

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2021.50488

张秀艳, 周紫羽, 李子豪, 赵河, 邵毅贞, 王晶, 陈云, 袁志良, 叶永忠. 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[J]. 植物科学学报, 2021, 39(5): 488-495

Zhang XY, Zhou ZY, Li ZH, Zhao H, Shao YZ, Wang J, Chen Y, Yuan ZL, Ye YZ. Quantitative characteristics and ecological correlations of sexual system in a deciduous broadleaf forest in the Baiyun Mountains of Henan Province, China[J]. *Plant Science Journal*, 2021, 39(5): 488-495

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

张秀艳¹, 周紫羽², 李子豪², 赵河³, 邵毅贞²,
王晶^{4,5}, 陈云^{2,5*}, 袁志良^{2,5}, 叶永忠²

(1. 河南地矿职业学院地质工程与资源勘查系, 郑州 451464; 2. 河南农业大学生命科学学院, 郑州 450002;
3. 河南省地质调查院, 郑州 450001; 4. 河南林业科学研究院, 郑州 450008;
5. 河南省伏牛山南北过渡带森林生态系统野外科学观测研究站, 河南洛阳 471400)

摘要: 基于河南白云山 5 hm² 落叶阔叶林统计该地区气候过渡带森林群落植物性系统的数量特征, 使用重要值、相对多度、群落多样性指数分析性系统的分布状况, 并采用方差分解分析环境对植物性系统的解释率。结果显示: 白云山 5 hm² 样地中两性花有 54 种 (58.06%), 其中 20 种为雌雄同株 (21.51%), 19 种为雌雄异株 (20.43%); 地形和空间因子对性系统的解释率最高; 空间过程对植物群落性系统的解释比例较大。暖温带-亚热带生态过渡区雌雄同株植物占比较大, 结果更符合温带森林的繁殖特征; 地形对白云山样地性系统的组成有一定影响; 扩散限制是影响木本植物群落性系统的重要生态过程。

关键词: 性系统; 气候过渡带; 空间分布格局; 数量特征; 生态关联性

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2021)05-0488-08

Quantitative characteristics and ecological correlations of sexual system in a deciduous broadleaf forest of the Baiyun Mountains of Henan Province, China

Zhang Xiu-Yan¹, Zhou Zi-Yu², Li Zi-Hao², Zhao He³, Shao Yi-Zhen²,
Wang Jing^{4,5}, Chen Yun^{2,5*}, Yuan Zhi-Liang^{2,5}, Ye Yong-Zhong²

(1. Geological Engineering and Resource Survey Department, Henan Vocational College of Geology and Mining, Zhengzhou 451464, China; 2. College of Life Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;
3. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450001, China; 4. Henan Forestry Research Institute, Zhengzhou 450008, China; 5. Field Scientific Observation and Research Station of Transitional Zone of South and North in the Funiu Mountains in Henan, Luoyang, Henan 471400, China)

Abstract: Exploring the quantitative characteristics of forest communities in a subtropical-to-temperate transition zone from the perspective of plant sexual systems can provide valuable information for biodiversity conservation and species coexistence. In this study, woody plants in the subtropical-to-temperate transition zone of the Baiyun Mountains were investigated and the quantitative characteristics of their sexual systems were analyzed. Variance of variance

收稿日期: 2021-03-19, 修回日期: 2021-05-18。

基金项目: 国家自然科学基金 (U1704115); 河南省林业科学研究院基本科研业务费 (2020JB01-006); 河南省自然资源厅科技攻关项目 (豫财招标采购-2021-178-9); 河南省自然科学基金 (212300410166); 河南省青年人才托举工程项目 (2020HYTP037)。

This work was supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (U1704115), Basic Scientific Research Business Expenses of Henan Forestry Science Research Institute (2020JB01-006), Science and Technology Project of Henan Provincial Department of Natural Resources (2021-178-9), Natural Science Foundation of Henan Province (212300410166), and Henan Youth Talent Support Project (2020HYTP037).

作者简介: 张秀艳 (1978-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为生态学、环境保护 (E-mail: 147447056@qq.com)。

* 通讯作者 (Author for correspondence. E-mail: cyecology@163.com)。

partition analysis environment for sexual system. Results showed that of the 93 woody seed plants recorded in the 5 hm² plots, 56 species were hermaphroditic (58.06%), 20 species were monoecious (21.51%), and 19 species were dioecious (20.43%). The proportion of monoecious plants was larger in the warm temperate-subtropical transition zone, consistent with the reproductive characteristics of temperate forests. Topographic factors have influenced the composition of the sexual systems of woody plants in the Baiyun Mountains. Furthermore, diffusion restriction is an important ecological process affecting the woody plant community.

