

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.020

引用格式:付本艺,宋国富,任晓龙,等.拉萨河流域湿地灌草层生态位与种间联结及群落稳定性研究[J].草地学报,2026,34(4):1363—1375

FU Ben-yi, SONG Guo-fu, REN Xiao-long, et al. Research on Niche, Interspecific Association and Community Stability of the Shrub-Herb Layer in the Wetlands of the Lhasa River Basin[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34 (4):1363—1375

拉萨河流域湿地灌草层生态位与种间联结 及群落稳定性研究

付本艺^{1,2,3,4}, 宋国富⁵, 任晓龙⁶, 孙雪婷^{1,2,3,4}, 罗大庆^{1,2,3,4}, 屈兴乐^{1,2,3,4*}

(1. 西藏农牧大学高原生态研究所, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏自治区高寒植被生态安全重点实验室, 西藏 林芝 860000; 3. 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000; 4. 阿里生态监测站, 西藏 阿里 859000; 5. 西藏自治区生态环境遥感监测中心, 西藏 拉萨 850000; 6. 林芝市生态环境局, 西藏 林芝 860000)

摘要:本研究聚焦拉萨河流域黑颈鹤国家自然保护区湿地生态系统,对灌木层和草本层优势种群的生态位特征、种间联结及群落稳定性展开系统探究,分析高寒湿地环境下优势物种的生存策略、资源竞争与共生关系,以促进优势种与伴生种的正联结,优化群落结构。研究表明:草本层 Levins 指数均值(7.97)高于灌木层(3.27),Shannon 指数均值(2.03)亦高于灌木层(1.20),表明草本植物资源利用广度与均匀性更优;生态位重叠指数显示,草本层均值(0.22)高于灌木层(0.18),资源竞争更为激烈;种间联结分析表明,灌草层整体呈正联结(VR 均大于1),灌木层植物整体共生大于竞争,草本层物种对于资源竞争较灌木层激烈。群落稳定性模型显示,灌草层与理论稳定点(20,80)的欧式距离分别为 7.98 和 22.77,草本层处于不稳定状态。研究建议通过筛选生态习性匹配物种优化植被配置,提升群落稳定性,为保护区植被管理、高原生态系统保护提供理论依据。

关键词:拉萨河流域湿地;灌草层;生态位特征;种间联结;群落稳定性

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1363-13

Research on Niche, Interspecific Association and Community Stability of the Shrub-Herb Layer in the Wetlands of the Lhasa River Basin

FU Ben-yi^{1,2,3,4}, SONG Guo-fu⁵, REN Xiao-long⁶, SUN Xue-ting^{1,2,3,4}, LUO Da-qing^{1,2,3,4}, QU Xing-le^{1,2,3,4*}

(1. Institute of Plateau Ecology, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Nyingchi, Xizang 860000, China; 2. Key Laboratory of Alpine Vegetation Ecological Security of Husbandry University, Nyingchi, Xizang 860000, China; 3. Key Laboratory of Xizang Plateau Forest Ecology of Ministry of Education & National, Nyingchi, Xizang 860000, China; 4. Ngari Ecological Monitoring Station, Ngari, Xizang 860000, China; 5. Xizang Autonomous Region Remote Sensing Monitoring Center for Ecological Environment, Lhasa, Xizang 850000, China; 6. Linzhi Municipal Ecology and Environment Bureau, Nyingchi, Xizang 860000, China)

Abstract: This study focused on the wetland ecosystem of the Black-necked Crane National Nature Reserve in the Lhasa River Basin, systematically explores the niche characteristics, interspecific associations, and community stability of the dominant populations in the shrub layer and herb layer, analyzes the survival strategies, resource competition, and symbiotic relationships of dominant species in the alpine wetland environment, aiming to promote the positive associations between dominant species and companion species and optimize the community structure; The results show that: the average value of the Levins index in the herb layer (7.97) is higher than that in the shrub

收稿日期:2025-05-06;修回日期:2025-06-18

基金项目:西藏农牧大学林学博士点(一期)(533325001);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZZK1006);西藏农牧学院 2025 年学科建设项目(高原生态研究所生态学-YJSXK2025-01);西藏农牧学院 2025 年学科建设项目(高原生态研究所资源利用与植物保护(资源利用方向)-YJSXK2025-16)资助

作者简介:付本艺(1999-),男,汉族,山东济南人,主要从事群落生态学方面研究,E-mail:438524206@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail:1318266529@qq.com

layer (3.27), and the average value of the Shannon index (2.03) is also higher than that in the shrub layer (1.20), indicating that herbaceous plants have better breadth and uniformity of resource utilization. The niche overlap index shows that the average value in the herb layer (0.22) is higher than that in the shrub layer (0.18), with more intense resource competition. The interspecific association analysis shows that the shrub-herb layer presents a positive association as a whole (all *VR* values are greater than 1). The overall symbiosis of plants in the shrub layer is stronger than competition, while the resource competition among species in the herb layer is more intense than that in the shrub layer. The community stability model shows that the Euclidean distances between the shrub layer, the herb layer and the theoretical stable point (20, 80) are 7.98 and 22.77 respectively, and the herb layer is in an unstable state. The study suggests optimizing vegetation configuration by screening species with matching ecological habits to enhance community stability, so as to provide a theoretical basis for the vegetation management of the reserve and the protection of the Qinghai-Xizang Plateau ecosystem.

Key words: Lhasa River Basin of wetlands; Shrub-herb layer; Niche characteristics; Interspecific association; Community stability

生态位宽度衡量了物种在资源利用上的广度与适应能力^[1]、生态位重叠则反映物种间在资源利用上的相似程度,是竞争压力的重要指示指标^[2]、生态位分化程度越高,群落中物种竞争程度越低,稳定性也越高^[3]。种间联结作为揭示物种间相互作用模式的主要手段,通常分为正联结与负联结两类:正联结反映物种间存在协同、互利或共生关系,有助于增强系统的资源整合与利用效率;而负联结则代表种间可能存在资源竞争、空间排斥或功能重叠^[4-6]。群落稳定性是衡量生态系统对干扰的抵抗能力和自我恢复能力的关键指标,受到群落内生态位分布格局与种间联结强度与方向的协同影响^[7]。生态位分化通过减少直接竞争、促进资源分割,为物种共存提供空间基础、适度的正联结增强了系统功能的互补性与缓冲能力,从而提高系统对外界干扰的适应性与群落稳定性^[8-9]。在国际研究中,生态位与群落稳定性的关系已成为群落生态学、功能生态学与全球变化生态学的交叉热点,研究重点逐渐从传统的“竞争排除”理论转向更综合的“功能互补性”与“生态网络结构”视角,强调物种间互作对生态系统功能维持的关键作用。例如,Wang等^[10]在实验中发现,生态位互补性通过增强物种共存和稳定性,显著提升了生态系统的生产力和抗扰动能力。Godoy等^[11]的研究则表明,当生态系统中的物种表现出显著的生态位差异时,其功能输出与系统稳定性呈正相关,支持“生态位分异”在维持功能稳定性中的核心地位。国内则是将生态位引入植物优势群落^[12]、动物群落^[13]等多方向,偏向探讨群落内的资源利用以及分布情况,分析个体之间在不同生存环境下的生存策略。此外,AC联结系数、Spearman秩相关检验、网络拓扑结构等方法的引入,也使得种间联结研究更加定量化和网络化。

