



引用格式: 龙姿羽, 王志成, 赵蕊, 等. 德夯地质公园林溪交错带草本群落优势种生态位及种间联结[J]. 西北植物学报, 2024, 44(12): 1954-1964. [LONG Z Y, WANG Z C, ZHAO R, et al. Niches and community stability of dominant herbaceous species in the forest and creek ecotone of Dehang Geopark[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(12): 1954-1964.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20240365

德夯地质公园林溪交错带草本群落 优势种生态位及种间联结

龙姿羽¹, 王志成¹, 赵蕊¹, 刘冰¹, 陈功锡^{1,2*}

(1 吉首大学 杜仲综合利用技术国家地方联合工程实验室, 湖南吉首 416000; 2 武陵山区乡村振兴与区域发展研究中心, 湖南吉首 416000)

摘要 【目的】探究德夯地质公园林溪交错带草本群落的优势种生态位特征、种间联结性及群落稳定状态, 以期为该区域的草本群落保护以及可持续发展提供理论基础。【方法】选取生态位测定、方差比率法、 χ^2 检验、Spearman 秩相关系数、联结系数对 3 条溪中的草本群落优势种进行分析。【结果】(1) 九龙溪与玉泉溪中透茎冷水花生态位最宽, 夯峡溪则是小赤麻生态位最宽。3 条溪的生态位重叠指数普遍偏小, 说明优势物种间竞争较弱, 对环境资源的需求相似性不大。(2) 3 条溪草本植物总体关联性与种间关联均以不显著负联结为主, 种间联结性较低, 多为独立分布。(3) 群落目前尚处于不稳定状态, 且草本群落的演替发展受群落内部与群落外部的共同影响。【结论】德夯地质公园林溪交错带草本群落优势种间关联弱, 物种独立分布, 群落处于不稳定状态。

关键词 林溪交错带; 草本植物; 生态位; 种间联结; 德夯地质公园

中图分类号 Q948.12 文献标志码 A

Niches and community stability of dominant herbaceous species in the forest and creek ecotone of Dehang Geopark

LONG Ziyu¹, WANG Zhicheng¹, ZHAO Rui¹, LIU Bing¹, CHEN Gongxi^{1,2*}

(1 National and Local United Engineering Laboratory of Integrative Utilization of Eucommia Ulmoides, Jishou University, Jishou, Hu'nan 416000, China; 2 Rural Revitalization and Regional Development Research Center of Wuling Mountain Area, Jishou, Hu'nan 416000, China)

Abstract [Objective] The study aims to explore the characteristics of ecological niche, interspecific connectivity, and community stability of dominant species in the herbaceous community of the forest and creek ecotone in Dehang Geopark, with the expectation of providing a theoretical foundation for the protection of the herbaceous communities and sustainable development in the area. [Methods] The authors employed a suite of analytical methods including niche determination, variance ratio, Chi-square test, Spearman rank correlation test, and association coefficient to examine the ecological niches and interspecific associations of the dominant herbaceous species within three creeks in Dehang Geopark. [Results] (1) In the Jiulong Creek and Yuquan Creek, *Pilea pumila* occupies the widest ecological niche, whereas in the Hangxia Creek, *Boehmeria spicata* has the broadest ecological niche. The average ecological niche overlap indices for Jiulong Creek, Hangxia Creek, and Yuquan Creek are generally low. This indicates that the interspecific competition among dominant species in the herbaceous communities of the forest and creek eco-

收稿日期: 2024-06-27; 修改稿收到日期: 2024-09-24

基金项目: 吉首市德夯风景区管理处科研项目(19DHK03)

作者简介: 龙姿羽(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事植物生态学研究。E-mail: longziyu1@163.com

* 通信作者: 陈功锡, 教授, 主要从事植物分类、植物生态与植物资源学研究。E-mail: chengongxi2011@163.com

tone is weak, and there is not a high degree of similarity in the demand for environmental resources. (2) The overall and interspecific associations of the herbaceous plants in the three streams are mainly characterized by non-significant negative connections, with relatively low interspecific connectivity, and are mostly independently distributed. (3) The community is currently in an unstable state, and the succession and development of the herbaceous community are influenced by both internal and external factors of the community. [Conclusion] In Dehang Geopark, the herbaceous community in the forest and creek ecotone has weak interspecific associations, with species being independently distributed, indicating that the community is in an unstable state.

Key words forest and creek ecotone; herbaceous; niches; interspecific association; Dehang Geopark

德夯地质公园(以下简称德夯)地理坐标为 $109^{\circ}30' - 109^{\circ}45' E, 28^{\circ}15' - 28^{\circ}43' N$,位于湖南省湘西州吉首市西郊,覆盖面积约为 164 km^2 ,是湘西世界地质公园的重要组成部分,也是著名的5A级风景旅游区。该区年均气温 $16 \sim 17^{\circ} C$,无霜期 $215 \sim 286 \text{ d}$,年降水量 $1200 \sim 1600 \text{ mm}$,全年日照时间约 1400 h 。该区域坡陡壁峭,众多溪流穿梭其中,形成了典型的半封闭式“V”字形河谷地貌^[1]。特殊的生态环境孕育了丰富的植物多样性,目前德夯共记载种子植物154科710属1627种^[2],其中包括吉首蒲儿根(*Sinosenecio jishouensis*)、吉首紫菀(*Aster jishouensis*)、德夯栎(*Quercus dehangensis*)等特有物种。近年来德夯的研究焦点主要聚集在植物区系^[2]、植物资源^[3]与自然景观分类^[4]等多个方面,虽然德夯的植物种类繁多,但针对占据其中大多数草本植物的研究相对较少。物种的生态位与种间联结性特征可揭示群落中不同物种对资源的竞争与利用以及群落间的稳定共存关系^[5-6]。其中,生态位宽度与生态位重叠度作为生态位的二大重要指标,它们反映了物种对环境的适应以及资源利用能力,是物种对多个环境因子生态适应的综合结果^[7]。种间联结则能够深刻揭示群落中各物种在不同生境中相互影响、相互作用所形成的有机关系,这种联结不仅有助于理解种间关系,还能进一步揭示环境差异对植物分布的影响^[5]。生态位和种间联结之间存在密切联系,物种间的正联结表明它们在资源利用和生态位上具有相似性,而负联结则表明生态位的分离,反映了物种间的排斥性^[8]。两者皆是物种繁殖体散布、定居、竞争、化感和环境适应性响应等生态学过程的结果。因此,深入研究群落中优势物种的生态位与种间联结特征不仅可以正确理解群落的结构和演替规律,还能从本质上解释群落稳定性的机制^[9]。

群落稳定性是群落内部各种因素相互作用的综合体现,它反映了在面对外部条件变化时,群落的自我调节与保持稳定的能力^[10]。草本群落中,优势种

的生态位及其种间联结特性作为重要的生态指标,不仅深刻揭示了不同物种在资源利用上的竞争态势,同时也为评估群落的稳定性提供了有力依据^[11]。群落稳定性受到生态位与种间联结变化的显著影响,物种生态位宽度及重叠度是决定群落稳定的关键性因素。群落内正联结种对越多,生态位宽度越宽,物种通常展现出更强的适应能力,群落的稳定性也越高;反之,群落内负关联种对越多,生态位则越窄,群落稳定性也越差^[12]。此外,人类活动例如栖息地破坏以及对资源的过度利用,可能会加剧物种间的生态位重叠,进一步增加竞争压力,削弱群落的稳定性。通过综合研究群落内物种的生态位特性、种间联结性以及群落的稳定性,能够更深入地理解物种之间的相互作用关系、物种如何适应和响应环境变化^[13]以及整个群落的稳定机制^[1]。为此,特选取德夯林溪交错带草本优势物种为对象,研究揭示该区域内草本优势种的生态位、种间关系以及群落稳定性的特征,进而为深入研究林溪交错带提供理论依据与实践参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

