DOI: 10. 11686/cyxb2025489 http://cyxb. magtech. com. cn
郁国梁, 杨尚剑, 王建成, 等. 新疆和静县草地物种多样性和系统发育多样性特征及其影响因子研究. 草业学报, 2026, 35(11): 1－12.
YU Guo-liang, YANG Shang-jian, WANG Jian-cheng, *et al*. Characterization of grassland species diversity, phylogenetic diversity and factors influencing them in Hejing County, Xinjiang. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(11): 1－12.

新疆和静县草地物种多样性和系统发育多样性特征及其影响因子研究

郁国梁[1,2,3], 杨尚剑[1,2,3], 王建成[1,2,3], 王喜勇[1,2,3*]
(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院吐鲁番沙漠植物园, 新疆 吐鲁番 838008; 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 中国－塔吉克斯坦生物资源保育与可持续利用"一带一路"联合实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 探究草地群落物种多样性和系统发育多样性特征, 对揭示植物群落构建机制及其影响因子, 改善草地群落物种组成具有重要意义。以天山南坡和静县境内5种类型草地(荒漠草原、河漫滩草甸、林缘草甸、亚高山草甸、高山草甸)为对象, 分析不同类型草地的物种多样性和系统发育多样性差异、海拔特征及其影响因子。结果表明: 1) Shannon-Wiener指数和系统发育多样性(PD)指数随海拔升高先增大后减小, Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数、净亲缘关系指数(NRI)和最近种间亲缘关系指数(NTI)均无明显变化趋势。2)林缘草甸和亚高山草甸物种多样性和系统发育多样性显著高于荒漠草原、河漫滩草甸和高山草甸, 且物种多样性和系统发育多样性变异主要来源于草地类型。3)Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数与系统发育多样性各指数呈显著正相关, 而Simpson优势度指数与系统发育多样性各指数间均无明显相关性。4)物种多样性主要受年平均湿度的影响, 系统发育多样性主要受纬度、年平均降水量、年平均湿度和年平均温度的影响。5)研究区NRI和NTI均值大于0, 植物群落构建以环境过滤为主导, 主要环境因子为年平均湿度、年平均温度和年平均降水量。基于以上研究结果, 建议和静县在保护草地生态系统中, 优先保护多样性较高的林缘草甸和亚高山草甸, 同时要加强西部低海拔区域荒漠草原的放牧管控。

关键词: 物种多样性; 系统发育多样性; 海拔; 草地类型; 群落构建

Characterization of grassland species diversity, phylogenetic diversity and factors influencing them in Hejing County, Xinjiang

YU Guo-liang[1,2,3], YANG Shang-jian[1,2,3], WANG Jian-cheng[1,2,3], WANG Xi-yong[1,2,3*]
1. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*; 2. *Turfan Desert Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Turfan* 838008, *China*; 3. *China-Tajikistan Belt and Road Joint Laboratory on Biodiversity Conservation and Sustainable Use, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*

Abstract: Exploring the characteristics of species diversity and phylogenetic diversity of grassland communities is of great significance for revealing the mechanisms of and factors influencing plant community assembly, and thus for formulating strategies to optimize the species composition of grassland communities. This research investigated five types of grassland (desert steppes, floodplain meadows, forest-edge meadows, subalpine meadows, and alpine

收稿日期: 2025-12-02; 改回日期: 2026-01-05
基金项目: 新疆国家植物园创建种质资源收集项目(E5448513)资助。
作者简介: 郁国梁(1998－), 男, 河南周口人, 助理工程师, 硕士。E-mail: 2663790310@qq. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: wangxy@ms. xjb. ac. cn

meadows) in Hejing County on the southern slope of the Tianshan Mountains, and analyzed the differences in species diversity, phylogenetic diversity, and their altitudinal characteristics, as well as the factors influencing these indices among different grassland types. It was found that: 1) The Shannon-Wiener index and phylogenetic diversity (PD) index initially increased and then decreased with elevation, while the Simpson dominance index, Pielou evenness index, net relatedness index (NRI), and nearest taxon index (NTI) showed no obvious elevational trend. 2) Species diversity and phylogenetic diversity were significantly higher in forest-edge meadows and subalpine meadows than in desert steppes, floodplain meadows, and alpine meadows, and the variations in species diversity and phylogenetic diversity mainly originated from grassland types. 3) The Shannon-Wiener index and Pielou evenness index were significantly positively correlated with all phylogenetic diversity indices, while the Simpson dominance index showed no significant correlation with these indices. 4) Species diversity was mainly affected by mean annual relative humidity, and phylogenetic diversity was correlated with latitude, mean annual precipitation, mean annual relative humidity, and mean annual temperature. 5) The mean values of NRI and NTI in the study area were greater than zero, indicating that plant community assembly was dominated by environmental filtering, with the main environmental factors being mean annual relative humidity, mean annual temperature, and mean annual precipitation. Based on the above research results, it is suggested that Hejing County give priority to protecting forest-edge meadows and subalpine meadows with high diversity in grassland ecosystem conservation, while strengthening grazing management and regulation of the desert steppes in the western low-altitude areas.

Key words: species diversity; phylogenetic diversity; elevation; grassland type; community construction

物种多样性和系统发育多样性特征是草地植物群落多样性研究的重要组成部分[1]。物种多样性一直是生态学领域的研究重点和热点,其可以直接反映群落中共存物种之间的分类学差异,从而揭示植物群落物种组成的时空变化[2-3]。从以往的研究结果可知,物种多样性能够维持植物群落稳定,且Elton[4]提出的“生物多样性阻抗假说”认为物种多样性越高的群落对外来物种入侵的抵抗力越强。植物群落构建机制一直以来都是生态学研究的核心论题[5]。基于确定性过程的生态位理论和随机性过程的中性理论是目前对群落构建机制的主要解释,生态位理论强调生境过滤及竞争排斥两种相反的作用力促使生态位分化,以达到物种间共存,而中性理论则认为扩散和随机作用是植物群落构建的决定因子[6]。以往研究中的植物群落构建机制中性理论和生态位理论均得到了证实[7],亦有研究发现群落构建是生态位过程和中性理论过程共同作用的结果[8]。系统发育多样性反映了植物群落中各物种在进化历史中的独立演化程度[9]。传统生物多样性研究主要关注物种数量、分布均匀度等方面,而系统发育多样性则提供了从进化角度看待生物多样性的新视角。系统发育多样性的研究有助于了解不同物种之间的进化关系,从而更深入地认识生物多样性的维持机制[10]。因此,在探究植物群落多样性特征时,应综合考虑物种多样性和系统发育多样性,从而以更全面的视角了解植物群落的形成及稳定机制。虽然目前已经对草地群落物种多样性和系统发育多样性的分布格局及影响因子做了大量研究,但对于兼具山地海拔梯度和多种草地类型的新疆和静县草地生态系统仍存在多样性变异来源、群落构建主导过程、多样性间相关性及影响因子等关键科学问题尚未厘清。

