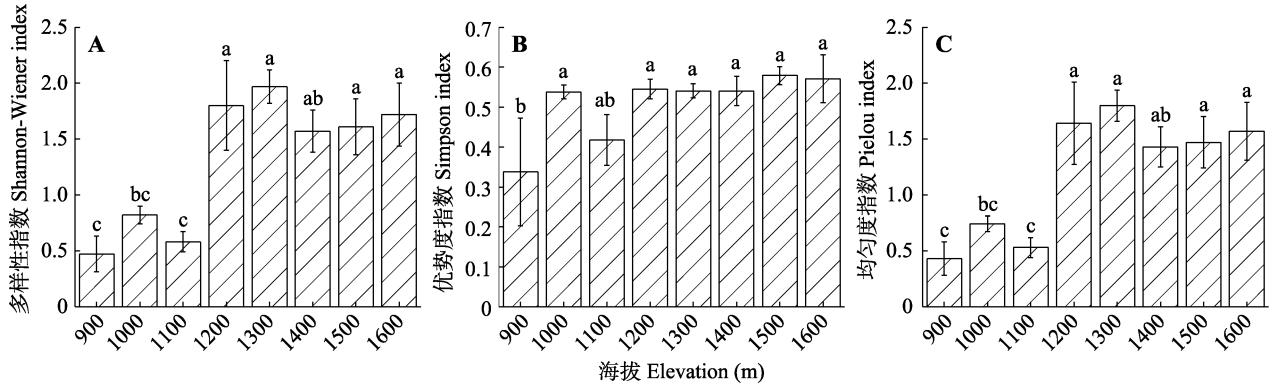


图3 戴云山南坡木本植物物种性系统多样性指数的海拔变化(平均值±标准差)。不同小写字母表示性系统多样性指数在不同海拔间的显著差异性($p < 0.05$)。

Fig. 3 Elevational variation of woody plant species diversity indices on the south slope of Daiyun Mountain (mean ± *SD*). Different lowercase letters indicate significant differences among different elevations ($p < 0.05$).

多样性指数的变化趋势一致。

2.6 植物性系统与环境因子的关系

由图4可知, 在性系统的多度与环境因子的Mantel相关性分析中, 土壤有效磷含量和土壤温度对性系统多度解释率较高。土壤有效磷含量和土壤温度与两性花植物植株数极显著相关, 坡度和土壤含水量与两性花植物的植株数显著相关; 土壤有效磷含量和土壤温度与雌雄异株植物植株数极显著相关, pH与雌雄异株植物植株数显著相关; 坡度、土壤有效磷含量、土壤全钾含量、土壤温度与雌雄同株植物植株数极显著相关。

3 讨论

3.1 植物性系统物种组成的地理环境分布

性系统的构成对气候变化与地理环境变动较为敏感, 导致不同气候带的性系统组成存在较大差异(张秀艳等, 2021; 王芸芸和郝占庆, 2022)。与其他研究区相同的是, 戴云山南坡木本植物两性花物种比