Key words: Sexual systems; Climatic transition zone; Distribution pattern; Numerical characteristics; Ecological correlations

植物繁育系统对于了解物种的发展历史、多样性维持机制和性别分化意义重大^[1]。花作为被子植物的性器官有各种形态特征, 其中雌雄蕊是繁殖过程中的重要部分^[2]。在一朵花中同时拥有功能正常的雌雄蕊称为两性花, 它约占被子植物中的72%^[3, 4]。若一朵花中缺乏发育不完全的雌蕊或雄蕊则称为单性花^[3]。单性雌花和雄花的现象相对出现较少, 雌雄同株和雌雄异株植物仅分别占被子植物的7%和4%^[4, 5]。植物性系统的差异决定植株会采用不同的繁殖方式进行繁衍, 这是决定植物种群分布和进化发展的关键因素^[6, 7]。在植物整个生活史过程中, 繁殖和雌雄性功能间的资源配置对于理解植物适合度很重要。在环境选择的压力下, 植物的资源可用性与繁殖资源的配置具有差异, 不同的生境条件会导致性系统组成发生变化^[8]。近年来, 植物的繁育系统与群落结构的关联性逐渐成为植物性系统研究的热点, 探索不同区域植物性系统的数量特征及自然环境条件对性系统的影响, 对于了解群落物种共存机制和种群的进化、发展具有重要作用^[9]。

不同的温度、湿度、光照等环境因子, 会影响不同植物群落性系统的组成和分布^[9, 10]。经过长期进化, 面对不同环境, 植物的适应策略具有差异。研究表明, 在热带森林群落中雌雄异株植物的物种比例较高^[11, 12], 而雌雄同株植物在温带森林中比例偏高^[13, 14]。王颖灿等^[2]的研究发现在热带森林群落雌雄异株的性别比例和多度与海拔呈正相关; 龙茹^[10]的研究表明湖北大老岭森林群落的性系统与海拔呈显著相关, 雌雄异株在胁迫环境中能够较好的生存; 颜立红^[15]的研究认为湖南壶瓶山的藤本植物性系统与温度和降水量等环境因子关联性较强, 可见从群落角度研究植物性系统的多样性

至关重要。我国温带落叶阔叶林生物多样性相对丰富^[14], 但将群落中的性系统纳入群落生物多样性来讨论群落组成、结构及环境对其影响的研究还未见报道。

本研究基于白云山5 hm²固定样地中木本植物的调查数据, 统计和分析了群落性系统的数量特征, 并探究性系统与环境因子的生态关联性, 阐明该区域木本植物性系统的数量特征及其分布规律; 以及何种生态因子主导着该区域植物性系统多样性格局。研究结果旨在为生态过渡带地区生物多样性的保护和物种共存研究提供理论基础。

1 方法

1.1 研究区概况

河南白云山(111°48' ~ 112°16'E, 33°33' ~ 33°56' N)位于河南省洛阳市嵩县。白云山国家森林公园的总面积达168 hm², 森林覆盖率达98.5%。气候类型属于暖温带-北亚热带季风气候过渡区。该研究区地势西高东低, 山坡坡度大多处于40° ~ 80°, 山体南北延伸。该研究区域年均气温13.1℃ ~ 13.9℃, 最高气温不超过26℃, 极端最低气温为-14.4℃。年均降水量约1200 mm, 集中在7-9月, 相对湿度为70% ~ 78%^[16]。

1.2 样地设置与环境指标

本研究于2015年在白云山国家森林公园进行实地勘察, 参照美国史密森研究院(Smithsonian Institution)热带林研究中心(Center for Tropical Forest Science, CTFS)大样地的建设标准^[17], 选取代表性落叶阔叶林设置5 hm²长期监测样地。该样地东西长250 m、南北宽200 m, 从西南角出发将其划分成120个20 m × 20 m的样方。调查统计每个样方中所有DBH ≥ 1.0 cm的木本植物

个体信息，包括物种名、树高、坐标、胸径等，并在每个植株离地 1.3 m 处环涂红漆做标记，以便持续监测。

地形因子包括凹凸度、坡度、海拔、坡向，测量方法参照 Yamakura 等^[18]。土壤理化性质的测定^[19]指标包括土壤含水量、土壤 pH 值、氮含量、磷含量、土壤有机质。空间因子包括 PCNM 向量，使用 R 语言中的“PCNM”包计算得出^[20]。

1.3 数据分析

1.3.1 木本植物性系统的确定

木本植物的性系统参考《中国植物志》在线数据库 (<http://frps.iplant.cn/>) 和 *Flora of China* (www.efloras.org/) 确定。根据花的特征不同，可以把植物分为单性花和两性花。从花着生部位和结构来看，单性花又分为雌雄同株和雌雄异株^[4, 21]。将植物的性系统划分为 3 个类别：雌雄同株、雌雄异株和两性花。

1.3.2 数据分析

根据物种重要值分析性系统的分布情况；物种多样性指数包括 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 均匀度指数^[22]。计算公式如下：

物种重要值 = (相对多度(%) + 相对频度(%) + 相对胸高断面积(%))/3^[23] (1)

植物不同性别占比(%) = 100 × 样方内雌雄异株植物的物种数/样方内总物种数 (2)

Shannon-wiener 指数 $H = -\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i$ (3)

Simpson 指数 $D = 1 - \sum_{i=1}^n P_i^2$ (4)