植物群落物种多样性和系统发育多样性的特征与海拔、经纬度和气候因子息息相关[11]。海拔和经纬度作为综合环境因子,其变化不仅影响温度、湿度等气候因子,还会对土壤、微生物等因子造成一定影响[11]。目前对于植物群落多样性影响因子的研究主要集中在土壤理化因子和地形等方面[11-13],而对于经纬度、气候因子等的研究较少。且受限于时间、精力,通过实地调查的植物群落多样性研究大多局限于小范围内的群落,有关植物群落多样性的空间变化及其对气候变化的响应研究有限[12-14]。因此,对于大范围内植物群落多样性变化特征及其经纬度、气候等影响因子的研究迫在眉睫。而新疆和静县由于其草地类型多样、面积广阔、地形复杂、东西部环境差异巨大等因素成为研究草地群落物种多样性和系统发育多样性特征及其影响因子的绝佳区域。

草地是新疆最大的植被类型，也是新疆自然资源陆地生态系统的主体[15]。和静县位于新疆中部，天山南坡。东部受塔里木盆地干热气流影响，旱生、超旱生植物占绝对优势，景观以荒漠草原为主[16]。西部随着地势升高以及伊犁河谷暖湿气流影响，年降水量为 300～500 mm，林缘草甸、河漫滩草甸、亚高山草甸和高山草甸发育良好，体现了高山、亚高山草地类型区域性、多样化的分布特点[16]。随着全球气候变暖，荒漠区植物多样性急剧减少，草地退化也成为新疆普遍存在的问题之一[17]。在对草地退化及修复的关注日益扩大的背景下，以和静县不同类型草地为研究对象，探究草地群落物种多样性和系统发育多样性特征及其影响因子，主要解决以下科学问题：1）和静县草地群落物种多样性和系统发育多样性在不同海拔、草地类型间的差异及其变异来源如何？2）和静县草地群落物种多样性和系统发育多样性间的相关性强度如何？3）和静县草地群落物种多样性和系统发育多样性的主要影响因子是什么？

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

和静县位于新疆维吾尔自治区中部（42°06′－43°33′ N、82°28′－87°52′ E）、巴音郭楞蒙古自治州西北部，地处天山中段南麓，属中温带大陆性气候，总面积 39686 km^2。县域有耕地 39133 hm^2、天然草场面积 2460133 hm^2、森林面积 163600 hm^2、林地面积 195000 hm^2、湿地面积 189533 hm^2，以天然草场为主，占总面积的 61.99%，有荒漠草原、河漫滩草甸、林缘草甸、亚高山草甸和高山草甸等草地类型[16]。和静县东部干旱少雨，西部高寒湿润，是研究草地植物群落多样性的理想区域。

1.2　野外调查及样地设置

在对和静县草地群落植被进行大量踏查的基础上，于 2025 年 6 月对和静县不同类型草地进行调查，分别在荒漠草原、河漫滩草甸、林缘草甸、亚高山草甸和高山草甸 5 种类型草地群落设置样地（图 1），其中荒漠草原 11 个样地，河漫滩草甸 8 个样地，林缘草甸 7 个样地，亚高山草甸 13 个样地，高山草甸 12 个样地，每个样地布设 3 个 10 m×10 m 的灌木样方，每个灌木样方沿对角线设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方，共 51 个样地、153 个灌木样方、459 个草本样方。同时记录每个样方中植物种类、数量、高度、冠幅，植株高度采用精度为 0.1 cm 的卷尺测量，冠幅用植株东西向和南北向直径计算。

1.3　群落物种重要值计算

$$重要值=(相对多度+相对频度+相对优势度)/3$$

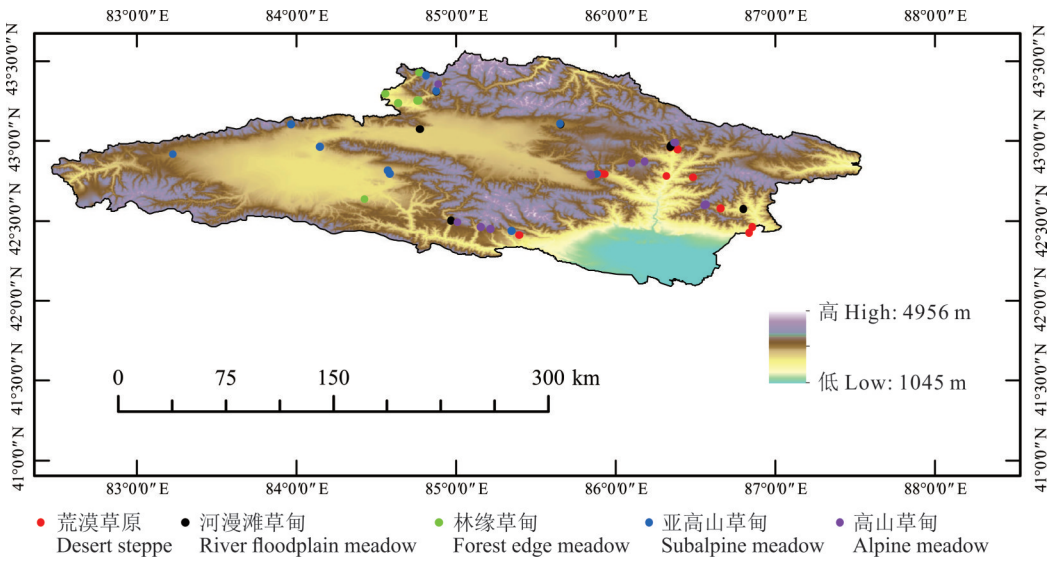


图 1　和静县采样地信息

Fig. 1　Information on sampling places in Hejing County

相对多度=(样地内该植物的株数/样地内全部植物的总株数)×100%

相对频度=(该植物样方出现的次数/所有种出现的总次数)×100%

相对优势度=(该植物的冠幅面积/所有种的冠幅面积之和)×100%

1.4 物种多样性和系统发育多样性指标计算

物种多样性指数选择Shannon-Wiener、Simpson和Pielou指数,计算公式如下:

$$H=-\sum_{i=1}^{s}P_i\ln P_i$$

$$D=-\ln\left[\sum_{i=1}^{s}\left(\frac{N_i}{N}\right)^2\right]$$

$$J=-\sum_{i=1}^{s}\frac{N_i(N_i-1)}{N(N-1)}$$

式中:H、D、J分别代表Shannon-Wiener、Simpson和Pielou指数,P_i表示第i个种的多度比例,S为物种的数目,N为全部种的个体总数,N_i是物种i的个体数[18]。