德夯核心区域分布有4条主要溪流,分别为德夯溪、九龙溪、夯峡溪与玉泉溪。德夯溪溪谷结构呈现开放性特征,沿途穿越2个苗族村寨,沿岸设有旅游专用道路,故而频繁受到人类活动的干扰。九龙溪全长约 2.5 km ,溪流宽度 $2 \sim 3 \text{ m}$,两侧为成片的竹林,山腰以上植被类型以常绿落叶阔叶混交林为主。夯峡溪全长约 5 km ,溪流宽度 $2.5 \sim 3.5 \text{ m}$,溪边植物种类丰富,含有多个特殊物种,如河谷专性物种吉首蒲儿根、五柱绞股蓝(*Gynostemma pentagynum*)等。玉泉溪全长约 1.5 km ,溪流宽度 $1.5 \sim 2.5 \text{ m}$,两侧植被覆盖率较高,沿途可观察到成片的楼梯草(*Elatostema involucreatum*)等群落。由于九龙溪、夯峡溪和玉泉溪均为封闭性的溪谷,且终端为大小不一的瀑布,保存较为完好,故选为研究对象。

文中 C1、C2、C3 分别代表九龙溪、夯峡溪和玉泉溪。

1.2 样线及样方调查

于 2023 年 5—9 月进行野外调查,采取样线与样方相结合的方式,以九龙溪、夯峡溪和玉泉溪 3 条溪流为样线,沿线设置样方。参考种-面积曲线法,通过种-样方数曲线计算最小样方数,并以样方数量不少于最小样方数的 2 倍为准则,在 3 条溪流沿岸共设置 1 m×1 m 的草本植物样方 90 个,其中九龙溪 32 个、夯峡溪 32 个、玉泉溪 26 个。主要记录草本植物种类(包括草质藤本和蕨类)、盖度、多度、株高及个体数量,从而分析物种生态位特征。生态位是指物种在生态系统中的功能角色和生存方式,通常通过资源利用和竞争关系来定义,而本文使用的样方生态位方法则侧重于通过实地测量和记录来直观反映物种在特定空间和时间尺度上的分布和资源利用情况,这种方法的优势在于直接观测物种在特定生境中的出现频率和重要值,其局限性在于可能受到样方大小和位置选择的影响,且主要反映局部生态位特征,可能不足以全面展示物种在整个生态系统中的角色。

1.3 数据分析

1.3.1 重要值

本次调查主要依据植物物种重要值来确定物种的优势程度。重要值(V_1)计算公式为:

$$V_1 = (\text{相对频度} + \text{相对盖度} + \text{相对高度}) / 3 \quad (1)$$

1.3.2 生态位宽度与重叠度

选取 Levins 指数^[14] (B_L) 和 Shannon 指数^[15] (B_S) 计算优势草本物种的生态位宽度,并采用 Pianka 生态位重叠度指数^[16] (O_{ik}) 测定草本群落优势物种间的生态位重叠程度。

Levins 生态位宽度(B_L):

$$B_L = 1 / \sum_{j=1}^r (P_{ij})^2 \quad (2)$$

Shannon 生态位宽度(B_S):

$$B_S = - \sum_{j=1}^r (P_{ij} \ln P_{ij}) \quad (3)$$

Pianka 生态位重叠度指数(O_{ik})

$$O_{ik} = \sum_{j=1}^r (P_{ij} P_{kj}) / \sqrt{\left(\sum_{j=1}^r P_{ij}\right)^2 \left(\sum_{j=1}^r P_{kj}\right)^2} \quad (4)$$

式中: N 为总样方数; P_{ij} 和 P_{kj} 分别为种 i 和种 k 在样方 j 中的重要值占其在所有样方中的重要值之和的比例。

1.3.3 总体关联性检验

根据 Schluter^[17] 提出的方法,使用方差比率(R_V)

测定群落的总体联结性,并计算统计量 W 检验总体关联的显著性水平。当 $R_V > 1$ 时,总体物种为正联结;反之则为负联结。此外,对 W 进行 χ^2 显著检验,若 $\chi^2_{0.95(N)} < W < \chi^2_{0.05(N)}$, 总体物种表现出独立不相关,若 $W > \chi^2_{0.05(N)}$ 或 $W < \chi^2_{0.95(N)}$, 则说明物种间不显著关联。

1.3.4 种间联结性检验

Yates 修订的 χ^2 检验^[8]:

$$\chi^2 = \frac{N(|ad - bc - N/2|)^2}{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)} \quad (5)$$

式中: a 为两物种同时出现的样方数; b 、 c 为仅有 1 个物种出现的样方数; d 为两物种均未出现的样方数。若 $ad > bc$, 则认为两物种之间存在正联结; $ad < bc$ 则为负联结; $ad = bc$ 则为两物种互相独立。当 $\chi^2 > 6.635$ 时,表示种间联结性极显著; $3.841 < \chi^2 < 6.635$ 时,表示物种间联结性显著; $\chi^2 < 3.841$, 表示种间联结性不显著^[18]。 χ^2 检验只能对物种联结性给出定性的结果,却不能对联结程度进行分析。因此,本研究进一步采用联结系数(C_A)和 Spearman 秩相关分析评估物种间的联结程度。

Spearman 秩相关分析^[8]:

$$r(i, k) = 1 - \left[6 \sum_{j=1}^N (X_{ij} - X_{kj})^2 \right] / (N^3 - N) \quad (6)$$

式中: N 为样方总数; X_{ij} 和 X_{kj} 分别为种 i 和种 k 在样方 j 中的重要值。

种间联结系数(C_A)^[8]:

当 $ad \geq bc$ 时,

$$C_A = (ad - bc) / (a + b)(b + d) \quad (7)$$

当 $bc > ad$ 及 $d \geq a$ 时,

$$C_A = (ad - bc) / (a + b)(a + c) \quad (8)$$

当 $bc > ad$ 及 $d < a$ 时,

$$C_A = (ad - bc) / (b + d)(c + d) \quad (9)$$

式中: C_A 取值范围为 $[-1, 1]$, C_A 越接近 1 表示物种间的正关联越强,反之则表示种间负关联越强;当 $C_A = 0$, 表示两者独立出现。

1.3.5 群落稳定性分析

选用郑元润^[19] 改进的 M. Godron 群落稳定性测定法,这种方法依据帕累托法则(80/20 法则)。通过将草本优势物种的相对频度排序并计算其累计倒数百分比与累计相对频度,构建模型来预测群落的稳定性。这种方法的核心在于比较平滑曲线模拟方程 $y = ax^2 + bx + c$ 与直线方程 $y = 100 - x$ 的交点与理想状态(20, 80)的欧氏距离。交点越接近

(20,80),意味着群落中 20%的关键物种对生态系统的稳定性和功能贡献了 80%,从而表明群落的稳定性越高。在生态学中,这一原则强调了少数关键物种在维持生态系统稳定性和抵抗力方面的重要性。

1.4 数据处理

基于 R4.0.4 软件程序包中的 niche.width、niche.overlap、sp.pair、sp.assoc 分别计算生态位与种间联结, MATLAB R2023a 进行群落稳定性分析,用 Origin 2024b 与 R4.0.4 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 物种组成及优势种

