

DOI:10.11686/cyxb2025106

http://cyxb.magtech.com.cn

吕焯昕, 叶茂, 钱娇蓉, 等. 新疆哈巴河林区草地物种多样性和系统发育多样性分析及影响因素研究. 草业学报, 2025, 34(12): 50-61.

LYU Ye-xin, YE Mao, QIAN Jiao-rong, et al. Biodiversity and phylogenetic diversity of grasslands in the Habahe forest area of Xinjiang and analysis of the influencing factors. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(12): 50-61.

新疆哈巴河林区草地物种多样性和系统发育多样性分析及影响因素研究

吕焯昕^{1,2}, 叶茂^{1,2*}, 钱娇蓉^{1,2}, 陈维龙^{1,2}, 车静^{1,2}, 李苗苗^{1,2}, 曾国燕^{1,2}

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要:为揭示哈巴河林区草地群落构建机制,本研究基于117个草本样方数据,整合物种、谱系发育等生物多样性指标,通过Pearson关联分析与广义线性回归模型(GLM)等方法,阐明生物多样性指标之间的关系,并探讨环境要素对群落结构的影响。结果表明:1)共记录到42种草本植物,隶属于17科37属,优势科为禾本科、菊科、蔷薇科和毛茛科,狗尾草、早熟禾、羽衣草和针茅是主要优势种;2)61.5%的样地净亲缘关系指数(NRI)和净最近亲缘关系指数(NTI)大于0, *T*检验结果表明群落的发育结构呈显著的聚集模式($P < 0.05$);3)系统发育多样性指数(PD)与丰富度指数(*Ma*)、多样性指数(*H'*)、优势度指数(*D*)和物种丰富度(*SR*)呈极显著正相关关系($P < 0.001$);相反,NRI和NTI与*H'*和*D*呈显著负相关关系($P < 0.05$);4)广义线性回归模型分析显示,年均降水量正向影响物种多样性指数和NTI($P < 0.05$),而物种多样性指数与经度、海拔呈极显著正相关关系($P < 0.001$),与纬度呈显著负相关关系($P < 0.05$);年均温与*Ma*呈显著负相关关系($P < 0.05$),与*H'*呈极显著负相关关系($P < 0.001$),但环境要素对PD和NRI无显著影响($P > 0.05$)。研究表明,水分和地理梯度是调控该区域草地群落多样性特征的关键因素。

关键词:物种多样性;系统发育多样性;系统发育结构;群落构建;环境因子

Biodiversity and phylogenetic diversity of grasslands in the Habahe forest area of Xinjiang and analysis of the influencing factors

LYU Ye-xin^{1,2}, YE Mao^{1,2*}, QIAN Jiao-rong^{1,2}, CHEN Wei-long^{1,2}, CHE Jing^{1,2}, LI Miao-miao^{1,2}, ZENG Guo-yan^{1,2}

1. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Region, Urumqi 830054, China

Abstract: In this work, we examined the mechanisms driving grassland community assembly in the Habahe forest region. In total, 117 quadrats were established, and the herbaceous plant community was analyzed on the basis of biodiversity indicators such as species composition and phylogenetic structure. Pearson's correlation and generalized linear model (GLM) analyses were utilized to explore relationships among biodiversity metrics and to evaluate the impacts of environmental factors on community structure. The main results were as follows: 1) The plant community comprised 42 herbaceous species belonging to 17 families and 37 genera, with Poaceae, Asteraceae, Rosaceae, and Ranunculaceae being the dominant families. *Setaria viridis*, *Poa annua*, *Alchemilla japonica*, and

收稿日期:2025-03-26;改回日期:2025-04-29

基金项目:阿尔泰山国家林业和草原局生态监测分析项目(2021:73010010251)和国家自然科学基金(42377449)资助。

作者简介:吕焯昕(1999-),女,河北保定人,在读硕士。E-mail: 1773228353@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yemao@xjnu.edu.cn

Stipa capillata were the primary dominant species; 2) The values of the net relatedness index (NRI) and net nearest taxa index (NTI) were above zero in 61.5% of the plots examined, with the independent-samples t-test (T) indicating significant phylogenetic clustering patterns ($P < 0.05$); 3) Phylogenetic diversity index (PD) showed significant positive correlations ($P < 0.001$) with the Margalef diversity index (Ma), Shannon—Wiener diversity index (H'), Simpson's dominance index (D), and species richness (SR). In contrast, both the NRI and NTI were negatively correlated ($P < 0.05$) with H' and D ; 4) The results of the GLM analysis revealed that mean annual precipitation positively influenced species diversity indices and NTI ($P < 0.05$). Species diversity indices exhibited robust positive associations with longitude and elevation ($P < 0.001$), but significant negative correlations with latitude ($P < 0.05$). Mean annual temperature was significantly and negatively correlated with Ma ($P < 0.05$) and H' ($P < 0.001$). Notably, environmental factors did not show significant effects on PD or NRI ($P > 0.05$). These results suggest that moisture availability and geographic gradients play crucial roles in shaping the patterns of grassland community diversity in this particular region.

Key words: species diversity; phylogenetic diversity; phylogenetic structure; community assembly; environmental factors

解析多尺度作用过程中生物多样性发生机制及其稳态维持策略,即群落构建机制,一直是群落生态学研究领域的关键问题^[1]。物种多样性作为生物多样性的核心组成部分,体现了植物群落在物种层面的多样性水平,并揭示了其与生态环境之间的相互关系^[2],在探究生物多样性的维持机制方面具有关键作用。谱系在生物多样性保护的优化实践中发挥了重要价值,将反映进化关系的系统发育多样性指标整合到保护生物学研究框架与生态评估机制中,从进化的角度全面反映群落物种的组成及动态变化,探讨群落形成过程并揭示物种多样性维持的机制^[3],对于林下生物多样性的保护具有重要意义^[4],这也是系统发育应用日益广泛的原因^[5]。以往研究多集中于物种层面的多样性维持机制^[6],将群落生态学与系统发育学结合的研究相对较少^[7]。因此,将物种多样性和系统发育学相结合,从全新视角探索群落维持机制并推测影响群落物种组成的生态因素具有重要价值^[8]。

目前解释植物群落构建的机制主要是生态位理论和中性理论^[9]。生态位理论关注确定性过程,涵盖环境筛选和种间竞争两大方面。在群落内生态位保持相对稳定的基础条件下,若环境筛选机制占据主导地位,使得具有趋同功能性状的近缘物种通过关键气候要素的选择而保留,最终使群落结构呈现出聚集态势;相反,竞争排斥会导致具有相似生态位的物种难以共存,致使物种间的亲缘关系较为疏远,谱系结构呈发散状态^[10]。与此同时,中性理论主张群落构建主要受随机过程或扩散限制的影响^[11]。由于生态漂变的随机性,群落中的所有个体被视为无差异,因此群落无系统发育结构^[12]。黄建雄等^[13]在古田山研究不同尺度植物群落系统发育时发现,所有尺度上都表现出显著的聚集现象,生态位理论得到了证实。然而,张森森等^[14]在汾河上游研究湿地植被时发现,环境因素和扩散限制是影响 β 多样性格局的决定性因素,群落构建则是生态位过程和中性理论过程共同作用的结果。此外,一项关于加拿大、阿拉斯加和欧洲北极地区土壤群落构建的研究表明,扩散作用等随机过程对微生物群落构建起决定性作用^[15]。但也有研究指出,竞争性排斥不一定会导致过度分散,反而可能引发系统发育聚集^[16],或与系统发育结构无关^[17]。由此可见,在群落构建过程中生态位理论和中性理论的作用因地域、尺度、梯度、生境等因素而异^[18],两者在解释生物群落多样性及维持机制方面均得到了广泛应用^[19]。