系统发育多样性指数选择Faith's PD指数(PD)、净亲缘关系指数(net relatedness index, NRI)和最近种间亲缘关系指数(nearest taxon index, NTI)表示,根据物种的种、属、科名利用R语言"V. PhyloMaker"包拟合并绘制研究区域所有物种的系统发育树,并根据其计算系统发育多样性指数。公式如下:

$$PD=\sum_{c\in C}L_c$$

式中:C是指连接谱系树上所考察的物种最短路径上所有分支的集合,c是指连接节点上的一段分支,L_c是指c所代表的分支长度[19]。

$$NRI=-\frac{MPD_s-MPD_{mds}}{SD(MPD_{mds})}$$

$$NTI=-\frac{MNTD_s-MNTD_{mds}}{SD(MNTD_{mds})}$$

式中:SD指标准差(standard deviation),MPD和$MNTD$分别表示物种间的平均成对系统发育距离(mean phylogenetic distance)与平均最近种间系统发育距离(mean nearest taxon distance),MPD_s和$MNTD_s$则分别表示实际观察到的MPD值和群落内亲缘关系最近的物种之间的平均系统发育距离,MPD_{mds}和$MNTD_{mds}$分别表示通过软件随机模拟999次的平均谱系距离和最近相邻谱系距离的平均值[19]。

1.5 气候因子数据来源

根据51个样地的经纬度,在世界气候数据网(http://worldclim.org),提取7个气象因子数据:年平均降水量(mean annual precipitation, MAP)、年平均温度(mean annual temperature, MAT)、年平均地温(mean annual ground temperature, MAGT)、年平均风速(mean annual wind speed, MAWS)、年日照时数(annual sunshine hours, ASH)、年平均湿度(mean annual humidity, MAH)、年蒸发量(annual evaporation volume, AE)。

1.6 数据处理与分析

采用R语言4.1.1软件"vegan"包计算物种多样性指数,"picante""ape"和"NST"包计算系统发育多样性指数;"ggpmisc"包进行线性回归分析,探究物种多样性和系统发育多样性随海拔的变化特征;采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同草地类型之间物种多样性和系统发育多样性的差异显著性,使用Duncan's test进行多重比较;采用协方差分析(analysis of covariance, ANCOVA)比较海拔、草地类型及二者交互作用对物种多样性和系统发育多样性指数变异的贡献率,因变量为物种多样性和系统发育多样性指数,自变量为海拔、草地类型以及二者的交互作用,分析中所用的回归模型为:物种多样性指数~海拔+草地类型+海拔×草地类型、系统发育多样性指数~海拔+草地类型+海拔×草地类型;对数据进行对数转换使其全部满足正态分布后采用Pearson相关性分析研究物种多样性和系统发育多样性指数之间的相关性;通过冗余分析(redundancy analysis, RDA)检验物种多样性和系统发育多样性与环境因子之间的相关性,通过显著性检验确定对物种多样性和系统发育多样

性整体有显著影响的因子；在去除自变量共线性后，采用逐步回归分析，利用赤池信息准则（Akaike information criterion，AIC）指标确定单个多样性指数的最优回归方程，找出对其有显著影响的因子。

2　结果与分析

2.1　和静县草地群落物种组成特征

和静县域草地群落调查记录物种 207 种，其中荒漠草原记录 74 种、河漫滩草甸记录 68 种、林缘草甸记录 66 种、亚高山草甸记录 82 种、高山草甸记录 68 种，隶属于 52 科、145 属，优势科为菊科（Asteraceae）、豆科（Fabaceae）、禾本科（Poaceae）、毛茛科（Ranunculaceae）和十字花科（Brassicaceae），分别占总物种数的比例为 21.6%、12.8%、10.1%、7.4% 和 4.0%，优势属为委陵菜属（*Potentilla*）、葱属（*Allium*）、红景天属（*Rhodiola*）、唐松草属（*Thalictrum*）和棘豆属（*Oxytropis*），分别占总物种数的 4.7%、4.0%、2.7%、2.7% 和 2.0%。由表 1 可知，研究区草地群落无明显单一优势种，荒漠草原以灌木和半灌木为主，主要群落为狭叶锦鸡儿＋羊茅（*Caragana stenophylla*＋*Festuca ovina*），而河漫滩草甸、林缘草甸、亚高山草甸和高山草甸以多年生草本为主，灌木仅少量分布有鬼箭锦鸡儿（*Caragana jubata*）和金露梅（*Dasiphora fruticosa*）。

表 1　和静县草地群落优势物种及重要值

Table 1　Dominant species and important values of grassland communities in Hejing County

草地类型 Grassland type	优势物种（重要值） Dominant species (important value)
荒漠草原 Desert steppe	狭叶锦鸡儿 *C. stenophylla*（4.3）、锐枝木蓼 *Atraphaxis pungens*（3.7）、羊茅 *F. ovina*（3.2）、紫菀木 *Asterothamnus alyssoides*（3.1）、驼绒藜 *Krascheninnikovia ceratoides*（3.0）
河漫滩草甸 River floodplain meadow	新疆苔草 *Carex turkestanica*（8.9）、芨芨草 *Neotrinia splendens*（8.7）、早熟禾 *Poa annua*（7.9）、大叶橐吾 *Ligularia macrophylla*（7.6）、冰草 *Agropyron cristatum*（6.9）
林缘草甸 Forest edge meadow	阿尔泰独尾草 *Eremurus altaicus*（3.8）、掌叶大黄 *Rheum palmatum*（3.7）、针茅 *Stipa capillata*（3.0）、黄唐松草 *Thalictrum flavum*（2.9）、地榆 *Sanguisorba officinalis*（2.7）
亚高山草甸 Subalpine meadow	新疆苔草 *C. turkestanica*（5.3）、羊茅 *F. ovina*（4.8）、珠芽蓼 *Bistorta vivipara*（4.4）、冰草 *A. cristatum*（4.3）、鬼箭锦鸡儿 *C. jubata*（4.1）
高山草甸 Alpine meadow	新疆苔草 *C. turkestanica*（7.8）、早熟禾 *P. annua*（5.0）、鬼箭锦鸡儿 *C. jubata*（4.8）、黄白火绒草 *Leontopodium ochroleucum*（4.6）、珠芽蓼 *B. vivipara*（3.2）

2.2　物种多样性和系统发育多样性特征及其变异来源

通过二元线性回归分析（图 2）可知，物种多样性和系统发育多样性表现为随海拔升高 Shannon-Wiener 指数呈先增大后减小的极显著变化趋势（$P<0.01$），PD 指数呈先增大后减小的显著变化趋势（$P<0.05$），而 Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数以及 NRI 和 NTI 则无显著变化趋势（$P>0.05$）。

通过单因素 Kruskal-Wallis 检验（图 3）可知，林缘草甸和亚高山草甸 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数显著高于荒漠草原和高山草甸，而荒漠草原和高山草甸的 Simpson 优势度指数则显著高于林缘草甸和亚高山草甸（$P<0.05$）；亚高山草甸的 PD 指数显著高于荒漠草原，NRI 和 NTI 指数显著高于河漫滩草甸（$P<0.05$）。

通过协方差分析（表 2）可知，Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数、PD 指数、NRI 和 NTI 指数变异均主要来源于草地类型，Simpson 优势度指数变异来源于草地类型以及海拔和草地类型的交叉作用（$P<0.05$）。