调查结果表明,德夯林溪交错带草本植物共有 141 种,隶属 51 科 102 属,以菊科(Asteraceae)、荨麻科(Urticaceae)、唇形科(Lamiaceae)与伞形科(Apiaceae)物种占据优势。其中,九龙溪共计 80 种(33 科 57 属),夯峡溪共计 95 种(37 科 72 属),玉泉溪共计 69 种(37 科 55 属)。将草本物种按照重要值大小从高到低进行排序,以累计超过 50%以上的草本物种视为优势种,对选取的草本群落优势种再进行生态位特征与种间联结分析。挑选出 3 条溪流中草本群落优势种,其中九龙溪 12 种,如透茎冷水花(*Pilea pumila*);夯峡溪 14 种,如小赤麻(*Boehmeria spicata*);玉泉溪 15 种,如楼梯草。从表 1 可知,3 条样线中草本优势种均有透茎冷水花、翠云草、凹叶景天和小赤麻,表明这 4 种植物在林溪交错带生态系统中的重要性和普遍性,它们具有较强的适应性和竞争力,在维持群落稳定性和多样性等方面发挥着不可替代的作用。

2.2 生态位特征

2.2.1 生态位宽度

表 1 表明,九龙溪草本群落优势种 Levins 生态位宽度(B_L)为 1.60~9.14, Shannon 生态位宽度(B_S)为 0.56~2.47。在九龙溪优势草本植物中生态位宽度最大的是透茎冷水花,其 B_L 和 B_S 分别为 9.14 和 2.47;降龙草的生态位最小,其 B_L 和 B_S 分别为 1.60 和 0.56。在所有优势草本植物中, V_1 和 B_L 、 B_S 变化趋势相同的占比为 16.67%, V_1 大而 B_L 、 B_S 小的占比 33.33%, V_1 小而 B_L 、 B_S 大的占比 50%。

夯峡溪草本群落优势种 B_L 范围为 1.81~7.42, B_S 为 0.64~2.16,其中,小赤麻生态位宽度值最大,其 B_L 和 B_S 分别为 7.42 和 2.16;芒生态位宽度值最小,其 B_L 和 B_S 分别为 1.81 和 0.64。 V_1 和 B_L 、 B_S 有相同变化趋势占比 28.57%, V_1 大而 B_L 、 B_S 小的

占比 35.71%, V_1 小而 B_L 、 B_S 大的占比 35.71%。

玉泉溪草本群落优势种 B_L 范围为 1.27~5.89, B_S 为 0.37~2.08,其中生态位宽度最大的物种为透茎冷水花,其 B_L 和 B_S 分别为 5.89 和 2.08;金荞麦的生态位宽度最小,其 B_L 和 B_S 分别为 1.27 和 0.37。 V_1 和 B_L 、 B_S 有相同变化趋势,占比 20%, V_1 大而 B_L 、 B_S 小的占比 40%, V_1 小而 B_L 、 B_S 大的占比 40%。

综上,林溪交错带草本群落优势种的 Levins 和 Shannon 生态位宽度排序稍有差别,但基本一致,而与重要值的变化趋势并不一样,表明生态位宽度和重要值并无显著定性关系,如九龙溪和夯峡溪的翠云草重要值均较大,但其生态位指数却较低。此外,透茎冷水花在 3 条溪流皆存在且生态位宽度都较大,表明透茎冷水花具备较强的竞争能力,在资源竞争中占据上风。

2.2.2 生态位重叠度值

3 条溪流草本群落优势种的种间生态位重叠度结果(图 1)表明,九龙溪草本群落优势种 66 个种对生态位重叠度指数(O_{ik})范围为 0.00~0.99,平均值为 0.12。 O_{ik} 大于 0.5 的种对有 3 个(占总对数的 4.55%),分别为小赤麻-薄叶卷柏(0.99)、降龙草-宜昌楼梯草(0.63)、少花马蓝-白苞蒿(0.51)、爵床-酢浆草(0.50); O_{ik} 为 0.10~0.50 的种对有 23 个(占总对数的 34.85%); O_{ik} 为 0.00~0.10 的种对有 21 个(占 31.82%); O_{ik} 为 0 的种对有 19 个(占总对数的 28.79%)。

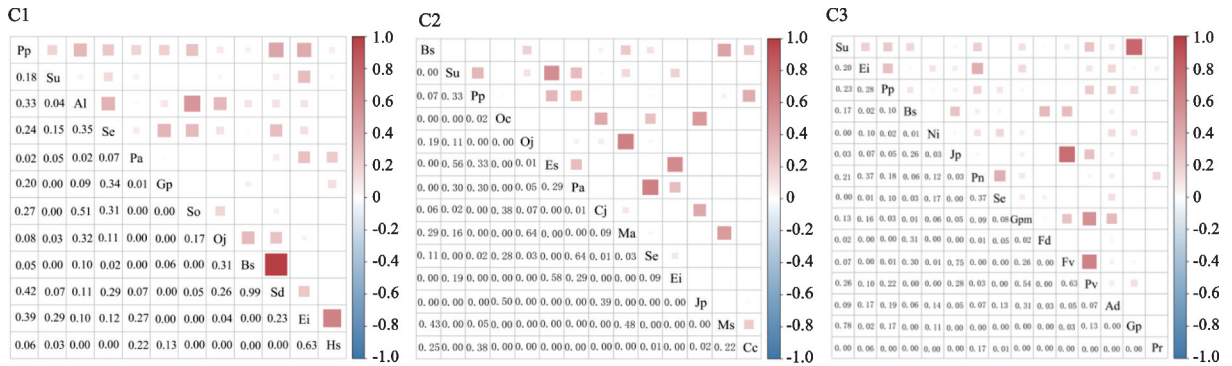
夯峡溪草本群落优势种 91 个种对 O_{ik} 范围为 0.00~0.64,平均值为 0.10。 O_{ik} 大于 0.5 的种对有 5 个(占总对数的 5.49%),分别为水芹-繁缕(0.64)、华中冷水花-凹叶景天(0.64)、对叶楼梯草-宜昌楼梯草(0.58)、翠云草-对叶楼梯草(0.56)、鸭跖草-爵床(0.50); O_{ik} 为 0.10~0.50 的种对有 20 个(占 21.98%); O_{ik} 为 0.00~0.10 的种对有 20 个(占总对数的 21.98%); O_{ik} 为 0 的种对有 46 个(占总对数的 50.55%)。

玉泉溪草本群落优势种 105 个种对 O_{ik} 范围为 0.00~0.78,平均值为 0.10。 O_{ik} 大于 0.5 的种对有 4 个(占 2.85%),分别为五柱绞股蓝-翠云草(0.78)、水蛇麻-爵床(0.75)、蜈蚣凤尾蕨-水蛇麻(0.63)、五柱绞股蓝-蜈蚣凤尾蕨(0.50); O_{ik} 为 0.10~0.50 的种对有 31 个(占 29.52%); O_{ik} 为 0.00~0.10 的种对有 37 个(占 35.24%); O_{ik} 为 0 的种对有 33 个(占 31.43%)。综上所述,林溪交错带生态位重叠度指数总体偏小,竞争较小,种间较为独立。

表 1 林溪交错带草本群落优势种重要值及生态位宽度

Table 1 Importance value and niche width of the dominant plants in the forest and creek ecotone