关于阿尔泰山哈巴河的研究主要在湿地退化和保护^[20]、生态恢复^[21]、草原和森林生态系统的健康评估^[22]、群落动态以及生产力^[23]等领域。然而,针对哈巴河林区草地群落构建机制及其影响因素的研究较为缺乏。因此,从生物群落多样性特征及其谱系发育这两个重要维度切入,推测影响哈巴河林区草地群落构建的主要气候变量,有助于了解草地生态系统构建机制,为推动生物多样性保护及草地资源的合理利用与健康发展提供科学依据。基于此,本研究选取新疆哈巴河林区海拔 900~2200 m 的草地为对象,共随机设置了 39 个试验样地。研究旨在回答

以下两个关键问题:1)物种 α 指数和系统发育 α 指数之间有怎样的关系;2)哈巴河林区草地群落构建机制及影响构建的驱动因素是哪些?通过以上研究,为进一步揭示哈巴河林区草地群落构建的生态过程及其维持机制提供科学支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

哈巴河林区位于中国新疆阿勒泰地区,地处阿尔泰山南麓,准噶尔盆地北缘,地理坐标 $85^{\circ}33' - 87^{\circ}18' E, 47^{\circ}37' - 49^{\circ}07' N$ 。山地多,平原少,是典型的山地草原生态系统。该地区海拔从410至3839 m不等。年平均气温为 $5.3^{\circ}C$,年平均降水量为205.6 mm,全年日照时间2837.1 h,无霜期144 d。降水量少,蒸发量大,日照丰富,昼夜温差大,属中温带大陆性干旱气候。土壤有明显垂直地带性,以黄棕壤、棕壤、暗棕壤为主,间有棕色针叶林土。哈巴河林区草地垂直分布特征明显,在海拔900至2200 m,草地类型分布自下而上依次为山地荒漠草原、山地草原、山地草甸草原和山地草甸^[23]。

1.2 试验设计

野外调查于2023年6至7月进行,此时处于草地生物量最大的时期。选择900~2200 m,采用分层海拔取样设计,垂直间隔每隔33 m设置1个 $20 m \times 20 m$ 的样地(共39个样地)。在每个样地中,随机布设3个 $1 m \times 1 m$ 的草本植物样方,共计117个样方。在采样过程中,详细记录植物种类和种群特征,如高度、密度、覆盖度和生物量。气象数据来自世界气候环境数据库(<https://www.worldclim.org/>)。然后利用ArcGIS 10.8进行空间插值,提取2023—2024年每个样方坐标的月气候指数,包括月平均气温、月降水量和月蒸散量等,并计算年平均值。

1.3 数据处理

1.3.1 物种重要值和优势度 本研究以频度(frequency, F_i)、盖度(coverage, C_i)、密度(density, D_i)和高度(height, H_i)为基础,计算了哈巴河林区草地群落物种重要值(importance values, IV)和优势度(Summed dominance, SDR_4)^[24]。其计算公式为:

$$IV_i = \left[\left(\frac{F_i}{\sum F} + \frac{C_i}{\sum C} + \frac{D_i}{\sum D} / 3 \right) \right] \times 100\% \quad (1)$$

$$SDR_{4i} = \left[\left(\frac{F_i}{F_{\max}} + \frac{C_i}{C_{\max}} + \frac{D_i}{D_{\max}} + \frac{H_i}{H_{\max}} \right) / 4 \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中: i 表示物种; F_{\max} 指群落中物种的最大频度值; C_{\max} 指群落中物种的最大盖度值; D_{\max} 指群落中物种的最大密度值; H_{\max} 则指群落中物种的最高高度值^[24]。

1.3.2 物种 α 指数 采用Margalef丰富度指数(Margalef diversity index, Ma)、Shannon—Wiener多样性指数(Shannon—Wiener diversity index, H')、Simpson优势度指数(Simpson dominance index, D)、Pielou均匀度指数(Pielou evenness index, J)和物种丰富度(species richness, SR)为测度^[25]。其计算公式为:

$$Ma = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (3)$$

$$H' = - \sum (P_i \ln P_i) \quad (4)$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (5)$$

$$J = \frac{- \sum P_i \ln P_i}{\ln S} \quad (6)$$

$$SR = S \quad (7)$$

式中: S 为1个样方中出现的总物种数; P_i 是物种 i 的重要值; N 为全部物种重要值之和。

1.3.3 系统发育 α 指数 本研究基于现有的物种列表,整理成科/属/种的格式后,使用预定义的系统发育框

架(GBOTB. extended),在R语言(v 4.3.3)中使用“V. PhyloMaker”包进行系统发育树建模^[25]。基于生成的系统发育拓扑网络,根据 Webb 群落系统发育理论框架^[26],使用“picante”包计算系统发育多样性(phylogenetic diversity, PD)和系统发育结构指数,即净亲缘关系指数(net relatedness index, NRI)和净最近亲缘关系指数(net nearest taxa index, NTI)^[27]。其计算公式为:

$$NRI = -1 \times \frac{MPD_s - MPD_{mds}}{SD(MPD_{mds})} \quad (8)$$

$$NTI = -1 \times \frac{MNTD_s - MNTD_{mds}}{SD(MNTD_{mds})} \quad (9)$$

式中:S表示某个实际群落;标准偏差(standard deviation, SD)表征零模型分布的离散程度,其中平均谱系距离(mean pairwise distance, MPD_{mds})和平均最近相邻谱系距离(mean nearest taxon distance, $MNTD_{mds}$)分别指迭代 999 次蒙特卡罗置换生成的零模型集合。最终计算得到 NRI 和 NTI,将两者与 0 比较,则会产生不同的发育结构状态。当两者均大于 0 时,发育结构是聚集的,生境过滤作用使得群落大多由亲缘较近的物种组成;当两者均小于 0 时,竞争排斥使得亲缘关系较远的物种共存于同一群落,而呈发散状态;当两者的正负不一致时,表示群落物种受环境和生物等因素的协同影响,发育结构随机^[28]。

1.4 数据分析

本研究首先利用 Excel 2010 软件对数据进行了初步整理和计算。使用 R-4.3.3 中的“V. PhyloMaker”包来构建系统发育树,之后,“picante”包计算系统发育 α 指数,即系统发育多样性和系统发育结构指数^[27]。而后采用 Pearson 线性关联检验,量化气候要素与生物多样性指标(物种 α 指数和系统发育 α 指数)的协变强度,筛选出显著影响群落多样性特征及其系统发育指数的气候要素。最后运用广义线性回归模型(generalized linear model, GLM)分析影响多样性指数的主要气候要素。其中采用赤池信息量准则(akaike information criterion, AIC)筛选出“最优模型”,以确定主要的气候要素,并通过方差膨胀因子(variance inflation factor, VIF)进行多重共线性诊断,剔除 $VIF > 10$ 的变量后,重新进行模型拟合,最终筛选出影响群落构建的显著气候要素^[29]。