2.3　物种多样性和系统发育多样性指数间的相关性

通过 Pearson 相关性分析（图 4）可知，物种多样性与系统发育多样性间具有显著的正相关关系。Shannon-Wiener 指数与 PD 指数呈极显著正相关（$P<0.01$），与 NRI 和 NTI 指数呈显著正相关（$P<0.05$），Pielou 均匀度指数与 PD 指数呈极显著正相关（$P<0.01$），与 NTI 指数呈显著正相关（$P<0.05$），而 Simpson 优势度指数与系统发育多样性各指数间无显著相关性。物种多样性中 Shannon-Wiener 指数与 Simpson 优势度指数呈显著负相关

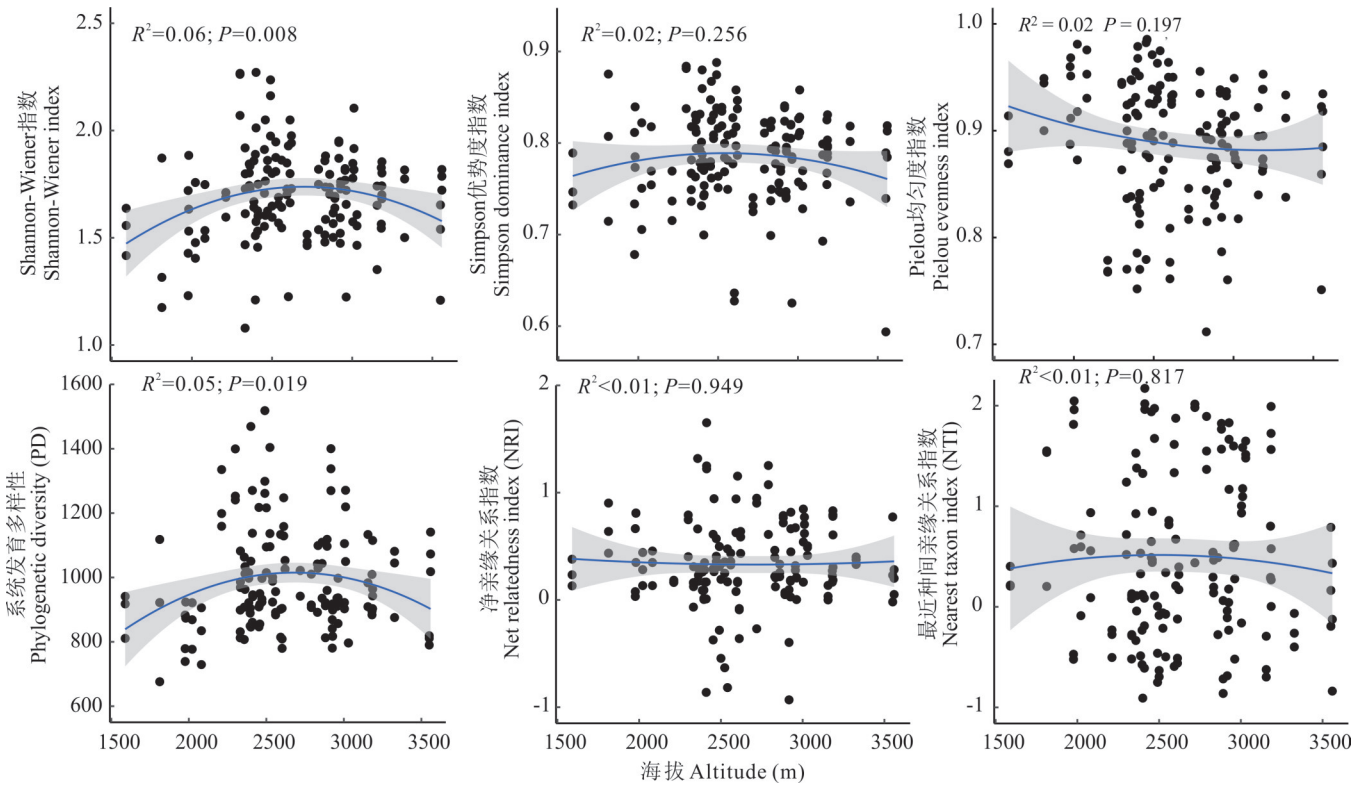


图2 物种多样性和系统发育多样性的海拔特征

Fig. 2 Elevation characteristics of species diversity and phylogenetic diversity

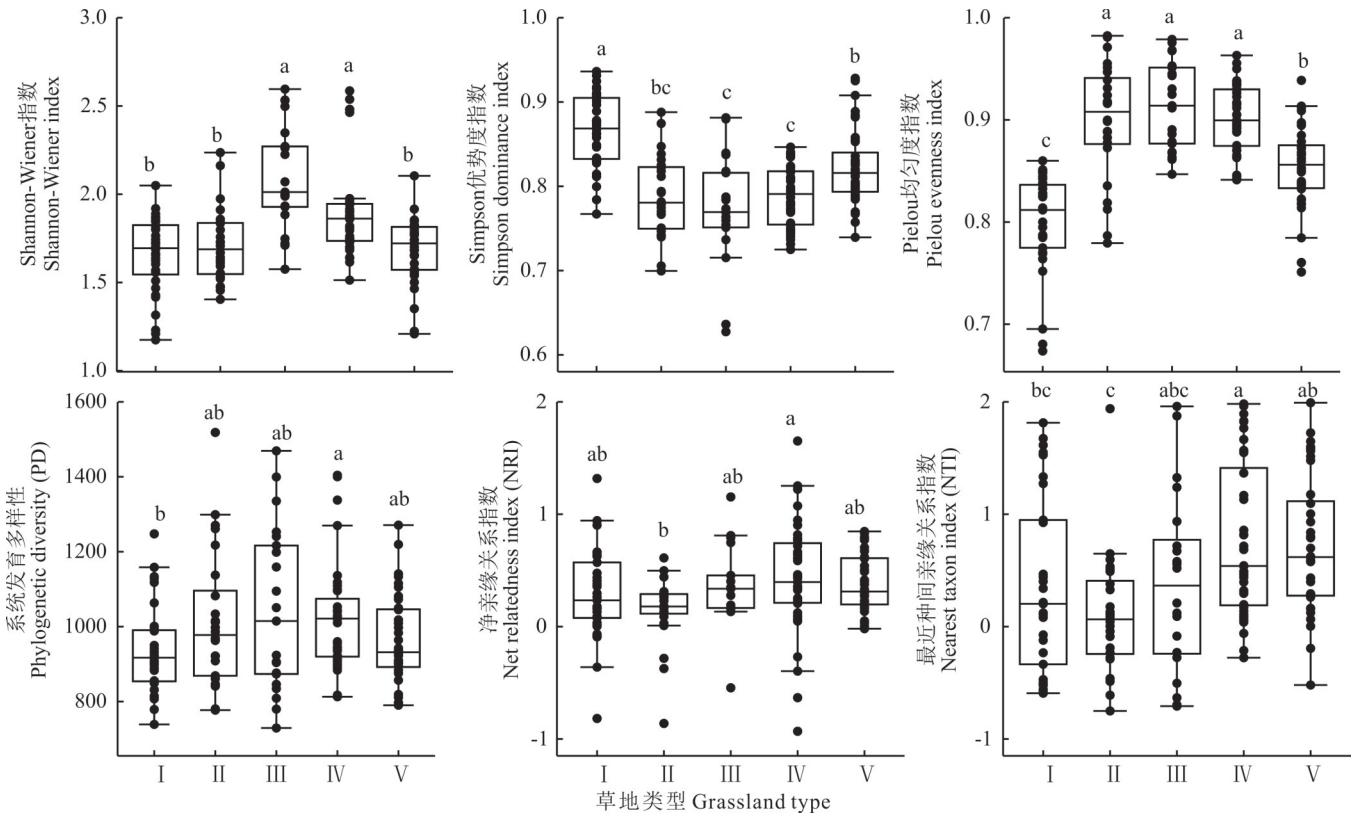


图3 不同类型的草地物种多样性和系统发育多样性特征

Fig. 3 Characteristics of species diversity and phylogenetic diversity of different types of grasslands

Ⅰ：荒漠草原 Desert steppe；Ⅱ：河漫滩草甸 River floodplain meadow；Ⅲ：林缘草甸 Forest edge meadow；Ⅳ：亚高山草甸 Subalpine meadows；Ⅴ：高山草甸 Alpine meadow. 不同小写字母表示各草地类型间差异显著(P<0.05)。Different lowercase letters indicate significant differences among the different types of grasslands (P<0.05).

表 2　物种多样性和系统发育多样性的协方差分析参数

Table 2　Analysis of covariance (ANCOVA) parameters for species diversity and phylogenetic diversity

变异来源 Source of variation	S-W			Simpson			Pielou		
	离差平方和 Sum of squares (*SS*)	均方 Mean square (*MS*)	*F* 值 *F* value	离差平方和 Sum of squares (*SS*)	均方 Mean square (*MS*)	*F* 值 *F* value	离差平方和 Sum of squares (*SS*)	均方 Mean square (*MS*)	*F* 值 *F* value
海拔 Altitude	0.038	0.038	0.665	0.004	0.004	1.694	0.001	0.001	0.051
草地类型 Grassland type	3.746	0.937	16.390**	0.181	0.045	21.273**	0.279	0.069	37.158**
海拔×草地类型 Altitude×grassland type	0.332	0.083	1.450	0.026	0.007	3.077*	0.014	0.003	1.813