溪流 Creek	编号 Number	种名 Species name	重要值 V_1	生态位宽度 Niche width	
				Levins (B_L)	Shannon (B_S)
九龙溪 Jiulong Creek (C1)	C1-01	透茎冷水花 <i>Pilea pumila</i>	9.28	9.14	2.47
	C1-02	翠云草 <i>Selaginella uncinata</i>	8.49	2.48	1.47
	C1-03	白苞蒿 <i>Artemisia lactiflora</i>	5.65	8.69	2.22
	C1-04	凹叶景天 <i>Sedum emarginatum</i>	5.63	7.67	2.17
	C1-05	华中冷水花 <i>Pilea angulata</i> subsp. <i>latiuscula</i>	4.37	3.12	1.45
	C1-06	五柱绞股蓝 <i>Gynostemma pentagynum</i>	4.26	3.92	1.63
	C1-07	少花马蓝 <i>Strobilanthes oliganthus</i>	3.84	3.14	1.33
	C1-08	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	3.29	4.44	1.71
	C1-09	小赤麻 <i>Boehmeria spicata</i>	3.29	4.27	1.66
	C1-10	薄叶卷柏 <i>Selaginella delicatula</i>	3.15	4.79	1.73
	C1-11	宜昌楼梯草 <i>Elatostema ichangense</i>	2.71	5.25	1.78
	C1-12	降龙草 <i>Hemiboea subcapitata</i>	2.44	1.60	0.56
夯峡溪 Hangxia Creek (C2)	C2-01	小赤麻 <i>Boehmeria spicata</i>	7.49	7.42	2.16
	C2-02	翠云草 <i>Selaginella uncinata</i>	5.41	3.73	1.40
	C2-03	透茎冷水花 <i>Pilea pumila</i>	4.68	4.37	1.74
	C2-04	酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i>	4.62	4.69	1.58
	C2-05	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>	4.05	3.07	1.50
	C2-06	对叶楼梯草 <i>Elatostema sinense</i>	3.14	3.68	1.44
	C2-07	华中冷水花 <i>Pilea angulata</i> subsp. <i>latiuscula</i>	3.08	5.15	1.71
	C2-08	鸭儿芹 <i>Cryptotaenia japonica</i>	2.98	2.38	1.25
	C2-09	繁缕 <i>Stellaria media</i>	2.55	5.08	1.74
	C2-10	凹叶景天 <i>Sedum emarginatum</i>	2.54	3.12	1.36
	C2-11	宜昌楼梯草 <i>Elatostema ichangense</i>	2.50	2.64	1.02
	C2-12	爵床 <i>Justicia procumbens</i>	2.43	2.49	1.05
	C2-13	芒 <i>Miscanthus sinensis</i>	2.04	1.81	0.64
	C2-14	鸭跖草 <i>Commelina communis</i>	2.03	3.58	1.33
玉泉溪 Yuquan Creek (C3)	C3-01	翠云草 <i>Selaginella uncinata</i>	11.33	5.30	1.87
	C3-02	楼梯草 <i>Elatostema involucreatum</i>	6.38	5.49	1.85
	C3-03	透茎冷水花 <i>Pilea pumila</i>	5.90	5.89	2.08
	C3-04	小赤麻 <i>Boehmeria spicata</i>	5.12	3.59	1.53
	C3-05	毛花点草 <i>Nanocnide obata</i>	5.03	3.24	1.26
	C3-06	爵床 <i>Justicia procumbens</i>	4.93	4.35	1.58
	C3-07	冷水花 <i>Pilea notata</i>	4.52	5.71	1.93
	C3-08	凹叶景天 <i>Sedum emarginatum</i>	3.58	3.01	1.30
	C3-09	绞股蓝 <i>Gynostemma pentaphyllum</i>	3.48	3.19	1.51
	C3-10	金荞麦 <i>Fagopyrum dibotrys</i>	3.17	1.27	0.37
	C3-11	水蛇麻 <i>Fatoua villosa</i>	3.14	4.32	1.59
	C3-12	蜈蚣凤尾蕨 <i>Pteris vittata</i>	2.78	3.91	1.50
	C3-13	金疮小草 <i>Ajuga decumbens</i>	2.52	4.49	1.81
	C3-14	五柱绞股蓝 <i>Gynostemma pentagynum</i>	2.04	1.60	0.74
	C3-15	赤车 <i>Pellionia radicans</i>	2.03	1.31	0.40



Pp. 透茎冷水花; Su. 翠云草; Al. 白苞蒿; Se. 凹叶景天; Pa. 华中冷水花; Gp. 五柱绞股蓝; So. 少花马蓝; Oj. 水芹;

Bs. 小赤麻; Sd. 薄叶卷柏; Ei. 宜昌楼梯草; Hs. 降龙草; Oc. 酢浆草; Es. 对叶楼梯草; Cj. 鸭儿芹; Ma. 繁缕; Jp. 爵床; Ms. 芒;

Cc. 鸭跖草; Ni. 毛花点草; Pn. 冷水花; Gpm. 绞股蓝; Fd. 金荞麦; Fv. 水蛇麻; Pv. 蜈蚣凤尾蕨; Ad. 金疮小草; Pr. 赤车。下同。

图 1 林溪交错带草本群落优势种生态位重叠度指数

Pp, *Pilea pumila*. Su, *Selaginella uncinata*. Al, *Artemisia lactiflora*. Se, *Sedum emarginatum*. Pa, *Pilea angulate* subsp. *latiuscula*. Gp, *Gynostemma pentagynum*. So, *Strobilanthes oligantha*. Oj, *Oenanthe javanica*. Bs, *Boehmeria spicata*.

Sd, *Selaginella delicatula*. Ei, *Elatostema ichangense*. Hs, *Hemiboea subcapitata*. Oc, *Oxalis corniculata*.

Es, *Elatostema sinense*. Cj, *Cryptotaenia japonica*. Ma, *Stellaria media*. Jp, *Justicia procumbens*. Ms, *Miscanthus sinensis*.

Cc, *Commelina communis*. Ni, *Nanocnide lobate*. Pn, *Pilea notata*. Gpm, *Gynostemma pentaphyllum*. Fd, *Fagopyrum dibotrys*.

Fv, *Fatoua villosa*. Pv, *Pteris vittata*. Ad, *Ajuga decumbens*. Pr, *Pellionia radicans*. The same as below.

Fig. 1 Niche overlap index of the dominant herbaceous in the forest and creek ecotone

2.3 总体关联性

由表 2 可知, 3 条溪流草本群落优势物种的总体关联基本一致, 总体关联性的方差比率 R_V 均小于 1, 且检验统计量 W 值区间为 $[\chi^2_{0.95(N)}, \chi^2_{0.05(N)}]$, 表明九龙溪、夯峡溪与玉泉溪草本群落优势种的总体关联性均呈不显著负联结。

表 2 林溪交错带草本群落优势种总体关联性

Table 2 Overall association between the dominant herbaceous species in the forest and creek ecotone

溪流 Creek	方差比率 R_V	检验统计量 W	χ^2 临界值 $[\chi^2_{0.95(N)}, \chi^2_{0.05(N)}]$	检验结果 Test result
C1	0.880 1	28.164 6	[18.492 6, 43.772 9]	不显著负联结 Non-significant negative association
C2	0.671 0	21.471 5	[18.492 6, 43.772 9]	不显著负联结 Non-significant negative association
C3	0.594 9	15.467 1	[15.379 1, 38.885 2]	不显著负联结 Non-significant negative association

2.4 种间关联性

2.4.1 χ^2 检验

3 条溪流优势草本 χ^2 检验结果(图 2)表明, 九龙溪的 66 个种对间有 28 对正相关, 38 对负相关, 分别占总种对的 42.42%、57.58%。正负联结种对比为 0.74, 其中极显著正相关有 1 对 ($P < 0.01$), 为