2 结果与分析

2.1 哈巴河林区草地群落的物种组成

通过对哈巴河林区草地植物群落调查(图 1)发现,共有 42 种不同的草本植物,隶属于 17 科 37 属,以禾本科、菊科、蔷薇科和毛茛科植物为主。禾本科包含的属数和物种数最多,分别为 7 属 8 种,分别占总属数的 18.92%,占总物种数的 19.05%;其次仅包含 1 属 1 种的有石竹科、藜芦科、紫草科、百合科、桔梗科、苋科、柳叶菜科、车前科、蓼科、牻牛儿苗科 10 科,分别占总属数的 2.70%,占总物种数的 2.38%。

通过计算哈巴河林区草地植物群落各物种的重要值和优势度(表 1),结果显示,狗尾草、早熟禾、羽衣草和针茅等物种的重要值和优势度较高,为当地的优势种,且该地区的绝大部分植物属于多年生草本植物,一年生草本植物较少。

2.2 哈巴河林区草地群落的谱系组成及其系统发育结构

系统发育树描述了哈巴河林区草地群落中所有物种间的进化亲缘关系(图 2)。对全部调查样地的系

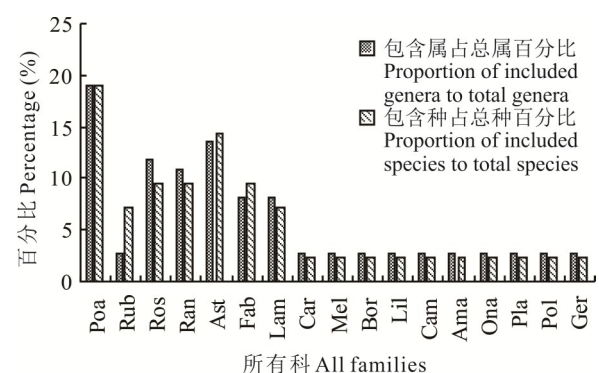


图 1 哈巴河林区草地植物群落的物种组成

Fig. 1 Species composition of grassland plant communities in the Habahe forest area

Poa: 禾本科 Poaceae; Rub: 茜草科 Rubiaceae; Ros: 蔷薇科 Rosaceae; Ran: 毛茛科 Ranunculaceae; Ast: 菊科 Asteraceae; Fab: 豆科 Fabaceae; Lam: 唇形科 Lamiaceae; Car: 石竹科 Caryophyllaceae; Mel: 藜芦科 Melanthiaceae; Bor: 紫草科 Boraginaceae; Lil: 百合科 Liliaceae; Cam: 桔梗科 Campanulaceae; Ama: 苋科 Amaranthaceae; Ona: 柳叶菜科 Onagraceae; Pla: 车前科 Plantaginaceae; Pol: 蓼科 Polygonaceae; Ger: 牻牛儿苗科 Geraniaceae.

表1 哈巴河林区草地植物群落物种的重要值和优势度

Table 1 Importance values and dominance of species of grassland plant communities in Habahe forest area (%)

物种名称 Species name	LF	IV (SDR)	物种名称 Species name	LF	IV (SDR)
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	A	65.05(10.05)	野蔷薇 <i>Rosa multiflora</i>	P	31.11(3.78)
早熟禾 <i>Poa annua</i>	A	62.65(19.57)	苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	P	29.68(5.57)
羽衣草 <i>Alchemilla japonica</i>	P	60.94(12.71)	夏枯草 <i>Prunella vulgaris</i>	P	29.42(2.39)
针茅 <i>Stipa capillata</i>	P	52.07(10.56)	叉歧繁缕 <i>Stellaria dichotoma</i>	P	28.66(9.01)
大针茅 <i>Stipa grandis</i>	P	48.03(16.73)	野草莓 <i>Fragaria vesca</i>	P	28.09(2.91)
艾 <i>Artemisia argyi</i>	P	46.52(24.50)	风铃草 <i>Campanula medium</i>	P	26.75(5.23)
车轴草 <i>Galium odoratum</i>	P	42.35(5.82)	赖草 <i>Leymus secalinus</i>	P	25.40(4.96)
青蒿 <i>Artemisia caruifolia</i>	A	41.37(3.66)	木地肤 <i>Bassia prostrata</i>	A	24.81(1.37)
火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i>	P	36.23(5.02)	野豌豆 <i>Vicia sepium</i>	P	24.50(6.43)
唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i> var. <i>sibiricum</i>	P	35.67(4.12)	猪牙花 <i>Erythronium japonicum</i>	P	22.89(0.55)
野火球 <i>Trifolium lupinaster</i>	P	35.16(8.41)	车前 <i>Plantago asiatica</i>	P	21.28(2.16)
薄荷 <i>Mentha canadensis</i>	P	35.14(1.18)	蓬子菜 <i>Galium verum</i>	P	21.02(3.43)
冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	P	35.13(11.06)	勿忘草 <i>Myosotis alpestris</i>	P	20.04(2.62)
蓍 <i>Achillea millefolium</i>	P	35.07(5.74)	糙苏 <i>Phlomis umbrosa</i>	P	19.58(1.15)
羊茅 <i>Festuca ovina</i>	P	34.74(6.63)	委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	P	19.01(1.33)
藜芦 <i>Veratrum nigrum</i>	P	34.15(0.67)	匍枝毛茛 <i>Ranunculus repens</i>	P	17.94(5.34)
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	P	33.15(2.12)	全缘铁线莲 <i>Clematis integrifolia</i>	P	17.55(0.98)
北方拉拉藤 <i>Galium boreale</i>	P	32.89(3.85)	金莲花 <i>Trollius chinensis</i>	P	17.47(0.51)
异燕麦 <i>Helictochloa hookeri</i>	A	32.74(14.85)	老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>	P	16.51(1.74)
篇蓄 <i>Polygonum aviculare</i>	A	31.79(3.94)	白车轴草 <i>Trifolium repens</i>	P	15.81(2.57)
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	P	31.71(3.64)	柳兰 <i>Chamerion angustifolium</i>	P	12.53(0.72)

LF: 生活型 Life form; IV (SDR): 重要值(优势度)Importance value (dominance); P: 多年生草本植物 Perennial herbs; A: 一年生草本植物 Annual herb.

统发育特征分析显示(图3),30.8%的样地系统发育指数(NRI、NTI)均小于0,揭示其群落内物种竞争排斥效应使得远缘物种通过生态位互补机制实现稳定共存,致使群落谱系呈发散状态;61.5%的样地指数均大于0,表明环境选择压力主导的趋同性系统发育格局,致使群落聚集分布;剩下7.7%的样地NRI与NTI相异,表明该样地群落缺乏显著谱系结构特征,中性过程在群落构建中发挥主导作用。总体来看,哈巴河林区草地群落系统发育结构呈聚集状态。

为了验证上述结论,对NRI和NTI进行T检验,分析均值是否显著偏离零模型。NRI和NTI的均值均大于0(图4),且NTI的均值明显高于NRI。但由于NRI误差条跨越0,与0无显著差异($P>0.05$),表示群落在净亲缘关系层面无显著的聚集性。然而,NTI误差条并未跨越0,表明NTI与0有显著差异($P<0.05$),群落在最近亲缘物种层面上呈显著的聚集性。这与系统发育树展现的结果一致,说明哈巴河林区草地群落整体的谱系结构呈显著的聚集状态。