变异来源 Source of variation	PD			NRI			NTI		
	离差平方和 Sum of squares (*SS*)	均方 Mean square (*MS*)	*F* 值 *F* value	离差平方和 Sum of squares (*SS*)	均方 Mean square (*MS*)	*F* 值 *F* value	离差平方和 Sum of squares (*SS*)	均方 Mean square (*MS*)	*F* 值 *F* value
海拔 Altitude	6562.000	6562.000	0.272	0.001	0.001	0.009	0.900	0.904	1.773
草地类型 Grassland type	308501.000	77125.000	3.197*	2.318	0.579	3.944*	13.110	3.276	6.430**
海拔×草地类型 Altitude×grassland type	42515.000	10629.000	0.441	0.631	0.158	1.074	0.910	0.227	0.446

S-W：Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index；Simpson：Simpson 优势度指数 Simpson dominance index；Pielou：Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index；PD：系统发育多样性 Phylogenetic diversity；NRI：净亲缘关系指数 Net relatedness index；NTI：最近种间亲缘关系指数 Nearest taxon index；*：$P<0.05$；**：$P<0.01$. 下同 The same below.

($P<0.05$)，而与 Pielou 均匀度指数呈极显著正相关($P<0.01$)。系统发育多样性中 PD 指数与 NRI、NTI 指数呈极显著负相关($P<0.01$)。

2.4　物种多样性和系统发育多样性的主要影响因子

由 RDA 结果(图 5)可知：轴Ⅰ和轴Ⅱ对物种多样性和系统发育多样性与其影响因子关系的解释变量分别为 66.05% 和 21.57%，累计为 87.62%，表明前 2 轴能够较好地说明物种多样性和系统发育多样性与其影响因子的关系。Simpson 优势度指数与纬度、年平均湿度呈显著负相关，而与经度、年平均温度呈显著正相关；Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数和 PD 指数与纬度、年平均湿度呈显著正相关，而与经度和年平均温度呈显著负相关。

由影响因子显著性检验(表 3)可知，物种多样性和系统发育多样性主要受纬度和年平均湿度的极显著影响($P<0.01$)，以及年平均温度的显著影响($P<0.05$)。

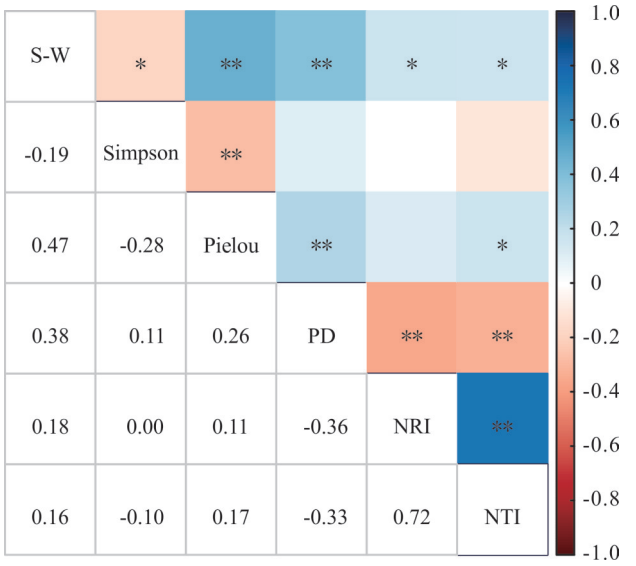


图 4　物种多样性和系统发育多样性指数间的相关性

Fig. 4　The correlation between species diversity and phylogenetic diversity index

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$.