透茎冷水花-白苞蒿, 不显著正关联有 27 对; 负联结全为不显著负关联。

夯峡溪的 91 个种对间有 35 对正联结, 56 对负联结, 占比分别为 38.46%、61.53%。正负关联比为 0.63, 其中显著正联结和不显著正联结的种对分别为 3 对、32 对, 占比为 3.30%、38.46%, 呈显著正联结 ($P < 0.05$) 的种对为透茎冷水花-鸭跖草、对叶楼梯草-华中冷水花、对叶楼梯草-宜昌楼梯草; 负联结则全为不显著负联结。

玉泉溪的 105 个种对间有 44 对正联结, 61 对负联结, 分别占比 41.90%、59.05%。正负关联比为 0.72, 其中显著正联结和不显著正联结的种对分别为 1 对、42 对, 呈显著正联结 ($P < 0.05$) 的种对为蜈蚣凤尾蕨-五柱绞股蓝。负联结与九龙溪、夯峡溪一样, 皆为不显著负联结。

综上所述, 林溪交错带的草本群落优势种 χ^2 检验结果主要以不显著联结为主, 这与总体关联性检验结果一致, 表明种对间联结较弱, 各物种间独立性较强。

2.4.2 Spearman 秩相关系数

3 条溪流优势草本 Spearman 秩相关性检验结果如图 3 所示, 九龙溪 66 个种对间有 29 对正关联, 占比 43.94%; 37 对负关联, 占比 56.06%。正负关联比为 0.78, 其中呈极显著正关联 ($P < 0.01$) 的种对有 1 个, 为水芹-白苞蒿; 呈显著正关联 ($P < 0.05$) 的种对有 3 个, 分别为白苞蒿-透茎冷水花、少花马

蓝-白苞蒿、宜昌楼梯草-翠云草;呈显著负关联($P < 0.05$)的种对有 1 个,为小赤麻-翠云草。

夯峡溪 91 个种对间有 34 对正关联,占比 37.36%;负关联为 57 对,占比 62.64%。正负关联比为 0.60,其中极显著正关联($P < 0.01$)的种对有 3 对,分别为繁缕-鸭儿芹、繁缕-水芹、对叶楼梯草-翠云草;显著正关联的种对有 7 对,分别为对叶楼梯草-华中冷水花、鸭儿芹-水芹、凹叶景天-华中冷水花、宜昌楼梯草-对叶楼梯草、酢浆草-爵床、透茎冷水花-鸭跖草、小赤麻-芒。

玉泉溪 105 个种对间有 40 对正关联,占比

38.10%;负关联 65 对,占比 61.90%。正负关联比为 0.71,其中极显著正关联($P < 0.01$)的种对有 1 个,为金荞麦-小赤麻;呈显著正关联($P < 0.05$)的种对有 4 个,分别为五柱绞股蓝-蜈蚣凤尾蕨、金疮小草-绞股蓝、凹叶景天-楼梯草、蜈蚣凤尾蕨-翠云草;呈显著负相关的种对有 2 个,分别为水蛇麻-凹叶景天、水蛇麻-楼梯草。该结果与 χ^2 检验结果相比,极显著和显著水平正负联结种对皆高于 χ^2 检验结果,但不显著相关种仍占据较大比例,各物种呈现独立分布格局,这与 χ^2 检验结果基本一致。

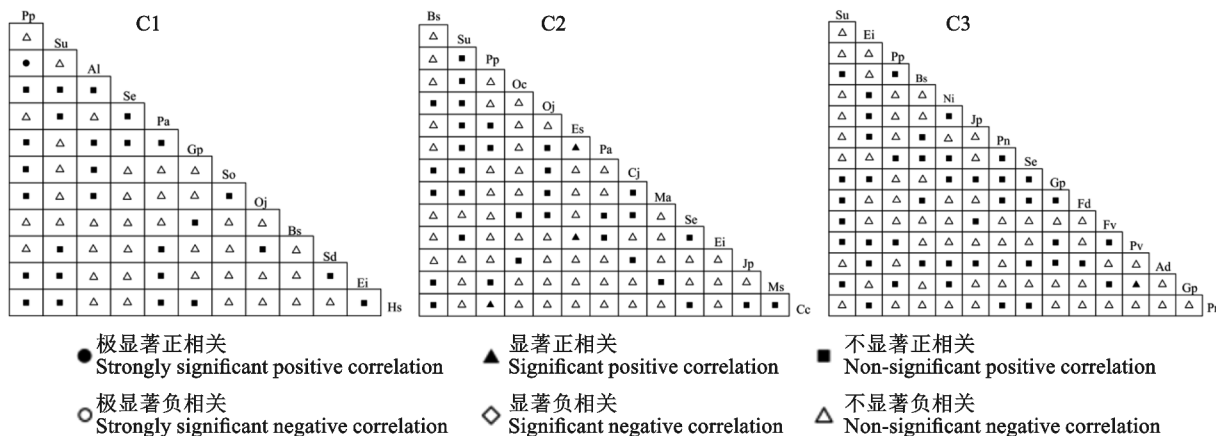


图 2 不同林溪交错带草本群落优势种 χ^2 检验半矩阵图

Fig. 2 Semi-matrix diagram on dominant herbaceous species in different forest and creek ecotones by χ^2 test

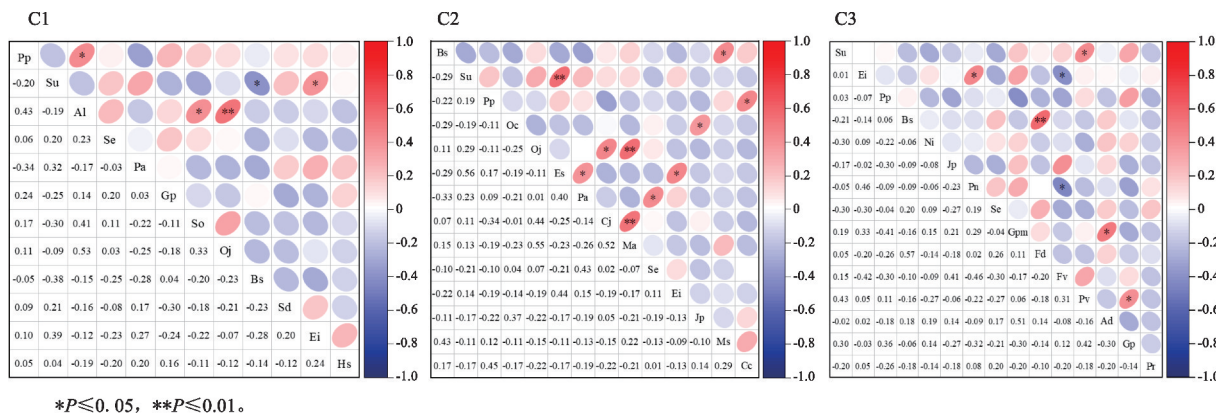


图 3 不同林溪交错带 Spearman 秩相关性半矩阵图

Fig. 3 Semi-matrix diagram of the Spearman associations for dominant herbaceous species in different forest and creek ecotones

2.4.3 联结系数 C_A 值分析

由图 4 可知,九龙溪、夯峡溪、玉泉溪联结系数 $C_A \geq 0.67$ 的种对分别有 1, 1, 2 对,占比分别为 1.51%, 1.10%, 1.90%; $0.33 \leq C_A < 0.67$ 的种对分别有 11, 10, 7 对,占比分别为 18.03%, 10.99%, 6.67%; $0 \leq C_A < 0.33$ 的种对分别有 17, 23, 35 对,占比分别为