2.3 物种 α 指数与系统发育 α 指数的Pearson关联性分析

使用Pearson关联性方法对物种8个常用指标分析可知(图5),PD与物种 α 指数(Ma 、 H' 、 SR)呈极显著正相关关系($P<0.001$),与 D 呈显著正相关关系($P<0.05$),与系统发育结构指数(NRI、NTI)呈显著负相关关系($P<0.05$)。而系统发育结构指数(NRI、NTI)间呈极显著正相关关系($P<0.001$)。 Ma 与 H' 、 SR 呈极显著正相关关系($P<0.01$),与 D 呈显著正相关关系($P<0.05$)。 H' 与 D 呈极显著正相关关系($P<0.001$)。系统发育结构指数(NRI、NTI)与 H' 呈显著负相关关系($P<0.05$),与 D 呈极显著负相关关系($P<0.001$)。

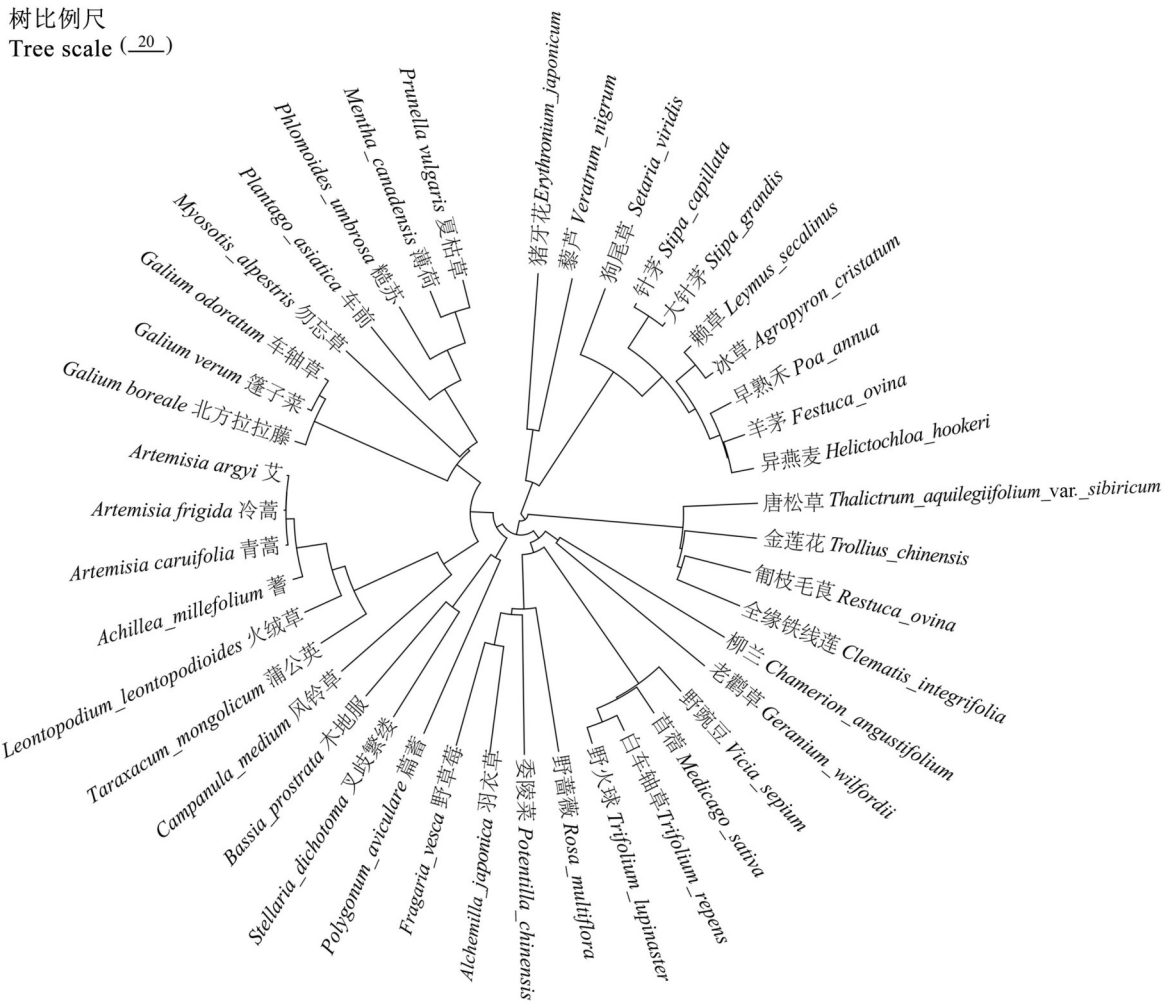


图 2 哈巴河林区草地群落系统发育树
Fig. 2 Phylogenetic tree of grassland communities in the Habahe forest area

2.4 影响群落多样性特征及其系统发育指数的气候要素分析

基于消除多重共线性干扰后的气候要素数据,本研究采用广义线性回归模型(GLM)对生物群落多样性特征及其系统发育指数进行检验(表 2)发现,经度这一因子与物种 α 指数(Ma 、 H' 、 D 和 J)存在极显著正效应($P < 0.001$);纬度与 Ma 、 H' 存在显著负效应($P < 0.05$)。海拔与 Ma 、 H' 、 D 和 SR 存在显著正效应($P < 0.05$)。而气候要素分析显示,年均气温与 Ma 之间呈显著负效应($P < 0.05$),与 H' 存在极显著负效应($P < 0.001$);年均降水量与 NTI 存在显著正效应($P < 0.05$)。值得注意的是,所有气候要素对 PD 和 NRI 均无显著影响($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 生物群落多样性特征和系统发育指数间的关联性分析

先前的研究中证实了群落物种多样性和系统发育指数之间具有显著的相关性^[30],本研究也得到了类似的结

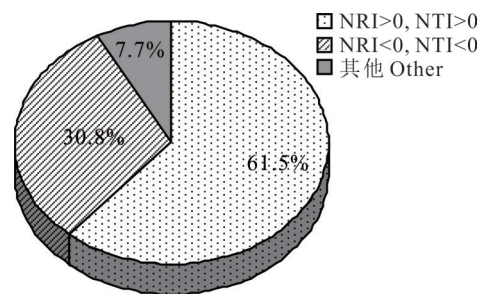


图 3 哈巴河林区草地系统发育结构百分比
Fig. 3 Percentage of phylogenetic structure of grassland samples in the Habahe forest area

论。PD与丰富度指数(Ma)、多样性指数(H')和物种丰富度(SR)呈极显著正相关($P < 0.001$),与优势度指数(D)呈显著正相关关系($P < 0.05$),在某一方面上述指数可替代系统发育多样性指数对草地群落结构进行定量描述。这与吕自立等^[31]在巴音布鲁克草原研究中的结果一致。除此之外,李梦佳等^[32]在戴云山物种与系统发育多样性研究中也得到物种丰富度与系统发育多样性之间存在极显著正相关关系的结论($P < 0.001$)。可能是因为随着物种丰富度的增加,物种数量的增加导致系统发育多样性的变异性显著提高^[33],从而促进群落系统发育多样性的提高。本研究还发现PD与NRI和NTI之间呈显著负相关关系($P < 0.05$),这一结论与吕自立等^[31]在巴音布鲁克的研究结果一致。NRI和NTI与 H' 呈显著负相关关系($P < 0.05$),与 D 呈极显著负相关关系($P < 0.001$),表明物种多样性和优势度对系统发育结构有一定的影响,能一定程度上描述群落物种结构,进一步说明物种多样性和系统发育多样性高度相关^[34],这一结论也在巴音布鲁克^[31]和戴云山^[32]的研究中得到了证实。基于生物多样性保护的多维属性特征,故在生态保育法规的制定过程中,建立物种组成多样性指标与系统发育维度等指数的协同评估机制十分重要。