拉萨河流域黑颈鹤自然保护区湿地作为黑颈鹤的重要越冬栖息地,不仅承载着濒危物种的保护功能,其独特的高寒植被群落结构与动态也深刻影响着区域生态安全^[14]。研究区海拔大于4000 m,乔木层物种较少,仅发现3种,因此研究着重分析灌草层的生态位分化、种间相互作用及群落稳定性。通过样地调查及多种数据分析,旨在实现以下科学任务:通过探究高寒湿地灌草层优势种生态位特征,分析物种适应极端环境的生存机制,同时借助生态位重叠指数剖析物种资源竞争强度;揭示种间相互作用的趋势,分析灌草层优势物种的竞争与共生关系,以便精准促进优势种与伴生种的正联结关系,优化群落结构,有效提升栖息地的生态服务功能;结合生态位特征与种间联结情况分析群落稳定性机制,为解释群落的稳定性情况和多样性提供依据。通过对这些问题的研究,期望为研究区植被管理、黑颈鹤栖息地生态环境及高原生态系统保护提供科学且具针对性的理论依据,凸显保护灌木群落对维系湿地生态基底的关键价值,助力完善保护区管理体系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于西藏中部(图1),其地理坐标为 $90^{\circ}21' \sim 91^{\circ}27' \text{E}$, $29^{\circ}44' \sim 30^{\circ}35' \text{N}$,涵盖拉萨河上游和澎波河流域的雅江中游河谷,是黑颈鹤重要的觅食与越冬栖息地。该地区年均气温约为 5°C ,降水主要集中在夏季6—8月,年降水量约491 mm,年日照时数接近3000 h。平均海拔3900 m,属高原温带半干旱季风气候区,气候温和,干湿季节分明,无霜期约120 d^[15]。

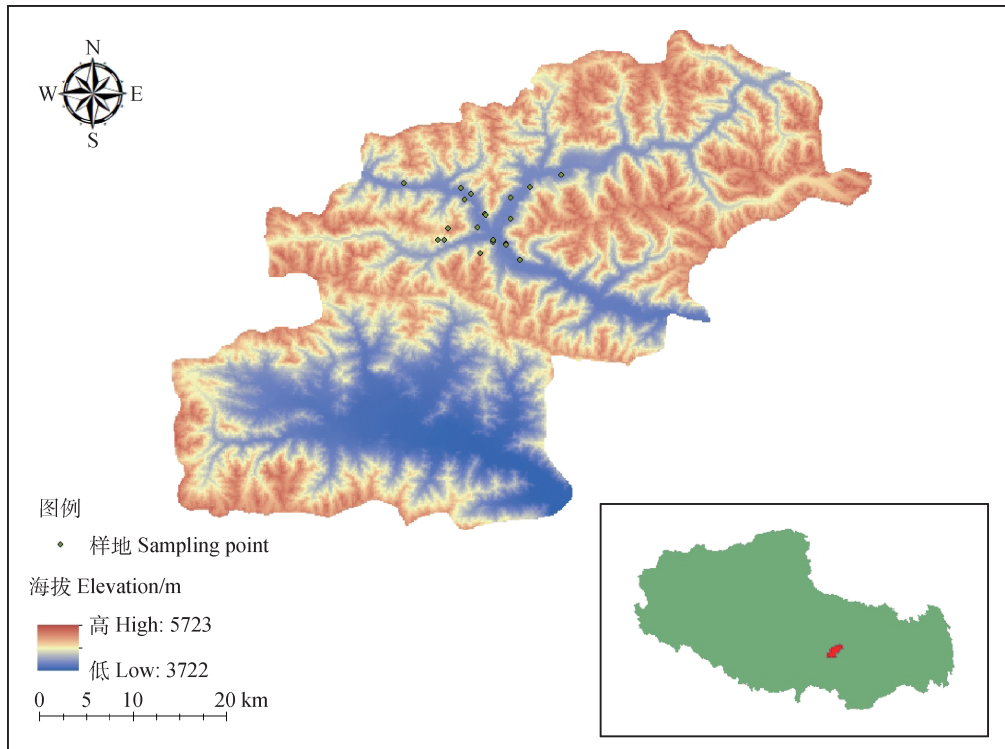


图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of the study area

1.2 调查方法

2022年6—8月对拉萨河流域黑颈鹤国家保护区湿地进行第一次植物群落外业调查,并于2023年7—8月对研究区进行复查,共设置23个样地。无乔木存在的灌木草本群落每个样地设置1条50 m的样线,端点处设置1个5 m×5 m灌木样方,每隔20 m设置1个5 m×5 m的灌木样方,每个灌木样方内嵌套1个1 m×1 m的草本样方。记录每个样方内出现物种的名称、高度、盖度等指标。

1.3 数据统计分析

1.3.1 重要值计算 对研究区的草本和灌木的重要值进行计算,分别选取重要值前15位的物种作为优势种进行生态位宽度、重叠指数以及种间联结关系分析^[16]。

相对高度=(某一种植物的高度/全部植物的高度之和)×100%;

相对盖度=(某一种植物的盖度/全部植物的盖度之和)×100%;

相对多度=(某一种植物的个体数/全部植物的个体数)×100%;

草本/灌木重要值=(相对多度+相对高度+相对盖度)/3。

1.3.2 生态位与生态位重叠指数 生态位宽度是衡量物种在资源利用广度和分布均匀性的重要指标,其计算通常基于Levin指数^[17]和Shannon指数^[18]两种方式,生态位重叠指数(O_{ik})公式反映了两个物种在资源位上的利用模式相似性^[19-20]。

$$B_x = \frac{1}{\sum_{j=1}^n (P_{ij})^2} \quad (1)$$

$$B_y = -\sum_{j=1}^n P_{ij} \times \ln(P_{ij}) \quad (2)$$

$$O_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n P_{ij} \times P_{kj}}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^n (P_{ij})^2\right) \times \left(\sum_{j=1}^n (P_{kj})^2\right)}} \quad (3)$$

式中: B_x 为Levin指数、 B_y 为Shannon多样性指数、 O_{ik} 为生态位重叠指数、 P_{ij} 表示物种*i*在样地*j*上的比例、*n*为样地总数。Levin指数主要描述资源利用的均匀性,数值越大,表明物种的生态位宽资源位宽度越广,相应的适应范围越广;而数值越小,则表明资源利用集中于某些特定类型。Shannon指数揭示资源利用的分散程度,值越高表明资源利用更加均匀和多样化。

1.3.3 总体联结性分析 使用Schluter提出的方

差比率法进行联结性指数(VR)的计算^[21],揭示物种间的联结性方向及强度,正值代表正联结性,负值代表负联结性,联结强度(W)综合考虑样方数量N对联结性强度的影响,为评估群落中物种关系提供了更加全面的视角。

$$VR = \frac{\sum_{i=1}^N (n_{1i} \times n_{2i}) - \frac{T_1 \times T_2}{T}}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (n_{1i})^2 - \frac{(T_1)^2}{T} \right] \times \left[\sum_{i=1}^N (n_{2i})^2 - \frac{(T_2)^2}{T} \right]}} \quad (4)$$

$$W = VR \times N \quad (5)$$

式中: n_{1i} 和 n_{2i} 是第*i*个样地中联结对数的个体数量, T 为样地内物种总个体数, N 为样地总数。当 $VR > 1$ 时,表示两物种具有正联结性,倾向于共同分布;当 $VR < 1$ 时,表示物种间存在负联结性。若 W 值大于 $\chi^2_{0.05(N)}$ 或小于 $\chi^2_{0.95(N)}$,则表明物种间存在显著的关联;反之,当 W 值落在这两个临界值之间时,说明物种间无显著关联。