27.87%, 25.27%, 33.33%; $-0.33 \leq C_A < 0$ 的种对分别有 8, 6, 15 对,占比分别为 12.12%, 6.59%, 14.29%; $-0.67 \leq C_A < -0.33$ 的种对分别有 13, 5, 15 对,占比分别为 21.31%, 5.49%, 14.29%; $C_A < -0.67$ 的种对分别有 11, 46, 31 对,占比分别为 18.03%, 50.55%, 29.52%。总体来看,九龙溪 66 个

种对间有正关联 29 对,占比 43.94%,负关联 37 对,占比 56.06%,其中有 15 对 C_A 值为 -1,占比为 22.73%;秀峡溪 91 个种对间有正关联 34 对,占比 37.36%,负关联 57 对,占比 62.64%,其中有 46 对 C_A 值为 -1,占比为 50.55%;玉泉溪 105 个种对间有正关联 44 对,占比 41.90%,负关联 61 对,占比 58.10%,其中有 31 对 C_A 值为 -1,占比为 29.52%。由此可见,秀峡溪 C_A 值负关联程度较高。3 条溪流正联结种对数皆低于负联结种对数,而且不显著负联结的种对数较多,这一结果与通过 χ^2 检验和

Spearman 秩相关系数得到的结果表现较为相近。

2.5 群落稳定性

由九龙溪、秀峡溪与玉泉溪草本优势物种的稳定性图解及群落整体稳定性分析(表 3、图 5)可知,3 条溪流中九龙溪草本优势种的欧氏距离最近,群落具有相对较好的稳定性,秀峡溪的欧氏距离最远,群落相对稳定性较差,但 3 条溪的物种累计倒数百分比与累计相对频度的比值均远离(20,80)。研究结果表明 3 条溪流均处于不稳定状态,这与总体联结和种间联结性的分析结果相吻合。

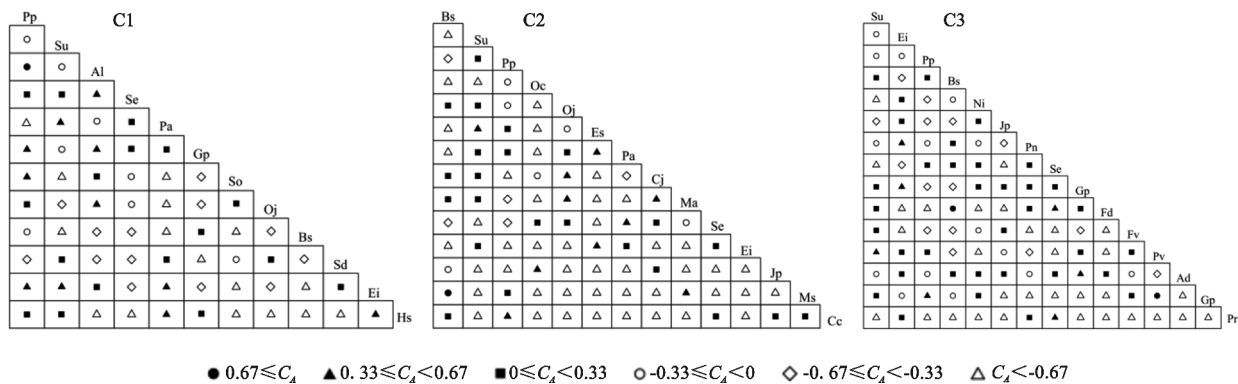


图 4 不同林溪交错带草本群落优势种联结系数 C_A 值相关性半矩阵图

Fig. 4 Semi-matrix diagram of the C_A for dominant herbaceous species in different forest and creek ecotones

表 3 林溪交错带草本群落优势种群落稳定性

Table 3 Community stability of dominant herbaceous in different forest and creek ecotones

溪流 Creek	曲线类型 Graph type	R^2	交点坐标 Point of intersection	欧氏距离 Euclidean distance
C1	$y = -0.009x^2 + 1.722x + 18.800$	0.989 5	(34.15, 65.80)	20.011 1
C2	$y = -0.006x^2 + 1.482x + 12.596$	0.991 3	(38.95, 61.05)	26.799 3
C3	$y = -0.008x^2 + 1.623x + 12.586$	0.993 3	(37.44, 62.56)	24.663 9

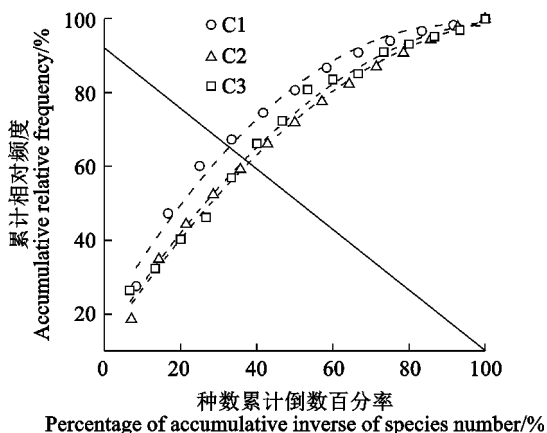


图 5 林溪交错带草本群落优势种稳定性分析

Fig. 5 Community stability analysis of the dominant herbaceous in different forest and creek ecotones

3 讨论

3.1 不同林溪交错带草本群落优势种生态位特征

生态位宽度的大小是衡量物种对环境适应能力和资源利用能力的重要指标^[20],生态位宽度值越大,表示其利用资源的能力就越强,对环境的适应能力也越强,分布的范围也越广^[21]。本研究表明德夯地质公园林溪交错带草本群落优势种中透茎冷水花、小赤麻生态位宽度值较大,说明这些物种在该区域适应能力较强,究其原因,可能是因为透茎冷水花和小赤麻大都分布在山坡林下或沟谷旁阴湿处,且皆为密集生长群落,生长较快,能快速占据生态位,具有较强的适应能力,因而能成为该区域的草本群落优势种。而降龙草、芒和金荞麦的生态位宽度值较

小,说明它们在林溪交错带这一环境中适应能力较弱,分布的范围较小,对生态因子的变化较为敏感。

作为衡量物种在群落中地位和作用的2个重要指标,重要值与生态位宽度既有相似之处但又存在些许差异。比较而言重要值更侧重于评估物种在群落中的相对重要性和优势度^[22],生态位宽度则更侧重于评估物种对环境资源的利用能力和适应能力。曾有研究表明,重要值大的物种一般其生态位宽度也较大^[23]。但本研究中重要值与生态位宽度的变化并未显现出定性关系,如九龙溪与玉泉溪样线中的翠水草重要值均较大,其生态位宽度却较小,说明重要值并不是影响生态位宽度的唯一因素。生态位宽度的大小与物种的分布频度也密切相关^[24],分布频度越大,通常意味着它能够适应更广泛的环境条件,从而拥有更宽的生态位,这可能是林溪交错带特殊性的体现。

生态位重叠是指2个或2个以上生态位相似的物种在同一生态环境中竞争或分享共同资源的现象^[25]。有研究表明,生态位重叠值越大,种间竞争越激烈^[26]。九龙溪(0.12)、夯峡溪(0.10)和玉泉溪(0.10)3条溪流的平均生态位重叠值偏低,竞争较小。可能是林溪交错带草本植物受溪流与林地2种不同生境的影响,生态环境脆弱,植物能够利用的资源并不充足,导致研究区草本群落优势种的生态位重叠程度相对较低。