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0457

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

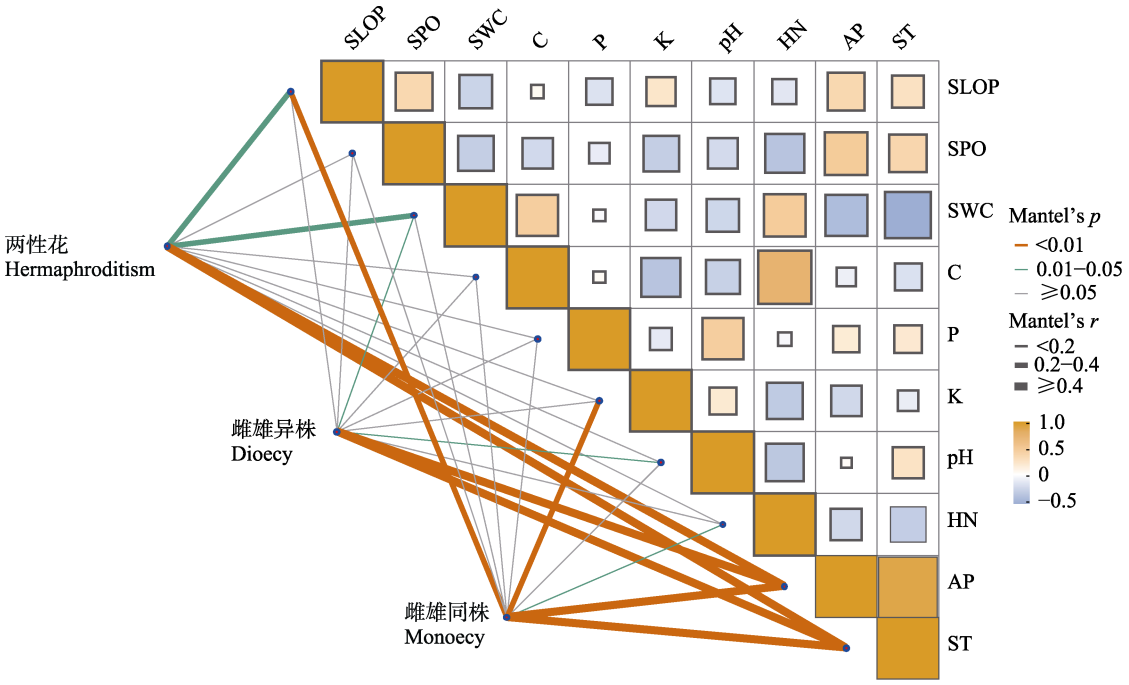


图4 植物性系统的多度与环境因子的Mantel相关性热图。AP, 有效磷含量; C, 土壤全碳含量; HN, 水解氮含量; K, 土壤全钾含量; P, 土壤全磷含量; SLOP, 坡度; SPO, 坡位; ST, 土壤温度; SWC, 土壤含水量。线的宽窄代表*r*的统计量, 橙色、绿色与灰色的线分别代表$p < 0.01$、$p < 0.05$与$p \geq 0.05$。

Fig. 4 Mantel correlation between plant sexual systems abundance and environmental factors. AP, available phosphorus content; C, soil total carbon content; HN, hydrolyzed nitrogen content; K, soil total potassium content; P, soil total phosphorus; SLOP, slope; SPO, slope location; ST, soil temperature; SWC, soil water content. The thickness of the lines represents the statistical magnitude of *r*. The orange, green, and gray lines represent $p < 0.01$, $p < 0.05$, and $p \geq 0.05$, respectively.

例(55.3%)最高。两性花植物在生物界中的高比例分布, 归因于其在繁殖效率、生态适应性、资源分配、进化稳定性、传粉者吸引以及性别可塑性等多个方面的综合优势, 这些优势不仅确保了它们在多变环境条件下的繁殖成功率, 还有助于维持种群遗传多样性(Gross, 2005; Etterson & Mazer, 2016; 王芸芸和郝占庆, 2022; 何花等, 2024)。与其他研究区不同的是, 戴云山南坡雌雄异株植物物种比例偏高, 雌雄同株植物物种比例偏低。这种差异主要与生境或群落类型有关。在戴云山自然保护区雌雄异株植物物种数比例(34.1%)高于雌雄同株(10.6%), 与亚热带森林的繁殖特征一致, 支持Bawa假说, 即雌雄异株植物在气候温暖潮湿的热带与亚热带植物区系中更为常见的假说(Bawa, 1980)。没有发现雌雄异株与雌雄同株物种比例随纬度的变化而变化的规律。但两性花植物不同, 将这些地区的纬度与植物性系统物种比例联系起来, 纬度梯度: 巴尔加斯州>云南西双版纳>澳大利亚>云南哀牢山>海南尖峰岭>河南白云山>福建戴云山>吉林长白山, 研究结果在一定程度上说明从热带到温带的两性花植物物种比例有可能随着纬度的增高而减少。