通过逐步回归分析比较物种多样性和系统发育多样性的影响因子(表 4)可知，除 NRI 外，物种多样性和系统发育多样性指数均受年平均湿度影响，Shannon-Wiener 指数和系统发育多样性指数均受年平均温度影响，系统发育多样性指数均受纬度的显著影响，此外，Shannon-Wiener 指数还受海拔影响，NRI 和 NTI 还受年平均降水量的影响($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 物种多样性和系统发育多样性特征及变异来源

通过调查研究发现和静县地区草地群落Shannon-Wiener指数随海拔升高呈先增大后减小的单峰格局，这与王恩召等[12]对焉耆霍拉山植物群落物种多样性与系统发育多样性沿海拔梯度分布格局的研究结果相同，这主要是因为Shannon-Wiener指数由植物群落物种数和各种间个体分配的均匀性决定[20]，同时研究区域属于干旱区，中海拔(2000～2500 m)区域相比低海拔(1500～2000 m)气候更湿润，人为干扰程度更低，相比高海拔(2500～3500 m)气温较高，更适宜植物生长[21]。Simpson优势度指数和Pielou均匀度指数分别表示植物群落中优势物种的突出程度与物种分布的均匀性[22]，本研究中二者随海拔变化均未表现出显著的变化趋势，而在不同类型草地之间却有明显差异，同时协方差分析结果也表明研究区域物种多样性的变异均主要来源于草地类型，这与以往研究中物种多样性与海拔的关系有所不同[23-25]，可能是因为本研究区域较大，且选择了多种草地类型，间接弱化了物种多样性和系统发育多样性与海拔之间的关系，同时由于不同草地类型生存环境、物种组成和共存方式差异巨大，使得本研究中各类型草地间物种多样性和系统发育多样性出现明显差异[26]。系统发育多样性指数(PD)基于物种的进化历史或系统发育关系来评估生物多样性[19]，本研究中PD指数随海拔升高呈现与Shannon-Wiener指数相似的先增大后减小的单峰格局，这与以往研究中物种多样性和系统发育多样性呈正相关的结论一致[27]，同时也表明了研究区域中海拔地区环境更适宜植物生长，使得不同进化分支的物种共存。群落系统发育结构指数主要用于检测群落是否存在系统发育结构，以及系统发育结构是否松散或聚集[28]。本研究中大部分群落NRI和NTI大于零，系统发育结构聚集，表明研究区域整体环境较恶劣，在群落构建过程中环境过滤占据主导地位，逐渐淘汰适应能力差的物种，保留了亲缘关系近、能适应恶劣环境的物种。这也证实了环境过滤是干旱区草地群落构建的主导过程，为生态位理论在干旱区草地的适用提供了支撑。不同草地类型中林缘草甸和亚高山草甸表现出较高的物种多样性和系统发育多样性，这主要是因为林缘草甸和亚高山草甸气候相较荒漠草原更湿润，气温相较高山草甸更高，而河漫滩草甸虽然气候湿润且气温适宜，但其往往存在盐渍化现象，导致植物生存环境恶劣，仅由少数耐盐碱植物组成[29]。基于以上结果建议研究区域在制定草地群落保护策略时优先保护多样性较高的林缘草甸和亚高山草甸，同时要强化对于低海拔区域的荒漠草原的人为干扰管控，加强放牧管理等。

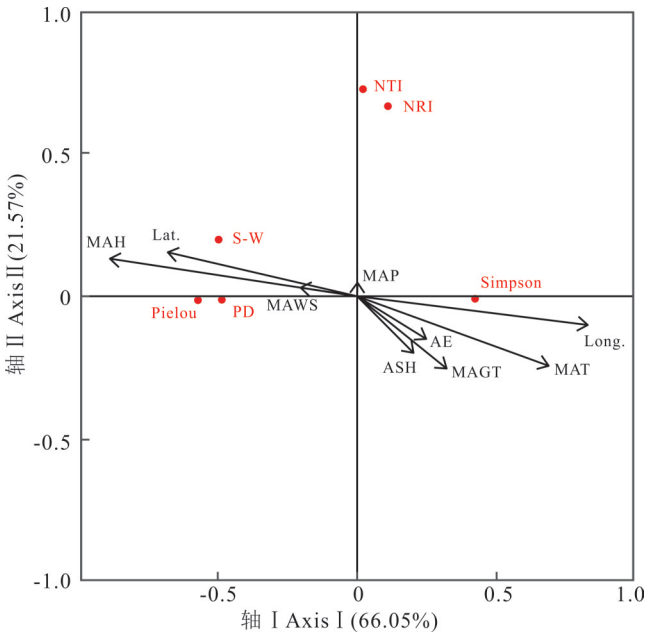


图5 物种多样性和系统发育多样性与其影响因子的冗余分析排序

Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) ranking of species diversity and phylogenetic diversity and their influencing factors

Long.：经度 Longitude；Lat.：纬度 Latitude；MAP：年平均降水量 Mean annual precipitation；MAT：年平均温度 Mean annual temperature；MAGT：年平均地温 Mean annual ground temperature；MAWS：年平均风速 Mean annual wind speed；ASH：年日照时数 Annual sunshine hours；MAH：年平均湿度 Mean annual humidity；AE：年蒸发量 Annual evaporation volume. 下同 The same below.

表3 影响因子显著性检验

Table 3 Significance test of impact factor

影响因子 Impact factors	R^2	P值 P value	轴Ⅰ得分 Axis Ⅰ score	轴Ⅱ得分 Axis Ⅱ score
Long.	0.040	0.085	0.827	−0.100
Lat.	0.127	0.001	−0.679	0.153
MAP	−0.008	0.590	0.001	0.048
MAT	0.080	0.040	0.687	−0.243
MAGT	0.036	0.183	0.321	−0.252
MAWS	−0.010	0.573	−0.203	0.030
ASH	−0.085	0.996	0.202	−0.197
MAH	0.124	0.002	−0.887	0.131
AE	0.012	0.354	0.248	−0.149

表 4　物种多样性和系统发育多样性影响因子的逐步回归分析

Table 4　Stepwise regression of main factors affecting species diversity and phylogenetic diversity

多样性指数 Diversity index	AIC	R^2	影响因子 Impact factor	回归系数估计值 Estimate regression coefficient	标准误 Standard error	*t*值 *t*-value
S-W	−410.16	0.232	Altitude**	−0.001	0.000	−3.074
			MAT**	−0.315	0.104	−3.032
			MAH*	−0.146	0.063	−2.312
Simpson	−886.43	0.118	MAH**	−0.005	0.001	−4.491
Pielou	−885.07	0.236	MAH**	0.011	0.003	3.138
			ASH**	−0.001	0.000	−2.967
			MAWS**	0.149	0.051	2.902
PD	1532.50	0.201	Lat.**	1493.000	561.300	2.659
			MAT*	−192.700	79.000	−2.439
			MAH*	−117.100	48.390	−2.420
NRI	−285.13	0.108	Lat.**	−4.531	1.501	−3.019
			MAP*	−0.009	0.003	−2.345
			MAT*	1.463	0.648	2.255
NTI	−88.30	0.118	Lat.**	−9.993	2.855	−3.500
			MAP**	−0.022	0.007	−3.191
			MAT**	3.959	1.234	3.208
			MAH**	1.616	0.475	3.403
			AE**	0.138	0.041	3.411

AIC：赤池信息准则 Akaike information criterion；R^2：决定系数 Coefficient of determination.