一般而言,生态位宽度较高往往具有较高的生态位重叠值^[27],但本研究表明,较大生态位宽度的草本群落优势种的生态位重叠值却越小,如九龙溪透茎冷水花和小赤麻生态位宽度较大,生态位重叠值(0.05)却较小,夯峡溪中的对叶楼梯草和宜昌楼梯草生态位宽度不是最大,但其生态位重叠度值(0.58)却最高,玉泉溪中也有出现此类现象,可见生态位宽度和生态位重叠值并未呈规律变化,这与李雨晗等^[5]、刘润红等^[28]的研究结果一致。其原因可能是研究区为旅游区,踩踏等人为干扰活动造成一定影响,使部分土层浅薄,不适宜植物生长,所以当存在适宜生长的地块时,生态位宽度较小的植物也会出现较大的生态位重叠^[1]。

3.2 不同林溪交错带草本群落优势种种间联结性特征

种间联结是物种在不同生境中相互作用、相互影响而形成的有机关系反映了群落之间的生境差异^[29]。种间联结性与群落稳定性之间也存在着必然关系^[30]。本研究对林溪交错带3条样线中的草

本群落优势种进行种间联结特征分析,发现九龙溪、夯峡溪与玉泉溪草本群落优势种的总体关联强度均为不显著负联结,由 χ^2 检验结果可知,种对间正负关联比分别为0.74、0.63、0.72,群落关联比值偏小,物种间分布较为松散,未形成稳定关系。通过Spearman秩相关检验以及联结系数 C_A 值也进一步验证了 χ^2 检验结果,表明林溪交错带群落处于不稳定的阶段,种间联结性较低,这一结果的出现可能是由于生境条件对种间关系的变化产生了影响。这与前述生态位重叠度低的原因基本一致,在德夯地质公园内旅游活动、农业耕作等人为干扰因素可能会产生影响,同时也受溪流与林地2种截然不同的生境影响。此外,水位波动也被视为影响植物生长的重要因素^[31],在丰水时期,溪流水位上涨冲刷土壤,对草本的生长造成影响,使其群落不稳定。

3.3 不同林溪交错带草本群落的稳定性

用M. Godron法对德夯地质公园林溪交错带草本群落优势种进行群落稳定性分析,结果表明交点坐标分别为(34.15, 65.80), (38.95, 61.05), (37.44, 62.56),皆与稳定点坐标(20, 80)偏离较远,说明群落状态并不稳定,与前文总体联结性和种对间联结性结论一致。导致群落不稳定的原因可能有3个。第一,群落正处于演替初期,在此阶段群落物种的组成与结构均发生快速的变化,种间关系并不稳定^[32]。第二,群落稳定性的维持不仅依赖于物种组成和群落结构的内在特性,同时也受到外部环境因素的干扰和影响^[33]。林溪交错带生境受旅游活动、农耕等人为干扰,对于其草本植物的生存生长及群落演替均会造成不可逆的影响。第三,林溪交错带作为特殊的生态环境,深受林地与溪流2种生态系统影响,长期的水淹条件已被证实会降低部分草本植物的存活率,并弱化群落内的种间关系^[34]。此外,坡度和坡向的变化也可能导致生境中光照、土壤水分、养分以及土壤厚度等资源的分布出现差异,这种差异性可能激发物种间对有限资源的竞争,其中物种往往表现出负相关性^[32],最终影响群落的整体稳定性。显然,德夯林溪交错带草本群落的演替发展,既受群落内物种关系的影响,还将受到包括旅游活动在内的人为活动的影响,对此还需进一步深入探讨。

总之,对林溪交错带草本群落优势种的生态位宽度及重叠度、种间联结性以及群落稳定性的综合分析能够增强对林溪交错带群落类型及多样性的科学认识,为未来研究提供理论基础和实践参考,以促进该领域研究与管理向更深层次发展。

4 结 论

(1)德夯地质公园林溪交错带草本群落中,透茎冷水花和小赤麻是主要的优势种。它们均以密集的生长方式迅速占据生态位,展现出对这一特殊环境的显著适应性。

(2)九龙溪、夯峡溪和玉泉溪草本植物生态位重叠值较低,分别为 0.12、0.10、0.10,表明植物间竞争不激烈。草本植物总体关联性呈不显著负联结,

χ^2 检验、Spearman 秩相关系数、联结系数 C_A 值结果均表明,草本群落优势种多呈现不显著联结,表明种对间联结性较弱,物种呈现独立分布格局。

(3)M. Godron 法分析结果表明交点坐标皆与稳定点坐标(20,80)偏离较远,说明林溪交错带草本群落状态总体稳定性较弱,但其群落的演替发展受群落内部(物种间关系)与群落外部(旅游活动在人为活动等)的共同影响,今后仍需进一步研究探讨。

参考文献:

- [1] 徐亮,陈功锡,张代贵. 湖南德夯河谷特殊生境典型植物群落特征研究[J]. 生命科学研究, 2011, 15(4): 303-310.
XU L, CHEN G X, ZHANG D G. Study on characteristics of the representative plant communities in Dehang valley habitat, Hu'nan Province[J]. *Life Science Research*, 2011, 15(4): 303-310.
- [2] 向晓媚,刘冰,谭璐,等. 湖南省德夯风景名胜区种子植物区系研究[J]. 西北植物学报, 2022, 42(6): 1051-1063.
XIANG X M, LIU B, TAN L, et al. Study on the flora of seed plants in Dehang scenic spot, Hu'nan Province[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(6): 1051-1063.
- [3] 谭璐,向亮,向晓媚,等. 湖南德夯野生精油植物资源调查及化学成分分析[J]. 山地农业生物学报, 2021, 40(6): 59-65.
TAN L, XIANG L, XIANG X M, et al. Investigation and chemical composition analysis of wild essential oil plant resources in Dehang of Hu'nan Province, China[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2021, 40(6): 59-65.
- [4] 刘冰,向晓媚,谭璐,等. 湖南省德夯风景名胜区景观分类[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 63-69.
LIU B, XIANG X M, TAN L, et al. Landscape classification of Dehang scenic spot in Hu'nan Province[J]. *Journal of Jishou University (Natural Sciences Edition)*, 2021, 42(3): 63-69.
- [5] 李雨晗,丁彦芬,张畅为. 南京外秦淮河优势草本植物生态位和种间联结性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(6): 203-210.
LI Y H, DING Y F, ZHANG C W. Niche and interspecific association of dominant herbaceous plants in the outer Qinhuai River, Nanjing City[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2023, 47(6): 203-210.
- [6] 李帅锋,刘万德,苏建荣,等. 滇西北云南红豆杉群落物种生态位与种间联结[J]. 植物科学学报, 2012, 30(6): 568-576.
LI S F, LIU W D, SU J R, et al. Niche and interspecific association of species of *Taxus yunnanensis* communities in north-west Yunnan Province[J]. *Plant Science Journal*, 2012, 30(6): 568-576.
- [7] 江焕,张辉,龙文兴,等. 金钟藤入侵群落的种间联结及生态位特征[J]. 生物多样性, 2019, 27(4): 388-399.
JIANG H, ZHANG H, LONG W X, et al. Interspecific associations and niche characteristics of communities invaded by *Decalobanthus boisianus* [J]. *Biodiversity Science*, 2019, 27(4): 388-399.
- [8] 徐满厚,刘敏,翟大彤,等. 植物种间联结研究内容与方法评述[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8224-8233.
XU M H, LIU M, ZHAI D T, et al. A review of contents and methods used to analyze various aspects of plant interspecific associations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(24): 8224-8233.
- [9] 杨金涛,张晓晗,尹正辉,等. 禁牧对西藏贡祖山温性草原主要植物生态位及种间联结的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(2): 330-337.
YANG J T, ZHANG X H, YIN Z H, et al. The influence of enclosure on the ecological niche and interspecific associations of dominant plant species in temperate grasslands of the Kuizu Mountains in Xizang[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(2): 0330-0337.
- [10] 王加国,李苇洁,张红军,等. 贵州百里杜鹃景区植物群落多样性与稳定性研究[J]. 林业资源管理, 2020(2): 120-125.
WANG J G, LI W J, ZHANG H J, et al. Study on the diversity and stability of plant communities in Baili *Rhododendron* scenic area in Guizhou Province[J]. *Forest Resources Management*, 2020(2): 120-125.
- [11] ZHANG L, ZHANG H L, CHEN Y K, et al. Analyses of community stability and inter-specific associations between a plant species with extremely small populations (*Hopea hainanensis*) and its associated species[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 922829.
- [12] 雷德芳,王志杰. 黔中喀斯特地区马尾松群落主要物种间联结、生态位及群落稳定性特征[J]. 生态学报, 2024, 44(10): 4353-4367.
LEI D F, WANG Z J. Interspecific associations, niches and community stability of main species in *Pinus massoniana* community in Karst mountainous cities, the central Guizhou Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(10): 4353-4367.
- [13] 郭泉水,包奋强,王福福,等. 三尖杉所属群落优势乔木树种种间关系[J]. 林业科学研究, 2008, 21(5): 662-668.
GUO Q S, BAO F Q, WANG X F, et al. Interspecific connection of dominant tree species in *Cephalotaxus fortunei* communities[J]. *Forest Research*, 2008, 21(5): 662-668.
- [14] LEVINS R. Evolution in changing environments: Some theoretical explorations[M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1968.
- [15] 李契,朱金兆,朱清科. 生态位理论及其测度研究进展[J]. 北