3.2 植物性系统数量特征的海拔分布

植物性系统的分布格局与群落物种组成以及植物的生活习性紧密相连, 是植物不同功能性状协同进化以适应环境的具体体现(Chazdon et al., 2003)。戴云山南坡雌雄同株植物植株数随海拔升高先下降后上升, 物种数随海拔升高显著下降。戴云山南坡雌雄同株植物中壳斗科与松科多度较高(附录), 壳斗科植物繁殖依赖虫媒或风媒传粉, 而松科植物则主要通过风媒传粉(邹霖湘等, 2017)。在中低海拔区域(900–1 300 m), 壳斗科植物占据主导地位, 随着海拔增加, 动物传粉者的密度降低, 进而影响雌雄同株植物的繁殖成功率(黄双全, 2018), 表现为雌雄同株植物植株数与物种数的显著减少。与此相反, 在高海拔区域, 黄山松为群落的优势种, 高海拔区域(1 400–1 600 m)的强风环境为松科植物提供了有利的风媒传粉条件, 从而雌雄同株植物的种群规模有所增加。低海拔壳斗科植物多度因动物传粉者变化而减少(施雨含等, 2021), 高海拔松科植物多度因风媒传粉优势而增加(王俊, 2021), 这种变化共同促成戴云山南坡雌雄同株植物数量特征随海拔升高先下降后上升的分布特征。

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

雌雄异株植物植株数随海拔升高呈现“单峰”模式, 于1 300 m处达最大值, 与戴云山南坡植物物种多样性和系统发育多样性沿海拔梯度呈现一致的格局(李梦佳等, 2021)。性系统多样性指数也遵循这一趋势, 表明雌雄异株在中等海拔比例高可能与物种多样性中等膨胀格局有关。随着海拔升高, 雌雄异株可以通过增加种群密度, 来弥补其较小的有效种群数量以及雌株与雄株空间隔离而降低的交配成功率(Silva et al., 2022)。在900–1 300 m的区域, 植被类型主要为针阔混交林, 而在1 400 m以上则是以针叶林为主(何中声等, 2022b)。雌雄异株植物的减少或许与针阔混交林向针叶林的过渡以及高海拔地区植物区系组成简化有关(Jiang et al., 2019)。

3.3 植物性系统与环境因子的生态关联

土壤养分与温度等环境因子是影响木本植物性系统分布的关键因素(Geber et al., 1999; Case & Barrett, 2004; 吴墨栩等, 2022)。研究结果表明, 土壤有效磷含量与土壤温度是影响戴云山南坡木本植物性系统分布特征的决定因素。这与戴云山南坡植物物种和系统发育多样性受土壤有效磷含量影响的结果(李梦佳等, 2021; Jiang et al., 2023)相符合。土壤有效磷含量会直接影响植物的光合作用、呼吸作用以及光合产物分配等关键生理过程(薛欣欣等, 2019), 这些生理活动的变化进而可能导致植物生长状况与分布范围变动。土壤有效磷通过调节植物性别比进而影响雌雄异株分布(王芸芸和郝占庆, 2022), 雄性植株相较于雌性植株更能适应缺磷环境(Xia et al., 2020)。相关研究发现, 戴云山南坡土壤有效磷含量随海拔梯度变化呈现单峰模式(何中声等, 2022a), 与雌雄异株具有显著相关性且变化趋势相同, 表明雌雄异株植物对土壤有效磷水平具有较高的敏感性。