3.2　物种多样性和系统发育多样性间的相关性分析

物种多样性和系统发育多样性间的相关性是植物群落多样性研究的重点之一[27]，本研究发现和静县草地群落物种多样性和系统发育多样性间呈显著的正相关关系，这与前人研究结果一致[30]。尤其是 Shannon-Wiener 指数与系统发育多样性各指数间均具有显著的正相关关系，这可能是因为 Shannon-Wiener 指数综合考虑了植物群落的物种数量及各物种的分布均匀程度，更能表现植物群落的物种分布及其与进化历史的关系[20]。Pielou 均匀度指数虽然与 PD 指数呈极显著的正相关关系，但其与群落系统发育结构指数 NRI 和 NTI 间的关系却弱于 Shannon-Wiener 指数，这可能是因为 Pielou 均匀度指数在计算时着重考虑了群落中各物种的分布均匀程度，但对于群落中物种的数量及各物种间的亲缘、进化关系未作考虑[22]。本研究中 Simpson 优势度指数与系统发育多样性各指数均未表现出明显的相关性，这与李梦佳等[27]的研究结果一致，这表明研究区域植物群落未出现特定物种仅在特定小区域内分布的现象，物种的进化关系较均衡[31−32]。PD 指数与 NRI 和 NTI 均呈极显著负相关关系，这表明植物群落物种的数量和进化关系与群落构建机制具有紧密的联系，且植物群落物种数量越多、进化关系越复杂，植物群落系统发育结构就越分散，表明植物群落在形成过程中受到的环境因子过滤影响越小[6]。以上物种数量、进化关系和群落构建机制三者间的关联规律深化了对干旱区草地植物多样性维持机制的理解。

3.3　物种多样性和系统发育多样性的主要影响因子

气候因子和海拔是影响植物群落物种多样性和系统发育多样性的关键因素[33]。通过冗余分析结果可知，研究区域物种多样性和系统发育多样性主要受纬度和年平均湿度的极显著影响，以及年平均温度的显著影响。主要是因为纬度是一个复杂的综合环境因子，其变化往往伴随着气温、湿度、日温差、年温差的变化，这些因子均会影响植物群落物种组成和数量[23]，同时由于研究区域属于干旱区，植物群落对于湿度、温度的变化更加敏感[34]，因

此本研究中年平均湿度和年平均温度会对植物群落物种多样性和系统发育多样性影响显著。

通过逐步回归分析探究物种多样性和系统发育多样性各指数的影响因子,发现除NRI外,所有多样性指数均受年平均湿度的影响,这与RDA结果相吻合。湿度对于植物的生存起着至关重要的作用,其不仅影响植物的蒸腾作用、气孔开闭,低湿度可能会导致植物蒸腾作用增强,进而失水,高湿度会使植物气孔长期处于开放状态,影响光合作用,还会通过影响植物吸收水分,影响养分的吸收,同时湿度对植物的影响在干旱区又会被无限放大[35-36]。除此之外,Shannon-Wiener指数还受海拔的显著影响,这与以往研究结果类似[27],主要是因为随海拔升高,温度降低,降水增多,人为干扰减少等,这些因子均会对植物群落物种多样性指数造成影响[12]。Pielou均匀度指数还受年日照时数和年均风速的影响,这可能是因为部分对日照和风速要求较高的植物受到影响,导致种群数量变化,进而影响了整个植物群落物种分布的均匀度,其具体机制还需要进一步研究。系统发育多样性指数中,PD、NRI和NTI还受纬度和年平均温度的影响,主要是因为纬度作为综合环境因子影响气温、湿度、光照等因素,进而会对植物群落的物种组成造成影响,植物群落在特定的环境也会形成不同的进化关系,进而表现出不同的系统发育多样性[34]。由NRI和NTI可知本研究区域植物群落构建机制由环境过滤主导,同时群落系统发育结构指数均受年平均温度、年平均湿度和年平均降水量的影响,这表明研究区域植物群落构建过程中物种的筛选主要由年平均温度、年平均湿度和年平均降水量来完成。因此,在对研究区草地生态健康监测时应重视气候因子中的气温、湿度及降水量的变化,以提早做出相应保护措施。

4 结论

通过对和静县草地物种多样性和系统发育多样性特征及其影响因素研究发现,研究区域Shannon-Wiener指数和PD指数随海拔升高先增大后减小,Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数、NRI和NTI均无明显变化趋势;林缘草甸和亚高山草甸多样性显著高于其他类型草地;物种多样性和系统发育多样性变异主要来源于草地类型;Shannon-Wiener指数和Pielou均匀度指数与系统发育多样性各指数呈显著正相关关系,而Simpson优势度指数与系统发育多样性各指数间均无明显相关性;物种多样性和系统发育多样性的影响因子主要为年平均湿度和年平均温度。综上所述,和静县林缘草甸和亚高山草甸物种多样性和系统发育多样性更高,研究区植物群落构建以环境过滤为主导,主要环境因子为年平均湿度、年平均温度和年平均降水量。

参考文献 References:

[1] Baldi A. Habitat heterogeneity overrides the species-area relationship. Journal of Biogeography, 2008, 35(4): 675-681.

[2] Swenson N G, Erickson D L, Mi X. Phylogenetic and functional alpha and beta diversity in temperate and tropical tree communities. Ecology, 2012, 93(8): S112-S125.

[3] Mcgill B J, Etienne R S, Gray J S, *et al*. Species abundance distributions: moving beyond single prediction theories to integration within an ecological framework. Ecology Letters, 2007, 10(10): 995-1015.

[4] Elton C S. The ecology of invasions by animals and plants. Journal of Wildlife Management, 1960, 24(2): 231.

[5] Ma Z J, Liu B, Wang J Q, *et al*. Construction of desert plant communities with different slope orientations based on phylogenetic and functional traits: Example of desertification closure reserve in Bohu County. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 3946-3957.
马紫荆, 刘彬, 王军强, 等. 基于系统发育及功能性状的不同坡向荒漠植物群落构建研究——以博湖县沙化封禁保护区为例. 生态学报, 2023, 43(10): 3946-3957.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

张淼淼，秦浩，王烨，等．汾河中上游湿地植被β多样性．生态学报，2016，36(11)：3292－3299.

[9] Schweiger O，Klotz S，Durka W，*et al*. A comparative test of phylogenetic diversity indices. Oecologia，2008，157(3)：485－495.

[10] Petchey O L，Gaston K J. Functional diversity(FD)，species richness and community composition. Ecology Letters，2002，5(3)：402－411.

[11] Zhong J J，Chen J，Chen Q，*et al*. Quantitative classification of MRT，CCA ordination，and species diversity along elevation gradients of a natural secondary forest in the Qinling mountains. Acta Ecologica Sinica，2019，39(1)：277－285.
钟娇娇，陈杰，陈倩，等．秦岭山地天然次生林群落MRT数量分类、CCA排序及多样性垂直格局．生态学报，2019，39(1)：277－285.

[12] Wang E Z，Zhang Y L，Qian H L，*et al*. Study on the distribution pattern of species diversity and phylogenetic diversity of plant community in Yanqi Hola Mountain along the altitude gradient. Acta Agrestia Sinica，2025，33(5)：1612－1621.
王恩召，张云玲，钱慧玲，等．焉耆霍拉山植物群落物种多样性与系统发育多样性沿海拔梯度分布格局研究．草地学报，2025，33(5)：1612－1621.