Pielou 指数 $E = (-\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i) / \ln S$ (5)

式中：相对多度为某个种的株数与所有种总株数的比；相对频度为某个种出现的次数与所有种出现总次数的比；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；*H* 为物种多样性；*D* 为物种优势度；*E* 为物种均匀度；*S* 为群落的总植株种数；*P_i* 为第 *i* 个种的相对重要值。

方差分解 (variation partitioning) 分析采用 R 语言的“Vegan”包完成^[24]。运用韦恩图表示各类因子的纯效应 (pure effect) 和共同效应 (share effect) 等进行分组。将所有因子分为地形、土壤和空间 3 大类。数据分析均通过 R 3.5.1 软件计算。

2 结果与分析

2.1 物种的基本组成及重要值

本研究在白云山样地内共记录到 (DBH ≥ 1 cm) 17 963 株，共有 93 种，分属于 56 科 34 属。两性花植株共 6341 株，单性花植株共 11 622 株，其中雌雄同株植物共有 8699 株。在 93 种木本植物中，有 19 个物种属于雌雄异株植物，占样地总物种数的 20.43%；雌雄同株有 20 种，占总物种数的 21.51%；两性花有 54 种，占 58.06%。

样地内重要值大于 2.0 的有 12 个种，其中两性花植株有 4 种，即：河南海棠 (*Malus honanensis* Rehd.)、白檀 (*Symplocos paniculate* (Thunb.) Miq.)、四照花 (*Cornus kousa* subsp. *chinensis* (Osborn) Q. Y. Xiang) 和水榆花楸 (*Sorbus alnifolia* (Sieb. et Zucc.) K. Koch)；雌雄同株植株有 5 种，即：油松 (*Pinus tabulaeformis* Carriere)、白桦 (*Betula platyphylla* Suk.)、榛 (*Corylus heterophylla* Fisch. ex Trautv.)、华山松 (*Pinus armandii* Franch.) 和锐齿槲栎 (*Quercus aliena* var. *acutiserrata* Maximowicz ex Wenzig)；雌雄异株植株有 3 种，即：秦岭木姜子 (*Litsea tsinlingensis* Yang et P. H. Huang)、漆 (*Toxicodendron vernicifluum* (Stokes) F. A. Barkl.) 和三桠乌药 (*Lindera obtusiloba* Bl.) (表 1)。

雌雄同株和雌雄异株有 65% 以上的物种重要值在 0 ~ 1，有 85% 的两性花植物重要值都在 0 ~ 1 (图 1)。重要值大于 2.0 的雌雄同株物种有 5 种，雌雄异株有 3 种；两性花有 4 种。样地内雌雄同株物种重要值累加为 55.6，雌雄异株为 16.1，两性花为 40.3。

2.2 植物性系统的植株数量和相对多度对应的样方数目

本研究发现，超过 60% 的样方单性花植株数量集中在 0 ~ 100 株，雌雄异株超过半数的物种植株数量在 100 株以内，只有 3 个物种在 300 株以上；雌雄同株物种的植株数量超过 300 株的有 5 种；全部的两性花植株数量都在 0 ~ 200 株和 400 株以上 (图 2：a)。有 70% 的小样方中雌雄异株植物的数量在 0 ~ 30 株 (0 ~ 0.075 株/m²)，50% 以上的样方中雌雄同株植物的数量在 30 ~ 60 株 (0.075 ~ 0.150 株/m²) 和 60 ~ 90

表 1 白云山 5 hm² 样地内植物性系统重要值 ≥ 2.0 的物种

Table 1 Plant species sexual systems with importance values ≥ 2.0 in 5 hm² plots in Baiyun Mountains

性系统 Sexual system	种名 Species	植株数量 No. of individuals	重要值 Importance value
两性花 Hermaphroditism	水榆花楸 <i>Sorbus alnifolia</i> (Sieb. et Zucc.) K. Koch	1453	5.5
	四照花 <i>Cornus kousa</i> subsp. <i>Chinensis</i> (Osborn) Q. Y. Xiang	916	4.0
	白檀 <i>Symplocos paniculate</i> (Thunb.) Miq.	850	3.5
	河南海棠 <i>Malus honanensis</i> Rehd.	505	2.6
雌雄同株 Monoecy	锐齿槲栎 <i>Quercus aliena</i> var. <i>acutiserrata</i> Maximowicz ex Wenzig	4623	31.3
	榛 <i>Corylus heterophylla</i> Fisch. ex Trautv.	1256	4.2
	华山松 <i>Pinus armandii</i> Franch.	823	7.5
	白桦 <i>Betula platyphylla</i> Suk.	275	2.6
	油松 <i>Pinus tabuliformis</i> Carriere	221	2.0
雌雄异株 Dioecy	三桠乌药 <i>Lindera obtusiloba</i> Bl.	1591	6.7
	漆 <i>Toxicodendron vernicifluum</i> (Stokes) F. A. Barkl.	781	6.1
	秦岭木姜子 <i>Litsea tsinlingensis</i> Yang et P. H. Huang	386	2.2