1.3.4 种间联结分析 为了改善在 2×2 列联表中由于样本量较小或数据稀疏而可能出现的偏大误差,使用Yates提出了修正的 χ^2 检验公式^[16]。 χ^2 检验只能对物种联结性提供定性的判断,而无法深入分析联结的具体程度。因此,本研究还结合了AC系数和Spearman秩相关分析,用于量化种间联结的强度。

$$\chi^2 = \frac{N \left(\left| ad - bc \right| - \frac{N}{2} \right)^2}{(a+b)(c+d)(a+c)(b+d)} \quad (6)$$

式中: a, b, c, d 分别表示 2×2 列联表中四个格子的观测频数, a :两个物种同时出现的样地数; b :仅物种B出现的样地数; c :仅物种A出现的样地数; d :两个物种均未出现的样方数; N 为总样本量。 $ad > bc$,为正联结, $ad < bc$,为负联结,当 $\chi^2 > 6.635$ 时表示种间联结关系为极显著,当 $6.635 > \chi^2 > 3.841$ 联结关系为显著, $\chi^2 < 3.841$ 说明两个物种之间无显著关系。

$$\text{当 } ad \geq bc \text{ 时, } AC = \frac{ad - bc}{(a+b)(b+d)} \quad (7)$$

$$\text{当 } bc > ad \text{ 及 } d \geq a \text{ 时, } AC = \frac{ad - bc}{(a+b)(a+c)} \quad (8)$$

$$\text{当 } bc > ad \text{ 及 } d < a \text{ 时, } AC = \frac{ad - bc}{(b+d)(c+d)} \quad (9)$$

AC的取值范围为 $(-1, 1)$,当AC值接近1时,说明两物种在资源利用之间存在较强的正相关性;当AC值接近-1时,表示两物种在资源利用方面存在相互排斥的现象;当AC等于0时,则表明两物种的分布完全独立,彼此间无显著关联^[22]。

$$r(i, k) = 1 - \frac{6 \times \sum_{j=1}^N (x_{ij} - x_{kj})^2}{N \times (N^2 - 1)} \quad (10)$$

式中: $r(i, k)$ 用于表征第*i*组种对与第*k*组种对之间的Spearman秩检验系数^[23]。 N 表示样地总数, X_{ij} 和 X_{kj} 分别表示第*i*组种对和第*k*组种对在样地中的重要性。

1.3.5 群落稳定性分析 黑颈鹤自然保护区属于温带气候,采用了M. Godron法进行群落稳定性评估^[24]。研究选取物种重要值排名在前15的物种,根据该方法,分析物种数量倒数的百分比与对应累积相对频度之间的关系,并构建平滑曲线模型,通过与直线 $y = 100 - x$ 相交,得到群落的稳定性比值,且该比值越接近理想稳定点(20, 80),群落稳定性越高。

生态位宽度以及生态位重叠指数使用R 4.4.1中的spaa包进行计算,通过`niche()`计算物种的生态位宽度,`niche.overlap()`评估物种间的生态位重叠,`sp.assoc()`计算联结系数AC,stats包中的`cor()`计算Spearman相关系数,使用MATLAB R2024b进行群落稳定性数据分析,Origin 2025 Pro进行绘图。

2 结果与分析

2.1 物种组成与优势种分析

两次外业调查,发现研究区野生维管束植物共有34科83属114种,其中,蕨类植物包括1科1属1种,裸子植物包括1科1属2种,被子植物中32科81属111种,研究区优势科以禾本科、菊科、蔷薇科为主。灌木草本层选取的30种优势种属于16科23属,占研究区总科数的47.06%,总属数的27.37%。

2.2 生态位宽度与生态位重叠指数

2.2.1 生态位宽度 从物种重要值的样地分布情况来看(表1),均匀程度呈现显著差异,草本层中物种分布较灌木层分布均匀,草本植物在高寒草地的

适应性更好,对于资源的利用以及生长方式有着更好的调控能力。例如,高山嵩草(*Carex parvula*)在21个样地分布,为多个样地的优势种,钉柱委陵菜(*Potentilla saundersiana*)在22个样地分布,大花嵩草(*Kobresia macrantha*)、丝颖针茅(*Stipa capillacea*)等也都在15个样地以上分布。灌木层中,鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、小叶金露梅(*Potentilla parvifolia*)等物种在样地间重要值波动剧烈,仅于特定样地表现出高重要值,反映其分布均匀度较低,生态位分化特突出,对微生境(如土壤条件、光照梯度)的选择性较强,体现了群落结构的异质性和优势种主导下的资源利用策略。

从灌木草本层生态位宽度的 Levins、Shannon 两个生态位指数数据分析结果来看(表1),灌木层的 Levins 生态位指数较高的包括近似小檗(*Berberis approximata*)、宽刺绢毛蔷薇(*Rosa sericea*)、腺叶绢毛蔷薇(*Rosa sericea*),分别为7.27,5.42,4.73,草本层的高山嵩草、钉柱委陵菜、丝颖针茅的 Levins 生态位指数分别为18.85,17.12,13.22,是生态位宽度最大的前3位,两群落排序结果与 Shannon 指数一致,但草本层的生态位指数差异较灌木层明显增大,表明草本层物种在资源利用方式上的分化程度很高,物种间的竞争减少。灌木层的架棚(*Ceratostigma minus*)、小叶栒子(*Cotoneaster microphyllus*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)以及草本层的粗壮嵩草(*Carex sargentiana*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、高山唐松草(*Thalictrum alpinum*)的两种生态位指数在群落中最小,对资源的利用范围狭窄,在资源竞争中可能处于劣势地位或特化生存的情况。生态位宽度与重要值的关系并非总是正相关,在资源稀缺或分布极端的环境中,生态位宽度较窄的物种也可能表现出较高的重要值,这类物种往往通过高度专化的资源利用策略和适应性,例如灌木层的宽刺绢毛蔷薇、腺叶绢毛蔷薇、青海刺参(*Morina kokonorica*),草本层中的钉柱委陵菜、毛果草(*Lasiocaryum densiflorum*)、乌奴龙胆(*Gentiana urnula*),由于能够通过优势物种利用较少的资源或空间,形成了自己独特的生态位,从而使生态位宽度较高。

2.2.2 生态位重叠指数分析 从灌木草本层生态位重叠指数来看(表2、表3),与生态位宽度存在一定关联,生态位宽度越大的物种,与其他物种的重叠概率越大,其中,灌木层中未产生重叠的物种对