- 京林业大学学报, 2003, 25(1): 100-107.
- LI J, ZHU J Z, ZHU Q K. A review on niche theory and niche metrics[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 25(1): 100-107.
- [16] PIANKA E R. The structure of lizard communities[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 53-74.
- [17] SCHLUTER D. A variance test for detecting species associations, with some example applications[J]. *Ecology*, 1984, 65(3): 998-1005.
- [18] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001: 45-46.
- [19] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探[J]. 林业科学, 2000, 36(5): 28-32.
- ZHENG Y R. Comparison of methods for studying stability of forest community[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(5): 28-32.
- [20] 俞筱桢, 余瑞, 黄娟, 等. 贵州茂兰喀斯特森林四药门花群落优势种群生态位特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(12): 3470-3478.
- YU X Y, YU R, HUANG J, *et al.* Niche characteristics of dominant plant populations of *Loropetalum subcordatum* community in Maolan Karst forest, Guizhou[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(12): 3470-3478.
- [21] 张明霞, 王得祥, 康冰, 等. 秦岭华山松天然次生林优势种群的种间联结性[J]. 林业科学, 2015, 51(1): 12-21.
- ZHANG M X, WANG D X, KANG B, *et al.* Interspecific associations of dominant plant populations in secondary forest of *Pinus armandii* in Qinling Mountains[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(1): 12-21.
- [22] 姜倪皓, 张诗函. 楚雄市西郊云南松林下草本优势种种间联结及环境解释[J]. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2109-2120.
- JIANG N H, ZHANG S H. Interspecific association and environmental interpretation of dominant herbaceous species in *Pinus yunnanensis* forest in the western suburbs of Chuxiong City[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(11): 2109-2120.
- [23] 陈俊华, 刘兴良, 何飞, 等. 卧龙巴朗山川滇高山栎灌丛主要木本植物种群生态位特征[J]. 林业科学, 2010, 46(3): 23-28.
- CHEN J H, LIU X L, HE F, *et al.* Niche characteristics of dominant woody populations in *Quercus aquifoliodes* shrub community in Balangshan Mountain in Wolong Nature Reserve[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(3): 23-28.
- [24] 钱逸凡, 伊力塔, 胡军飞, 等. 普陀山主要植物种生态位特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(3): 561-568.
- QIAN Y F, YI L T, HU J F, *et al.* Niche characteristics of main plant species in Putuo Mountain, Zhejiang Province of East China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(3): 561-568.
- [25] 郑超超, 伊力塔, 张超, 等. 浙江江山公益林物种间关系及CCA排序[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7511-7521.
- ZHENG C C, YI L T, ZHANG C, *et al.* Interspecific relationship and canonical correspondence analysis of the dominant species in ecological service forest of Jiangshan City in Zhejiang Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(22): 7511-7521.
- [26] TILMAN D. Causes, consequences and ethics of biodiversity[J]. *Nature*, 2000, 405(6783): 208-211.
- [27] 陈玉凯, 杨琦, 莫燕妮, 等. 海南岛霸王岭国家重点保护植物的生态位研究[J]. 植物生态学报, 2014, 38(6): 576-584.
- CHEN Y K, YANG Q, MO Y N, *et al.* A study on the niches of the State's Key Protected Plants in Bawangling, Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(6): 576-584.
- [28] 刘润红, 陈乐, 涂洪润, 等. 桂林岩溶石山青冈群落灌木层主要物种生态位与种间联结[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 2057-2071.
- LIU R H, CHEN L, TU H R, *et al.* Niche and interspecific association of main species in shrub layer of *Cyclobalanopsis glauca* community in Karst hills of Guilin, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 2057-2071.
- [29] 陈龙涛, 石晓东, 高润梅. 山西陵川南方红豆杉群落种间联结与生态位特征研究[J]. 植物科学学报, 2016, 34(4): 521-529.
- CHEN L T, SHI X D, GAO R M. Interspecific association and niche characteristics of *Taxus chinensis* var. *mairei* communities in Lingchuan, Shanxi[J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34(4): 521-529.
- [30] 黄祥童, 王绍先, 黄炳军, 等. 珍稀植物对开蕨与其伴生物种的联结性及群落稳定性[J]. 生态学报, 2015, 35(1): 80-90.
- HUANG X T, WANG S X, HUANG B J, *et al.* Analyses of community stability and inter-specific associations between the rare plant *Phyllitis scolopendrium* and its associated species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(1): 80-90.
- [31] 薛媛媛, 栾兆擎, 史丹, 等. 东北三江平原地区水位梯度对湿地植被群落生态特征的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(6): 39-47.
- XUE Y Y, LUAN Z Q, SHI D, *et al.* The influences of the hydraulic gradient on the ecological characteristics of wetland vegetation communities in Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 44(6): 39-47.
- [32] 谢婉丽, 王奇悦, 王秋雪, 等. 闽江福州段自生草本植物生态位和种间联结研究[J/OL]. 热带亚热带植物学报, (2024-03-07)[2024-06-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1374.q.20240301.1142.008.html>.
- XIE W L, WANG Q Y, WANG Q X, *et al.* Niche and interspecific association of pontaneous herbaceous plants in Fuzhou Section of Minjiang River[J/OL]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, (2024-03-07)[2024-06-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1374.q.20240301.1142.008.html>.
- [33] 郭佳琦, 陈俊辰, 黄旬, 等. 喜旱莲子草入侵群落主要物种生态位和种间联结研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30(8): 1607-1616.
- GUO J Q, CHEN J C, HUANG X, *et al.* Niche characteristics and interspecific associations of the dominant species of the communities invaded by *Alternanthera philoxeroides*[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(8): 1607-1616.
- [34] 王伟, 郭倩, 康海军, 等. 线叶蒿草地群落构成及种间关联分析[J]. 西北植物学报, 2015, 35(10): 2096-2102.
- WANG W, GUO Q, KANG H J, *et al.* Community composition and interspecific association analysis of *Kobresia capillifolia* grassland[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(10): 2096-2102.