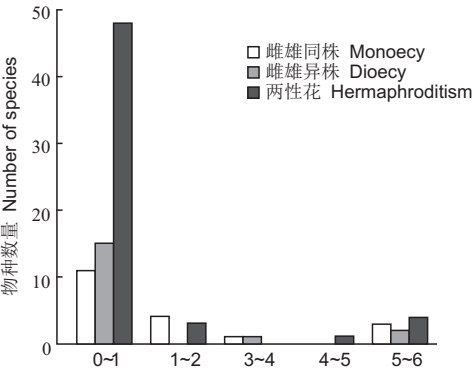


图 1 不同重要值的性系统的物种数量
Fig. 1 Number of sexual systems with different importance values

(0.15 ~ 0.23 株/m²)，有 50% 以上的样方中两性花数量在 0 ~ 60 株(0 ~ 0.15 株/m²)，而雌雄异株植物数量超过 90 株(0.23 株/m²) 的小样方数为 0(图 2: b)。

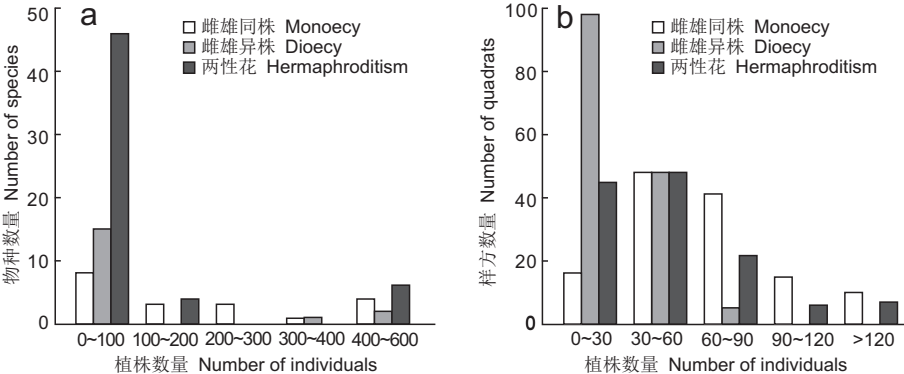


图 2 不同植株数量的性系统的物种数量和样方数目

Fig. 2 Number of sexual systems with different plant populations and number of quadrats

样方中雌雄同株的相对多度集中在 45% ~ 60%，超过 60% 的样方有 30 个；66 个样方中雌雄异株的相对多度在 15% 以下，占总样方数的 53%，两性花的相对多度集中在 15% ~ 45%，雌雄异株相对多度没有超过 60% 的样方(图 3: a)。样方中雌雄异株植物占单性花的比例集中在 10% ~ 20% 和 20% ~ 30% 的较多，超过 50% 的样方数目不到 10 个；雌雄同株占单性花的比例集中在 60% 以上(图 3: c)。由此可见，在样方水平中两性花植株和雌雄同株数量较大，雌雄异株数量最少。

2.3 植物性系统的群落多样性

样地内性系统的 Shannon-Wiener 指数整体较高，从性系统角度来说，雌雄同株的 Shannon-Wiener 指数最高，高达 4.14(图 4: a)。Shannon-Wiener 指数介于 1.2~1.6 的样方数最多，超过 2.0