随着海拔升高, 土壤温度逐渐降低, 这一变化对植物根系的生长与分布具有显著影响, 进而间接调控木本植物的性系统空间分布。研究表明, 两性花植物的分布与年平均气温正相关, 而雌雄同株植物则与之负相关(Wang et al., 2020)。雌雄异株植物具有较宽的环境适应性以及较高的传播能力(王芸芸和郝占庆, 2022), 这使得它们能够更有效地应对由海拔变化引起的温度变化。

随着海拔升高, 环境压力增大, 环境适应性假说认为, 雌雄异株植物更适应于土壤贫瘠或季节性干旱等环境压力较大的地区(Hultine et al., 2016; Varga & Soulsbury, 2020)。因而, 雌雄异株的繁殖策略在高海拔可能更具优势。雌雄性别功能的分离有助于雄性植株专注于花粉的生产与传播, 而雌性植株则集中于种子生成, 这在资源受限的环境中提高了生存与繁殖潜力。生态位分化假说认为, 对于雌雄同株植物, 他们在资源利用上表现出更大灵活性, 能够根据环境条件变化, 调整自交与异交比例, 实现对环境的良好适应。在中低海拔地区, 尤其是在植被密度较大的森林群落中, 雌雄同株植物能够占据多种生态位, 从而在资源适中环境中具有竞争优势。戴云山南坡植物性系统的分布格局主要受生物因子、非生物因子与植物自身生理特性的共同作用。

4 总结

戴云山南坡沿海拔梯度分布的雌雄异株植物物种比例高于雌雄同株, 支持雌雄异株植物在热带与亚热带植物区系中更为常见的Bawa假说。戴云山南坡植物性系统的分布模式与植物物种和谱系多样性呈现相似的海拔梯度格局, 即雌雄异株植株数随海拔升高呈现“单峰”模式, 在1 300 m处达到最大值。土壤有效磷含量与土壤温度是影响戴云山南坡木本植物性系统海拔梯度分布的关键环境因素, 也是推动植物多样性变化的重要驱动力, 均受环境过滤控制。本研究考虑了戴云山南坡土壤、地形和气候因素对植物性系统的影响, 未来有必要考虑不同坡向(南坡和北坡)与人为干扰强度对植物性系统分布的影响。此外, 植物自身的生物学特性同样对植物性系统的分布产生影响。未来研究需要综合考虑植物性系统与其他功能性状之间的生态联系, 以深入理解植物性系统分布格局背后的驱动机制。

致谢 感谢福建农林大学科技创新专项基金(KFb22030XA)资助。野外调查得到福建戴云山国家级自然保护区管理局的支持与帮助, 谨致谢忱!

参考文献

Bawa KS (1980). Evolution of dioecy in flowering plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 11, 15-39.

Case AL, Barrett SCH (2004). Environmental stress and the evolution of dioecy: *Wurmbea dioica* (Colchicaceae) in Western Australia. *Evolutionary Ecology*, 18, 145-164.

Chazdon RL, Careaga S, Webb C, Vargas O (2003).

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0457

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

Community and phylogenetic structure of reproductive traits of woody species in wet tropical forests. *Ecological Monographs*, 73, 331-348.

Chen XS, Li QJ (2008a). Sexual systems and ecological correlates in an azonal tropical forests, SW China. *Biotropica*, 40, 160-167.

Chen XS, Li QJ (2008b). Patterns of plant sexual systems in subtropical evergreen broad-leaved forests in Ailao Mountains, SW China. *Journal of Plant Ecology*, 1, 179-185.

Etterson JR, Mazer SJ (2016). How climate change affects plants' sex lives. *Science*, 353, 32-33.

Geber MA, Dawson TE, Delph LF (1999). *Gender and Sexual Dimorphism in Flowering Plants*. Springer, Heidelberg.

Gross CL (2005). A comparison of the sexual systems in the trees from the Australian tropics with other tropical biomes—More monoecy but why? *American Journal of Botany*, 92, 907-919.