[13] Jiang S，Wei T X，Fan D H，*et al*. Plant diversity in different positions of gullies and valleys in the loess region of western Shanxi Province，northern China. Journal of Beijing Forestry University，2024，46(6)：20－27.
江姗，魏天兴，范德卉，等．晋西黄土区沟谷不同部位植物多样性．北京林业大学学报，2024，46(6)：20－27.

[14] Wang Z H，Lv S J，Wang Z W，*et al*. Effects of grazing intensity on dominant population and species diversity and their typical relationships. Ecology and Environment Sciences，2024，33(6)：869－876.
王梓晗，吕世杰，王忠武，等．放牧强度对优势种群重要值和物种多样性及其二者典型关系的影响．生态环境学报，2024，33(6)：869－876.

[15] Guo H，Liu W Q，Chen X L. Practical achievements，current problems，and solutions of the ecological civilization system in Xinjiang. Journal of Shaanxi Academy of Governance，2025，39(3)：102－106.
郭虹，刘婉青，陈晓丽．新疆生态文明制度体系的实践成就、现实问题与解决路径．陕西行政学院学报，2025，39(3)：102－106.

[16] Tao M. Grassland resources degradation investigation and governance countermeasures in Hejing County. Modern Agricultural Science and Technology，2018(6)：220－222.
陶梦．和静县草地资源退化情况调查及治理对策．现代农业科技，2018(6)：220－222.

[17] Abudureheman·Wusiman，Yusufujiang·Rusuli，Zhang F，*et al*. Temporal and spatial characteristics of grassland degradation in Xinjiang Section of Tianshan Mountains based on remote sensing monitoring and its relationship with climate factors. Pratacultural Science，2023，40(7)：1779－1792.
阿卜杜热合曼·吾斯曼，玉素甫江·如素力，张发，等．基于遥感监测的天山新疆段草地退化时空特征及其与气候因子的关系．草业科学，2023，40(7)：1779－1792.

[18] Gamito S. Caution is needed when applying Margalef diversity index. Ecological Indicators，2010，10(2)：550－551.

[19] Njogu W A. Species richness，functional and phylogenetic diversity of plant communities along the altitudinal gradient of Mount Kenya，East Africa. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences，2021.
Njogu Waigwa Antony. 东非肯尼亚山海拔梯度植物群落的物种丰富度、功能和系统发育多样性．北京：中国科学院大学，2021.

[20] Liu L，Ren S C，Xue T，*et al*. Vegetation distribution and species diversity in lake aiding basin based on Shannon-Wiener index. Ground Water，2020，42(4)：120－123.
刘亮，任世昌，薛挺，等．基于Shannon-Wiener指数的艾丁湖流域植被分布及物种多样性研究．地下水，2020，42(4)：120－123.

[21] Li W H，Ganjurjav H，Cao X J，*et al*. Effects of altitude on plant productivity and species diversity in alpine meadows of northern Tibet. Acta Prataculturae Sinica，2017，26(9)：200－207.
栗文瀚，干珠扎布，曹旭娟，等．海拔梯度对藏北高寒草地生产力和物种多样性的影响．草业学报，2017，26(9)：200－207.

[22] Fang J Y，Wang X P，Shen Z H，*et al*. Methods and protocols for plant community inventory. Biodiversity Science，2009，17(6)：533－548.
方精云，王襄平，沈泽昊，等．植物群落清查的主要内容、方法和技术规范．生物多样性，2009，17(6)：533－548.

[23] He J S，Chen W L. A review of gradient changes in species diversity of land plant communities. Acta Ecologica Sinica，1997，

17(1): 93－101.
贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征. 生态学报, 1997, 17(1): 93－101.

[24] Tang Z Y, Fang J Y. A review on the elevational patterns of plant species diversity. Biodiversity Science, 2004, 12(1): 20－28.
唐志尧, 方精云. 植物物种多样性的垂直分布格局. 生物多样性, 2004, 12(1): 20－28.

[25] Pan H L, Li M H, Cai X H, *et al*. Responses of growth and ecophysiology of plants to altitude. Ecology and Environment Sciences, 2009, 18(2): 722－730.
潘红丽, 李迈和, 蔡小虎, 等. 海拔梯度上的植物生长与生理生态特性. 生态环境学报, 2009, 18(2): 722－730.

[26] Huang Z L, Kong G H, He D Q. Plant community diversity in Dinghushan Nature Reserve. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(2): 193－198.
黄忠良, 孔国辉, 何道泉. 鼎湖山植物群落多样性的研究. 生态学报, 2000, 20(2): 193－198.

[27] 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.

[28] Niu H Y, Wang Z F, Lian J Y, *et al*. New progress in community assembly: community phylogenetic structure combining evolution and ecology. Biodiversity Science, 2011, 19(3): 275－283.
牛红玉, 王峥峰, 练琚愉, 等. 群落构建研究的新进展: 进化和生态相结合的群落谱系结构研究. 生物多样性, 2011, 19(3): 275－283.

[29] Mao Z H, Zhu J J. Effects of disturbances on species composition and diversity of plant communities. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(8): 2695－2701.
毛志宏, 朱教君. 干扰对植物群落物种组成及多样性的影响. 生态学报, 2006, 26(8): 2695－2701.

[30] Forest F, Grenyer R, Rouget M, *et al*. Preserving the evolutionary potential of floras in biodiversity hotspots. Nature, 2007, 445(7129): 757－760.

[31] Honorio C E N, Kyle G, Dexter R, *et al*. Phylogenetic diversity of Amazonian tree communities. Diversity and Distributions, 2015, 21(11): 1295－1307.

[32] Mishler B D, Knerr N, Gonzalez-orozco C E, *et al*. Phylogenetic measures of biodiversity and neo- and paleo-endemism in Australian *Acacia*. Nature Communications, 2014, 5(1): 4473.

[33] Wang D B, 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.

[34] Zhang L Y, Chen C D. On the general characteristics of plant diversity of Gurbantunggut sandy desert. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(11): 1923－1932.
张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点. 生态学报, 2002, 22(11): 1923－1932.

[35] Li F L, Bao W K. Responses of the morphological and anatomical structure of the plant leaf to environmental change. Chinese Bulletin of Botany, 2005, 22(Supple 1): 118－127.
李芳兰, 包维楷. 植物叶片形态解剖结构对环境变化的响应与适应. 植物学通报, 2005, 22(增刊1): 118－127.

[36] Tang Z C. Response and adaptability of plants to water stress—— Ⅱ response and adaptability of plants to drought. Plant Physiology Communications, 1983(4): 3－9.
汤章城. 植物对水分胁迫的反应和适应性——Ⅱ植物对干旱的反应和适应性. 植物生理学通讯, 1983(4): 3－9.