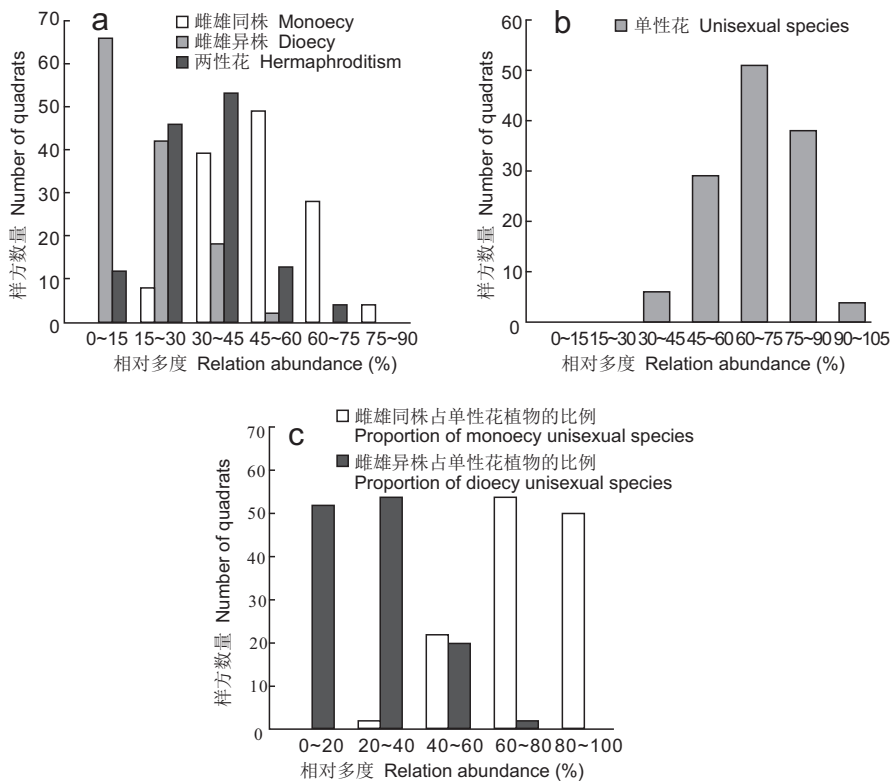


图 3 白云山样地 5 hm² 样地 20 m × 20 m 样方水平的植物性别属性的样方数目分布

Fig. 3 Distribution of sexual system attributes in 20 m × 20 m quadrats in 5 hm² plots in Baiyun Mountains

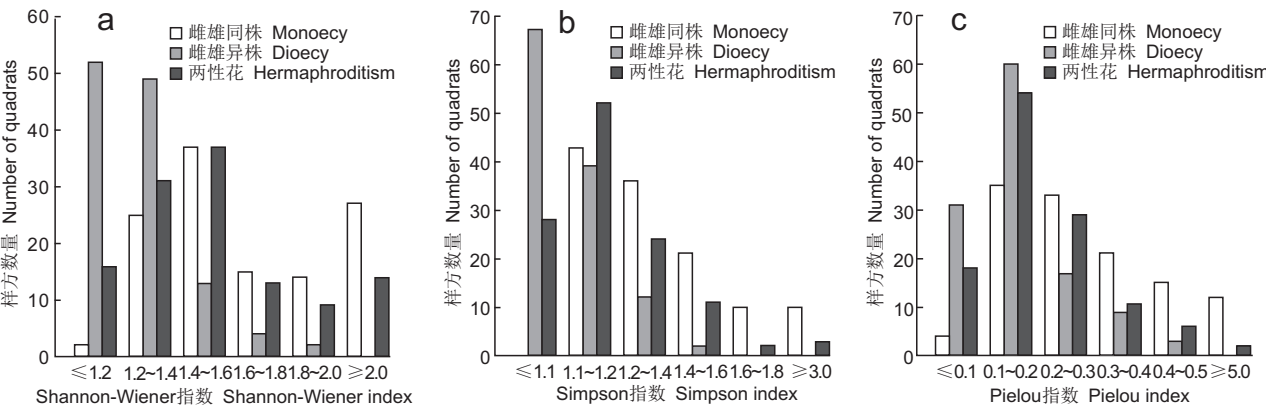


图 4 白云山样地 5 hm² 样地 20 m × 20 m 样方水平中物种多样性指数

Fig. 4 Diversity indices of species in 20 m × 20 m quadrats in 5 hm² plots in Baiyun Mountains

的样方数有 41 个。雌雄同株的指数超过 2 的样方数有 27 个(图 4: a)。样方的 Simpson 指数多集中在 1.1 ~ 1.4, 随着该指数的增加, 样方数目也越来越少。雌雄异株的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数都集中在 1.0 ~ 1.4 (图 4: b)。Pielou 均匀度指数多集中在 0.1 ~ 0.2 和 0.2 ~ 0.3, 其中雌雄同株和两性花的样方数目在其它范围内的数量基本持平(图 4: c)。

2.4 环境因子对植物性系统分布的影响

方差分解结果表明, 雌雄同株、雌雄异株和两性花的 Pielou 多样性指数的整体解释量分别为 82.16%、46.43%和 62.63%, 其中雌雄同株指数的解释率最高。Pielou 指数中雌雄同株的纯地形因子占 10.67%, 纯土壤因子占 1.27%, 纯空间因子占 20.28%。地形因子和空间因子对植物性系统的解释率较为显著。由图 5 可知地形和空间因子对