He H, Tan DY, Yang XC (2024). Cryptic dioecy in angiosperms: Diversity, phylogeny and evolutionary significance. *Biodiversity Science*, 32, 24149. DOI: 10.17520/biods.2024149. [何花, 谭敦炎, 杨晓琛 (2024). 被子植物隐性雌雄异株性系统的多样性、系统演化及进化意义. 生物多样性, 32, 24149. DOI: 10.17520/biods.2024149.]

He ZS, Chen JJ, Zhu J, Wang ZW, Gu XG, Jiang L, Chen B, Xu DW, Wu ZY, Liu JF (2022a). Characteristics of microbial functional diversity and its influencing factors of forest soils at different elevations on the southern slope of Daiyun Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 42, 3504-3515. [何中声, 陈佳嘉, 朱静, 王紫薇, 谷新光, 江蓝, 陈博, 徐道炜, 吴则焰, 刘金福 (2022a). 戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物功能多样性特征及影响因素. 生态学报, 42, 3504-3515.]

He ZS, Gu XG, Jiang L, Xu DW, Liu JF, Li WZ, Chen WW (2022b). Characteristics and its influencing factors of forest soil dominant bacterial community in different elevations on the southern slope of Daiyun Mountain. *Journal of Beijing Forestry University*, 44(7), 107-116. [何中声, 谷新光, 江蓝, 徐道炜, 刘金福, 李文周, 陈文伟 (2022b). 戴云山南坡不同海拔森林土壤优势细菌群落特征及影响因素. 北京林业大学学报, 44(7), 107-116.]

Huang SQ (2018). A better understanding of ecological networks needs studying plant-pollinator interactions. *Biodiversity Science*, 26, 429-432. [黄双全 (2018). 了解生态网络需要监测植物与传粉者的相互作用. 生物多样性, 26, 429-432.]

Hultine KR, Grady KC, Wood TE, Shuster SM, Stella JC, Whitham TG (2016). Climate change perils for dioecious plant species. *Nature Plants*, 2, 16109. DOI: 10.1038/nplants.2016.109.

Jiang L, He ZS, Liu JF, Xing C, Gu XG, Wei CS, Zhu J, Wang XL (2019). Elevation gradient altered soil C, N, and P stoichiometry of *Pinus taiwanensis* forest on Daiyun Mountain. *Forests*, 10, 1089. DOI: 10.3390/f10121089.

Jiang L, Zhang X, Zhu J, Wei X, Chen B, Liu JF, Zheng SQ, He ZS (2023). Environmental heterogeneity determines beta diversity and species turnover for woody plants along an elevation gradient in subtropical forests of China. *Forestry Research*, 3, 26. DOI: 10.48130/FR-2023-0026.

Li MJ, He ZS, Jiang L, Gu XG, Jin MR, Chen B, Liu JF (2021). Distribution pattern and driving factors of species diversity and phylogenetic diversity along altitudinal gradient on the south slope of Daiyun Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 41, 1148-1157. [李梦佳, 何中声, 江蓝, 谷新光, 晋梦然, 陈博, 刘金福 (2021). 戴云山物种多样性与系统发育多样性海拔梯度分布格局及驱动因子. 生态学报, 41, 1148-1157.]

Li TH, Jiang J, Chen JM, Fan SB (2004). The sexual polymorphism of seed plant. *Journal of Northeast Forestry University*, 32(5), 48-52. [李同华, 姜静, 陈建名, 范士波 (2004). 种子植物性别的多态性. 东北林业大学学报, 32(5), 48-52.]

Lin HY, Tseng YH, Hsieh CF, Hu JM (2020). Geographical distribution of dioecy and its ecological correlates based on fine-scaled species distribution data from a subtropical island. *Ecological Research*, 35, 170-181.

Long R (2011). *Study on Community Structure of Deciduous Broad-Leaf Forests and Their Plant Sexual System Diversity in Dalaoling, Hubei Province*. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. [龙茹 (2011). 湖北大老岭落叶阔叶林群落结构和植物性系统多样性研究. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京.]

