

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.027

引用格式:付本艺,马颖,仁青拉姆,等.拉萨河流域黑颈鹤自然保护区维管植物群落分类与排序研究[J].草地学报,2026,34(4):1458—1470

FU Ben-yi, MA Ying, LAMU Ren-qing, et al. Study on Classification and Ordination of Vascular Plant Communities in the Black-Necked Crane National Nature Reserve of the Lhasa River Basin[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4): 1458—1470

拉萨河流域黑颈鹤自然保护区维管植物群落分类与排序研究

付本艺^{1,2,3}, 马颖^{2,3,4}, 仁青拉姆⁵, 杨小菊^{1,2,3}, 罗大庆^{1,2,3}, 屈兴乐^{1,2,3*}

(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. 青藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000; 4. 山东省济宁市兖州区第六中学, 山东 济宁 272000; 5. 西藏自治区阿里生态环境监测中心, 西藏 阿里 859000)

摘要:为明确拉萨河流域黑颈鹤自然保护区野生维管植物群落结构、分布格局及其与环境因子的关系,研究于2022—2023年对保护区进行野外调查,采用 TWINSpan 分类、CCA 排序、多样性指数分析等方法,系统探讨了群落类型划分、空间分布特征、环境驱动机制及与黑颈鹤栖息地的耦合关系。结果表明,研究区共记录野生维管植物 34 科 83 属 114 种,以双子叶草本植物为主体。TWINSpan 将群落划分为 7 个类型,其中群落以草本植物构成为主,乔木植物较少。CCA 排序显示,经度、年均降水量、坡度和坡向是驱动群落分布的关键环境因子。多样性分析显示,Shannon-Wiener 指数(1.31~2.95)和 Simpson 指数(0.37~0.99)在群落间差异显著($P < 0.05$)。Mantel-test 检验证实年均降水量对 Pielou 均匀度指数和 Shannon-Wiener 指数影响最大。RDA 分析进一步量化表明,经度、年均降水量、坡向和坡度为调控群落多样性的核心因子,其中 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数与年均降水量相关性较强,Simpson 指数对经度梯度响应显著。研究结果揭示了高原湿地植物群落对水热梯度的适应模式,为黑颈鹤栖息地保护及湿地生态系统管理提供了理论依据。

关键词:黑颈鹤自然保护区;数量分类;排序;群落多样性;环境因子

中图分类号:S812.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1458-13

Study on Classification and Ordination of Vascular Plant Communities in the Black-Necked Crane National Nature Reserve of the Lhasa River Basin

FU Ben-yi^{1,2,3}, MA Ying^{2,3,4}, LAMU Ren-qing⁵, YANG Xiao-ju^{1,2,3}, LUO Da-qing^{1,2,3}, QU Xing-le^{1,2,3*}

(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. Yanzhou District No. 6 Middle School, Jining City, Shandong Province, Ali, Xizang 27200, China;
5. Ali Ecological and Environmental Monitoring Center of Xizang Autonomous Region, Ali, Xizang 859000, China)

Abstract: To clarify the community structure, distribution pattern of wild vascular plants in wetlands of the National Nature Reserve for Black-necked Cranes in the Lhasa River Basin and their relationship with environmental factors, the study conducted field surveys on 23 typical plots in the reserve from 2022 to 2023, using methods such as TWINSpan classification, CCA ordination, and diversity index analysis, to systematically

收稿日期:2025-05-13;修回日期:2025-09-18

基金项目:西藏农牧大学林学博士点(一期)(533325001)资助;2023年西藏自治区拉萨市、日喀则市生态质量样地生态地面监测(603323087);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK1006)资助

作者简介:付本艺(1999-),男,汉族,硕士研究生,主要从事植物生理学、群落生态学方向研究,E-mail:438524206@qq.com;*通信作者 Author for correspondence,E-mail:1318266529@qq.com

investigate community type classification, spatial distribution characteristics, environmental driving mechanisms, and the coupling relationship with black-necked crane habitats. Results showed that a total of 114 species of wild vascular plants belonging to 83 genera and 34 families were recorded in the study area, with dicotyledonous herbs as the main components; TWINSpan classified the communities into 7 types, among which the communities were mainly composed of herbaceous plants, with fewer arbor plants. CCA ordination indicated that longitude, mean annual precipitation, slope gradient, and slope aspect were the key environmental factors driving community distribution. Diversity analysis showed that the Shannon-Wiener index (1.31-2.95) and Simpson index (0.37-0.99) were significantly different among communities ($P < 0.05$), and the Mantel-test confirmed that mean annual precipitation had the most significant impact on the Pielou evenness index and Shannon-Wiener index. Further quantification by RDA analysis showed that longitude, mean annual precipitation, slope aspect, and slope gradient were the core factors regulating community diversity. Among them, the Shannon-Wiener index and Pielou index were positively correlated with mean annual precipitation, and the Simpson index responded significantly to the longitude gradient. The results revealed the adaptation patterns of plateau wetland plant communities to hydrothermal gradients, providing a theoretical basis for the protection of black-necked crane habitats and wetland ecosystem management.

Key words: Black-necked crane national nature reserve; Quantitative classification; Ordination; Community diversity; Environmental factors

植物群落分类、排序与多样性研究是植被生态学的基础课题之一,在揭示群落结构演替规律、环境响应机制和生态系统功能方面发挥着重要作用^[1]。分类旨在根据植物种类组成、优势度和群落结构等特征,将群落划分为若干生态上同质的单元^[2];排序则通过降维数学模型揭示植物群落与环境变量之间的梯度关系,识别限制种群分布的关键因子^[3];群落多样性分析则通过丰富度指数、均匀度指数及优势度指数等,定量评估生态系统的复杂性与稳定性。这三类方法的协同应用,已成为生态系统状态评估、保护单元划分及退化植被恢复路径制定的重要理论工具^[4]。

拉萨河流域位于青藏高原腹地,是连接喜马拉雅山系与藏南河谷的重要生态廊道,其黑颈鹤自然保护区生态系统不仅在区域水源涵养、气候调节和地貌稳定中发挥着核心作用,更是多种高原特有物种的重要生境^[5]。国家一级保护动物黑颈鹤(*Grus nigricollis*)的主要越冬与觅食区域,分布在该流域中下游的典型高寒黑颈鹤自然保护区中,该区域植被类型复杂,微地形多变,为植物群落的形成与演替提供了丰富的自然条件。近年来已有学者对西藏及其周边地区植被进行分类与排序研究,如拉琼等^[6-7]对拉萨河下游区域和葛青松等^[8]对拉萨河中游的研究排序结果清晰揭示了地形、经度分布对群落分异的主导作用。但在具体到保护区核心区域的野生维管植物群落结构、分布格局及其环境响应机制方面仍缺乏系统性的实地数据支撑和深入分析。特别是在生态保护逐渐向科学化和

精细化方向转变的背景下,通过植被信息揭示生态系统变化趋势、指导保护区分区管理,成为亟需解决的关键问题。基于此,本研究以拉萨河流域黑颈鹤国家级自然保护区为对象,开展野生维管植物群落的实地调查与样地采集工作,结合多种定量方法,系统划分群落类型、解析其空间分布格局,并评估群落多样性指数与环境因子之间的响应关系。研究旨在回答以下核心问题:黑颈鹤自然保护区植物群落可划分为哪些基本类型,其空间分布格局有何特征?哪些环境因子在主导群落结构和群落多样性方面起关键作用?群落类型的分布是否与黑颈鹤的典型栖息地存在耦合关系?研究结果可进一步丰富黑颈鹤自然保护区植物生态研究成果,强化保护区的科学管理,为珍稀水鸟栖息地的保护修复提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区基础概况

研究区位于西藏中部、拉萨河上游以及澎波河流域的西藏雅江中游河谷黑颈鹤国家保护区,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℃,降水主要集中在夏季6—8月,年降水量约491 mm,为保护区主要补水时间周期,日照时数接近3000 h。平均海拔3900 m,该区域日温差显著,太阳辐射强烈,年日照时数接近3000 h。平均海拔高达3900 m,属于典型的高原温带半干旱高原季风气候区。黑颈鹤自然保护区水源以拉萨河支

流补给为主,土壤类型为高寒沼泽土与草甸土^[9]。

1.2 研究方法

2022—2023年6—8月,分2次对黑颈鹤国家自然保护区进行野外调查,根据标准调查方法,采用样地调查以及踏查相结合的调查方法。按照生境类型全覆盖、地形梯度代表性、黑颈鹤频繁生存地区关联性3个基本原则,共设置23个样地。由于研究区位于高寒地区,地形复杂,乔木层物种较少,分布范围有限,乔木样地设置为20 m×20 m的调查样方,每个乔木样地内嵌套1个5 m×5 m的灌木调查样方,每个灌木样地内嵌套1个1 m×1 m草本调查

样方,其余无乔木存在的灌木草本群落则在每个样地设置1条50 m的样线,端点处设置1个5 m×5 m的灌木样方,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、多度、高度、盖度等指标,同时记录每个样方的经纬度、海拔、坡向(按最多光照到最低光照赋值)、坡度等地理信息。研究区为国家保护区,无放牧、旅游等人为干扰,仅存在少量科研调查活动,整体保持自然生态状态。通过世界气候数据库(<http://www.worldclim.org>)以及使用ArcMap 10.8根据样地经纬度获得相应的气候数据。

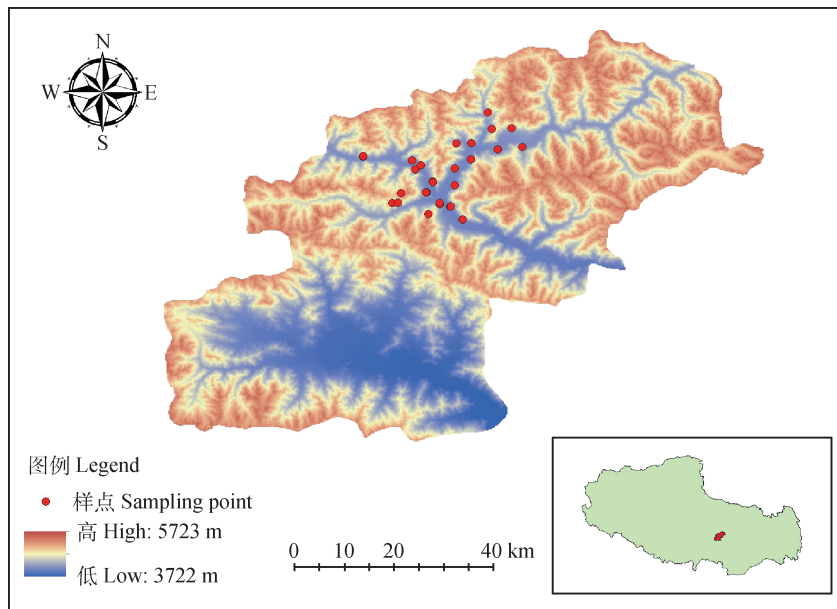


图1 研究区概况图

Fig 1 Overview of the study area

注:审图号,GS(2024)0650,底图无修改

Note: Map Approval Number, GS(2024)0650. No modifications were made to the base map

1.3 数据统计分析

计算每个样方中各物种的重要值、每个群落的Gleason物种丰富度、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson多样性指数和Pielou均匀度指数^[10]。

草本/灌木重要值=

(相对多度+相对高度+相对盖度)/3

乔木重要值=

(相对多度+相对频度+相对优势度)/3

$$\text{Gleason} = \frac{S}{\ln A} \quad (1)$$

$$\text{Shannon-Wiener} = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i \quad (2)$$

$$\text{Simpson} = 1 - \sum_{i=1}^S p_i^2 \quad (3)$$

$$\text{Pielou} = \frac{-\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i}{\ln S} \quad (4)$$

式中:S代表群落中的物种数量,A代表样方面积,而 p_i 则是指群落中第*i*个物种的个体数量。

1.4 环境变量标准化及共线性计算方法

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \quad (5)$$

$\bar{x}_j$ 环境变量标准化采用Z-标准化方法^[11],其中 x_{ij} 是第*i*个样本第*j*个环境变量的原始值, s_j 是第*j*

个环境变量的均值, s_j 是第 j 个环境变量的标准差。通过该标准化,可消除不同

量纲、数量级环境变量对分析结果的干扰,使各变量在相同尺度参与计算。

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \tag{6}$$

对环境因子之间通过构建回归分析进行共线性检测,计算方差膨胀因子(VIF)。其中, R^2 为决定系数, R_j^2 表示第 j 个环境因子的决定系数。当 $VIF < 5$ 时,表示环境因子间无共线性,无需剔除^[12]。

使用 PCORD 5.0 进行 TWINSpan 绘图(基于等级分类的多元统计方法,通过对物种和样方数据进行双向分类,将数据划分为不同的群组); Canoco 5.0 进行 CCA(基于单峰模型的约束性排序方法,适用于物种与环境之间存在非线性关系的情况)、RDA(将物种数据与如环境变量进行线性回归,通过排序轴展示物种与环境变量之间的关系)排序分析与绘图;采用 R 4.4.1 的 vegan 程序包进行 α 多样性指数分析及 Mantel-test 检验; Origin 2025pro 进行重要值分布绘图; MATLAB R2024b 进行单因素方差分析。研究区位于西藏高寒地区,物种分布差异体现在坡度、坡向,且物种多数生长

生理差异为喜光照、喜潮湿的区别,因此以地形因子为主,探讨研究区植物群落与环境因子的关系^[7]。在排序分析中,环境因子箭头连线的长度直观反映了该因子与研究对象的关联程度,连线越长,说明该因子对研究对象的分布影响越显著,而箭头连线与排序轴之间夹角的余弦值,则量化了该因子与排序轴的相关性大小,夹角越小,表明因子与该轴的关联越紧密^[10]。同时以优势种为主导并依据植物群落命名原则划分群落,不同层之间的优势种用“-”连接,同一层中共优种则用“+”连接^[13]。

2 结果与分析

2.1 群落组成结构分析

两次外业调查得出,研究区野生维管束植物共有 34 科 83 属 114 种,主要由草本植物构成,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,科属比例达到了 2.47(科数除以属数),双子叶植物 27 科、67 属、90 种,单子叶植物 5 科 14 属 21 种,因此,双子叶植物构成了西藏黑颈鹤国家保护区黑颈鹤自然保护区野生维管植物的主体(表 1)。

表 1 研究区野生维管束植物科、属、种数量统计
Table 1 Number statistics of wild vascular plant family, genera and species

科名 family	属数 No.of genera	种数 No.of species	变种 Varieties	变型 Form	科名 Families	属数 No.of genera	种数 No.of species	变种 Varieties	变型 Form
凤尾蕨科 Pteridaceae	1	1			杜鹃花科 Ericaceae	1	1		
柏科 Cupressaceae	1	1	1		报春花科 Primulaceae	1	2		
杨柳科 Salicaceae	1	1			蓝雪科 Plumbaginaceae	1	1		
蓼科 Polygonaceae	2	2			龙胆科 Gentianaceae	3	4		
藜科 Amaranthaceae	2	2			紫草科 Boraginaceae	2	3	1	
石竹科 Caryophyllaceae	3	2	1		唇形科 Lamiaceae	5	5		
毛茛科 Ranunculaceae	3	3			列当科 Orobanchaceae	2	2		
小檗科 Berberidaceae	1	2			玄参科 Scrophulariaceae	2	2		
景天科 Crassulaceae	1	1			车前科 Plantaginaceae	1	1		
虎耳草科 Saxifragaceae	2	2			川续断科 Caprifoliaceae	3	4		
蔷薇科 Rosaceae	9	14	1	2	桔梗科 Campanulaceae	4	4		
豆科 Fabaceae	4	6			菊科 Asteraceae	8	14		
大戟科 Euphorbiaceae	1	1			禾本科 Poaceae	9	11		
卫矛科 Celastraceae	1	1			莎草科 Cyperaceae	2	7		
瑞香科 Thymelaeaceae	1	1			灯芯草科 Juncaceae	1	1		
五加科 Araliaceae	1	1			百合科 Liliaceae	1	2		
伞形科 Umbelliferae	2	2			石蒜科 Amaryllidaceae	1	1		
					合计 Total	83	108	4	2

2.2 群落数量分类

将研究区内 23 个样地中的 114 个物种,根据 TWINSpan 的分类方法将 23 个样地划分为 7 个群

落(图 2):群落 1:樱草杜鹃(*Rhododendron primuli-florum*) + 山生柳(*Salix oritrepha*) - 高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)群落,由样地 1,2,10,13 组成,

植被盖度为85%,坡度分布在25~32度之间,坡向为阳坡、半阴坡,以灌木为主,樱草杜鹃为优势种,山生柳为次优势种,分布在研究区外围,物种较少,群落内还分布着窄叶鲜卑花(*Sibiraea angustata*)、圆萼刺参(*Morina chinensis*)、藏橐吾(*Ligularia rumicifolia*),仅存在此群落的三种密度较高的物种。

群落2:近似小檗(*Berberis approximata*)-灰毛风铃草(*Campanula cana*)群落,由3,4和18,3个样地构成,面积最广,关联性最高,植物盖度在75%~95%之间,坡度为5度以及15度之间分布,坡向为阴坡、半阴坡,其中近似小檗为主要优势种,次生种包括矮锦鸡儿、鬼箭锦鸡儿等,伴生种主要包括灰毛风铃草、高山嵩草、丝颖针茅(*Stipa capillacea*)等。

群落3:香柏(*Juniperus pingii* var. *wilsonii*)+大果圆柏(*Sabina tibetica*)-高山嵩草群落,由7,8,22,3个样地组成,是7个群落中唯一的乔木群落,香柏为优势种,大果圆柏为次优势种,主要伴生种为高山嵩草、灰毛风铃草、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)等,植物盖度在85%~90%之间,坡度为10~20度,坡向为半阳坡。

群落4:矮锦鸡儿(*Caragana pygmaea*)-喜马拉雅嵩草(*Carex kokanica*)群落,由5,6,14,3个样地

组成,矮锦鸡儿为主要优势种,喜马拉雅嵩草为次生种,草本占主体地位,灌木以近似小檗为主,坡度在5~36度之间,植物盖度在70%~90%之间,在半阴坡、阴坡分布。

群落5:高山嵩草+丝颖针茅(*Stipa capillacea*)群落,包括11,12,15和19,4个样地,它们的总覆盖率在70%~90%之间。主要以草地植被为主,分布有灌木。高山嵩草是草为优势种,丝颖针茅是次优势种,其他伴生种包括钉柱委陵菜、紫花针茅(*Stipa purpurea*)等,坡度为15~24度,坡向为半阴坡。

群落6:高山嵩草-鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)群落包括9,17和20,3个样地,植物盖度在80%左右,高山嵩草为优势种,灌木以鬼箭锦鸡儿分布最为广泛,坡度为12~22度,坡向为阴坡,伴生种包括狼毒(*Stellera chamaejasme*)、扭盔马先蒿(*Pedicularis davidii*)、马蹄黄(*Spenceria ramalana*)等。

群落7:白草(*Pennisetum flaccidum*)+粗壮嵩草(*Carex sargentiana*)群落,由16,21和23,3个样地组成,主要以草地植被为主,白草为主要优势种,植物盖度在90%以上,次生种为粗壮嵩草,伴生种以大花嵩草、毛果草(*Lasiocaryum densiflorum*)、黑穗画眉草(*Eragrostis nigra*)为主,坡度在5~15度之间,坡向为阴坡、半阴坡。

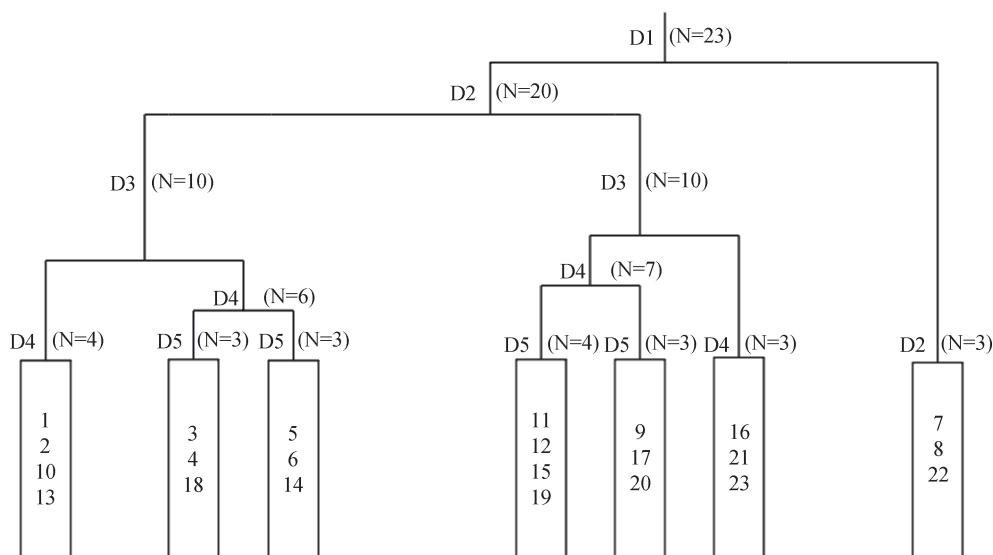


图2 TWINSpan分类结果

Fig. 2 TWINSpan classification result

2.3 群落分布与环境因子的排序分析

2.3.1 环境因子共线性分析 为验证环境因子共线性对CCA/RDA的影响,基于因子间Pearson相关系数矩阵(图3),计算方差膨胀因子(VIF),对每个环境

因子(LAT、LON、ALT、ASP、SLO、AMT、AMP),构建以该因子为因变量、其余因子为自变量的线性回归方程。其中,海拔与年均温(AMT)共线性最强, R^2 为0.54,方差膨胀因子为2.20。其次为年均温(AMT)与

年均降水量(AMP), R^2 为0.51, 方差膨胀因子为2.06。经度(Lon)与坡向(ASP)的 R^2 为0.01, 方差膨胀因子为1.01。因此环境因子间的方差膨胀因子范围在

2.06~1.01之间。所有因子的VIF均小于5, 无显著共线性。因此, 7个环境因子可直接用于CCA和RDA分析, 确保模型保留完整环境梯度信息。

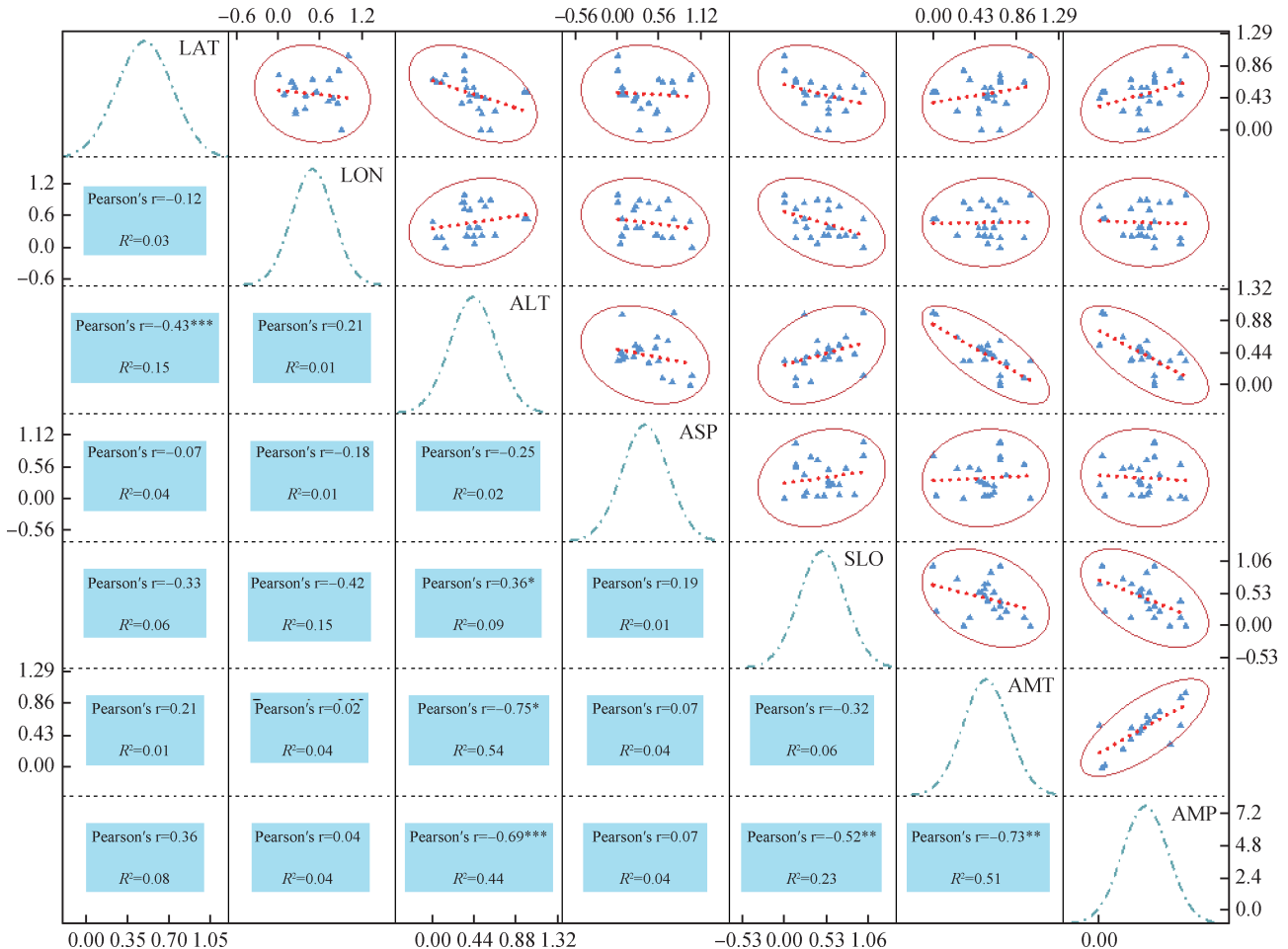


图3 研究环境因子间的共线性分析

Fig. 3 Analysis of collinearity among environmental factors

注: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$ 。下同

Note: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$. The same as below

2.3.2 CCA 排序分析 数据显示第1排序轴长为4.85, 因此确定应用单峰模型CCA方法进行排序(图4、表2)。其中:排序前2轴特征值分别为0.48和0.38, 对应的物种-环境方差累计解释量为57.62%, 4轴累计解释量为85.34%, 表明前2轴能够较为有效地反映群落分布与环境因子之间的关联性。结果显示, 经度为解释能力最强的变量; 其次为年均降水量、坡度与坡向; 海拔与纬度的解释力相对较低, 与植物群落分布呈不显著关系; 年均温的解释度最低。整体而言, CCA排序图揭示了样地群落分布在环境梯度上的响应特征, 优势物种的排序位置与其所属群落一致, 排序结果与TWINSpan分类结果上保持一致性, 例如, 樱草

杜鹃与山生柳集中于第3象限, 与群落1的分布区域相对应; 香柏与大果圆柏位于第2象限, 与所属乔木群落一致, 反映出其在排序结构中的环境响应较为稳定。

CCA主要优势物种排序结果显示(表3), 第1排序轴(Axis 1, 特征值0.48, 解释变异量13.39%)与经度(LON, $P = 0.002$)呈显著正相关, 第2排序轴(Axis 2, 特征值0.38, 解释变异量24.93%)与坡向(ASP)及年均降水量(AMP, $P = 0.012$)关联密切。优势物种的空间分布与群落类型吻合: 樱草杜鹃(S4)和山生柳(S5)集中于第3象限, 对应阳坡高坡度的灌木群落; 香柏与大果圆柏分布于第2象限, 匹配半阳坡的乔木群落; 高山嵩草和丝颖针茅聚集于排序图中

心,指示半阴坡低坡度的草本群落。环境因子向量表明,经度沿第1轴正向递增,坡向与年均降水量沿第2轴形成“阴坡-高降水”到“阳坡-低降水”的环境梯度,

前2轴累计解释物种-环境关系变异量 57.62%,验证了经度、坡向和降水量对群落分布的主导作用,且排序结果与 TWINSpan 分类结果一致。

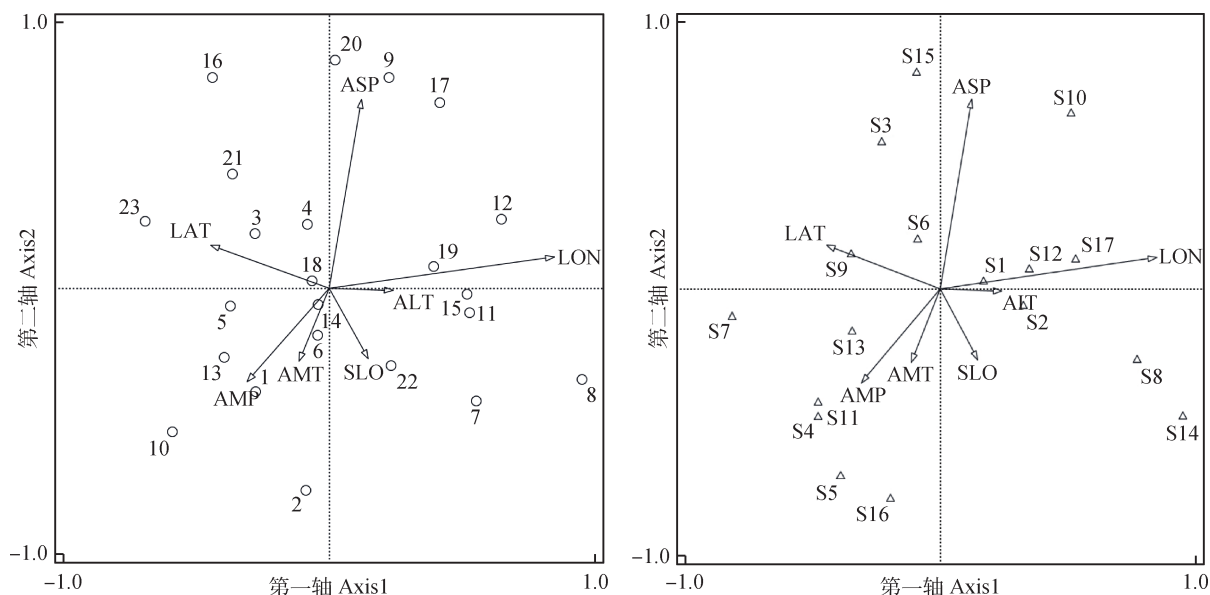


图4 左1为CCA群落分类图,左2为CCA主要优势物种分类图

Fig. 4 The classification of CCA community (left) and the classification of main dominant species in CCA (right)

注:左1为样地与环境因子排序图,数字1—23为样地编号;左2为优势物种分布图。S1—S17为主要优势种,S1,高山嵩草;S2,大花嵩草;S3,白草;S4,樱草杜鹃;S5,山生柳;S6,近似小檗;S7,粗壮蒿草;S8,大果圆柏;S9,矮锦鸡儿;S10,鬼箭锦鸡儿;S11,垂穗披碱草;S12,丝颖针茅;S13,喜马拉雅蒿草;S14,香柏;S15,小叶金露梅;S16,窄叶鲜卑花;S17,灰毛风铃草

Note: The left-hand 1 is the ordination diagram of sample plots and environmental factors, with numbers 1—23 being the sample plot numbers; the left-hand 2 is the distribution diagram of dominant species, with S1 — S17 being the main dominant species. S1, *Carex parvula*; S2, *Carex nudicarpa*; S3, *Pennisetum flaccidum*; S4, *Rhododendron primuliflorum*; S5, *Salix oritrepha*; S6, *Berberis approximata*; S7, *Carex sargentiana*; S8, *Juniperus tibetica*; S9, *Caragana pygmaea*; S10, *Caragana jubata*; S11, *Elymus nutans*; S12, *Stipa capillacea*; S13, *Carex kokanica*; S14, *Juniperus pingii* var. *wilsonii*; S15, *Potentilla parvifolia*; S16, *Sibiraea angustata*; S17, *Campanula cana*

表2 CCA 排序统计分析

Table 2 Statistical analysis of CCA ordination

	轴1 Axis 1	轴2 Axis 2	轴3 Axis 3	轴4 Axis 4
特征值 Eigenvalue	0.48	0.38	0.24	0.17
解释变异量 Explained variation	13.39	24.93	31.90	36.94
伪典范相关	0.93	0.89	0.89	0.75
Pseudo-canonical correlation				
物种-环境方差累计 Explained fitted variationt	32.06	57.62	73.34	85.34

2.4 群落多样性指数分析

研究基于 Gleason 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数,对不同群落的物种多样性进行量化分析(表4)。结果显示, Gleason 丰富度指数平均值为 (4.96 ± 0.73) , 最大值 6.20 与最小值 3.25, 极差小于平均值, 群落相对稳定; Shannon-Wiener 多样性指数均值为 (2.37 ± 0.05) , 范围 1.31~2.95, 标准误差仅

0.05, 反映多数群落多样性水平集中, 仅少数群落因物种组成差异呈现离散特征; Simpson 多样性指数均值 (0.84 ± 0.13) , 接近理论极值 1, 显示多数群落优势种效应较弱, 但极值范围 0.37~0.99 表明部分群落存在显著优势种或高度均匀的物种分布格局。Pielou 均匀度指数均值为 (0.72 ± 0.19) , 在 4 个指数中变异程度最高, 群落间物种分布均匀性差异显著, 少数群落因生境胁迫或干扰呈现单一优势种主导, 而多数群落物种分布相对均衡。

对 7 种群落物种多样性指数进行描述统计分析(图5), 结果显示数据符合正态分布, 故采用单因素方差检验。结果表明: 不同群落的 Shannon-Wiener 多样性指数 ($P=0.032$) 与 Simpson 多样性指数 ($P=0.041$) 均呈现显著差异 ($P<0.05$)。其中, Shannon-Wiener 指数综合反映物种丰富度与均匀度, 其显著差异表明群落间物种相对丰度及分布均匀性的综合效应存在分化; 而 Simpson 指数作为优

表 3 CCA 排序轴前两轴与环境因子的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of the first two CCA ordination axes with environmental factors

	轴 1 相关性 Axis 1 correlation	轴 2 相关性 Axis 2 correlation	决定系数 Coefficient of determination (R^2)	显著性 Significance probability
经度 Longitude	0.76***	0.09	0.77	0.002
年均降水量 AMP	-0.15	-0.55**	0.61	0.012
坡度 Slope	0.09	-0.39*	0.54	0.014
坡向 Aspect	0.11	0.62***	0.59	0.038
海拔 Altitude	0.18	0.04	—	0.18
纬度 Latitude	-0.26	0.13	—	0.328
年均温 AMT	-0.08	0.11	—	0.756

表 4 不同群落物种多样性指数总特征

Table 4 Overall sign of species diversity index in different communities

群落多样性指数 Species diversity index	平均值±标准误差 Mean±stand error	最大值 Max	最小值 Min
Gleason 丰富度指数 Gleason Richness index	4.96±0.73	6.20	3.25
Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	2.37±0.05	2.95	1.31
Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	0.84±0.13	0.99	0.37
Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	0.72±0.19	0.89	0.01

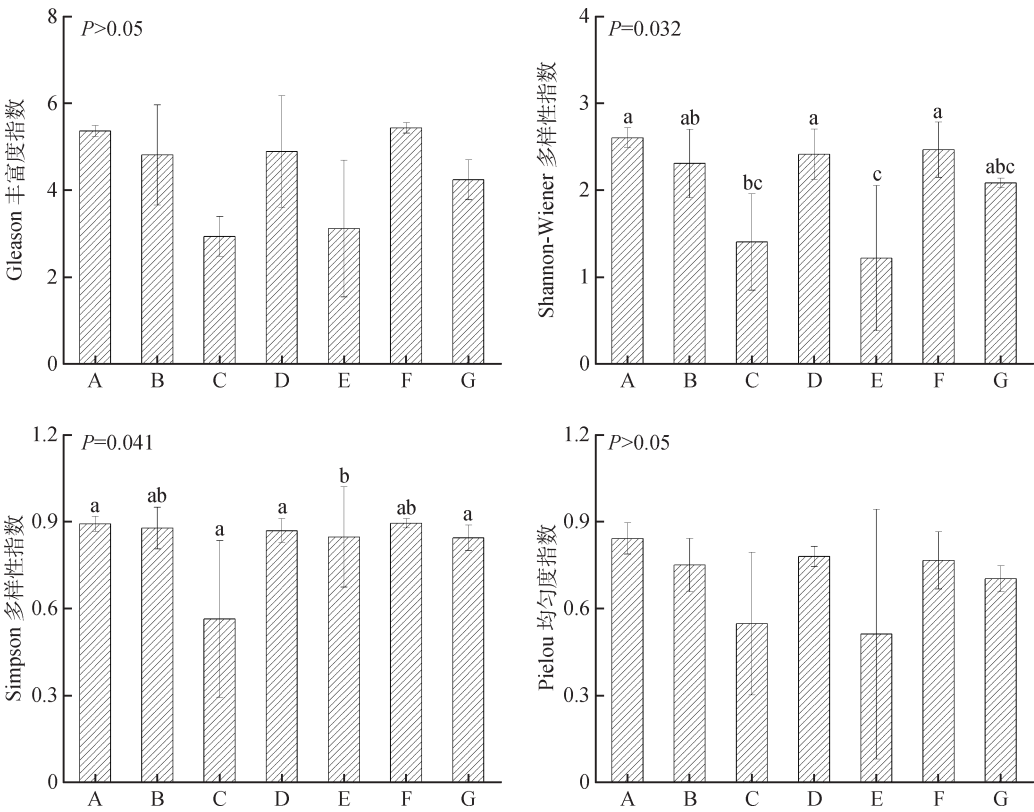


图 5 不同群落类型间群落多样性差异分析

Fig. 5 Analysis of species diversity differences among different community types

注: A~G 分别代表群落 1~群落 7

Note: A-G represents community 1-community 7, respectively

势种反向指标,其显著差异进一步揭示群落间优势种地位及物种优势度的显著不同—即部分群落优势种效应突出,而另一些群落物种分布更为均衡;

相比之下,Gleason 丰富度指数与 Pielou 均匀度指数在群落间差异未达显著水平,说明各群落的物种丰富度及均匀性相对稳定,未形成显著分化。

2.5 群落多样性指数与环境因子的 Mantel-test 检验分析

为探讨环境因子对植物群落多样性结构的影响,本研究基于 Mantel-test 检验构建了相关性热图与网络图(图6),系统分析了七个环境变量与四个多样性指数之间的关系。年均降水量是对多样性影响最显著的因子,与 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数之间均为显著相关,这说明在降水量较高的区域,植物群落的物种组成更为丰富,且物种分布更加均衡。年均温虽与海拔显著负相关,但其与多样性指数之间的相关性均不显著,这表明温度虽然在地形梯度中呈现

规律性变化,但在本研究区域内并非驱动植物多样性变化的核心因素。另外, Simpson 指数与所有环境因子均不显著相关,表明优势种占比在空间上较为稳定。 Gleason 指数未显示与各环境变量的显著相关,与各因子的相关性较弱,进一步验证了上述多样性指数差异分析(表3,图5)中, Gleason 丰富度指数在群落间差异未达显著水平,物种丰富度相对稳定,不受单一环境因子的调控。 Mantel-test 检验结果明确指出,气候因子特别是降水是驱动群落多样性变化的主要环境因子,其中年均降水量的影响尤为显著,地形与空间变量的影响相对次要,研究区域尺度上最弱。

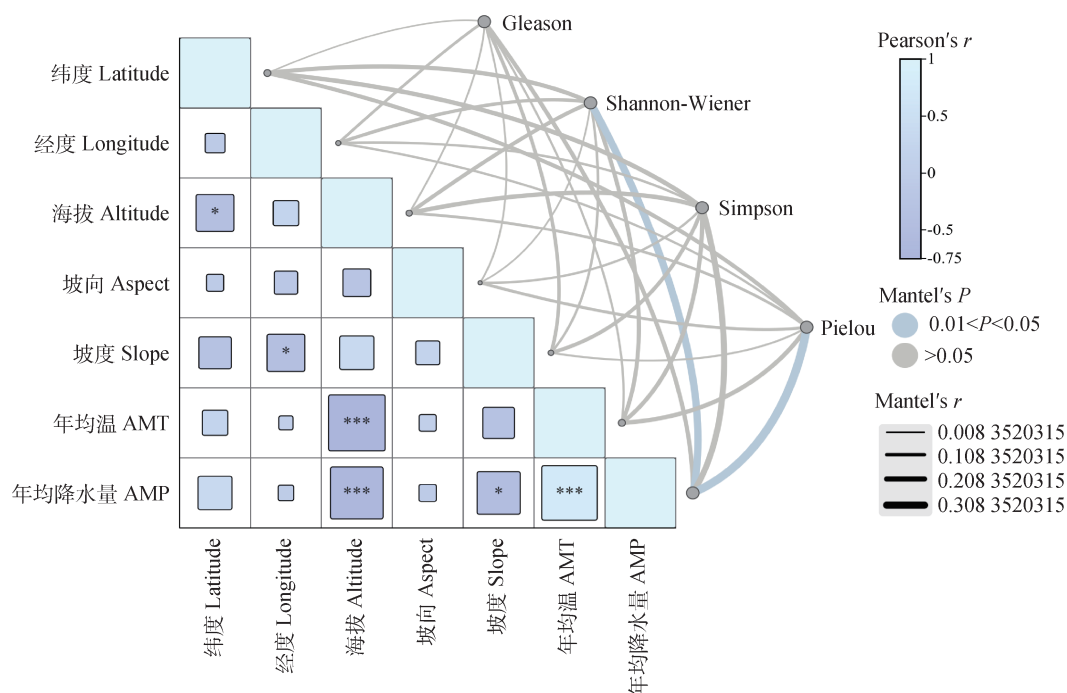


图6 群落多样性指数与环境因子 Mantel-test 检验分析

Fig. 6 Analysis of mantel test between diversity indices and environmental factors

2.6 群落多样性指数与环境因子的 RDA 分析

冗余分析进一步量化了环境因子对群落多样性指数的线性解释能力,结果显示(表5、表6、图7)。DCA 排序显示第一轴长为0.4,小于4,因此采用 RDA 进行群落多样性指数与环境因子的排序分析。排序前2轴的物种—环境方差累计解释量达83.45%,表明前两轴可以解释多样性指数与环境因子变化的主要生态梯度。与 CCA 排序分析方法一致,连线越长,说明该因子对研究对象的分布影响越显著,夹角越小,两者的相关性关系越为强烈。蒙特卡洛置换检验(999次)结果显示显著性水平为0.026($P < 0.05$),说明环境因子在 RDA 分类排序中可以起到合理的解释。其中,前两轴物种—环境方差累计解释量为83.45%,说明

前两轴可以揭示多样性与环境关系的核心维度。从排序轴特征来看,轴1特征值为0.27,单独解释27.29%的变异量,其与经度呈极显著正相关,决定系数为0.53,是影响多样性空间格局的首要因子;轴2特征值为0.17,解释17.84%的变异量,主要与坡向呈极显著负相关、与年均降水量呈显著正相关,二者决定系数分别为0.49和0.34%。环境因子的显著性分析表明,除经度、年均降水量、坡向外,坡度与轴2呈显著负相关,说明低坡度区域更利于多样性维持。而纬度、海拔和年均温的解释程度较低,且均不显著,对多样性指数的直接驱动作用较弱。从多样性指数的响应关系来看, Pielou 指数在排序图中与年均降水量向量方向相同且向量长度接近,降水对群落均匀度(Pielou 指

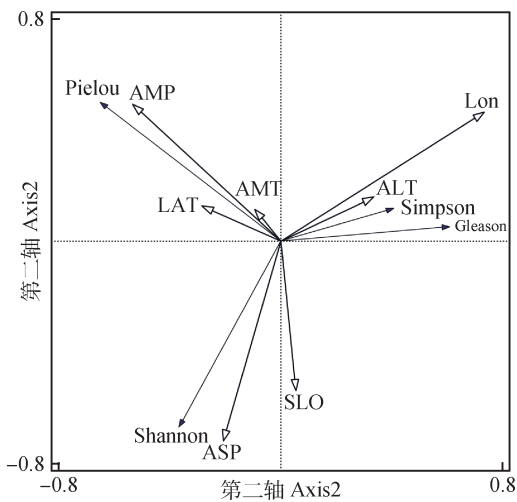


图 7 群落多样性指数与环境因子的冗余分析
Fig. 7 Redundancy analysis of diversity indices and environmental factors

数)有着较好的调控作用;Shannon-Wiener 指数和坡向夹角较小且两向量长度基本一致,说明坡向对于群落多样性水平(Shannon-Wiener 指数)影响明显,物种倾向于特定坡向生存;Simpson 指数则更靠近经度梯度,反映其对宏观地理格局的响应。从 Gleason 丰富度指数分布情况来看,其受多因子综合影响但未形成显著关联。综上,RDA 分析与 CCA 排序、Mantel-test 检验结果一致,进一步证实经度、年均降水量、坡向和坡度是调控研究区群落多样性的核心因子。

3 讨论

3.1 植物群落分类与排序分析

在植被生态学研究,数量分类与排序是一种可以阐明植物种类、植物群落与环境因子之间关系的常用方法,聚类分析是依据不同样方间物种的距离值进行运算,从而将生长性质类似以及环境因子影响程度较近的样方归为同一群落类别^[14-16]。相比之下,双向指示种分析法则采用了不同的策略,通过构建矩阵,从中挑选出指示种来计算每个样方的特定分值,最后,根据这些分值的高低来划分样方所属的群落类别^[17-18]。研究区以双子叶草本植物为主体,高山嵩草在研究区分布面积较广,反映了其对高原气候的强适应性,与赵津仪等^[19]在佩枯措湖区的研究结果一致,表明嵩草属(*Kobresia*)植物在西藏黑颈鹤自然保护区生态系统中的关键地位。仅存 2 种乔木和少量灌木,体现了青藏高原高寒保护区植被以草本为主、层次结构简单的典型高寒生态系统,这与拉琼等^[5]在西藏高寒地区和 Dangles 等^[20]在安第斯高山地区的研究结果一致,表明极端气候条件下草本植物因生长周期短、繁殖策略灵活而成为优势类群。研究通过 TWINSpan 将样地划分为 7 种群落类型,其中群落 2(近似小檗-灰毛风铃草群落)与群落 7(白草-粗壮嵩草群落)的分布特征与黑颈鹤核心栖息地(喜湿润植物群落,平缓地带)呈现显著耦合^[9,20]。这两类群落均位于

表 5 RDA 排序相关指数分析
Table 5 Analysis of Relevant Indices in RDA Ordination

	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2	轴 3 Axis 3	轴 4 Axis 4
特征值 Eigenvalue	0.27	0.17	0.08	0.41
解释变量量 Explained variation	27.29	45.13	54.07	95.44
伪典范相关 Pseudo-canonical correlation	0.68	0.63	0.00	0.00
物种-环境方差累计 Explained fitted variationt	50.46	83..45	100	100

表 6 RDA 排序前两轴与环境因子的相关性分析
Table 6 Analysis of relevant indices for rda ordination

	轴 1 相关性 Axis 1 correlation	轴 2 相关性 Axis 2 correlation	决定系数 Coefficient of determination (R^2)	显著性 Significance probability
经度 Longitude	0.76***	0.39	0.53	0.006
年均降水量 AMP	-0.42*	0.56**	0.34	0.029
坡向 Aspect	-0.46*	-0.71***	0.49	0.022
坡度 Slope	0.19	-0.41*	0.31	0.041
纬度 Latitude	-0.28	0.19	—	0.540
海拔 Altitude	0.19	0.31	—	0.544
年均温 AMT	-0.07	0.24	—	0.700

阴坡、低坡度区域,植被盖度达75%-95%,其高Shannon-Wiener多样性指数(群落物种个体数量多,分布均匀),与黑颈鹤对“高植被覆盖、丰富食物资源”的生境需求形成生态统一^[22]。从环境因子看,黑颈鹤活动区的经度、年均降水量与群落分布的主导因子高度重叠-高经度区降水变幅大,阴坡微生境湿度高,形成湿润小生境,促进白草、粗壮嵩草等湿生草本与耐湿灌木的镶嵌分布,这类群落不仅为黑颈鹤提供昆虫、草本根系等食物资源,其密集的植被结构还构成有效天敌屏障,符合黑颈鹤对“安全觅食区”的行为需求^[9,23]。

CCA排序结果显示经度、年均降水量、坡度、坡向是主要影响因子,第一轴经度从左向右经度逐渐增加,降水逐渐减少。坡度和坡向由于地形原因改变光照、降水等生境小气候,对群落植物生长产生影响,这与葛青松等^[24]在雅江中游河谷的研究结果一致。其中经度的解释力最强,反映研究区自东向西降水梯度对植被格局的显著影响,坡向通过调控光照和水分再分配,以及湿度较高的原因,适宜灰毛风铃草、鬼箭锦鸡儿等湿生物种的生存,而保护区阳坡优势种则为耐旱的樱草杜鹃、山生柳,导致保护区阴坡与阳坡的物种组成分异,这与杨小菊等^[25]在雅鲁藏布江中游表明坡向是高寒山区植被分异的关键微环境因子的研究一致。值得注意的是,本研究中乔木群落仅出现在半阳坡、坡度10~20度的区域,暗示乔木生长对微地形条件的严格需求,这与宁盼等^[26]关于大果圆柏群落依赖特定坡度和光照条件的研究结论一致。灌丛群落与草本群落的分布格局,体现了不同植物类群对微生境的差异化适应策略,也反映了高海拔区域环境条件对植被群落构建的主导作用。灌丛群落凭借对贫瘠土壤和寒冷湿润环境的强适应性,在高坡度阴坡占据优势;而草本群落则通过多样的物种组成,灵活适应从平缓半阳坡到陡峭阴坡的多种生境,展现出更为广泛的生态幅。这种分布特征不仅是植物长期适应环境的结果,也为该区域生态系统的稳定性和生物多样性维持提供了重要支撑。

3.2 群落多样性的环境响应与生态意义

群落多样性是衡量湿地生态系统稳定性与健康状态的核心指标。7种群落的多样性评估结果显示:群落1、群落2与群落7的物种多样性显著较高,其中群落2、7集中分布于阴坡、半阴坡及低坡度(5-15度)

区域,群落1虽位于半阴坡及高坡度(25-32度)区域,物种组成丰富且分布均匀,未形成单一优势种垄断格局,进一步提升了保护区生态系统的稳定性与韧性。而研究区内物种丰富度较低的群落,其物种分布呈现低多样性特征,核心原因在于这类群落处于保护区范围内水源补给较弱的微生境,多为坡度较高或阳坡区域,受地形影响,地表径流导致水分流失加快,土壤养分随水分流失加剧,显著限制了植物生长空间与物种数量,最终形成优势种高度集中的群落结构^[18,27]。

不同群落的Shannon-Wiener多样性指数与Simpson多样性指数存在显著差异,群落1、群落2以及群丛群落7的各项指标相较其他群落多样性指数较为平衡稳定,没有明显的变化趋势,表明灌丛群落以及乔木群落在研究区内生长形势较好,没有明显的波动,对于周围环境适应性较好;阴坡、低坡度区域的Shannon-Wiener指数和Simpson指数显著高于阳坡和高坡度区域,反映微生境异质性对物种共存的促进作用^[11]。Pielou均匀度指数的高变异暗示部分群落受优势种(樱草杜鹃、香柏)强烈控制,而多数群落因资源分配均衡呈现更稳定的结构,这与MacArthur^[28]提出的“资源分配理论”相符。

Mantel-test检验和RDA分析结合环境因子分析进一步揭示,降水变幅与Pielou多样性指数呈正相关,表明降水季节变化显著的区域更有利于不同生态策略物种共存,在降水量变化较大的区域,植物群落的物种组成更为丰富,物种分布更加均衡,这与Siefert等^[29]对全球干旱区植被多样性对降水变异的响应规律研究结果一致,而年均温与各多样性指数之间的夹角较大,说明其对多样性指数的影响相对较小,这与之前分析中温度在本研究区域内并非驱动植物多样性变化的核心因素的结论一致。

3.3 群落分布驱动因子与多样性关联的生态机制及保护意义

研究证实经度、年均降水量、坡向和坡度是塑造黑颈鹤国家自然保护区植物群落分布的核心环境因子,其作用机制体现在:从CCA排序中可以看出,第一轴从左往右,降水递减趋势,经度逐渐增加,导致低经度区形成以耐旱灌木为主的单一优势群落。坡向通过调控光照和水分再分配,使保护区阴坡群落因湿度高而物种组成更复杂,保护区阳坡则以耐旱灌木为主导,这种群落分布格局与物种多样性的空间分异呈现显著协同。群落分类与排序

结果进一步揭示,微地形通过减少土壤养分流失,为草本与灌木的共存提供条件,表明优势种效应弱化与资源分配均衡的生态特征^[30]。从生态意义看,这种“环境因子-群落结构-多样性”的链式响应,本质是高寒地区植物对青藏高原水热梯度的适应性策略^[31-33]。这一机制为保护管理提供启示:需重点保护阴坡低坡度区域的高多样性群落,因其不仅是黑颈鹤的核心觅食地,更通过维持多样性的正向关联增强生态系统韧性;同时针对阳坡退化区域,可借助高山嵩草等优势种的强适应性开展植被重建,逐步改善群落结构与物种共存格局。

4 结论

群落分以双子叶草本植物为主,高山嵩草是主要优势物种;分类与排序结果分析表明,经度、坡向、坡度是影响该地区群落分布的重要环境因子;阴坡、坡度低的区域群落多样性指数较高。研究区植物群落的乔木稀缺性和草本优势性,凸显其作为高原保护区生态系统的独特性。因此,需针对阴坡低坡度区域实施重点保护,在阴坡、低坡度等群落多样性高的区域设立核心保护区,保护现有植被群落及其生态过程,同时利用优势物种的分布特征和环境适应性开展保护区植被保护,维持黑颈鹤栖息地的植物群落稳定性。

参考文献

- [1] 李振基,陈圣宾. 群落生态学[M]. 北京:气象出版社,2011:37-169
LI Z J, CHEN S B. Community Ecology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011: 37-169
- [2] 李广水,宋丁全. 植被数量分类的研究特点及发展趋势[J]安徽农业科学,2008,36(4): 1707-1709
LI G S, SONG D Q. Research characteristics and development tendency of vegetation numerical classification [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(4): 1707-1709
- [3] 苏金娟,刘永萍,刘丽燕,等. 新疆阿勒泰地区典型植物群落数量分类与排序分析[J]. 草业学报, 2023, 32(9): 50-67
SU J J, LIU Y P, LIU L Y, et al. Quantitative classification and ordination analysis of typical plant communities in Altay Prefecture of Xinjiang [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(9): 50-67
- [4] 张嘉玉,李小伟,刘万弟,等. 宁夏沙芦草群落分类及群落特征与环境关系的研究[J]. 草地学报, 2023, 31(2): 498-509
ZHANG J Y, LI X W, LIU W D, et al. A study on the Agropyron mongolicum community classification and the relationship between that community characteristics and the environment in Ningxia [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(2): 498-509
- [5] SIEFERT A., RAVENSCROFT C., & ALTHOFF D. Scale dependence of vegetation-environment relationships: a meta-analysis of multivariate data [J]. Journal of Vegetation Science, 2012, 23(5), 942-951
- [6] 拉琼,扎西次仁,朱卫东,等. 雅鲁藏布江河岸植物物种丰富度分布格局及其环境解释[J]. 生物多样性, 2014, 22(3): 337-347
LA Q, ZHAXICIREN, ZHU W D, et al. Plant species-richness and association with environmental factors in the riparian zone of the Yarlung Zangbo River of Tibet, China [J]. Biodiversity Science, 2014, 22(3): 337-347
- [7] 包小婷,丁陆彬,姚帅臣,等. 拉萨河流域植物群落数量分类与排序[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 779-786
BAO X T, DING L B, YAO S C, et al. Quantitative classification and ordination of plant communities in Lhasa River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 779-786
- [8] 葛青松,屈兴乐,罗大庆,等. 雅鲁藏布江中上游典型植物群落维管植物资源研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(08): 44-55
GE Q S, QU X L, LUO D Q, et al. Study on vascular plant resources of typical plant communities in the middle and upper reaches of the Yarlung Zangbo River [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(8): 44-55
- [9] 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[EB/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20251023.1736.008>, 2025-10-24/2026-04-09
FU B Y, SONG G F, REN X L, et al. Research on niche, interspecific association and community stability of the shrub herb layer in the wetlands of the Lhasa River Basin [EB/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20251023.1736.008>, 2025-10-24/2026-04-09
- [10] 郭水良,于晶,陈国奇. 生态学数据分析—方法、程序与软件[M]. 北京:北京科学出版社, 2015: 103-175
GUO S L, YU J, CHEN G Q. Data Analysis in Ecology: Methods, Procedures and Software [M]. Beijing: Science Press, 2015: 103-175
- [11] 马克平. 生物群落多样性的测度方法— α 多样性的测度方法(上) [J]. 生物多样性, 1994(3): 162-168
MA K P. Measurement method of biological community diversity i. Measurement method of α diversity (I) [J]. Biodiversity Science, 1994, 2(3): 231-239
- [12] 张金屯. 数量生态学[M]. 3版. 北京:科学出版社, 2018: 24-152
ZHANG J T. Quantitative Ecology [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2018: 24-152
- [13] 杨小菊,强巴克珠,郭凯瑜,等. 藏西北高寒荒漠植物群落数量分类与排序[J]. 中国草地学报, 2024, 46(12): 44-54
YANG X J, QIANG B, GUO K Y, et al. Quantitative classification and ordination of alpine desert plant communities in northwest Xizang [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(12): 44-54
- [14] 金玲,陆颖,马红彬,谢应忠,沈艳. 内蒙古鄂托克前旗荒漠草原植物群落数量分类与排序[J]. 草业学报, 2022, 31(4): 12-21
JIN L, LU Y, MA H B, et al. Numerical classification and ordina-

- tion of the desert steppe plant community in Etuokeqianqi, Inner Mongolia[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(4):12-21
- [15] 刘倩, 丁彦芬, 宋杉杉, 等. 南京明城墙绿带草本层自生植物群落数量分类与排序分析[J]. *草业学报*, 2024, 33(05):1-15
LIU Q, DING Y F, SONG S S, et al. Quantitative classification and ordination analysis of spontaneous vegetation communities in herb layer along the green belt of Nanjing Ming City Wall[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(5):1-15
- [16] 韩锦涛, 李素清, 张云芳. 山西尖山铁尾矿坝复垦地不同人工植被下草本植物群落特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2025, 41(5):639-650
HAN J T, LI S Q, ZHANG Y F. Characteristics of herbaceous plant communities under different revegetation types on a reclaimed tailing dam of Jianshan iron mine in Shanxi[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2025, 41(5):639-650
- [17] 田悦, 赵正武, 刘艳. 西藏东部高寒草甸苔藓植物群落数量分类与排序[J]. *生态学报*, 2022, 42(02):755-765
TIAN Y, ZHAO Z W, LIU Y. Classification and ordination of bryophyte communities in alpine meadow of eastern Tibet[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(02):755-765
- [18] 李巧玉, 陈娟, 张小晶, 等. 川西亚高山彩叶林群落数量分类、排序与物种多样性[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(3):519-528
LI Q Y, CHEN J, ZHANG X J, et al. Quantitative classification, ordination, and species diversity of subalpine colored-leaf forest communities in western Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(3):519-528
- [19] 赵津仪, 屈兴乐, 薛会英, 等. 西藏佩枯错植物群落分类及物种多样性研究[J]. *草地学报*, 2019, 27(4):969-976
ZHAO J Y, QU X L, XUE H Y, et al. Research on plant community classification and species diversity of PeikuTso in Tibet[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(4):969-976
- [20] DANGLES O, RABATEL A, KRAEMER M, et al. Ecosystem sentinels for climate change? Evidence of wetland cover changes over the last 30 years in the tropical Andes[J]. *Plos One*, 2012, 12(5), e0175814
- [21] 白君君. 青藏高原地区黑颈鹤生境时空动态变化研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2023:5-15
BAI J J. Temporal and spatial changes of black-necked crane habitat on the Qinghai-Tibet plateau [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2023:5-15
- [22] 马竞一, 曾卫, 王梦君. 2000—2020年西藏雅鲁藏布江中游河谷黑颈鹤国家级自然保护区生态系统格局变化及驱动因素研究[J]. *高原科学研究*, 2023, 7(1):9-18
MA J Y, ZENG W, WANG M J. Study on the changes in ecosystem patterns and drivers of the black-necked crane national nature reserve in the middle Yarlung Tsangpo River valley, tibet year 2000—2020[J]. *Plateau Science Research*, 2023, 7(1):9-18
- [23] 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 protection in national nature reserve for black-necked cranes in the middle reaches of the Brahmaputra River valley in Tibet[J]. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2020, 39(2):57-61
- [24] 葛青松. 雅鲁藏布江中游植物群落特征及数量关系研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2020:5-15
GE Q S. Study on the characteristics and quantitative relationship of plant communities in the middle reaches of Yarlung Zangbo river[D]. Lasa: Tibet University, 2020:5-15
- [25] 杨小菊, 强巴克珠, 韩彦刚, 等. 雅鲁藏布江中游河谷植物群落数量分类与排序[J]. *草地学报*, 2024, 23(09):2784-2793
YANG X J, QIANG B K Z, HAN Y G, et al. Quantitative classification and ordering of plant communities in the middle Yarlung Tsangpo River valley [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(9):2784-2793
- [26] 宁盼, 侯晓巍, 胡云云, 等. 青海省大果圆柏群落物种多样性与土壤因子的关系[J]. *西北植物学报*, 2021, 41(11):1924-1931
NING P, HOU X W, HU Y Y, et al. Relationship between species diversity of *Juniperus tibetica* community and soil factors in Qinghai Province [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, 41(11):1924-1931
- [27] ZHANG Q P, WANG J, GU, H L, et al. Effects of continuous slope gradient on the dominance characteristics of plant functional groups and plant diversity in alpine meadows [J]. *Sustainability*, 2018, 10(12), 4805
- [28] MACARTHUR R H. Energy flow in communities and the prediction of species diversity[J]. *Ecology*, 1955, 36(4), 580-587
- [29] SIEFERT A, RAVENSCROFT C, ALTHOFF D, et al. Scale dependence of vegetation-environment relationships: ameta-analysis of multivariate data[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(5):942-951
- [30] 赵津仪, 屈兴乐, 薛会英, 等. 西藏佩枯错植物群落分类及物种多样性研究[J]. *草地学报*, 2019, 27(4):969-976
ZHAO J Y, QU X L, XUE H Y, et al. Research on plant community classification and species diversity of PeikuTso in Tibet [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(4):969-976
- [31] 周娟娟, 刘云飞, 王敬龙等. 短期养分添加对西藏沼泽化高寒草甸地上生物量、植物多样性和功能性状的影响[J]. 2019, *草业学报*, 2023, 32(11):17-29
ZHOU J J, LIU Y F, WANG J L, et al. Effect of short-term nutrient addition on aboveground biomass, plant diversity, and functional traits of swampy alpine meadow in Tibet [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(11):17-29
- [32] 闫瑞强. 雅鲁藏布江中游黑颈鹤生境适宜性动态变化[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017:5-15
YAN R Q. Dynamic Change of Black-necked Crane Habitat Suitability in the Middle Yarlung Zangbo River [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017:5-15
- [33] 刘伟, 周显辉, 侯延玥, 等. 青藏高原东缘高寒草甸植物群落特征对气候变化的响应机理[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2025, 61(5):591-597, 605
LIU W, ZHOU X H, HOU Y Y, et al. Response patterns of alpine meadow plant communities to climate changes on the eastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2025, 61(5):591-597, 605