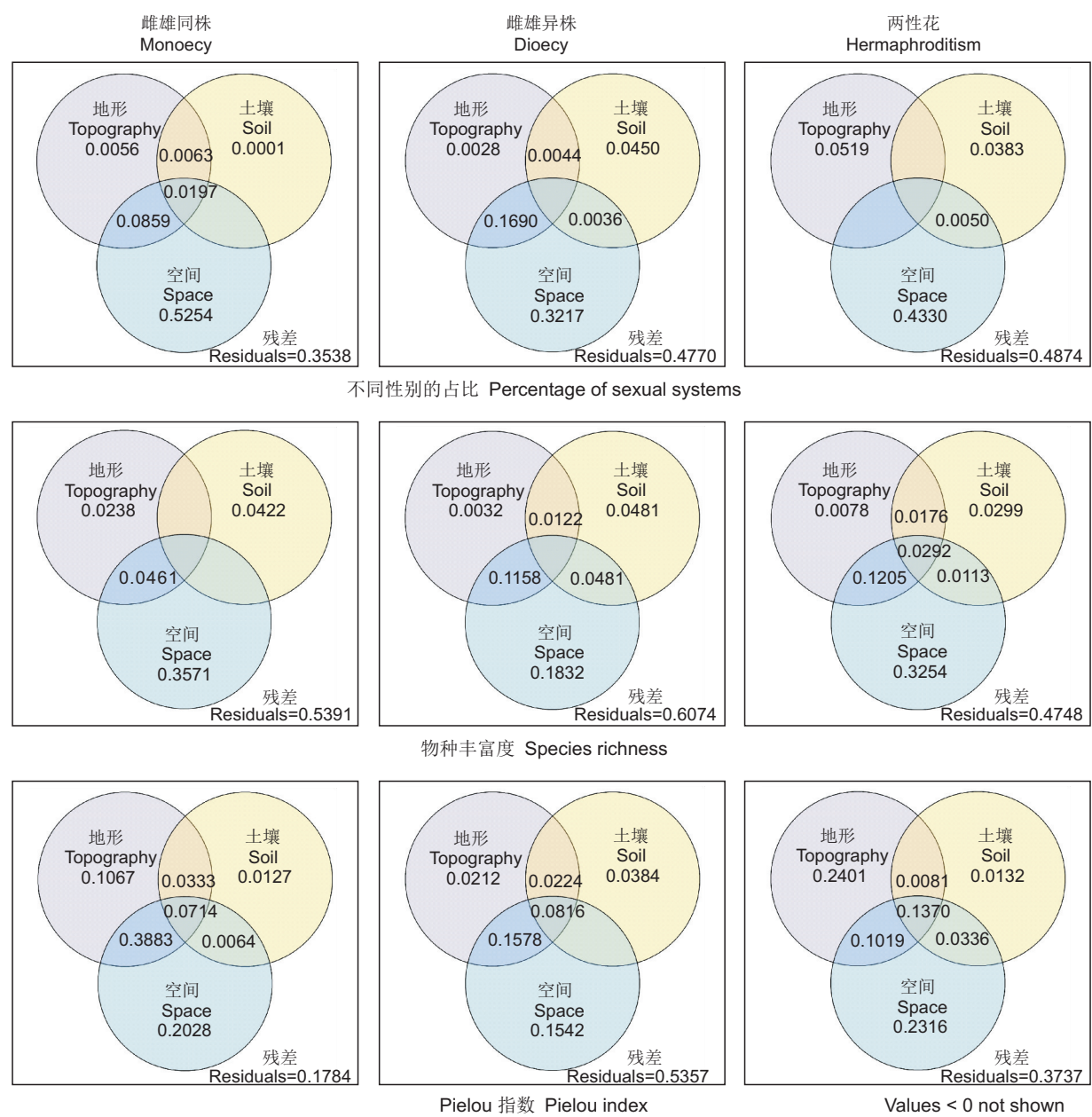


图 5 方差分解分析地形、土壤和空间因子对性系统的纯效应和共同效应
Fig. 5 Variation partitioning analysis of pure and shared effects of topographical, soil, and spatial factors on sexual systems

雌雄同株的解释率是高于对雌雄异株和两性花的解释率。土壤因子的作用对物种多样性指数空间分布格局的解释率较小。

3 讨论

通常两性花在森林中的占比最大，数量差异主要体现在雌雄同株和雌雄异株的比例，这种差异和不同生境或群落类型相关，不同气候带植物性系统的差异较大，温带森林群落具有高比例的雌雄同株

植物^[11, 25]，热带雌雄异株植物比例较高^[26]。本研究结果表明在河南白云山森林群落中雌雄同株的物种数所占比例（21.51%）高于雌雄异株植物（20.43%），与温带森林的繁殖特征一致。河南白云山雌雄同株的比例大于王熊等^[27]在吉林长白山的调查结果（18.5%）和山东昆崙山的结果（11.3%）^[14]，但低于西双版纳（26.1%）和云南哀牢山（30.1%）^[12]。这些地区的从北到南的纬度差异依次为：山东昆崙山 > 吉林长白山 > 河南白云

山 > 云南哀牢山, 将这些地区的纬度差异与雌雄同株的比例联系起来, 可以看出研究结果在一定程度上说明从温带到热带雌雄同株的比例与纬度梯度具有相关性。随纬度的变化没有发现雌雄异株植物的比例变化具有明显的规律, 这与王颖灿等^[2]的结果一致。

从个体密度来看, 白云山样地中大多数样方雌雄同株植物的密度达 0.15 ~ 0.23 株/m², 而雌雄异株植物的密度为 0 ~ 0.075 株/m²。王颖灿等^[2]研究发现, 海南尖峰岭样地中数量最多的雌雄同株植物的样方密度达到 0.125 株/m², 数量最多的雌雄异株植物的样方密度达到 0.125 ~ 0.250 株/m²。可见, 在暖温带- 亚热带生态过渡区雌雄同株植物占大多数, 而在热带雨林地区雌雄异株植物丰富度较高。河南白云山属于暖温带- 北亚热带生态过渡区, 在地理位置上更偏向温带地区, 研究结果符合温带森林的繁殖特征。