通过分析群落的系统发育多样性和系统发育结构,能推测群落构建的机制,这对于理解群落的动态变化具有重要作用^[29]。有研究表明,物种生态位在系统发育上具有一定的保守性^[35],具有趋同生态功能性状邻近、生态位相似的物种,往往对扰动强度表现出显著正相关敏感性,又对特定的干扰因素展现出适应优势。而谱系分歧度较高的物种可能会因不适应环境变化而逐渐被排除,最终导致群落系统发育聚集。本研究也得到了一致的结果,哈巴河林区草地群落系统发育结构整体呈显著聚集模式,原因可能是哈巴河属于温带大陆性气候,降水稀少且蒸发强烈,物种在这种环境胁迫下逐渐适应,无法应对寒冷干旱的物种逐渐消失。从而导致群落内物种的适应性趋同,种间亲缘关系更近,系统发育树缩短并促使物种系统发育聚集^[36]。

3.2 影响物种 α 指数的气候要素分析

气候、土壤、地貌和地形等生态因素对植物群落物种多样性的影响已经被广泛探讨,且研究结果呈现出复杂和多样的特点^[37]。由于研究区的区域特征不同,影响物种多样性的因素也有所差异。特别是对于相对较小的植物群落来说,微环境差异可能是群落物种组成和结构差异的主要原因^[38]。对去除共线性后的气候要素与群落物

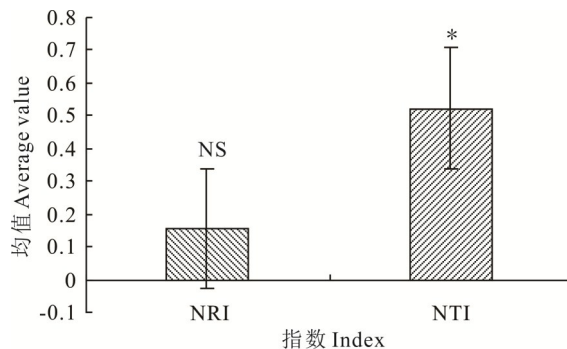


图4 净亲缘关系指数和净最近亲缘关系指数均值的T检验
 Fig. 4 T-test for the average values of the net relatedness index (NRI) and net nearest taxa index (NTI)
 NS: $P > 0.05$; *: $P < 0.05$.

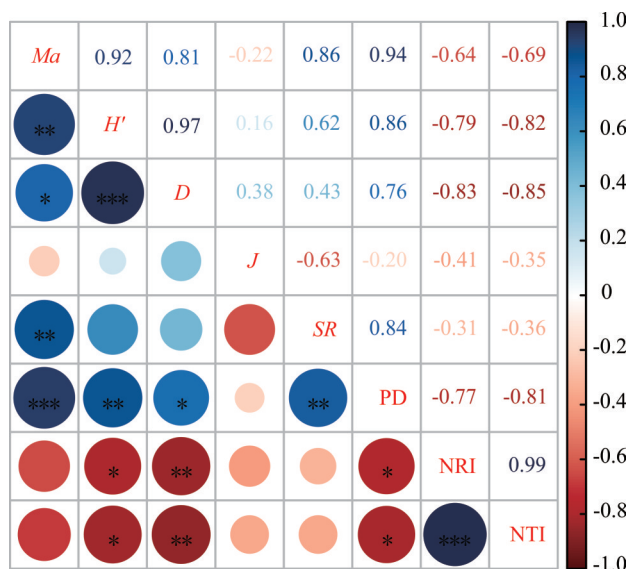


图5 生物群落多样性特征及其系统发育指数间的Pearson相关分析

Fig. 5 Statistical assessment of Pearson correlation coefficients between community-level biodiversity metrics and phylogenetic structure indices

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$; 蓝色代表正相关,红色代表负相关,圆圈越大颜色越深,则相关性越强 Blue denotes positive correlations, red represents negative correlations, with larger and darker circles indicating stronger associations; Ma : Margalef 丰富度指数 Margalef diversity index; H' : Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; D : Simpson 优势度指数 Simpson dominance index; J : Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index; SR : 物种丰富度 Species richness; PD : 系统发育多样性指数 Phylogenetic diversity index; NRI : 净亲缘关系指数 Net relatedness index; NTI : 净最近亲缘关系指数 Net nearest taxa index.

表 2 植物群落物种多样性和系统发育多样性与环境因子的最优模型回归分析

Table 2 Optimal model regression analysis of plant community species diversity and phylogenetic diversity with environmental factors

多样性指数 Diversity index	环境因子 Environmental factor						R^2	AIC
	Lat	Lon	Asl	Aap	Aat	Aae		
Margalef 物种丰富度 Margalef diversity index	-0.525*	0.322**	0.455***	0.220*	-1.179*	0.646	0.629	-28.489
Shannon—Wiener 多样性指数 Shannon—Wiener diversity index	-0.435*	0.402***	0.528***	0.074	-1.416***	0.968*	0.756	-36.855
Simpson 优势度指数 Simpson dominance index	-0.510	0.515***	0.460***	0.083	-0.531	0.092	0.632	-92.889
Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	-0.185	0.747***	0.120	-0.174	0.011	0.361	0.217	-68.512
物种丰富度 Species richness	-0.596	0.211	0.413*	0.186	-1.037	0.535	—	158.570
系统发育多样性 Phylogenetic diversity index	-0.084	0.006	0.227	-0.077	-0.877	0.227	—	515.687
净亲缘关系指数 Net relatedness index	-0.687	-0.007	0.286	0.196	-0.036	-0.073	—	127.783
净最近亲缘关系指数 Net nearest taxa index	-0.564	0.234	0.158	0.351*	0.776	-0.514	—	136.419

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; Lat: 纬度 Latitude; Lon: 经度 Longitude; Asl: 海拔 Altitude; Aap: 年均降水量 Average annual precipitation; Aat: 年均气温 Annual average temperature; Aae: 年均蒸散发 Annual average evapotranspiration; R^2 : 决定系数 Determinant coefficient; AIC: 赤池信息量准则 Akaike information criterion; 气候要素的数值为通径系数 The value of the climate element is the diameter coefficient.