($O_{ik}=0.00$)为39个,占总物种对数的37.14%;62.86%的种对(66个)之间的生态位重叠指数大于0,具体表现为, $0.50>O_{ik}>0.00$ 的物种对为55个,占总对数的52.38%; $O_{ik}\geq 0.50$ 的物种对为11对,占总对数的10.48%,毛叶绣线菊与东方茶藨子(*Ribes mandshuricum*)之间的生态位重叠指数达到了0.92,为灌木层最大值,两个物种在对资源的利用上有很大的相似性。在草本层中,17个物种对未产生重叠,占总物种对数的16.19%;83.81%的种对(88个) $O_{ik}\geq 0.00$,其中, $0.50>O_{ik}>0.00$ 的物种对有64个,占总对数60.95%; $O_{ik}\geq 0.50$ 的物种对有24个,占总对数的22.86%,尤其以丝颖针茅与毛果草、高山嵩草与钉柱委陵菜之间的指数较高,存在一定竞争关系,分别为0.80与0.78。灌木层与草本层的生态位重叠指数平均值分别为0.18和0.22,表明两群落内优势物种在资源利用和生态位占据上有一定的分化,各自有相对独立的生存空间和资源利用方式,草本层优势物种之间的生态位重叠程度相对灌木层略高,种间竞争相对灌木层更为明显。

2.3 种间联结分析

2.3.1 总体关联性检验 研究区内灌木层和草本层 VR 值均大于1,依次为1.31和1.25,两优势种群层关系为正联结。灌木层和草本层统计检验量分别为30.12,28.72, χ^2 临界值为(12.34,32.92),检验统计量 W 皆处于 $\chi^2_{0.05(N)}$ 或小于 $\chi^2_{0.95(N)}$ 所界定的区间内,总体关联性均为不显著。

2.3.2 种间关联性分析 研究区内灌木草本层优势种的种间关联性 χ^2 检验结果显示(图2、图3),灌木层和草本层的正联结种对分别为52对和55对,负联结分别为53对和50对,显著率分别为18.09%和11.42%,都呈现出不显著相关的种对占比较高的特点,这表明无论是灌木还是草本,大部分物种在生态位上相对独立,彼此间相互影响较小。

灌木层正相关方面,34.29%的种对(36对)为不显著正相关;极显著正相关($P<0.001$)种对有9个,占总对数的8.57%;显著正相关种对7个,占比6.67%。例如,樱草杜鹃与山生柳为极显著正相关,窄叶鲜卑花与小叶金露梅为显著正相关。在负相关层面,47.62%的种对(50对)为不显著负相关;极显著负相关及显著负相关的种对分别为1个和2个,占比为0.95%和1.90%。例如,近似小檗与樱草杜鹃为极显著负相关,近似小檗与山生柳为显著

表 1 灌木草本层优势种生态位宽度相关指数

Table 1 Niche breadth-related indices of dominant species in shrub-herb layers

类型 Type	缩写 Abbreviation	植物名称 Plant name	相对多度 Relative abundance	重要值 Importance value	Levins (Bx)	Shannon (By)
灌木层 Shrub	BA	近似小檗 <i>Berberis approximata</i>	0.21	9.19	7.27	2.17
	CP	矮锦鸡儿 <i>Caragana pygmaea</i>	0.08	5.16	2.93	1.09
	PP	小叶金露梅 <i>Potentilla parvifolia</i>	0.10	2.76	2.84	1.39
	RP	樱草杜鹃 <i>Rhododendron primuliflorum</i>	0.11	2.65	2.82	1.19
	SM	毛叶绣线菊 <i>Spiraea mollifolia</i>	0.07	2.18	3.84	1.52
	SO	山生柳 <i>Salix oritrepha</i>	0.06	1.86	2.99	1.10
	SA	窄叶鲜卑花 <i>Sibiraea angustata</i>	0.02	1.22	1.85	0.65
	IP	川藏香茶菜 <i>Isodon pharicus</i>	0.05	1.03	3.41	1.30
	CJ	鬼箭锦鸡儿 <i>Caragana jubata</i>	0.02	0.98	1.69	0.62
	CE	架棚 <i>Ceratostigma minus</i>	0.01	0.94	1.41	0.55
	RS	宽刺绢毛蔷薇 <i>Rosa sericea</i>	0.04	0.84	5.42	1.96
	CM	小叶栒子 <i>Cotoneaster microphyllus</i>	0.09	0.73	1.67	0.59
	RO	腺叶绢毛蔷薇 <i>Rosa sericea</i>	0.08	0.67	4.73	1.65
	MK	青海刺参 <i>Morina kokonorica</i>	0.05	0.46	4.21	1.51
	RM	东方茶藨子 <i>Ribes mandshuricum</i>	0.05	0.40	1.97	0.68
草本层 Herb	CA	高山嵩草 <i>Carex parvula</i>	0.42	12.44	18.85	2.98
	SC	丝颖针茅 <i>Stipa capillacea</i>	0.05	4.35	13.22	2.67
	PF	白草 <i>Pennisetum flaccidum</i>	0.08	3.36	5.21	1.82
	CC	灰毛风铃草 <i>Campanula cana</i>	0.09	3.30	9.61	2.39
	CD	大花嵩草 <i>Carex nudicarpa</i>	0.11	3.05	8.67	2.47
	EM	垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	0.02	2.80	2.66	1.44
	CK	喜马拉雅嵩草 <i>Carex kokanica</i>	0.05	2.53	3.56	1.45
	PS	钉柱委陵菜 <i>Potentilla saundersiana</i>	0.04	1.98	17.12	2.94
	CS	粗壮嵩草 <i>Carex sargentiana</i>	0.03	1.34	1.95	0.68
	AM	小球花蒿 <i>Artemisiainaeorcroftiana</i>	0.02	1.23	7.96	2.27
	LD	毛果草 <i>Lasiocaryum densiflorum</i>	0.01	0.67	9.78	2.49
	GU	乌奴龙胆 <i>Gentiana urnula</i>	0.03	0.64	9.85	2.51
	PH	羽毛委陵菜 <i>Potentilla plumosa</i>	0.01	0.56	3.83	1.53
	TA	高山唐松草 <i>Thalictrum alpinum</i>	0.09	0.43	3.13	1.34
	LT	铺散肋柱花 <i>Lomatogonium thomsonii</i>	0.01	0.25	4.13	1.49

注:物种名称以拉丁文名缩写表示。下同

Note: Species names are represented by abbreviations of their Latin names. The same applies hereinafter

负相关,显著正相关(含极显著)与显著负相关(含极显著)比值为 5.3:1.0,灌木层整体趋向于共生大于竞争。

草本层方面,在正相关层面,45.71%的种对(48对)为不显著正相关,极显著正相关的种对仅2个,占比为1.90%;显著正相关的种对5个,占比4.76%,例如,粗壮嵩草与喜马拉雅嵩草为极显著正相关,高山嵩草与丝颖针茅为显著负相关。在负相关层面,42.86%的种对(45对)为不显著负相关;显著负相关的种对5个,占比4.76%;无显著负相关的种对,例如,高山嵩草与白草为显著负相关,显著正相关(含极显著)与显著负相关(含极显著)比值为1.4:1,草本层物种间的资源竞争较为

明显。

2.3.3 AC联结系数分析 AC联结系数整体趋势与 χ^2 检验结果一致,物种间以不显著关系为主,灌木层强正相关(含次强正相关)大于草本层,进一步验证了灌木层物种资源利用的整体共生趋势(图4、图5)。其中,3.81%的种对(4对)为强正相关联结($0.67 \leq AC$);14.29%的种对(15对)为次强正相关联结($0.33 \leq AC < 0.67$);31.43%的种对(33对)为较弱正相关联结($0 \leq AC < 0.33$)。负联结方面,强负相关($AC < -0.67$)种对最多,为38对,占总对数的36.19%;4.76%的种对(5对)为次强负相关联结($-0.67 \leq AC < -0.33$);9.52%的种对(10对)为较弱负相关联结($-0.33 \leq AC < 0.00$)。

表 2 灌木层优势物种生态位重叠指数

Table 2 Niche overlap index of dominant species in shrub layer

	BA	CP	PP	RP	SM	SO	SA	IP	CJ	CE	RS	CM	RO	MK	RM
BA	1.00														
CP	0.20	1.00													
PP	0.14	0.05	1.00												
RP	0.00	0.00	0.21	1.00											
SM	0.15	0.00	0.21	0.19	1.00										
SO	0.00	0.00	0.22	0.47	0.39	1.00									
SA	0.00	0.00	0.26	0.29	0.37	0.80	1.00								
IP	0.31	0.00	0.35	0.00	0.66	0.00	0.00	1.00							
CJ	0.13	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.27	1.00						
CE	0.03	0.00	0.23	0.17	0.19	0.63	0.91	0.05	0.00	1.00					
RS	0.24	0.00	0.08	0.23	0.24	0.20	0.22	0.07	0.32	0.16	1.00				
CM	0.13	0.00	0.13	0.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	1.00			
RO	0.61	0.00	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	0.19	0.54	0.01	0.24	0.06	1.00		
MK	0.26	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.26	0.74	0.02	0.33	0.08	0.72	1.00	
RM	0.07	0.00	0.19	0.21	0.92	0.38	0.30	0.58	0.00	0.06	0.11	0.00	0.00	0.00	1.00

表 3 草本层优势物种生态位重叠指数

Table 3 Niche overlap index of dominant species in herbaceous layer

	CA	SC	PF	CC	CD	EM	CK	PS	CS	AM	LD	GU	PH	TA	LT
CA	1.00														
SC	0.72	1.00													
PF	0.18	0.19	1.00												
CC	0.53	0.70	0.34	1.00											
CD	0.69	0.36	0.13	0.51	1.00										
EM	0.35	0.07	0.09	0.03	0.20	1.00									
CK	0.35	0.23	0.01	0.04	0.04	0.28	1.00								
PS	0.78	0.68	0.28	0.53	0.41	0.24	0.35	1.00							
CS	0.27	0.00	0.00	0.00	0.09	0.57	0.26	0.16	1.00						
AM	0.39	0.38	0.58	0.26	0.30	0.29	0.26	0.43	0.24	1.00					
LD	0.63	0.80	0.27	0.67	0.46	0.24	0.03	0.44	0.12	0.30	1.00				
GU	0.60	0.54	0.33	0.70	0.63	0.18	0.18	0.52	0.26	0.40	0.40	1.00			
PH	0.46	0.25	0.04	0.31	0.60	0.01	0.32	0.32	0.00	0.17	0.08	0.54	1.00		
TA	0.37	0.09	0.05	0.06	0.23	0.06	0.09	0.51	0.00	0.01	0.05	0.03	0.12	1.00	
LT	0.21	0.41	0.18	0.53	0.03	0.06	0.59	0.55	0.00	0.23	0.14	0.39	0.41	0.03	1.00

草本层正联结方面,显著负相关种对数量大于显著正相关,群层倾向于排斥关系。其中,8.57%的种对(9对)为强正相关联结($0.67 \leq AC$);4.76%的种对(5对)为次强正相关联结($0.33 \leq AC < 0.67$);较弱正相关($0 \leq AC < 0.33$)种对最多,有37对,占总对数的35.24%。负联结方面,14.29%的种对(15对)为强负相关联结($AC < -0.67$);13.33%的种对(14对)为次强负相关联结($-0.67 \leq AC < -0.33$);23.81%的种对(25对)为较弱负相关联结($-0.33 \leq AC < 0.00$)。

2.3.4 Spearman 秩检验分析 研究区内灌木层和草本层的Spearman秩相关性检验结果显示,优势种之间的种间联结以不显著关联为主,与 χ^2 检验结果

基本一致(图6、图7)。83.81%的灌木层种对为不显著关联,显著率为16.19%,具体表现为,极显著($P < 0.001$)正相关3对,包括樱草杜鹃(*Rhododendron primuliflorum*)与小叶金露梅、毛叶绣线菊(*Spiraea mollifolia*)与川藏香茶菜(*Isodon pharicus*)等;无极显著负相关;显著正负相关种对分别为12对和2对,例如:近似小檗与樱草杜鹃、窄叶鲜卑花(*Sibiraea angustata*)与小叶栒子(*Cotoneaster microphyllus*)等为显著正相关,毛叶绣线菊与近似小檗显著负相关等。88.57%的草本层种对为不显著关联,显著率为11.43%,其中:极显著正相关($P < 0.001$)仅有1对,为高山嵩草与大花嵩草;无极显著负相关;显著正负相关($P < 0.05$)种对分别为5对和6对,如白草(*Pen-*

2.4 灌木草本层群落稳定性分析

为进一步验证灌木草本层的种间联结关系,对两群层的群落稳定性进行拟合分析(图8),可以看出,决定系数 R^2 分别为91.61%和97.37%,两群层拟合效果都较为理想,稳定性模型 $y=100-x$ 与灌木层非线性拟合方程 $y=-0.012x^2+1.758x+36$ 相交于(25.61,74.33),与草本层非线性拟合方程 $y=-0.009x^2+1.867x+8$ 相交于(36.71,64.53),灌木层与理论稳定点(20,80)的欧式距离分别为7.98,22.77,灌木层稳定性优于草本层,表明灌木层总体处于稳定状态,草本层远离理论稳定点(20,80),表明草本层处于不稳定状态。

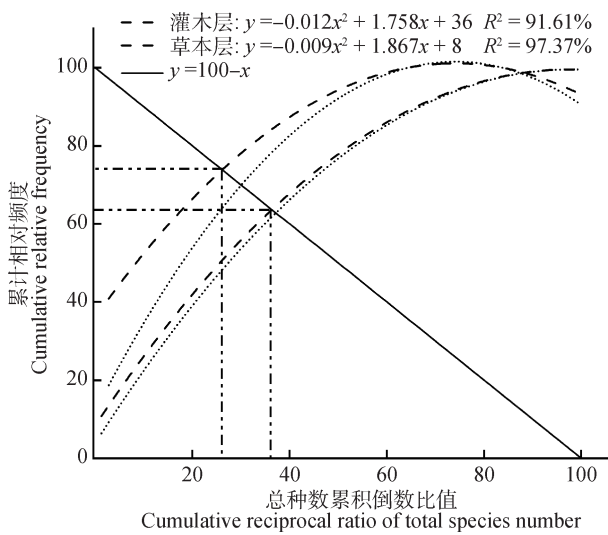


图8 灌木草本层群落稳定性分析

Fig. 8 Analysis of community stability in the shrub-herb layer

3 讨论

3.1 灌草层生态位特征分析

生态位宽度与重要值指数两者之间的关系在不同生态系统和环境条件下表现出显著的动态性和复杂性,生态位宽度是解释物种重要性的基础维度,但需结合物种特化策略、环境斑块化程度及生长型差异进行多维解析^[25-27]。数据分析表明生态位宽度与重要值呈现显著的正相关趋势,表明物种对资源的利用范围与其在群落中的优势地位密切相关,例如,灌木层的近似小檗和草本层的高山嵩草分别以最高Levins指数和重要值成为绝对优势种,说明其通过广泛的生态位分化占据了核心资源,这种模式符合经典生态位理论,即生态位越宽的物种越能适应异质性环境,从而在竞争中获得更高的资源占有率^[28-29],这与卢燕等^[30]在天山荒漠、雷德芳

等^[31]在黔中喀斯特地区环境异质性地区物种生存策略研究结论一致。研究区地位于西藏高寒地区,物种的生长特性与资源的利用等原因,使得部分物种表现出生态位宽度与重要值的非对称性,这与方江平等^[32]在西藏色季拉山高寒草甸研究结论类似,例如,灌木层的宽刺绢毛蔷薇重要值为0.84,但Levins指数较高达5.42,这与其在特定微生境的高效资源利用有关,类似地,草本层的钉柱委陵菜以低重要值指数实现高Levins值,其可能依赖局部土壤养分或微气候条件形成优势,这种现象支持“生态位保守性假说”,即某些物种通过特化策略在有限资源空间中维持高竞争力,反映了高寒草甸群落对极端环境的适应性响应机制^[33-35]。

3.2 灌木草本层生态位重叠指数分析

从生态位重叠指数来看,灌木层整体重叠程度较低,平均值仅为0.18,显示出较高的生态位差异性,灌木植物种间资源利用分化明显,能够通过生态位分化有效避免直接竞争,形成相对稳定的资源分配格局,这与熊梅等^[36]在荒漠草原的物种生存策略研究结果一致。由于高寒地区资源空间斑块化、高异质性的环境条件,灌木植物在垂直结构与时间利用上体现出明显的资源隔离策略。王净杰等^[37]对拉萨河中下游湿地的研究表明,狭域分布物种常通过特化根系分布策略在局部微生境形成优势,这与本研究中宽刺绢毛蔷薇的生态位保守性现象一致。然而,在少数物种对中也表现出显著重叠现象,如架棚与窄叶鲜卑花之间重叠指数高达0.91,但两者Levins值与重要值较低,说明虽然它们资源利用范围较窄,却与多个物种在相似生态位上存在竞争关系,此类“高重叠-低重要性”的物种组合反映了对非优势资源的“边缘竞争”,提示这类物种面临生存压力更大、更新能力更弱等生态瓶颈。

草本层的生态位重叠指数则明显偏高,均值为0.22,有24个物种对的 O_{ik} 值大于0.50,表明物种之间在资源需求结构上存在显著交叉,但也可在垂直层次或利用时间上实现差异化协同,从而缓解了资源直接冲突,这种“竞争-共存”并存模式正是生态位理论中“资源补偿”机制的体现,即通过生态位维度的微调使物种得以长期共存^[38-39]。进一步将拉萨河流域湿地生态位重叠指数与其他类型生态系统进行对比分析发现,Fargione等^[40]在北美温带草原系统中研究显示,由于土壤剖面中水分与养分分布

相对均一,物种在水分、氮素等关键资源上表现出较高的资源共享倾向,促进了生态位重叠的提升,而MacDougall等^[41]在澳大利亚热带稀树草原研究中发现,强烈的季节性干扰与空间异质性导致植物在微生境中的资源占据差异显著,物种间更倾向于构建资源隔离机制,以降低直接竞争。相较之下,本研究中灌木层与草本层表现出“中度生态位重叠-适度资源共享”的特征,说明高寒湿地系统在水热条件受限、资源空间复杂背景下,物种间既需协同提升系统资源利用率,又必须维持一定的生态位分化以缓冲竞争压力。与热带或温带系统相比,高寒湿地的生态位重叠策略反映出一种“竞争-互补并存”的权衡适应机制,即通过形成局部生态位重叠提升系统稳定性功能,但避免大范围重叠造成竞争垄断,这也提示在后续保护实践中,应重视中度生态位重叠下的功能冗余群体构建,以增强群落的生态弹性与长期稳定性。

3.3 种间联结分析

灌草层种间联结研究通过整合 χ^2 检验、AC联结系数与Spearman秩检验分析,构建了种间关联的“统计显著性-生态关联强度-空间协同性”三维分析体系,三类方法在数据特征表现上呈现梯度性差异: χ^2 检验基于二元存在/缺失数据识别显著关联种对,AC系数通过连续变量量化种间相互作用强度,Spearman秩检验则基于物种多度秩次揭示非线性关联模式,这种多维验证不仅提高了结论的可靠性,更通过方法间的交叉验证揭示了高寒植物群落构建的深层机制^[42-43]。

三种方法均一致显示研究区群落以种间不显著关联为主,验证了大部分物种生态位相对独立的核心结论。 χ^2 检验的显著率与Spearman秩检验分析的显著率高度吻合,表明物种间缺乏普遍的关联性,在两种检验方法中,灌木群层显著正相关(含极显著正相关)种对数量均大于显著负相关数量,与Hu等^[44]在西藏唐古拉地区研究结论一致,表明灌木层中物种间协同关系紧密,在生态功能互补、资源共享等方面表现更突出。但与AC联结系数存在一定差异,灌木草本层的强负联结为38对和15对,远远大于 χ^2 检验与Spearman秩检验分析结果,导致这种现象发生的原因有以下几种,(1)由于研究区位于高寒地区,海拔4000 m左右,物种稀少及分布不密集,那么物种之间要建立起强正相关联系就会

变得十分困难;(2)在资源匮乏以及分布不均的地区,物种间对资源的竞争加剧,AC联结系数能量化这种因资源竞争产生的负向作用强度,而 χ^2 检验只判断是否显著共存或排斥,忽略强度差异,Spearman秩检验分析更关注单调趋势一致性,对这种因资源异质性引发的复杂负向作用可能不敏感^[16,30];(3) χ^2 检验基于物种存在/缺失的二元数据统计显著性,但忽略作用强度,直接量化种间作用强度,存在 $a=0$ 的现象,就判定为显著负联结,更易检测负向作用的“强度事实”^[45]。

3.4 群落稳定性分析

通过群落稳定性拟合分析进一步揭示群落结构特征,灌木层与草本层的高决定系数,证实模型对两群落稳定性特征的有效刻画。稳定性模型 $y=100-x$ 与灌木层非线性方程交于(25.61,74.33),与草本层方程交于(36.71,64.53),草本层显著偏离理论稳定点(20,80),其处于不稳定状态,灌木层与稳定点(20,80)的欧式距离为7.98,距离较近,处于群落演替的中期阶段,与周华坤等^[46]在青藏高原高寒草甸的研究结论类似,从生态位理论视角解读,草本层群落拟合交点远离稳定点,本质是生态位分化不完全的外在表现^[16,25,31],这与种间关联分析结果形成机制呼应,草本层显著正相关与负相关之间的差异性较小,共生与竞争共存,反映物种间资源竞争激烈,这种高强度竞争打破群落平衡,致使稳定性模型交点偏离稳定区,群落内物种相互作用未达平衡,协同关系不足以抵消局部竞争压力,最终导致群落稳定性失衡。