Ma KP (1994). Measurement method of biological community diversity I. Measurement method of α diversity (I). *Biodiversity Science*, 2, 231-239. [马克平 (1994). 生物群落多样性的测度方法. I. α多样性的测度方法(上). 生物多样性, 2, 231-239.]

MAMUT J, Tan DY (2014). Gynomonoecy in angiosperms: phylogeny, sex expression and evolutionary significance. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 76-90. [吉乃提汗•马木提, 谭敦炎 (2014). 被子植物雌全同株性系统: 系统演化、性表达与进化意义. 植物生态学报, 38, 76-90.]

Ramírez N (2022). Sexual and breeding systems in a xerophytic shrubland. *Open Journal of Ecology*, 12, 434-482.

Renner SS (2014). The relative and absolute frequencies of angiosperm sexual systems: dioecy, monoecy, gynodioecy, and an updated online database. *American Journal of Botany*, 101, 1588-1596.

Shi YH, Ren ZX, Zhao YH, Wang H (2021). Effect of climate change on the distribution and phenology of plants, insect pollinators, and their interactions. *Biodiversity Science*, 29, 495-506. [施雨含, 任宗昕, 赵延会, 王红 (2021). 气候变化对植物–传粉昆虫的分布区和物候及其互作关系的影响. 生物多样性, 29, 495-506.]

Silva DM, Luna ALL, Souza CS, Nunes YRF, Fonseca RS, de

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

Azevedo IFP (2022). Sexual and reproductive systems of woody species in vereda are distributed according to the life form and habitat occurrence. *Austral Ecology*, 47, 1528-1543.

State Forestry Administration (1999). *Forest Soil Analysis Method*. China Standards Press, Beijing. [国家林业局 (1999). 森林土壤分析方法. 中国标准出版社, 北京.]

Tree of Sex Consortium (2014). Tree of Sex: a database of sexual systems. *Scientific Data*, 1, 140015. DOI: 10.1038/sdata.2014.15.

Varga S, Soulsbury CD (2020). Environmental stressors affect sex ratios in sexually dimorphic plant sexual systems. *Plant Biology*, 22, 890-898.

Wang J (2021). *A Study on Survival Pressure and Competitiveness of Pinus Sect. Cembra in China*. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. [王俊 (2021). 中国五针松组植物生存压力和竞争力研究. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京.]

Wang X, Wang GR, Xia FC, Ni CC, Sun Y, Liu BD, Gao W, Zhou HC (2017). Sexual system and ecological links of woody plants in Changbai Mountains, northeastern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 39(5), 58-64. [王熊, 王戈戎, 夏富才, 倪成才, 孙越, 刘宝东, 高伟, 周海城 (2017). 长白山木本植物性别系统及其生态关联性. 北京林业大学学报, 39(5), 58-64.]

Wang YC, Lin JY, Xu H, Lin MX, Li YD (2019). Numerical characteristics of plant sexual system of the woody plants in the 60 ha plot in the tropical rain forest in Jianfengling, Hainan Island. *Biodiversity Science*, 27, 297-305. [王颖灿, 林家怡, 许涵, 林明献, 李意德 (2019). 海南尖峰岭热带山地雨林60 ha大样地木本植物性别系统数量特征. 生物多样性, 27, 297-305.]

Wang YY, Hao ZQ (2022). Angiosperm sexual systems—Concepts, evolution, ecology, and future directions. *Biodiversity Science*, 30, 243-254. [王芸芸, 郝占庆 (2022). 被子植物性系统的多样性、生态功能及分布规律. 生物多样性, 30, 243-254.]

Wang YY, Luo A, Lyu T, Dimitrov D, Xu XT, Freckleton RP, Li YQ, Su XY, Li YC, Liu YP, Sandanov D, Li QJ, Hao ZQ, Liu SG, Wang ZH (2021). Global distribution and evolutionary transitions of angiosperm sexual systems. *Ecology Letters*, 24, 1835-1847.