温度、光照等环境因子在不同的地形中会呈现出不同的小气候, 这种差异将对样地内物种组成及物种空间分布产生重要的影响^[28]。王颖灿等^[2]的研究表明在热带雨林地区雌雄异株植物多度分布与海拔呈正相关, 与本研究结果一致, 白云山样地地形因子(海拔等)对植物性系统有一定的解释率。地形能够在小尺度空间范围内呈现出不同的生境类型, 这种环境梯度导致的不同生境在小尺度区域内对物种分布格局和群落多样性的影响更加明显^[29], 白云山样地的平均海拔在 1500 m 左右, 调查的 5 hm² 样地最高达 1600 m, 可能是由于海拔高低不同形成的森林小气候对白云山性系统有影响。

影响植物性别形成和分布的因素是多种多样的, 本研究分解分析结果表明, 地形和空间因子的共同作用对雌雄同株性别占比、物种丰富度和 Pielou 指数的解释率分别达到 16.90%、11.58% 和 15.78%, 这在一定程度上可以解释地形和空间因子共同作用对雌雄异株空间分布格局起决定作用, 支持雌雄异株有空间分离现象, 雌雄异株的空间分布受扩散限制的影响。研究结果显示, 空间因子对性系统的解释率较高, 雌雄同株和两性花容易发生自交而生长聚集, 雌雄异株种子只能落在以母株为半径的一定范围内, 也说明扩散限制可能会影响到性系统空间分布^[30]。土壤对性系统的解释率比较低, 但不能忽略土壤含水量、pH 值和土壤有机质

等土壤性质对性系统分布格局的影响, 今后的研究中需要加入性系统不同的传粉方式及花的形态特征研究土壤在植物繁殖过程中的作用。

总的来说, 暖温带- 亚热带生态过渡区雌雄同株植物占比较大, 结果更符合温带森林的繁殖特征; 地形对白云山样地性系统有一定影响; 扩散限制是影响木本植物群落性系统的重要生态过程。

参考文献:

- [1] 何亚平, 刘建全. 植物繁育系统研究的最近进展和评述[J]. 植物生态学报, 2003, 27(2): 151-163.
He YP, Liu JQ. A review on recent advances in the studies of plant breeding system[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(2): 151-163.
- [2] 王颖灿, 林家怡, 许涵, 林明献, 李意德. 海南尖峰岭热带山地雨林 60 ha 大样地木本植物性系统数量特征[J]. 生物多样性, 2019, 27(3): 297-305.
Wang YC, Lin JY, Xu H, Lin MX, Li YD. Numerical characteristics of plant sexual system of the woody plants in the 60 ha plot in the tropical rain forest in Jianfengling, Hainan Island[J]. *Biodiversity Science*, 2019, 27(3): 297-305.
- [3] 李同华, 姜静, 陈建名, 范士波. 种子植物性别的多态性[J]. 东北林业大学学报, 2004, 32(5): 48-52.
Li TH, Jiang J, Chen JM, Fan SB. The sexual polymorphism of seed plant[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2004, 32(5): 48-52.
- [4] 柴紫菲, 谢道生, 盛文涛. 浅谈植物的性别[J]. 园艺与种苗, 2018, 6: 54-56.
Chai ZF, Xie DS, Sheng WT. Discussion on plant sex[J]. *Horticulture and Seed*, 2018, 6: 54-56.
- [5] Renner SS, Ricklefs RE. Dioecy and its correlates in the flowering plants[J]. *Am J Bot*, 1995, 82(5): 596-606.
- [6] Barrett SCH, Harder LD. Ecology and evolution of plant mating[J]. *Trends Ecol Evol*, 1996, 11(2): 73-79.
- [7] Charlesworth D. Evolution of plant breeding systems[J]. *Curr Biol*, 2006, 16(17): 726-735.
- [8] Varga S, Soulsbury CD. Environmental stressors affect sex ratios in sexually dimorphic plant sexual systems[J]. *Plant Biol*, 2020, 22(5): 890-898.
- [9] 胥晓, 杨帆, 尹春英, 李春阳. 雌雄异株植物对环境胁迫响应的性别差异研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2626-2631.
Xu X, Yang F, Yin CY, Li CY. Research advance sinsex-specific response of dioecious plants to environmental stresses[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2626-2631.
- [10] 龙茹. 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[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [11] Nathan R, Muller LHC. Spatial patterns of seed dispersal, their determinants and consequences for recruitment[J]. *Trends Ecol Evol*, 2000, 15(7): 278–285.
- [12] Chen XS, Li QJ. Sexual systems and ecological correlation in an Azonal tropical forests, SW China[J]. *Biotropica*, 2008, 40(2): 160–167.
- [13] 王芸芸, 师帅, 蒯菲, 原作强, 叶吉, 等. 长白山阔叶红松林木本植物繁殖特征及其关联性[J]. 科学通报, 2014, 59(24): 2407–2415.
- Wang YY, Shi S, Lin F, Yuan ZQ, Ye J, *et al.* Reproductive traits and their correlation among woody plants in a broadleaf-Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest in Northeast China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59: 2407–2415.
- [14] 杨晓燕, 吴晓明, 姜明媛, 高燕, 周淑诺, 等. 昆崙山植物性系统及其生态关联性[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2017, 18(5): 667–671.
- Yang XY, Wu XM, Jiang MY, Gao Y, Zhou SN, *et al.* Sexual systems and ecological links of wood plants in Kunyu Mountains, China[J]. *Journal of Beijing Forestry University (Natural Science)*, 2017, 18(5): 667–671.
- [15] 颜立红. 湖南壶瓶山藤本植物的有性系统及其环境适应性[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(7): 35–39.
- Yan LH. Sexual system and environmental adaptability of vines in Hupingshan Mountain, Hunan Province[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, 35(7): 35–39.
- [16] 王帅朋, 姚成亮, 周紫羽, 陈云, 叶永忠. 河南白云山温带落叶阔叶林萌生特征及萌生个体空间分布格局[J]. 植物科学学报 2021, 39(1): 32–41.
- Wang SP, Yao CL, Zhou ZY, Chen Y, Ye YZ. Germination characteristics and spatial distribution patterns of sprouting woody plants in a broad-leaved deciduous forest in Baiyunshan, Henan Province, China[J]. *Plant Science Journal*, 2021, 39(1): 32–41.
- [17] Condit R. Research in large, long-term tropical forest plots[J]. *Trends Ecol Evol*, 1995, 10(1): 18–22.
- [18] Yamahura T, Kanzakia M, Itoh A, Ohkubo T, Ogino K, *et al.* Topography of a large-scale research plot established within a tropical rain forest at Lambir, Sarawak [J]. *Tropics*, 1995, 5(1/2): 41–56.
- [19] 黄萍, 王楠, 周紫羽, 王婷, 袁志良, 等. 白云山落叶阔叶林土壤细菌群落结构及环境因子的相关性分析[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(3): 416–419.
- Huang P, Wang N, Zhou ZY, Wang T, Yuan ZL, *et al.* Soil bacterial community structure and correlation analysis of environmental factors in deciduous broad-leaved forest of Baiyun Mountain[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2020, 54(3): 416–419.
- [20] Blanchet F, Legendre P, Borcard D. Forward selection of explanatory variables[J]. *Ecology*, 2008, 89(9): 2623–2632.
- [21] Ashman T, Bachtrog D, Blackmon H, Goldberg E, Hahn M, *et al.* Tree of sex: A database of sexual systems[J]. *Sci Data*, 2014, 1(1): 1–8.
- [22] 陈廷贵, 张金屯. 十五个物种多样性指数的比较研究[J]. 河南科学, 1999, 17: 55–71.
- Chen TG, Zhang JT. A comparison of fifteen species diversity indices[J]. *Henan Science*, 1999, 17: 55–71.
- [23] Chen Y, Shao Y, Xi J, Yuan Z, Wang T. *et al.* Community preferences of woody plant species in a heterogeneous temperate forest, China[J]. *Front Ecol Evol*, 2020, 8(1): 165.
- [24] Lai J, Lortie C, Muenchen R, Jian Y, Ma K. Evaluating the popularity of R in ecology[J]. *Ecosphere*, 2019, 10(1): 1–7.
- [25] Renner SS. The relative and absolute frequencies of angiosperm sexual systems: dioecy, monoecy, gynodioecy and an updated online database [J]. *Am J Bot*, 2014, 101(10): 1588–1596.
- [26] Chen XS, Li QJ. Patterns of plant sexual systems in subtropical evergreen broad-leaved forests in Ailao Mountains, SW China[J]. *J Plant Ecol*, 2008, 1(3): 179–185.
- [27] 王熊, 王戈戎, 夏富才, 倪成才, 孙越, 等. 长白山木本植物性系统及其生态关联性[J]. 北京林业大学学报, 2017, 37(5): 59–61.
- Wang X, Wang GR, Xia FC, Ni CC, Sun Y, *et al.* Sexual system and ecological links of woody plants in Changbai Mountains, northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(5): 58–64.
- [28] 胡永春, 范新宇, 邵毅贞, 陈云, 叶永忠, 等. 地形和光照因子对白云山国家森林公园苔藓植物功能性状的影响[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(1): 89–96.
- Hu YC, Fan XY, Shao YZ, Chen Y, Ye YZ, *et al.* Effects of topographic and light factors on bryophytes functional traits in Baiyun Mountain National Forest Park[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2021, 55(1): 89–96.
- [29] 向琳, 陈芳清, 官守鹏, 王玉兵, 吕坤. 井冈山鹿角杜鹃群落灌木层功能多样性及其随海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 8144–8155.
- Xiang L, Chen FQ, Guan SP, Wang YB, Lü K. Functional diversity and spatial variation of shrubs in *Rhododendron latoucheae* communities distributed along an altitude gradient in Mt. Jinggang, Jiangxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(21): 8144–8155.
- [30] 祝燕. 古田山亚热带常绿阔叶林密度制约普遍性研究[D]. 北京: 中国科学院植物研究所, 2009.

(责任编辑: 周 媛)