种多样性进行分析,研究证实这两者之间存在一定的关联性。本研究发现,经度与物种 α 指数(丰富度指数 Ma 、多样性指数 H' 、优势度指数 D 、均匀度指数 J)等呈极显著正相关关系($P < 0.01$),这与前人在祁连山^[39]、青藏高原^[40]和海南岛湿润地区^[41]的研究结果一致。此外,本研究还发现纬度与丰富度指数 Ma 、多样性指数 H' 等呈显著负相关关系($P < 0.05$),这与前人的研究结果一致^[42],但与冯建孟等^[43]在滇西北研究的结果相反。物种多样性的纬度分布格局呈多样化的形态,这在一定程度上可能与不同的研究尺度及其相应的生态调控机制有关^[44]。

草地群落物种多样性的变化是多种因素相互作用的结果。此外,海拔相较于其他因素更能有效地反映温度、湿度和降水等环境因素的变化,其作用更加突出^[45]。在山地森林生态系统垂直带谱中,海拔梯度作为关键的驱动因子,通过调控水热组合模式重新塑造物种多样性的分布格局^[46]。温度随海拔上升呈递减趋势,而降水则表现出正向增加。本研究发现,海拔与物种 α 指数(丰富度指数 Ma 、多样性指数 H' 、优势度指数 D 、物种丰富度 SR)呈显著正相关关系($P < 0.05$);年均温与丰富度指数 Ma 呈显著负相关关系($P < 0.05$),与多样性指数 H' 呈极显著负相关关系($P < 0.001$),这与前人在阿勒泰林区^[47]、岷江上游^[48]的研究结果一致。原因可能是研究区地理环境条件相似,在低海拔地区降水少且蒸发量大,使盐分在土壤表面积累,抑制植物的生长,导致群落中的物种逐渐减少^[49]。随着海拔升高,降水充足、土壤湿润,促使对局部环境依赖性强的禾本科等小型植物生长。这些植物种子扩散有限且数量较多,因此易形成聚集分布^[38]。另外,本研究发现年均降水量与丰富度指数 Ma 呈显著的正相关关系($P < 0.05$),这与前人在哈巴河林区草地研究的结果一致^[50],也得到了以往研究结果的证实^[51]。综上,经度、纬度、海拔、年均气温和年均降水量等环境因子是影响哈巴河林区草地群落物种多样性组成的驱动因子。

3.3 影响系统发育 α 指数的气候要素分析

作为理解生物群落构建的两大理论支柱,生态位理论侧重于环境筛选和物种间的竞争等确定因素如何影响群落的组成和结构。相反,中性理论则强调扩散过程及随机变异等非确定因素在群落构建中的作用,为本研究提供了分析群落多样性和物种分布模式的不同方法^[14]。在干旱和半干旱地区,降水和养分作为环境筛对物种产生强烈的过滤作用,进一步强化了生态位理论在群落构建中的作用^[52]。本研究也得到了一致的结论,进一步对哈巴河林区草地群落的系统发育结构(NRI、NTI)进行 T 检验发现(图 4),系统发育结构(NRI、NTI)均表现出非随机结构,哈巴河林区草地群落整体呈聚集状态,表明生境筛选在群落构建中起重要作用,得到了生态位理论的支持^[13]。

为进一步探究影响群落构建的驱动因素,广义线性模型分析的结果表明,本研究选用的环境因子对物种多样性的解释力比系统发育指数的解释更显著,但系统发育还受到其他环境因素的影响,如地形或土壤因子。这可能

是由于地形和土壤条件的差异,导致在小尺度上增加了生境的多样性,从而扩大了生态位空间,并促进了物种在较小尺度上的稳定共存^[53]。然而,诸如海拔等地形因素的变化可能会引起温度、降水和土壤性质等环境要素的变动,继而对系统发育多样性和系统发育结构产生影响^[54]。先前的研究表明系统发育多样性(PD)随海拔的增加,整体呈下降态势,谱系结构由发散转变为聚集^[31],但本研究发现海拔对系统发育结构的影响并不显著,这与王俊伟等^[55]在布丹拉山研究的结果一致,原因可能是样地海拔梯度小,设置的采样点数量较少,代表性不够,加之该区域物种系统发育结构可能更多受到低洼等微地形及旅游和放牧等人类活动的影响,从而导致系统发育结构在海拔变化中表现不明显。本研究还发现年均降水量与NTI存在显著的正相关关系($P < 0.05$),但对PD和NRI的影响均未达到显著水平($P > 0.05$),该结论在祁连山^[25]和青藏高原^[56]的相关研究中得到了支持。这可能是由于土壤因子等区域生境因素对植物群落系统发育的影响比气候因素更加强烈。在生态学研究中,局地环境要素与气候变量间存在显著关联性,然而准确评估两者对生物群落的独立贡献却面临挑战^[57]。具体而言,气候要素通过调节陆地生态系统中养分及化学循环过程及可利用程度^[58],进而对植物群落的谱系结构产生间接影响,这一结论与Zhang等^[59]的研究结果一致。这可能是由于水分下渗加快了土壤中有有效养分的溶解和迁移速率,从而提高了草本植物对养分的吸收效能^[60],使得物种在生态特性和环境需求上具有相似性,最终导致群落内亲缘物种占据相似的生态位而呈聚集的趋势。Han等^[61]在青藏高原高寒草地的研究中证实了这一结论,发现土壤全氮含量与系统发育结构呈显著的正相关关系。当土壤中的氮含量较高时,促使群落系统发育结构趋于聚集。但由于本研究缺乏土壤因子数据的测定,限制了深入分析。

4 结论

本研究以新疆哈巴河林区海拔900~2200 m的草地为对象,通过野外植物群落样方调查,探讨了草地植物群落的构建机制及驱动因素。本研究发现,在哈巴河林区,草地植物群落的谱系结构整体呈显著的聚集模式,环境筛选主导群落形成,群落构建机制过程中生态位理论发挥了重要作用。此外,物种多样性与环境因子显著相关,其中物种多样性指数与经度、海拔等存在极显著正相关关系($P < 0.001$),与年均降水量等气候要素存在显著正相关关系($P < 0.05$),与纬度存在显著负相关关系($P < 0.05$);丰富度指数 Ma 与年均降水呈显著负相关关系($P < 0.05$),与多样性指数 H' 呈极显著负相关关系($P < 0.001$);年均降水量与NTI存在显著正相关关系($P < 0.05$)。总之,经度、纬度、海拔、年降水量和年平均气温对物种多样性有显著影响,年均降水量是影响哈巴河林区草地群落构建的主要环境因子。然而,本研究仍存在一些局限性,需进一步完善。首先,尽管研究区设置了海拔梯度,但各海拔梯度的样地设置较少,导致代表性不足,海拔梯度对系统发育结构的影响不显著。因此,应扩大海拔梯度,增加样地数量,以更全面、科学地探讨其对草地群落谱系结构的影响。此外,前人研究发现群落系统发育受土壤等环境因素的显著影响。因此,将土壤理化性质纳入后续研究,可系统阐释草地群落构建的生态位分化机制与系统发育的关系,进而为哈巴河林区草地生态系统植物种质资源保育、人工繁育技术优化以及退化生态系统功能的修复等实践,提供符合生态补偿机制与生物多样性保护法规的科学支撑。

参考文献 References:

- [1] Yan Y J, Yang X, Tang Z Y. Patterns of species diversity and phylogenetic structure of vascular plants on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecology and Evolution*, 2013, 3(13): 4584-4595.
- [2] Swenson N G, Erickson D L, Mi X, *et al.* Phylogenetic and functional alpha and beta diversity in temperate and tropical tree communities. *Ecology*, 2012, 93(8): S112-S125.
- [3] Schweiger O, Klotz S, Durka W, *et al.* A comparative test of phylogenetic diversity indices. *Oecologia*, 2008, 157(3): 485-495.
- [4] Ci X Q, Li J. Phylogenetic diversity and its application in floristics and biodiversity conservation. *Biodiversity Science*, 2017, 25(2): 175-181.
慈秀芹,李捷.系统发育多样性在植物区系研究与生物多样性保护中的应用. *生物多样性*, 2017, 25(2): 175-181.
- [5] Li X, Sun H. Phylogenetic pattern of alpine plants along latitude and longitude in Hengduan Mountains Region. *Plant Diversity*, 2017, 39(1): 37-43.