Wang YY, Lyu T, Shrestha N, Lyu LS, Li YQ, Schmid B, Freckleton RP, Dimitrov D, Liu SG, Hao ZQ, Wang ZH (2020). Drivers of large-scale geographical variation in sexual systems of woody plants. *Global Ecology and Biogeography*, 29, 546-557.

Wu MX, An MT, Tian L, Liu F (2022). Effects of environmental factors on quantitative characteristics of woody plant sexual system in Maolan karst forest. *Biodiversity Science*, 30, 119-128. [吴墨栩, 安明态, 田力, 刘锋 (2022). 茂兰喀斯特森林木本植物性系统数量特征及其与环境因子的关系. 生物多样性, 30, 119-128.]

Wu XG, Wang WP, Li B, Liang YL, Liu YZ (2020). Altitudinal gradient of soil organic carbon in forest soils in the mid-subtropical zone of China. *Acta Pedologica Sinica*, 57, 1539-1547. [吴小刚, 王文平, 李斌, 梁跃龙, 刘以珍 (2020). 中亚热带森林土壤有机碳的海拔梯度变化. 土壤学报, 57, 1539-1547.]

Xia ZC, He Y, Yu L, Lv RB, Korpelainen H, Li CY (2020). Sex-specific strategies of phosphorus (P) acquisition in *Populus cathayana* as affected by soil P availability and distribution. *New Phytologist*, 225, 782-792.

Xu X, Yang F, Yin CY, Li CY (2007). Research advances in sex-specific responses of dioecious plants to environmental stresses. *Chinese Journal* of *Applied Ecology*, 18, 2626-2631. [胥晓, 杨帆, 尹春英, 李春阳 (2007). 雌雄异株植物对环境胁迫响的性别差异研究进展. 应用生态学报, 18, 2626-2631.]

Xue XX, Wu XP, Wang WB, Luo XH, Wang DP, Zhang YF, Zou BX (2019). Progress of potassium, magnesium and their interaction in plant-soil system. *Soils*, 51, 1-10. [薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 罗雪华, 王大鹏, 张永发, 邹碧霞 (2019). 植物-土壤系统中钾镁营养及其交互作用研究进展. 土壤, 51, 1-10.]

Zhang DY (2003). *Plant Life-History Evolution and Reproductive Ecology*. Science Press, Beijing. [张大勇 (2003). 植物生活史进化与繁殖生态学. 科学出版社, 北京.]

Zhang XY, Zhou ZY, Li ZH, Zhao H, Shao YZ, Wang J, Chen Y, Yuan ZL, Ye YZ (2021). Quantitative characteristics and ecological correlations of sexual system in a deciduous broadleaf forest of the Baiyun Mountains of Henan Province, China. *Plant Science Journal*, 39, 488-495. [张秀艳, 周紫羽, 李子豪, 赵河, 邵毅贞, 王晶, 陈云, 袁志良, 叶永忠 (2021). 河南白云山落叶阔叶林群落性系统的数量特征及生态关联性. 植物科学学报, 39, 488-495.]

Zou LX, He ZS, Jiang L, Liu JF, Zheng SQ, Li WZ (2017). Pollination mode of spermatophyte in Daiyun Mountain nature reserve. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 33, 38-42. [邹霖湘, 何中声, 江蓝, 刘金福, 郑世群, 李文周 (2017). 戴云山自然保护区种子植物传粉模式研究. 中国农学通报, 33, 38-42.]

责任编委: 任明迅　责任编辑: 李　敏

附录　戴云山南坡海拔梯度上木本植物性系统分布

Supplement　Distribution of woody plant sexual systems along elevational gradient on the south slope of Daiyun Mountain

https://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2024.0457-S1.pdf

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0457

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology