

DOI:10.11686/cyxb2024173

http://cyxb.magtech.com.cn

姜安静,董乙强,周时杰,等.草地植物多样性沿海拔梯度分布特征及其驱动因素——以天山北坡东段为例.草业学报,2025,34(3):29—40.

JIANG An-jing, DONG Yi-qiang, ZHOU Shi-jie, et al. Distribution characteristics of grassland plant diversity along the altitudinal gradient and its driving factors: A case study of the eastern section of the northern slope of the Tianshan Mountains. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 29—40.

草地植物多样性沿海拔梯度分布特征及其驱动因素 ——以天山北坡东段为例

姜安静¹,董乙强^{1,2,3*},周时杰¹,聂婷婷¹,吴悦¹,柳泽宇¹,单兴芸¹,雷雅欣¹,吴凯¹,
安沙舟^{1,2,3}

(1.新疆农业大学草业学院,新疆乌鲁木齐830052;2.新疆草地资源与生态自治区重点实验室,新疆乌鲁木齐830052;3.西部干旱区草地资源与生态教育部重点实验室,新疆乌鲁木齐830052)

摘要:探究山地草地生态系统物种多样性沿海拔梯度的分布规律及其驱动因素,对揭示区域植物的环境适应性、区域多样性的保护及修复治理等具有重要意义。以天山北坡东段奇台县山地草地为研究对象,采用野外原生境实地调查取样的方法,对15个海拔梯度,跨度为1250~3150 m的草地植物群落数量特征和物种多样性进行测定分析,并用随机森林模型以及偏最小二乘路径模型解析海拔、气温、降水以及植物数量特征与植物多样性的关系。结果表明:1)随海拔梯度的增加,草地植物群落盖度和密度均呈极显著增加趋势,而植物高度呈极显著降低趋势,生物量则呈先降后升的趋势($P < 0.01$);2)植物 α 多样性指数沿海拔梯度均呈先升后降的“单峰”分布规律($P < 0.05$),相邻海拔间相似度Sorensen指数整体呈先下降后上升的波动变化,相反物种替代率Cody指数呈先上升后下降的变化趋势;3)植物盖度、生物量以及Patrick指数均与气候呈显著相关关系($P < 0.05$),植物多样性主要受盖度的直接影响,海拔通过显著影响气温和降水,进而间接影响植物密度,植物密度又显著正向影响植物盖度($P < 0.01$)。综上,海拔通过影响气候间接影响植物群落特征,使其具有明显的垂直分布特征。

关键词:海拔;植物多样性;驱动因素;气候因素

Distribution characteristics of grassland plant diversity along the altitudinal gradient and its driving factors: A case study of the eastern section of the northern slope of the Tianshan Mountains

JIANG An-jing¹, DONG Yi-qiang^{1,2,3*}, ZHOU Shi-jie¹, NIE Ting-ting¹, WU Yue¹, LIU Ze-yu¹,
SHAN Xing-yun¹, LEI Ya-xin¹, WU Kai¹, AN Sha-zhou^{1,2,3}

1. College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology, Urumqi 830052, China; 3. Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Western Arid Region, Ministry of Education, Urumqi 830052, China

Abstract: Exploring the distribution pattern of species diversity, and its driving factors, in mountain grassland ecosystems along altitude gradients is of great importance to understanding of the environmental adaptability of regional plants, and requirements for the conservation of regional diversity and vegetation restoration and management. In this study, the quantitative characteristics and species diversity of plant communities in Qitai

收稿日期:2024-05-14;改回日期:2024-07-01

基金项目:国家自然科学基金(32260355)和新疆农业大学自治区研究生创新项目(XJ2024G122)资助。

作者简介:姜安静(2000—),女,新疆石河子人,在读硕士。E-mail: 1452805901@qq.com

*通信作者 Corresponding author. E-mail: xjdyq1210@163.com

County, on the eastern section of the northern slopes of the Tianshan Mountains, were measured and analysed at 15 sites along altitudinal gradients spanning from 1250–3150 m. We also used the random forest model and the partial least squares path modeling (PLS-PM) to analyse the relationship between altitude, temperature, precipitation, and quantitative characteristics of the plants and plant diversity. The results showed that: 1) With increasing altitude, the grassland plant community cover and density showed a highly significant increasing trend, while the plant height showed a highly significant decreasing trend, and the biomass showed an initially decreasing trend and then an increasing trend ($P < 0.01$); 2) The α -diversity of plants was maximized ($P < 0.05$) at mid-altitude along the altitudinal gradient, and the Sorenson index between neighboring altitudes showed an overall pattern of initial decrease and then increase with increasing altitude, while the Cody index of species substitution rate showed a tendency of increasing and then decreasing; 3) Plant cover, biomass, and Patrick's index were all significantly correlated with climate ($P < 0.05$), with plant diversity mainly directly affected by cover, and elevation indirectly affecting plant density by significantly affecting temperature and precipitation, plant density also significantly positively affects plant coverage ($P < 0.01$). In summary, altitude indirectly affects the characteristics of plant communities by influencing climate, giving the plant communities a distinct vertical distribution along the altitudinal gradient.

Key words: altitude; plant diversity; driving factor; climatic factor

草地是我国重要的畜牧业生产基地,同时也是世界上分布最广的陆地生态系统之一,在气候调节、水源涵养、水土保持、维持生物多样性等生态功能方面起着重要作用^[1]。生物多样性与草地生态系统服务功能密切相关^[2],且植物多样性是生物多样性的组成部分,在维持群落生态系统功能和生态系统服务等方面发挥重要作用^[3]。植物群落由具有不同生活史的物种组成,占据不同的生态位^[4],这些具有多样性生活史及占据不同生态位的物种使群落随着群落环境的变化而表现出异质性模式^[5]。因此,解析草地生态系统中植物多样性的主导因子,对制定草地生物多样性保护政策以及草地生态系统的管理具有重要意义。

山地生态系统覆盖了约27%的世界陆地表面,支持约1/4的陆地生物多样性^[6],在维持全球生物多样性以及为人类提供不可或缺的生态系统功能和利益方面发挥着关键作用^[7]。山地具有明显的海拔梯度,为测试环境变化对生态系统过程的影响提供了一个“自然”的环境,其可以导致生物和非生物因素的空间异质性^[8]。已有研究表明,随着海拔梯度的变化,温度和降水发生显著变化^[9],并间接影响植物群落垂直分布格局^[10]。因此,植物群落沿海拔梯度的变化规律已成为生态学领域研究的重要内容。相关研究表明,高海拔地区的植被群落易受温度影响,低海拔地区植物生长更易受水分影响^[11]。Zhou等^[12]对天山山脉荒漠草地研究发现植物生物量和物种丰富度与海拔呈明显的指数递减关系,且降水量显著影响植物生物量和物种丰富度,但气温对其影响不显著($P > 0.05$),而史恭发等^[13]对内蒙古大兴安岭研究得出不同结论,即植物物种多样性随海拔上升呈先升后降的“单峰”变化格局。Aqeel等^[14]对巴基斯坦的研究发现,随海拔的升高,物种丰富度呈显著升高的变化趋势,且物种丰富度与气候因子存在显著负交互作用。在世界范围内,前人因研究区域的坡度、坡向、海拔以及地点特异性等条件不同,植物物种多样性对海拔梯度的响应没有明确的模式^[12–16],且其主导因子存在较大差异,因此,仍需阐明植物多样性的海拔分布模式及其对海拔的响应机制,以期为生态系统生物多样性的保护以及生态恢复提供基础框架。

新疆天然草地植物种类丰富,草地类型多样,且天山是全球温带干旱区山地生态系统的典型代表,也是全球变化的敏感地带,其草地植被具有明显的垂直地带性分布格局,是研究植被群落特征沿海拔梯度分布规律的理想区域。基于此,本研究以新疆天山北坡奇台县为研究区域,通过对不同海拔梯度(1250~3150 m)植物群落特征的测定分析,阐明海拔对草地植物数量特征、 α 多样性和 β 多样性的影响,并结合气温和降水因子,解析植物物种多样性变异的主要驱动因子,加深对该地区植物多样性分布的认识,以期在全球气候变化背景下为山地草地植物多样性的保护和科学经营管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆天山北坡奇台县(N 43.76°, E 89.64°, 海拔1250~3150 m),其土壤条件、气候以及植被覆盖率等方面具有非常明显的差异性,发育了较为完整的植被垂直带谱(表1)。研究区属于温带大陆性半荒漠干旱性气候,年均气温为5.5℃,年均降水量为269.4 mm,地势由北向南海拔逐渐上升。随海拔由低到高,依次分布着温性荒漠、温性草原、温性草甸草原、山地草甸和高寒草甸草地。温性荒漠草地主要优势植物是伊犁绢蒿(*Seriphidium transiliense*)、小蓬(*Nanophyton erinaceum*);温性草原草地主要优势植物是羊茅(*Festuca ovina*)、草原苔草(*Carex liparocarpos*)、针茅(*Stipa capillata*);温性草甸草原草地主要优势植物是白尖苔草(*Carex oxyleuca*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)、草原糙苏(*Phlomooides pratensis*);山地草甸草地主要优势植物是黑花苔草(*Carex melanantha*)、天山羽衣草(*Alchemilla tianschanica*);高寒草甸草地主要优势植物是高山早熟禾(*Poa alpina*)、细果苔草(*Carex stenocarpa*)、天山羽衣草。

1.2 试验设计及野外调查取样

试验样地均布设在新疆天山北坡昌吉回族自治州奇台县,随海拔由低到高,依次布设15个海拔梯度的试验样地,即1250、1270、1370、1590、1750、1770、2060、2170、2240、2460、2630、2730、2850、2950和3150 m。2023年8月,对试验区进行野外植被采集工作,在每个海拔样地内设置3条典型样线,样线间隔为50 m,并在每个样线上布置3个1 m×1 m的样方,样方间距约为50 m,共计135个样方(15个试验样地×3条样线×3个样方)。测定时,记录各样方中的物种种类,并分种进行盖度、高度、密度及生物量的测定。其中,采用针刺法测定物种盖度(%);采用常规方法测量自然高度(cm);密度(株·m⁻²)为直接计数法记录株丛数;采用齐地刈割法测定生物量(g·m⁻²),带回实验室置于烘箱105℃下杀青30 min后80℃烘至恒重(24 h)后称重。

1.3 植物多样性的计算

1.3.1 植物α多样性 植物α多样性测定采用丰富度指数(Patrick指数)、物种多样性指数(Shannon—Wiener指数)、均匀度指数(Pielou指数)和优势度指数(Simpson指数)4种指标。计算公式如下^[17]:

重要值(importance value, IV): $IV = (\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对密度} + \text{相对生物量}) / 4$

Patrick丰富度指数: $P = S$

Shannon—Wiener多样性指数: $H = -\sum P_i \ln P_i$

Pielou均匀度指数: $E = H / \ln S$

Simpson优势度指数: $D = 1 - \sum P_i^2$

式中:S为样地总物种数; P_i 为第*i*个物种相对重要值。

1.3.2 植物β多样性 植物β多样性采用Sorenson指数和Cody指数2种指标。计算公式如下^[18-19]:

Sorenson指数: $C_s = \frac{2c}{a+b}$

式中: c 为两群落共有的物种数, a 和 b 分别为两群落各自物种数。其中,指数0.8~1.0为高度相似,0.6~0.8为中度相似,0.4~0.6为低度相似,0.2~0.4为非常低的相似,0~0.2表示海拔梯度间物种几乎没有相似之处^[12]。

Cody指数: $\beta_c = \frac{g(H) + l(H)}{2}$

式中: $g(H)$ 为沿海拔梯度获得的物种数目; $l(H)$ 为沿海拔梯度丧失的物种数目。

1.4 数据处理

气温和降水数据源于国家青藏高原科学数据中心逐月降水量和逐月平均气温,逐月降水量数据处理为年累积降水数据,逐月平均气温数据处理为年均气温数据;以上数据空间分辨率为1 km。利用Excel进行数据整理,并计算植物α和β多样性;使用SPSS 25进行不同草地类型以及不同海拔间植物数量特征和多样性的单因素方差

分析,并对植物群落特征和地理因素进行回归分析;运用 Origin 2021 进行柱状图及回归图的绘制;并在 R studio 中使用“randomForest”包进行随机森林模型的分析,利用“psych”和“reshape 2”包计算相关性和重要值,并利用“ggplot 2”包绘图,探索植物群落特征和地理因素对多样性影响的重要值及显著性。再次采用 R 语言“psych”包用于海拔、气候以及植物群落特征之间的偏最小二乘路径建模 (partial least squares path modeling, PLS-PM),并计算直接效应、间接效应和总效应,其中总效应为直接效应加上间接效应。随机森林以及偏最小二乘路径建模数据均经过标准化处理。

2 结果与分析

2.1 草地植物数量特征沿海拔梯度的分布规律

植物数量特征均与海拔呈极显著相关 (图 1),其中植物盖度和密度均与海拔呈正相关 ($R^2=0.8482, P<0.001; R^2=0.8782, P<0.001$),并具有较高的相关性,而植物高度与海拔呈负相关 ($R^2=0.4638, P<0.01$),除此之外,植物生物量随海拔的升高呈明显先降低后升高的单峰形式曲线 ($R^2=0.6125, P<0.01$)。

2.2 草地植物 α 多样性沿海拔梯度的分布规律

植物 Patrick 指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数均与海拔呈二次函数的关系 (图 2),表明植物多样性随海拔的升高呈先增加后下降的变化趋势,海拔能分别解释 Patrick 指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数空间变异的 80.24%、75.04%、68.33% 和 41.73%。其中 Pielou 指数在海拔 2060 m 处达到峰值 ($P<0.05$),Patrick 指数在 2730~2850 m 处达到峰值 ($P<0.001$),Simpson 指数在 2630 m 处达到峰值 ($P<0.01$)。

2.3 草地植物 β 多样性沿海拔梯度的分布规律

βc 直观地代表沿环境条件梯度变化的群落间物种替代率,数值越高表示海拔梯度间

表 1 研究区地理位置及其基本情况

Table 1 Geographical location and basic information of the study area

样地序号 Sample plot number	海拔 Altitude (m)	地理位置 Geographical position	草地类型 Grassland type	优势种 Dominant species	年均温 Mean annual temperature (°C)	年均降水量 Mean annual precipitation (mm)
1	1250	E 89.64°, N 43.76°	温性荒漠草地 Temperate desert grassland	伊犁绢蒿, 小蓬 <i>S. transiliense, N. erinaceum</i>	5.61	150.36
2	1270	E 89.64°, N 43.73°	温性荒漠草地 Temperate desert grassland	伊犁绢蒿, 小蓬 <i>S. transiliense, N. erinaceum</i>	5.34	154.71
3	1370	E 89.61°, N 43.71°	温性荒漠草地 Temperate desert grassland	伊犁绢蒿 <i>S. transiliense</i>	4.93	161.42
4	1590	E 89.62°, N 43.64°	温性草原草地 Temperate steppe grassland	羊茅, 草原苔草 <i>F. ovina, C. liparocarpos</i>	4.06	166.45
5	1750	E 89.62°, N 43.63°	温性草原草地 Temperate steppe grassland	羊茅, 针茅, 草原苔草 <i>F. ovina, S. capillata, C. liparocarpos</i>	3.67	172.28
6	1770	E 89.62°, N 43.60°	温性草原草地 Temperate steppe grassland	羊茅, 草原苔草 <i>F. ovina, C. liparocarpos</i>	3.21	177.40
7	2060	E 89.61°, N 43.55°	温性草甸草原草地 Temperate meadow-steppe grassland	白尖苔草, 草原糙苏, 披碱草 <i>C. oxyleuca, P. pratensis, Elymus dahuricus</i>	1.76	195.20
8	2170	E 89.61°, N 43.54°	温性草甸草原草地 Temperate meadow-steppe grassland	无芒雀麦, 白尖苔草 <i>B. inermis, C. oxyleuca</i>	1.28	208.60
9	2240	E 89.60°, N 43.52°	山地草甸草地 Mountain meadow grassland	天山羽衣草 <i>A. tianschanica</i>	0.76	212.02
10	2460	E 89.60°, N 43.51°	山地草甸草地 Mountain meadow grassland	黑花苔草 <i>C. melanantha</i>	0.24	222.11
11	2630	E 89.60°, N 43.50°	山地草甸草地 Mountain meadow grassland	黑花苔草 <i>C. melanantha</i>	-0.19	229.12
12	2730	E 89.60°, N 43.50°	山地草甸草地 Mountain meadow grassland	黑花苔草 <i>C. melanantha</i>	-1.04	246.88
13	2850	E 89.60°, N 43.49°	高寒草甸草地 Alpine meadow grassland	细果苔草, 天山羽衣草 <i>C. stenocarpa, A. tianschanica</i>	-1.49	246.09
14	2950	E 89.59°, N 43.49°	高寒草甸草地 Alpine meadow grassland	高山早熟禾, 天山羽衣草 <i>P. alpina, A. tianschanica</i>	-2.40	260.66
15	3150	E 89.58°, N 43.48°	高寒草甸草地 Alpine meadow grassland	高山早熟禾, 细果苔草 <i>P. alpina, C. stenocarpa</i>	-3.49	271.98

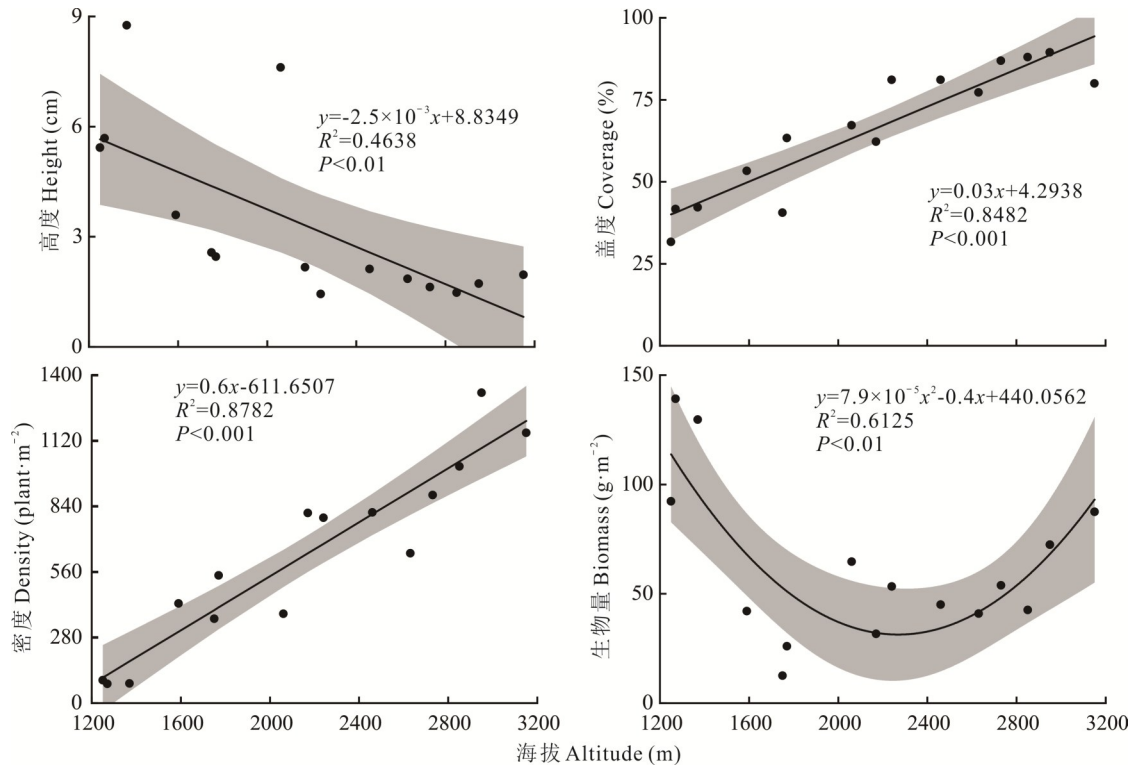


图 1 不同海拔梯度植物群落数量特征

Fig. 1 Quantitative characteristics of plant communities with different altitude gradients

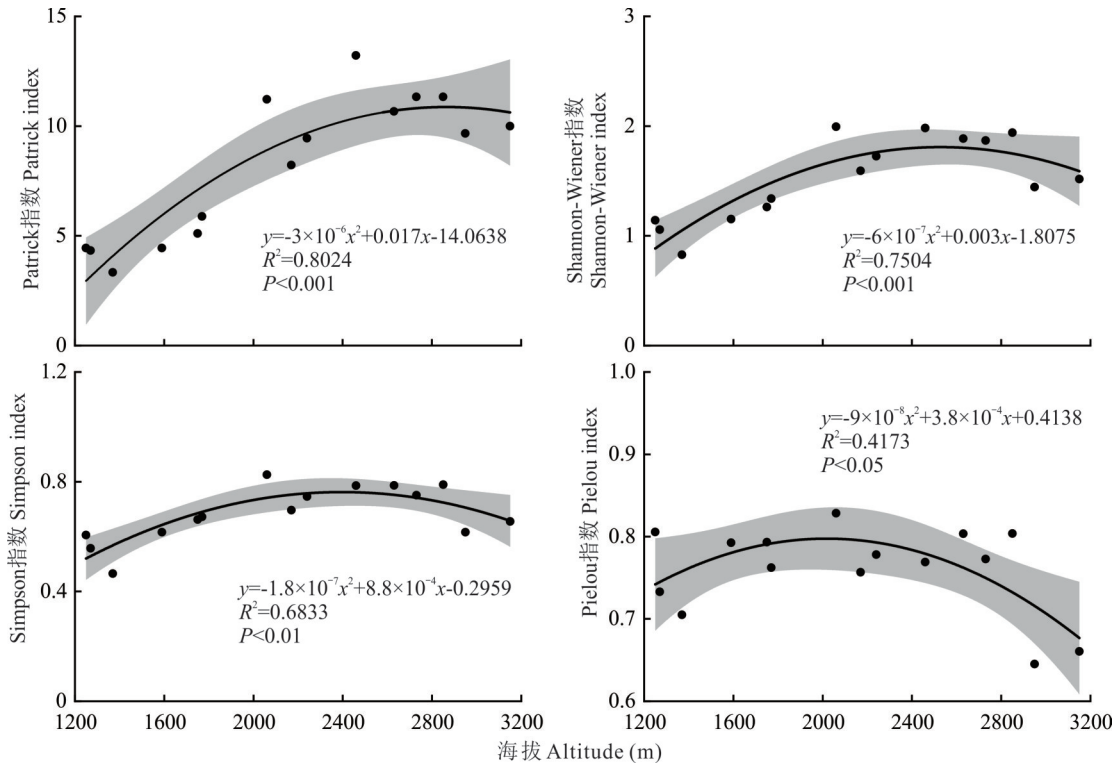


图 2 植物 α 多样性指数与海拔的拟合方程

Fig. 2 A fitting equation between alpha diversity index and altitude

物种替换速率越快。 β_c 随海拔的升高呈先增加后降低的趋势(表 2), 表明相邻群落的物种替代先增加后减小。 C_s 主要反映群落之间的相似程度, 从 Sorenson 指数来看, 相邻海拔之间表现为高度相似、中度相似和低度相似

(>0.4),其中,海拔1250和1270 m的Sorenson指数最大(0.94),为高度相似,海拔1770和2060 m的Sorenson指数最小(0.05),几乎不相似。

表2 不同海拔植物Sorenson相似度指数和Cody指数

Table 2 Sorenson similarity index and Cody index of plants at different altitudes

海拔 Altitude (m)	1250 m	1270 m	1370 m	1590 m	1750 m	1770 m	2060 m	2170 m	2240 m	2460 m	2630 m	2730 m	2850 m	2950 m	3150 m
1250		0.94	0.53	0.33	0.27	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1270	0.50		0.57	0.35	0.29	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1370	3.50	3.00		0.53	0.32	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1590	6.00	5.50	3.50		0.64	0.60	0.06	0.13	0.00	0.00	0.07	0.07	0.07	0.00	0.00
1750	8.00	7.50	6.50	4.00		0.58	0.21	0.29	0.07	0.10	0.12	0.13	0.13	0.06	0.12
1770	8.00	7.50	5.50	4.00	5.00		0.05	0.12	0.00	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07	0.00
2060	17.50	17.00	16.00	16.50	15.50	17.50		0.54	0.35	0.29	0.35	0.32	0.18	0.18	0.17
2170	15.50	15.00	14.00	13.50	12.50	14.50	13.50		0.56	0.39	0.43	0.40	0.39	0.34	0.33
2240	11.50	11.00	10.00	11.50	12.50	12.50	12.50	8.00		0.56	0.59	0.56	0.48	0.61	0.59
2460	19.00	18.50	17.50	19.00	19.00	19.00	19.00	15.50	9.50		0.69	0.68	0.46	0.54	0.61
2630	14.50	14.00	13.00	13.50	14.50	14.50	14.50	12.00	7.00	7.50		0.84	0.56	0.51	0.55
2730	13.50	13.00	12.00	12.50	13.50	13.50	13.50	12.00	7.00	7.50	3.00		0.54	0.43	0.53
2850	14.00	13.50	12.50	13.00	14.00	14.00	14.00	12.50	8.50	13.00	8.50	8.50		0.68	0.67
2950	14.00	13.50	12.50	14.00	15.00	14.00	14.50	13.50	6.50	11.00	9.50	10.50	6.00		0.77
3150	14.50	14.00	13.00	14.50	14.50	15.50	15.00	14.00	7.00	9.50	9.00	9.00	6.50	4.50	

注: 右上角为Sorenson相似度指数, 左下角为Cody指数。

Note: The upper right corner is the Sorenson similarity index, and the lower left corner is the Cody index.

2.4 植物盖度、生物量和Patrick指数与气候因子之间的相关性

年均降水量和年均温均与植物盖度、生物量及Patrick指数显著相关(图3),其中,盖度随年均降水量的升高呈极显著升高,而随年均温的升高呈极显著降低($P < 0.001$),生物量和Patrick指数与气候因素的拟合曲线均为二项式,其中生物量随气候因子的升高呈先降后升的“U”型变化趋势($P < 0.05$),与之相反,Patrick指数随生物量和气候因子的升高呈先升后降的趋势($P < 0.05$)。盖度与生物量和Patrick指数分别呈不显著的先降后升以及显著升高的变化趋势。

2.5 非生物因子和生物因子对植物多样性的贡献

随机森林和相关性都一致表明,海拔、植物数量特征和气候因子均与植物多样性显著关联,其中海拔、年均温、年均降水量和生物量对解释不同海拔植物多样性的贡献率较大(图4),但环境因子对Pielou均匀度指数的影响较小。降水、盖度以及海拔均与Patrick丰富度指数呈负相关。

2.6 海拔、气候以及植物数量特征与植物多样性拟合的结构方程模型

通过偏最小二乘路径模型分析海拔对植物多样性的影响及其潜在驱动机制(图5A),结果表明,植物盖度和生物量分别通过正向和负向直接影响植物 α 多样性,并解释植物多样性变异的54%。海拔通过显著影响气候,进而间接影响植物密度($P < 0.05$),同时,植物密度又显著正向影响植物盖度($P < 0.01$)。此外,综合来看,海拔和盖度对植物多样性影响的总效应较好,其中海拔是通过间接效应影响植物多样性,而盖度是通过直接正效应影响植物多样性(图5B)。

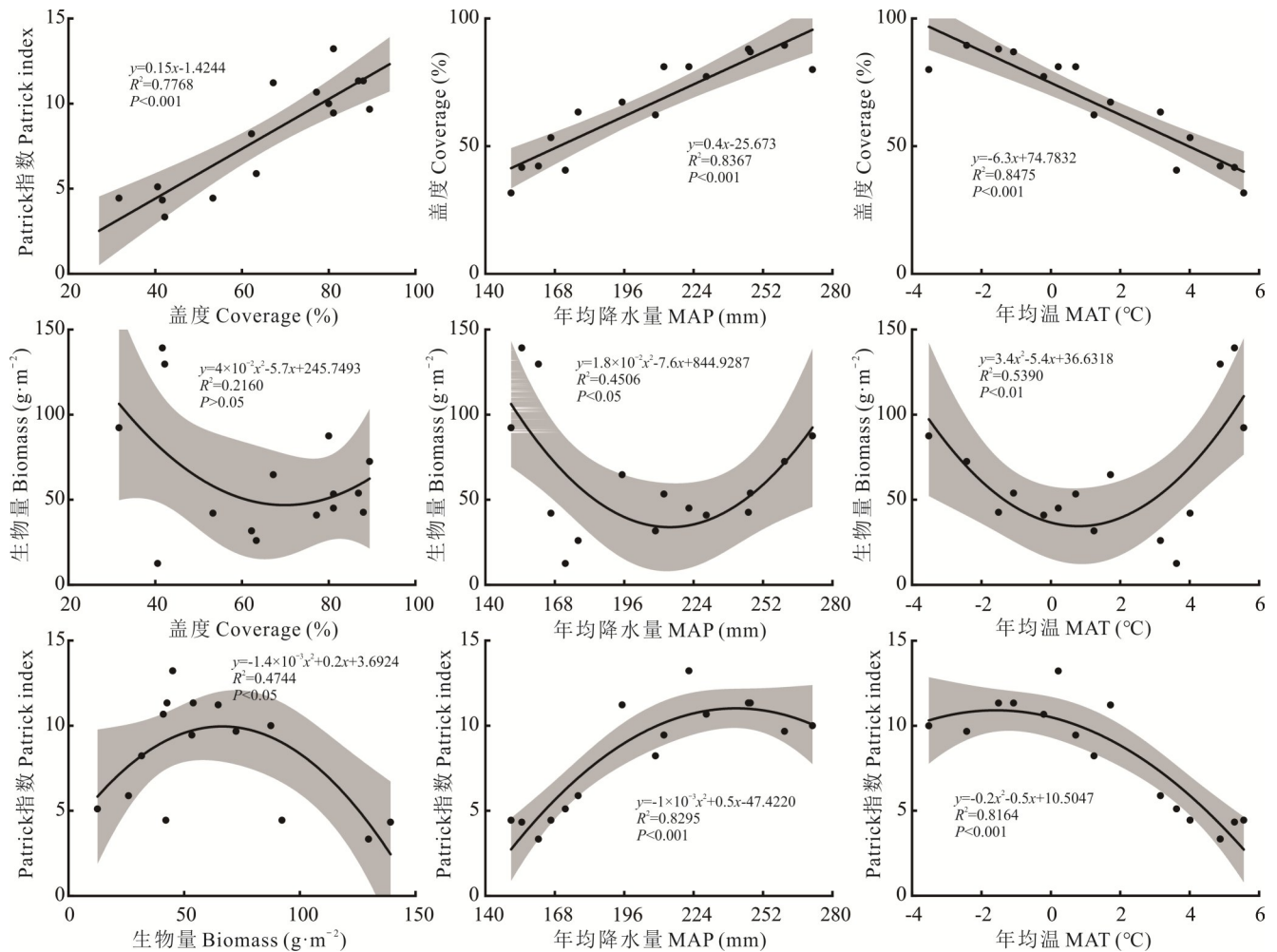


图 3 植物盖度、生物量和 Patrick 指数与气候因子的关系

Fig. 3 Plant coverage, biomass and Patrick index in relation to climate

MAP: 年均降水量 Mean annual precipitation; MAT: 年均温 Mean annual temperature. 下同 The same below.

3 讨论

3.1 海拔梯度对植物群落数量特征及多样性的影响

植物群落组成和多样性是了解结构变化以及群落功能的关键因素^[20],研究海拔梯度下植物群落的变化规律,对了解并保护草地植物资源具有重要意义。本研究发现,随海拔的升高,草地植物盖度以及密度均呈显著升高的趋势,这与霍新茹^[21]对宁乡罗山自然保护区的研究结果一致,但与吴红宝等^[22]对青藏高原研究得出植物盖度随海拔的升高呈线性降低趋势的结果不同,这可能是由于霍新茹^[21]所选研究区和本研究地区海拔均不超过 3200 m,而吴红宝等^[22]所选研究区海拔在 4000 m 以上,所选的海拔研究尺度不同,也是导致结果差异的原因。孟泽昕^[11]对海拔 3700~5300 m 的青藏高原草地研究发现,由于较高的海拔,排除了放牧干扰,使草地生态功能没有得到合理的利用,高海拔地区草地植物盖度趋于稳定,没有增长。马婧婧等^[23]对新疆海拔 155~8611 m 草地研究发现,草地优势物种生物量与海拔呈“U”型、显著正相关、显著负相关、驼峰型以及无显著相关 5 种相关关系。He 等^[24]对海拔 898~2823 m 草地研究发现,地上生物量随海拔升高呈降低趋势。本研究发现,草地生物量随海拔的升高呈先降低后升高的变化趋势,造成结果差异性的原因可能是研究区的水热条件以及土壤养分等不同,除此之外,有研究认为,由于人类放牧等行为的影响,家畜通过践踏和采食,进而影响草地植物的生物量^[25]。

植物多样性在草地生态系统功能中起着关键作用,但由于自然生态系统对环境变化的高度敏感性,因此海拔的变化会影响草地植物多样性。贺金生等^[26]综述前人研究发现,植物多样性随海拔的变化有 5 种趋势,即植物多

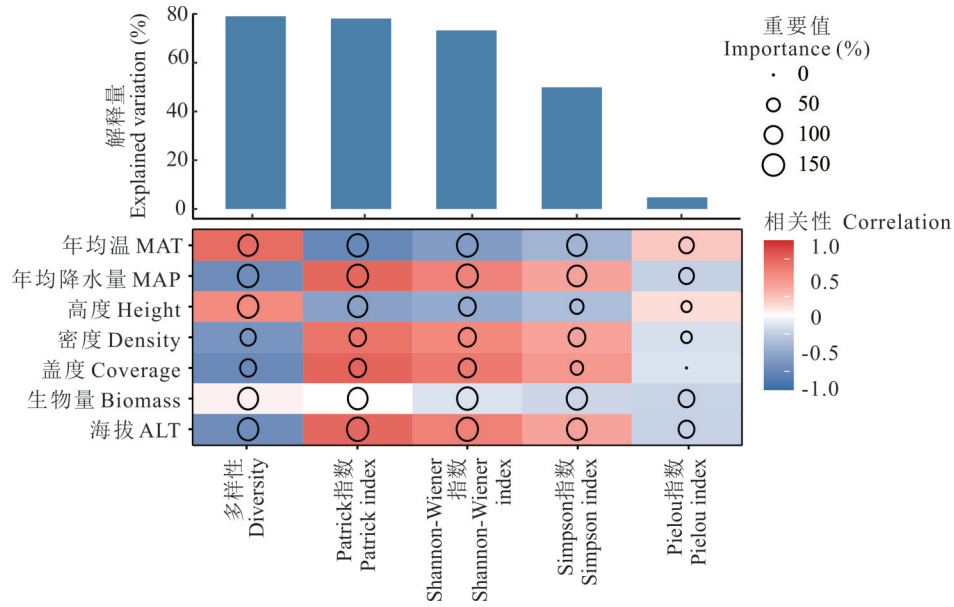


图4 基于相关性和随机森林模型的非生物因子和生物因子对植物α多样性的贡献

Fig. 4 Contribution of abiotic and biological factors to plant alpha diversity based on correlation and random forest models

圆圈大小表示变量的重要性(即通过随机森林模型计算的均方误差增加的百分比)。颜色代表斯皮尔曼的相关性。Circle size represents the variable importance (that is proportion of explained variability calculated via multiple regression modeling and variance decomposition analysis). Colors represent Spearman correlations. ALT: 海拔 Altitude.

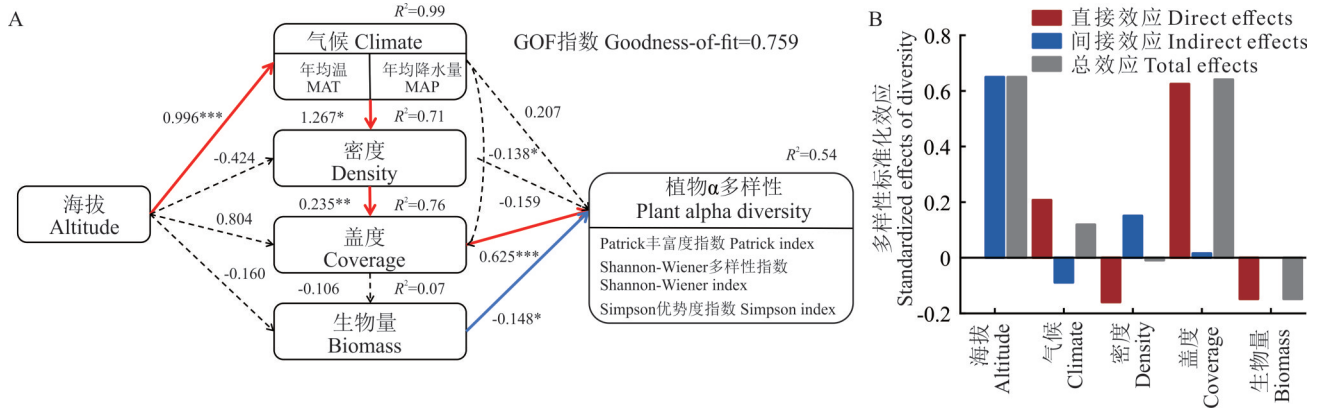


图5 海拔对植物群落多样性的影响及其潜在调控路径

Fig. 5 Effect of altitude on plant community diversity and its potential regulatory pathways

A: 红色实线表示显著正相关,蓝色实线表示显著负相关,黑色虚线表示无显著相关性($P>0.05$)。The solid red line indicates a significant positive correlation, the solid blue line indicates a significant negative correlation, and the dashed black line indicates no significant correlation ($P>0.05$). *: $P<0.05$, **: $P<0.01$, ***: $P<0.001$.

多样性与海拔呈正相关、负相关、无显著相关性以及多样性在中海拔处最大或者最低,造成这种差异的原因主要是海拔梯度的尺度、人为干扰以及研究区生境的不同^[27]。Bai等^[28]研究发现,随海拔的升高,植物多样性呈增加趋势,而大多研究认为植物多样性随海拔的升高呈先增后降的变化趋势^[29-30],本研究结果与之相同,即植物 Patrick 丰富度指数、Shannon—Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数以及 Pielou 均匀度指数随海拔升高呈显著先增后降的变化趋势($P<0.05$),其符合“中间膨胀理论”。在中海拔地区,水热耦合作用适宜,以满足植物的生长繁殖,而在低海拔地区,降水较少而较高的气温,增加水分蒸发量,且因人为干扰、过度放牧等原因,导致植物多样性降低,还可能是因为低海拔区植物群落具有相对稳定的群落结构,优势种的生长限制了其他物种的发展^[31],高海拔地区虽然有充足的降水,但因冷湿气候因素的限制,以及由于受到树木的遮挡,光照不足,导致植物多样性降

低^[32],群落中各类植物功能群在长期的演变过程中,形成了差异化应对水热变化的策略最终导致整个群落的多样性差异^[33]。除植物组成和 α 多样性以外, β 多样性也是群落结构的重要指标,能够反映相邻群落间的相似性及替换速率。研究发现,Cody指数随海拔的升高呈先增后降的趋势,在温性草甸草原海拔1770~2060 m以及2060~2170 m达到较大值,表明温性草甸草原作为过渡带的一种植被类型,具有较高的物种替换速率,有研究表明,物种替代是导致物种组成差异的主要原因,物种的适应性分布与环境异质性相互作用^[34],从而使植物沿海拔梯度具有明显的垂直地带性分布。

3.2 植物多样性变异的关键调控因子

海拔作为表征非生物和生物因素变化的代表,其可以通过影响气温、降水、土壤理化性质以及生长季节长度等环境因子,进而影响植物的生长和分布^[35]。本研究发现,植物地上生物量随海拔、气温以及降水的升高呈先减少后增加的变化趋势,而植物Patrick丰富度指数随海拔、气温和降水的升高呈先增加后降低的变化趋势,表明植物多样性和生物量均受到环境因子的调节^[28]。随机森林模型和偏最小二乘路径模型同时也证明了这一点,海拔、气温、降水和生物量对解释不同海拔植物多样性的贡献率较大(图4),且海拔通过直接影响气候进而间接影响植物群落特征(图5)。Loreau等^[36]研究发现,当环境因素对植物生物量和多样性分别呈促进和抑制作用时,两者则呈负相关的变化趋势,本研究地上生物量与植物多样性呈显著负相关的结果与之一致,张瀚文等^[20]对夹金山研究也得到草本植物生物量与植物多样性总体上呈负相关,这可能因为草地植物群落生物量升高,增加了物种之间的竞争关系,从而导致竞争能力较弱的植物消失,进而影响了植物多样性,但因研究的空间尺度,取样时间以及草地生境的不同,王采娥等^[30]研究表明物种多样性和生物量存在正相关关系,因此关于不同海拔梯度植物多样性与生物量之间的关系还需进一步研究。偏最小二乘路径模型表明,海拔和气候均对植物多样性产生间接影响,这与Li等^[37]的研究结果不同,其研究表明植物群落的多样性直接受到降水和海拔的影响,一些研究表明,气候变化的间接影响可以放大,超过甚至逆转直接影响^[38-39],但也有研究表明,适应寒冷的物种受气候条件的影响比受竞争的影响要小,竞争阻止了它们占据较低的海拔^[40]。

4 结论

天山北坡东段草地植物群落特征具有明显的垂直地带性特征,并具有丰富的植物物种资源,其中,植物盖度和密度均与海拔呈正相关,而植物高度与海拔呈负相关,植物生物量随海拔的升高呈明显先降后升的单峰形式曲线,植物 α 多样性因中海拔地区水热耦合作用适宜,中间高度膨胀,均随海拔的升高呈先增加后降低的变化趋势,同样,物种替换速率随海拔的升高也呈先提高后降低的变化趋势,并在过渡带温性草甸草原具有较高的物种替换速率。地理因素海拔、气候因子气温和降水以及地上生物量均是驱动植物多样性变化的重要影响因子,海拔通过影响气候因子进而间接影响植物群落特征。

参考文献 References:

- [1] Han J, Xue T, Yang J, *et al.* Effects of water retention and fertilization measures on plant community characteristics and species diversity of grassland in Loess Hilly Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(12): 5399–5411.
韩军, 薛焱, 杨杰, 等. 保水增肥措施对黄土丘陵区草地植物群落特征及物种多样性的影响. *生态学报*, 2024, 44(12): 5399–5411.
- [2] Lan L S, You C C, Zhang L, *et al.* Characteristics of productivity and biodiversity of meadow grassland in western Jilin Province—A case study of grassland in Changling County in 2022. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5): 1529–1537.
兰理实, 由成成, 张龙, 等. 吉林西部草甸草原生产力和物种多样性特征研究—以2022年长岭县草原为例. *草地学报*, 2024, 32(5): 1529–1537.
- [3] Li S J, Wang X M, Liu H F, *et al.* Diversity of desert plants in Hexi Corridor and its response to environmental factors. *Ecology and Environment*, 2023, 32(3): 429–438.
- [4] Nettesheim F C, Garbin M L, Rajao P H M, *et al.* Environment is more relevant than spatial structure as a driver of regional variation in tropical tree community richness and composition. *Plant Ecology & Diversity*, 2018, 11(1): 27–40.

- [5] Bagaria G, Rodà F, Pino J. Extinction and colonisation of habitat specialists drive plant species replacement along a Mediterranean grassland-forest succession. *Journal of Vegetation Science*, 2019, 30(2): 331–340.
- [6] Korner C, Spehn E M. *Mountain biodiversity: A global assessment*. London: Routledge, 2019.
- [7] Rahbek C, Borregaard M K, Antonelli A, *et al.* Building mountain biodiversity: Geological and evolutionary processes. *Science*, 2019, 365(6458): 1114–1119.
- [8] Huang K, Xiang J, Ma Y, *et al.* Response of soil microbial communities to elevation gradient in central subtropical *Pinus taiwanensis* and *Pinus massoniana* forests. *Forests*, 2023, 14(4): 772.
- [9] Zhang X, Wang Y, Wang J, *et al.* Elevation influences belowground biomass proportion in forests by affecting climatic factors, soil nutrients and key leaf traits. *Plants*, 2024, 13(5): 674.
- [10] Li Y C. Study on vegetation variation and its response to climate factors and human activities in the Qilian Mountain. Lanzhou: Northwest Normal University, 2023.
李玉辰. 祁连山植被变化及其对气候因子和人类活动的响应研究. 兰州: 西北师范大学, 2023.
- [11] Meng Z X. Ecosystem multifunctional assessment of alpine grassland in Qinghai–Tibet Plateau at different altitude gradients. Xianyang: Northwest A & F University, 2022.
孟泽昕. 不同海拔高度青藏高寒草地生态系统多功能性评估. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022.
- [12] Zhou S, Dong Y, Julihaiti A, *et al.* Spatial variation in desert spring vegetation biomass, richness and their environmental controls in the arid region of Central Asia. *Sustainability*, 2022, 14(19): 12152.
- [13] Shi G F, Xu N, Niu Z Q, *et al.* Altitudinal differences of understory plant biodiversity in eastern Greater Xing'an Mountains, Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(7): 3004–3015.
史恭发, 徐诺, 牛钊倩, 等. 内蒙古大兴安岭东部林下植物生物多样性海拔差异研究. *生态学报*, 2024, 44(7): 3004–3015.
- [14] Aqeel M, Khalid N, Noman A, *et al.* Interplay between edaphic and climatic factors unravels plant and microbial diversity along an altitudinal gradient. *Environmental Research*, 2024, 242: 117711.
- [15] Liang H Z, Liu L L, Gao H, *et al.* Altitudinal distribution pattern and its driving factors of plant diversity in the middle section of the eastern slope of the Taihang Mountain. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(7): 1091–1100.
梁红柱, 刘丽丽, 高会, 等. 太行山东坡中段植物多样性垂直分布格局及其驱动因素. *中国生态农业学报*, 2022, 30(7): 1091–1100.
- [16] Wang X J. Distribution pattern of plant diversity along an elevation gradient in southern Gaoligong Mountain. Kunming: Yunnan University, 2021.
王兴杰. 高黎贡山南段植物多样性沿海拔梯度分布格局研究. 昆明: 云南大学, 2021.
- [17] Dong Y Q. Effects of grazing exclusion on vegetation and soil fractions of active organic carbon of *Seriphidium transiliense* desert under moderate degeneration. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017.
董乙强. 禁牧对中度退化伊犁绢蒿荒漠植被和土壤活性有机碳组的影响. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017.
- [18] Geng Q W, Muhammad A, Yuan Z X, *et al.* Plant species composition and diversity along successional gradients in arid and semi-arid regions of China. *Forest Ecology and Management*, 2022, 524: 120542.
- [19] Lu W, Yu J, Ren H, *et al.* Spatial variations in species diversity of mid-subtropical evergreen broad-leaved forest community in Gutianshan National Nature Reserve. *Biodiversity Science*, 2018, 26(9): 1023–1028.
- [20] Zhang H W, Wang M, Li J, *et al.* Effects of different altitudes on herbaceous plant species diversity and biomass in Jiain Mountain. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023, 29(5): 1125–1131.
张瀚文, 王敏, 李婧, 等. 不同海拔高度对夹金山草本层植物物种多样性与生物量的影响. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(5): 1125–1131.
- [21] Huo X R. Quantitative classification and health evaluation of grassland plant community in Luoshan nature reserve of Ningxia. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
霍新茹. 宁夏罗山自然保护区草地植物群落数量分类及其健康评价. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [22] Wu H B, Shui H W, Hu G Z, *et al.* Species diversity and biomass distribution patterns of alpine grassland along an elevation gradient in the Northern Tibetan Plateau. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(6): 1071–1079.
吴红宝, 水宏伟, 胡国铮, 等. 海拔对藏北高寒草地物种多样性和生物量的影响. *生态环境学报*, 2019, 28(6): 1071–

- 1079.
- [23] Ma J J, Liu Y H, Sheng J D, *et al.* Changes of relationships between dominant species and their relative biomass along elevational gradients in Xinjiang grasslands. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(8): 25–35.
马婧婧, 刘耘华, 盛建东, 等. 新疆草地优势种植物相对生物量沿海拔梯度变化特征. *草业学报*, 2021, 30(8): 25–35.
- [24] He G, Shi Z, Fang H, *et al.* Climate and soil stressed elevation patterns of plant species to determine the aboveground biomass distributions in a valley-type Savanna. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1324841.
- [25] Li N, Tang S M, Guo J Y, *et al.* Meta-analysis of effects of grazing on plant community properties in Nei Mongol grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(9): 1256–1269.
李娜, 唐士明, 郭建英, 等. 放牧对内蒙古草地植物群落特征影响的Meta分析. *植物生态学报*, 2023, 47(9): 1256–1269.
- [26] He J S, Chen W L. A review of gradient changes in species diversity of land plant communities. *Acta Ecologica Sinica*, 1997(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(1): 93–101.
- [27] Duan M J, Gao Q Z, Guo Y Q, *et al.* Species diversity distribution pattern of alpine grassland communities along an altitudinal gradient in the Northern Tibet. *Pratacultural Science*, 2011, 28(10): 1845–1850.
段敏杰, 高清竹, 郭亚奇, 等. 藏北高寒草地植物群落物种多样性沿海拔梯度的分布格局. *草业科学*, 2011, 28(10): 1845–1850.
- [28] Bai J, Long C, Quan X, *et al.* Reverse diversity-biomass patterns in grasslands are constrained by climates and stoichiometry along an elevational gradient. *Science of the Total Environment*, 2024, 917: 170416.
- [29] Lv 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沿海拔梯度分布格局及驱动因子. *草业学报*, 2023, 32(7): 12–22.
- [30] Wang C E, Huang M, Wang W Y, *et al.* Variation characteristics of plant community diversity and above-ground biomass in alpine degraded slopes along altitude gradients in the headwaters region of three-river on Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(9): 3640–3655.
王采娥, 黄梅, 王文银, 等. 三江源区高寒坡地退化植物群落多样性和地上生物量沿海拔梯度的变化特征. *生态学报*, 2022, 42(9): 3640–3655.
- [31] Li Q. Responses of alpine meadow vegetation, soil and microorganism to altitudes and aspect in eastern Qilian Mountains and its microbial adaptation mechanisms. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023.
李强. 东祁连山高寒草甸植被、土壤和微生物对海拔和坡向的响应及其微生物适应机制研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.
- [32] Yang Y, Qiu K Y, Li J Y, *et al.* Relationship between altitudinal distribution characteristics of typical plant community diversity and soil factors on the eastern slope of the Helan Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 4995–5004.
杨壹, 邱开阳, 李静尧, 等. 贺兰山东坡典型植物群落多样性垂直分布特征与土壤因子的关系. *生态学报*, 2023, 43(12): 4995–5004.
- [33] Ren S J, Song Z Y, Lin C C, *et al.* Spatial pattern of plant communities along wetness gradient in alpine grassland of Xizang and their driving factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(5): 1996–2007.
任世杰, 宋朝阳, 林长存, 等. 西藏高寒草原湿润度梯度下植物群落特征空间格局及其驱动因子. *生态学报*, 2024, 44(5): 1996–2007.
- [34] Cong M Z, Liu Q J, Sun Z, *et al.* Interpretation of environmental factors affecting β diversity and its components of plant community in northern slope Changbai Mountain. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2024-02-27. (2024-02-27)[2024-08-07]. <https://kns-cnki-net.webvpn.xjau.edu.cn/kcms/detail/32.1161.s.20240226.0919.002.html>.
丛明珠, 刘琪璟, 孙震, 等. 长白山北坡植物群落 β 多样性及其组分的驱动因素. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024-02-27. (2024-02-27)[2024-08-07]. <https://kns-cnki-net.webvpn.xjau.edu.cn/kcms/detail/32.1161.s.20240226.0919.002.html>.
- [35] Wang A, Wang X, Tognetti R, *et al.* Elevation alters carbon and nutrient concentrations and stoichiometry in *Quercus aquifolioides* in southwestern China. *Science of the Total Environment*, 2018, 622: 1463–1475.

-
- [36] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, *et al.* Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges. *Science*, 2001, 294(5543): 804–808.
- [37] Li T, Xiong Q L, Luo P, *et al.* Direct and indirect effects of environmental factors, spatial constraints, and functional traits on shaping the plant diversity of montane forests. *Ecology and Evolution*, 2020, 10: 557–568.
- [38] Suttle K B, Thomsen M A, Power M E. Species interactions reverse grassland responses to changing climate. *Science*, 2007, 315(5812): 640–642.
- [39] Tylianakis J M, Didham R K, Bascombe J, *et al.* Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2008, 11(12): 1351–1363.
- [40] Louthan A M, Doak D F, Angert A L. Where and when do species interactions set range limits. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(12): 780–792.