- [6] Gong H, Yu T, Zhang X, *et al.* Effects of boundary constraints and climatic factors on plant diversity along an altitudinal gradient. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 19(7): e00671.
- [7] Macheroum A, Kadik L, Neffar S, *et al.* Environmental drivers of taxonomic and phylogenetic diversity patterns of plant communities in semi-arid steppe rangelands of North Africa. *Ecological Indicators*, 2021, 132(12): 108279.
- [8] Merwin L, He T, Lamont B B. Phylogenetic and phenotypic structure among *Banksia* communities in south-western Australia. *Journal of Biogeography*, 2012, 39(2): 797–807.
- [9] Rosindell J, Hubbell S P, Etienne R S. The unified neutral theory of biodiversity and biogeography at age ten. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, 26(7): 340–348.
- [10] Lu M M, Huang X C, Ci X Q, *et al.* Phylogenetic community structure of subtropical forests along elevational gradients in Ailao Mountains of southwest China. *Biodiversity Science*, 2014, 22(4): 438–448.
卢孟孟, 黄小翠, 慈秀芹, 等. 沿海拔梯度变化的哀牢山亚热带森林群落系统发育结构. *生物多样性*, 2014, 22(4): 438–448.
- [11] Leibold M A, McPeck M A. Coexistence of the niche and neutral perspectives in community ecology. *Ecology*, 2006, 87(6): 1399–1410.
- [12] Getschke G. The unified neutral theory of biodiversity and biogeography. *Plant Systematics & Evolution*, 2002, 85(11): 3172–3174.
- [13] Huang J X, Zheng F Y, Mi X C. Influence of environmental factors on phylogenetic structure at multiple spatial scales in an evergreen broad-leaved forest of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(3): 309–315.
黄建雄, 郑凤英, 米湘成. 不同尺度上环境因子对常绿阔叶林群落的谱系结构的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(3): 309–315.
- [14] Zhang M M, Qin H, Wang Y, *et al.* Beta diversity of wetland vegetation in the middle and upper reaches of the Fenhe River watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(11): 3292–3299.
张森森, 秦浩, 王焯, 等. 汾河中上游湿地植被 β 多样性. *生态学报*, 2016, 36(11): 3292–3299.
- [15] Shi Y, Grogan P, Sun H, *et al.* Multi-scale variability analysis reveals the importance of spatial distance in shaping Arctic soil microbial functional communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 86(7): 126–134.
- [16] Mayfield M M, Levine J M. Opposing effects of competitive exclusion on the phylogenetic structure of communities. *Ecology Letters*, 2010, 13(9): 1085–1093.
- [17] Bennett J A, Lamb E G, Hall J C, *et al.* Increased competition does not lead to increased phylogenetic overdispersion in a native grassland. *Ecology Letters*, 2013, 16(9): 1168–1176.
- [18] Jump A S, Mátyás C, Peñuelas J. The altitude-for-latitude disparity in the range retractions of woody species. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(12): 694–701.
- [19] Chai Y X. The species diversity and community assembly of arbuscular mycorrhizal fungi in Qilianshan Mountains on a northwest-facing slope and a southeast-facing slope. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
柴宇星. 祁连山阴阳坡丛枝菌根真菌多样性及群落构建机制研究. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [20] Liu Y. Protection and restoration of wetlands in Habahe County, Altay of Xinjiang. *Wetland Science & Management*, 2022, 18(2): 47–50.
刘岩. 新疆阿勒泰哈巴河县湿地保护和恢复工程. *湿地科学与管理*, 2022, 18(2): 47–50.
- [21] Tan F, Yang P N, Wang C, *et al.* Water requirement for ecological restoration of damaged vegetation in arid area—A case study at plain area in Habahe County, Xinjiang Wei Autonomous Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(1): 244–252.
谭翻, 杨鹏年, 王翠, 等. 干旱区受损植被生态恢复需水量—以新疆哈巴河县平原区为例. *水土保持通报*, 2023, 43(1): 244–252.
- [22] Zhou Q, Ye M, Zhao F F. Ecosystem health assessment based on the VOR model analysis in forest area of Altai Mountains. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2021, 56(3): 137–148.
周泉, 叶茂, 赵凡凡. 基于 VOR 模型的阿尔泰山林区森林生态系统健康评价. *甘肃农业大学学报*, 2021, 56(3): 137–148.
- [23] Zeng G Y, Ye M, Li M M, *et al.* Stability and diversity of plant communities and their biomass in grassland before and after grazing in the Habahe region of Altai Mountains. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1): 82–91.
曾国燕, 叶茂, 李苗苗, 等. 放牧对阿尔泰山哈巴河地区草地植物群落稳定性与多样性及其生物量关系的影响. *水土保持研究*, 2025, 32(1): 82–91.
- [24] Shen R, Zhang J L, He B, *et al.* The structure characteristic and analysis on similarity of grassland community in dry-hot valley