4 结论

本研究聚焦黑颈鹤国家级自然保护区湿地,解析草本、灌木层生态位、种间关系与群落稳定性:草本层凭广生态位适配高寒环境,但资源强竞争致稳定性弱;灌木层借生态位精准分化、资源利用均衡化,构建更具韧性的稳定群落,揭示“生态位分化程度-群落稳定性”正相关调控关系。建议调控草本层稳定性短板,明确湿地生态修复方向,即人工科学促进生态位分化(如着重把握正联结的共生种对关系)、缓解资源竞争压力,为应对气候变化下群落演替管理提供“靶向干预”依据,凸显保护灌木群落对维持湿地生态基底的重要性,助力完善保护区

管理体系,丰富极端环境群落生态学理论,为全球变化下高寒湿地脆弱性评估、韧性提升提供本土支撑,推动相关理论深化拓展。

参考文献

- [1] 尹正辉,陈新丰,拉多.模拟增温和放牧对高寒草甸主要植物生态位及种间联结的影响[J].草地学报,2023,31(5):1302-1313
YIN Z H, CHEN X F, LA D. Analysis on the niche and interspecific association of dominant plant species in alpine meadow under simulated warming and grazing[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(5):1302-1313
- [2] 占玉芳,马力,李小燕,等.黑河流域(张掖段)湿地植物群落优势种群生态位[J].东北林业大学学报,2015,43(1):43-47
ZHAN Y F, MA L, LI X Y, et al. Niches of dominant populations of wetland plants in Zhangye section of Heihe River[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(1):43-47
- [3] 刘济明,刘欢,李丽霞.米蒿群落主要物种资源利用特征分析[J].植物研究,2021,41(3):380-386
LIU J M, LIU H, LI L X. Resource utilization characteristics of dominant species in Cinnamomum migao community[J]. Bulletin of Botanical Research, 2021, 41(3):380-386
- [4] 俞昀,白小军,王志一.大兴安岭次生林区不同龄级落叶松(*Larix gmelinii*)生态位特征和竞争关系[J].生态学报,2022,42(12):4912-4921
YU Y, BAI X J, WANG Z Y. Niche characteristics and competitive relationship of *Larix gmelinii* between different age classes in Greater Khingan Range secondary forest area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12):4912-4921
- [5] 李子涵,赵悦悦,吴爽,等.北京四座楼市级自然保护区落叶阔叶林优势种生态位及种间联结分析[J].植物资源与环境学报,2025,34(4):83-94
LI Z H, ZHAO Y Y, WU S, et al. Analysis on niche and interspecific association of dominant species in deciduous broad-leaved forest of Beijing Sizuolou Municipal-level nature reserve[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2025, 34(4):83-94
- [6] 晏昕辉,拓行行,李美慧,等.宁夏云雾山典型草原半灌木扩张过程中植物种间联结性研究[J].草地学报,2023,31(1):230-238
YAN X H, TUO H H, LI M H, et al. Interspecific association of plants in the process of the subshrub expansion in typical steppe of Yunwu Mountain, Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(1):230-238
- [7] 祁旭阳,王欣雨,尹子鸣,等.长时间尺度草地物种多样性-群落稳定性关系及机制[J].草地学报,2025,33(4):1239-1248
QI X Y, WANG X Y, YIN Z M, et al. Relationship and mechanism between species diversity and community stability in long-term grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(4):1239-1248
- [8] 李丹阳,吕宝磊,姜雨,等.抚育间伐对塞罕坝自然保护区人工林植被生态位特征和种间关联性的影响[J].干旱区资源与环境,2025,39(1):139-149
LI D Y, LÜ B L, JIANG Y, et al. Influence of tending thinning on niche characteristics and interspecific association of planted forest vegetation in saihanba nature reserve[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2025, 39(1):139-149
- [9] 蔡京勇,郑德国,罗刚,等.锐齿槲栎群落乔灌木层优势种生态位及群落稳定性[J].湖南生态科学学报,2023,10(4):34-42
CAI J Y, ZHENG D G, LUO G, et al. Niche and community stability of dominant species in the tree-shrub-grass layer of *Quercus aliena* var. *acutiserrata* community[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2023, 10(4):34-42
- [10] WANG S, ISBELL F, DENG W, et al. E. How complementarity and selection affect the relationship between ecosystem functioning and stability[J]. Ecology, 2021, 102(12): e03347
- [11] GODOY O, GÓMEZ-APARICIO L, MATÍAS L. An excess of niche differences maximizes ecosystem functioning[J]. Nature Communications, 2020, 11:4312
- [12] 曹晟烜,黄运腾,罗真,等.福建海岛车桑子灌丛群落生态位特征及环境对其影响[J].东北林业大学学报,2025,53(4):88-98
CAO S X, HUANG Y T, LUO Z, et al. Analysis on niche characteristics of *dodonaea viscosa* shrub communities in fujian islands and environmental impacts on them[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(4):88-98
- [13] 姜海霞,郭东昌,刘曼红,等.中央站黑嘴松鸡国家级自然保护区大型底栖动物多样性和生态位研究[J].湿地科学,2024,22(4):508-517
JIANG H X, GUO D C, LIU M H, et al. Study on diversity and niche of macrozoobenthos in Zhongyangzhan Black-billed capercaillie national nature reserve[J]. Wetland Science, 2024, 22(4):508-517
- [14] 刘敏杰,李华军.西藏雅鲁藏布江中游河谷黑颈鹤国家级自然保护区珍稀野生动植物资源与保护[J].中南林业调查规划,2020,39(2):57-61
LIU M J, LI H J. Rare wildlife resources and their protection in the black-necked crane national nature reserve in the middle reaches valley of the Yarlung Zangbo River, Xizang[J]. Journal of Central South Forest Inventory and Planning, 2020, 39(2):57-61
- [15] 王涛,沈渭寿.雅鲁藏布江黑颈鹤越冬地气温时空变化特征[J].生态学报,2020,40(11):3560-3570
WANG T, SHEN W S. The temporal and spatial changes of temperature in Black-necked Crane over wintering area of Yarlung Zangbo River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11):3560-3570
- [16] 张金屯.数量生态学[M].第3版.北京:科学出版社,2018:13-216
ZHANG J T. Quantitative ecology[M]. 3rd Edition. Beijing: Science Press, 2018:13-216

- [17] LEVINS R. Evolution in changing environments: some theoretical explorations [M]. Princeton: Princeton University Press, 1968: 32-120
- [18] SILVERTOWN J, DODD M, GOWING D. Hydrological niches in terrestrial plant communities: A review[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 103(1): 93-108
- [19] SCHOENER T W. Resource partitioning in ecological communities: research on how similar species divide resources helps reveal the natural regulation of species diversity [J]. *Science*, 1974, 185(4145): 27-39
- [20] PIANKA E R. The structure of lizard communities [J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 1973, 4(1): 53-74
- [21] SCHLUTER D. A variance test for detecting species association, with some example applications. *Ecology*, 1984, 65(3): 998-1005
- [22] 阿拉姆, 尹正辉, 李森, 等. 拉萨河流域沼泽湿地优势草本生态位及种间联结分析[J]. *草地学报*, 2025, 33(8): 2666-2676
ALAM, YIN Z H, LI S, et al. Analysis on niche and interspecific association of dominant herbs in swamp wetlands of the Lhasa River Basin [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(8): 2666-2676
- [23] 陈丽华, 赵志刚, 周敏. 南京外秦淮河草本植物群落生态位与种间联结性[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(6): 203-211
CHEN L H, ZHAO Z G, ZHOU M. Niche and interspecific association of herbaceous plant communities in the outer Qinhuai River of Nanjing [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2023, 47(6): 203-211
- [24] 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
- [25] 杜忠毓, 邢文黎, 薛亮, 等. 喀斯特石漠化锑矿区植物群落主要物种生态位特征及其种间联结[J]. *生态学报*, 2023, 43(7): 2865-2880
DU Z Y, XING W L, XUE L, et al. Niche characteristics of main species in plant communities and their interspecific association in antimony mining areas with karst rocky desertification [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7): 2865-2880
- [26] 李振基. 群落生态学[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 27-28, 247-258
LI Z J. Community ecology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001: 27-28, 247-258
- [27] 宋红艳, 孙彩丽, 柴宗政. 黔西北铅锌矿废渣场优势草本植物种群生态位及种间关系[J]. *草地学报*, 2022, 30(10): 2764-2771
SONG H Y, SUN C L, CHAI Z Z, et al. Niche and interspecific relationships of dominant herbaceous plant populations in lead-zinc mine waste dumps in Northwest Guizhou [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(10): 2764-2771
- [28] 史浩伯, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河下游植被种间关系与稳定性分析[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(1): 220-226
SHI H B, CHEN Y N, LI W H, et al. Interspecific association and stability of vegetation in the lower reaches of the Tarim River [J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(1): 220-226
- [29] 孙舰, 朱熙栋, 蔡新成, 等. 施肥补播对高寒草甸植物群落稳定性及种间关系的短期影响[J]. *草地学报*, 2026, 34(1): 275-286
SUN J, ZHU X D, CAI X C, et al. Short-term effects of fertilization and reseeding on plant community stability and interspecific relationships in alpine meadows [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2026, 34(1): 275-286
- [30] 卢燕, 吴万平, 曾勇. 天山北麓绿洲荒漠过渡带优势植物的生态位特征与种间联结[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(2): 254-3263
LU Y, WU W P, ZENG Y. Niche characteristics and interspecific association of dominant plants in the oasis-desert ecotone on the northern foot of the Tianshan Mountains [J]. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(2): 254-3263
- [31] 雷德芳, 王志杰. 黔中喀斯特地区马尾松群落主要物种种间联结、生态位及群落稳定性特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5521-5530
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
- [32] 方江平, 卢杰, 罗建, 等. 高寒植物长鞭红景天种群生态位研究[J]. *西藏农业科技*, 2009, 31(5): 2027-2031
FANG J P, LU J, LUO J, et al. Study on the ecological niche of psychrophyte *Rhodiola fasitiata* population [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(5): 2027-2031
- [33] BAI Y, WU J, CLARK C M, et al. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland [J]. *Nature*, 2004, 431(7005): 181-184
- [34] 高亮, 江子涵, 洪子辰, 等. 武夷山国家公园甜槠林主要树种生态位与种间联结分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2024, 33(6): 65-73
GAO L, JIANG Z H, HONG Z C, et al. Analysis on niche and interspecific association of main tree species in *castanopsis eyrei* forest of Wuyi Mountain National Park [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2024, 33(6): 65-73
- [35] 高永恒, 曾晓阳, 周国英, 等. 长江源区高寒湿地植物群落主要种群种间关系分析[J]. *湿地科学*, 2011, 9(1): 1-7
GAO Y H, ZENG X Y, ZHOU G Y, et al. Interspecific relationships of dominant populations in the alpine wetlands in the source region of Yangtze River [J]. *Wetland Science*, 2011, 9(1): 1-7
- [36] 熊梅, 安海波, 赵萌莉, 等. 放牧对荒漠草原主要植物种群空间格局与生态位的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(4): 1177-1183
XIONG M, AN H B, ZHAO M L, et al. Influence of grazing on spatial pattern and niche of main plant populations in desert steppe [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(4): 1177-1183
- [37] 王净杰, 朱建航, 高鑫, 等. 拉萨河中下游典型湿地植物物种多样性及种间联结性分析[J]. *草地学报*, 2024, 32(3): 918-927

- WANG J J, ZHU J H, GAO X, et al. Analysis on plant species diversity and interspecific association of typical wetlands in the middle and lower reaches of the Lhasa River [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(3): 918-927
- [38] 何江,徐来仙,艾训儒,等. 星斗山天然次生林优势种的生态位和种间联结动态[J]. *林业科学研究*, 2024, 37(1): 171-182
- HE J, XU L X, AI X R, et al. Dynamics of niche and interspecific association of dominant species in natural secondary forest of Xingdou Mountain[J]. *Journal of Forestry Research*, 2024, 37(1): 171-182
- [39] 刘雨婷,侯满福,贺露炎,等. 滇东菌子山喀斯特森林群落乔木优势树种生态位和种间联结[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(7): 1771-1778
- LIU Y T, HOU M F, HE L Y, et al. Niche and interspecific association of dominant tree species in karst forest of Junzi Mountain, Eastern Yunnan, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(7): 1771-1778
- [40] FARGIONE J E, TILMAN D. Diversity decreases invasion via both sampling and complementarity effects [J]. *Ecology Letters*, 2005, 8(6): 604-611
- [41] MACDOUGALL A S, GILBERT B, LEVINE J M. Plant invasion and the niche[J]. *Journal of Ecology*, 2009, 97(4): 609-615
- [42] 吴明江,邱娟,郑凤,等. 新疆野果林灌木物种多样性与生态位研究[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(12): 2094-2109
- WU M J, QIU J, ZHENG F, et al. Study on shrub species diversity and niche of Xinjiang Wild Fruit Forest[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(12): 2094-2109
- [43] 张忠华,胡刚. 喀斯特山地青冈栎群落优势种的种间关系分析[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(S2): 1209-1213
- ZHANG Z H, HU G. Interspecific relationship analysis of dominant species in *Quercus Cyclobalanopsis* community in karst mountain area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(S2): 1209-1213
- [44] HU Y, WANG H. C, JIA H, et al. Ecological niche and interspecific association of plant communities in alpine desertification grasslands: A case study of Qinghai Lake Basin [J]. *Plants (Basel)*, 2022, 11(20): 2724
- [45] 胡宁宁,崔雨昕,孙萌,等. 秦岭西段典型森林群落灌木层优势种群生态位与种间联结[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(12): 3595-3604
- HU N N, CUI Y X, SUN M, et al. Niche and interspecific association of dominant populations in the shrub layer of typical forest communities in the western section of the Qinling Mountains [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(12): 3595-3604
- [46] 周华坤,周立,赵新全,等. 青藏高原高寒草甸生态系统稳定性研究[J]. *科学通报*, 2006, 51(1): 63-69
- ZHOU H K, ZHOU L, ZHAO X Q, et al. Study on the stability of alpine meadow ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(1): 63-69

(责任编辑 刘婷婷)