- of Yuanjiang River. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(12): 2821–2825.
- 沈蕊, 张建利, 何彪, 等. 元江流域干热河谷草地植物群落结构特征与相似性分析. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2821–2825.
- [25] Chen Q. Diversity and community assembly mechanisms of plant and soil microbial in Qilian Mountain National Park. Yangling: Northwest A & F University, 2023.
- 陈倩. 祁连山国家公园植物和土壤微生物多样性及群落构建机制. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [26] Webb C O. Exploring the phylogenetic structure of ecological communities: An example for rain forest trees. *The American Naturalist*, 2000, 156(2): 145–155.
- [27] Kraft N J, Adler P B, Godoy O, *et al.* Community assembly, coexistence and the environmental filtering metaphor. *Functional Ecology*, 2015, 29(5): 592–599.
- [28] Webb C O, Ackerly D D, McPeck M, *et al.* Phylogenies and community ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33(1): 475–505.
- [29] Mori A S, Fujii S, Kitagawa R, *et al.* Null model approaches to evaluating the relative role of different assembly processes in shaping ecological communities. *Oecologia*, 2015, 178(1): 261–273.
- [30] Faith D P. Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biological Conservation*, 1992, 61(1): 1–10.
- [31] Lyu Z L, Liu B, Chang F, *et al.* Species diversity and phylogenetic diversity in Bayinbrook alpine grasslands: elevation gradient distribution patterns and drivers. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(7): 12–22.
- 吕自立, 刘彬, 常凤, 等. 巴音布鲁克高寒草甸物种多样性与系统发育多样性海拔梯度分布格局及驱动因子. *草业学报*, 2023, 32(7): 12–22.
- [32] Li M J, He Z S, Jiang L, *et al.* Distribution pattern and driving factors of species diversity and phylogenetic diversity along altitudinal gradient on the south slope of Daiyun Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 1148–1157.
- 李梦佳, 何中声, 江蓝, 等. 戴云山物种多样性与系统发育多样性海拔梯度分布格局及驱动因子. *生态学报*, 2021, 41(3): 1148–1157.
- [33] Wang G H, Ren J Z, Zhang Z H. Species diversity in relation to phylogenetic traits of plant. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 12(1): 41–46.
- 王国宏, 任继周, 张自和. 物种多样性与植物系统发育. *草业学报*, 2003, 12(1): 41–46.
- [34] Faith D P. Biodiversity's option value: A comment on Maier. *Ambio*, 2018, 47(6): 735–736.
- [35] Moles A T, Ackerly D D, Webb C O, *et al.* A brief history of seed size. *Science*, 2005, 307(5709): 576–580.
- [36] Jin H X, He F L, Li C L, *et al.* Vegetation characteristics, abundance of soil microbes, and soil physico-chemical properties in desertified alpine meadows of Maqu. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(11): 20–28.
- 金红喜, 何芳兰, 李昌龙, 等. 玛曲沙化高寒草甸植被、土壤理化性质及土壤微生物数量研究. *草业学报*, 2015, 24(11): 20–28.
- [37] Zhu G D, Guo N, Han Y J, *et al.* Effects of extreme drought on plant diversity and soil properties of Inner Mongolian desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(3): 52–59.
- 朱国栋, 郭娜, 韩勇军, 等. 极端干旱对内蒙古荒漠草原植物群落物种多样性和土壤性质的影响. *中国草地学报*, 2021, 43(3): 52–59.
- [38] Wang D P, Ji S Y, Chen F P. A review on the species diversity of plant community. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(4): 55–60.
- 汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述. *生态学杂志*, 2001, 20(4): 55–60.
- [39] He M Y, Wang Y X, Peng Z C, *et al.* The spatial pattern of aboveground biomass and species richness in the grassland of Qilian Mountain. *Pratacultural Science*, 2020, 37(10): 2012–2021.
- 何美悦, 王迎新, 彭泽晨, 等. 祁连山草原地上生物量和物种丰富度的空间格局. *草业科学*, 2020, 37(10): 2012–2021.
- [40] Yang Y H, Rao S, Hu H F, *et al.* Plant species richness of alpine grasslands in relation to environmental factors and biomass on the Tibetan Plateau. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 200–205.
- 杨元合, 饶胜, 胡会峰, 等. 青藏高原高寒草地植物物种丰富度及其与环境因子和生物量的关系. *生物多样性*, 2004, 12(1): 200–205.
- [41] Yang M, Wei S, Mwangi B N, *et al.* Horizontal distribution characteristics and environmental factors of shrubland species diversity in Hainan Island, China. *Land*, 2022, 11(7): 1047.
- [42] Zhang G, Li Q, Sun S. Diversity and distribution of parasitic angiosperms in China. *Ecology and Evolution*, 2018, 8(9): 4378–4386.

- [43] Feng J M, Dong X D, Xu C D, *et al.* Effects of sampling scale on latitudinal patterns of species diversity in seed plants in northwestern Yunnan, China. *Biodiversity Science*, 2009, 17(3): 266–271.
冯建孟, 董晓东, 徐成东, 等. 取样尺度效应对滇西北地区种子植物物种多样性纬度分布格局的影响. *生物多样性*, 2009, 17(3): 266–271.
- [44] Hawkins B A, Diniz-Filho J A F. Latitude and geographic patterns in species richness. *Ecography*, 2004, 27(2): 268–272.
- [45] Lomolino M V. Elevation gradients of species-density: Historical and prospective views. *Global Ecology and Biogeography*, 2001, 10(1): 3–13.
- [46] Tan S S, Ye Z L, Yuan L B, *et al.* Beta diversity of plant communities in Baishanzu Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21): 6944–6956.
谭珊珊, 叶珍林, 袁留斌, 等. 百山祖自然保护区植物群落beta多样性. *生态学报*, 2013, 33(21): 6944–6956.
- [47] Zhang X, Ye M, Pan X T, *et al.* Characteristics of grassland plant community change with elevation and its relationship with environmental factors in the Burqin forest region of the Altai mountains. *Diversity*, 2023, 15(10): 1098.
- [48] Chen H, Li Y Q, Zheng S W, *et al.* Research on the correlations of shrub biomass with slope—aspect and altitude in dry valley of the upper reach of the Minjiang River. *Journal of Chengdu University (Natural Science Edition)*, 2007, 26(1): 14–18.
陈泓, 黎燕琼, 郑绍伟, 等. 岷江上游干旱河谷灌丛生物量与坡向及海拔梯度相关性研究. *成都大学学报(自然科学版)*, 2007, 26(1): 14–18.
- [49] 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. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(9): 50–67.
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. *草业学报*, 2023, 32(9): 50–67.
- [50] Zeng G Y, Ye M, Li M M, *et al.* The relationships between plant community stability and diversity across different grassland types and their association with environmental factors in the Habahe forest area, Xinjiang. *Diversity*, 2024, 16(8): 499.
- [51] Xu J, Dang H, Tian T, *et al.* Human disturbance rather than habitat factors drives plant community assembly and diversity patterns in a semiarid region. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(14): 1803–1811.
- [52] Wang J M, Qu M J, Wang Y, *et al.* The drivers of plant taxonomic, functional, and phylogenetic β -diversity in the gobi desert of northern Qinghai—Tibet Plateau. *Biodiversity Science*, 2022, 30(6): 62–75.
王健铭, 曲梦君, 王寅, 等. 青藏高原北部戈壁植物群落物种、功能与系统发育 β 多样性分布格局及其影响因素. *生物多样性*, 2022, 30(6): 62–75.
- [53] Takahashi K, Tanaka S. Relative importance of habitat filtering and limiting similarity on species assemblages of alpine and subalpine plant communities. *Journal of Plant Research*, 2016, 129(6): 1041–1049.
- [54] Gairola S, Ghildiyal S K, Sharma C M, *et al.* Species richness and diversity along an altitudinal gradient in moist temperate forest of Garhwal Himalaya. *The Journal of American Science*, 2009, 5(5): 119–128.
- [55] Wang J W, Ming S P, Xu M, *et al.* Diversity pattern and phylogenetic structure of plant communities in alpine ecological key zone. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(9): 2777–2786.
王俊伟, 明升平, 许敏, 等. 高山生态关键带植物群落多样性格局与系统发育结构. *草地学报*, 2023, 31(9): 2777–2786.
- [56] Li Y G. Geographical distribution patterns and conservation of wetland plant diversity in the Qinghai—Tibet Plateau. Lhasa: Tibet University, 2024.
李义刚. 青藏高原湿地植物多样性地理分布格局及其保护. 拉萨: 西藏大学, 2024.
- [57] Gilbert B, Lechowicz M J. Neutrality, niches, and dispersal in a temperate forest understory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(20): 7651–7656.
- [58] Fernandez-Going B M, Harrison S P, Anacker B L, *et al.* Climate interacts with soil to produce beta diversity in Californian plant communities. *Ecology*, 2013, 94(9): 2007–2018.
- [59] Zhang X X, Ye J F, Laffan S W, *et al.* Spatial phylogenetics of the Chinese angiosperm flora provides insights into endemism and conservation. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2022, 64(1): 105–117.
- [60] Du Z Y, An H, Wen Z L, *et al.* Response of plant community structure and its stability to water and nitrogen addition in desert grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(6): 2359–2371.
杜忠毓, 安慧, 文志林, 等. 荒漠草原植物群落结构及其稳定性对增水和增氮的响应. *生态学报*, 2021, 41(6): 2359–2371.
- [61] Han W Y, Chen L, Su X K, *et al.* Effects of soil physico-chemical properties on plant species diversity along an elevation gradient over alpine grassland on the Qinghai—Tibetan Plateau, China. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13(4): 822268.