

引用格式: 张敏, 王晓丽, 马玉寿, 等. 雅鲁藏布江上游高寒草甸地上生物量与多样性沿海拔梯度的变化特征[J]. 西北植物学报, 2024, 44(1): 0154-0163. [ZHANG M, WANG X L, MA Y S, et al. Characteristics of the aboveground biomass and diversity along altitudinal gradients in alpine meadows of the upper reaches of the Yarlung Zangbo River[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(1): 0154-0163.]
DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20230381

雅鲁藏布江上游高寒草甸地上生物量与多样性沿海拔梯度的变化特征

张 敏, 王晓丽, 马玉寿*, 王彦龙, 秦金萍, 董瑞珍

(青海大学 青海省畜牧兽医科学院, 青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 西宁 810016)

摘 要 【目的】雅鲁藏布江是青藏高原最重要的河流, 研究雅鲁藏布江地上生物量和物种多样性对了解该区域的草地资源和生态保护具有重要意义。【方法】根据海拔梯度对雅鲁藏布江上游高寒草甸植被特征进行调查, 探讨不同海拔梯度下地上生物量和物种多样性的分布差异、地上生物量与物种多样性之间的关系, 以及相关环境因子对地上生物量和物种多样性的影响。【结果】(1) 雅鲁藏布江上游高寒草甸地上生物量与海拔、气温和降水均无显著相关关系 ($P > 0.05$); (2) 多物种多样性指数与海拔呈显著负相关关系 ($P < 0.05$), Shannon-Weiner 指数 (H')、Patrick 指数 (R') 随海拔升高表现为下降趋势, 而物种多样性与气温和降水呈显著正相关关系 ($P < 0.05$); (3) 地上生物量与物种多样性之间表现为显著负相关关系, Shannon-Weiner 指数 (H') 对地上生物量的解释达到 70% ($P < 0.01$)。【结论】雅鲁藏布江上游高寒草甸的海拔与地上生物量无显著相关性, 而与物种多样性呈显著负相关关系, 这为雅鲁藏布江上游流域草地资源合理利用和物种多样性保护提供依据。

关键词 雅鲁藏布江; 高寒草甸; 地上生物量; 物种多样性; 海拔; 环境因子

中图分类号 Q948

文献标志码 A

Characteristics of the aboveground biomass and diversity along altitudinal gradients in alpine meadows of the upper reaches of the Yarlung Zangbo River

ZHANG Min, WANG Xiaoli, MA Yushou*, WANG Yanlong, QIN Jinping, DONG Ruizhen
(Qinghai Key Laboratory of Alpine Grassland Adaptive Management, Qinghai Academy of Animal Husbandry and Veterinary Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract [Objective] The Yarlung Zangbo River is the most important river in the Tibetan Plateau, and the study of aboveground biomass and species diversity of the Yarlung Zangbo River is of great significance for the understanding of grassland resources and ecological conservation in the region. [Methods] This study investigated the characteristics of vegetations along elevation gradients in the alpine meadows in the upper reaches of the Yarlung Zangbo River, the distributional differences of aboveground biomass and species diversity along the gradients, and the relationship between aboveground biomass and species diversity.

收稿日期: 2023-06-13; 修改稿收到日期: 2023-10-12

基金项目: “青海学者”科研项目

作者简介: 张 敏 (1996—), 女, 博士, 主要从事草地生态环境研究。E-mail: 524143733@qq.com

* 通信作者: 马玉寿, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事草地生态与环境保护研究。E-mail: mayushou@sina.com

We also studied the effects of environmental factors on aboveground biomass and species diversity. [Results] (1) There was no significant relationship between aboveground biomass and elevation, temperature and precipitation ($P > 0.05$). (2) Species diversity indices showed a significant negative correlation with elevations, and the Shannon-Weiner index (H) and Patrick index (R) showed a declining trend with elevation. Species diversity showed a significant positive correlation with temperature and precipitation ($P < 0.05$). (3) Aboveground biomass and diversity showed a negative correlation, and the explanation of aboveground biomass by the Shannon-Weiner index (H) reached 70% ($P < 0.01$). [Conclusion] There was no significant correlation between aboveground biomass and elevation, and species diversity indices showed a significant negative correlation with elevation. These results provide basis for the rational utilization of grassland resources and species diversity conservation in the upper reaches of the Yarlung Zangbo River basin.

Key words Yarlung Zangbo River; alpine meadow; above-ground biomass; species diversity; altitude; environmental factors

植物群落特征及其物种多样性在群落生态学研究占有重要地位^[1]。物种多样性可以表述群落的复杂程度和物种多少,是反映群落特征的重要指标之一^[2]。进行群落物种多样性研究不仅能更好地反映群落在组成、结构、功能和动态等方面的异质性,也可反映不同自然地理条件与群落的相互关系及其发展变化^[3]。植物群落结构是草地生态系统的重要组成部分,对研究草地类型、物种组成和结构具有重要意义^[4]。高寒草甸是青藏高原主要的草地类型之一,是高寒草地生态系统的重要组成部分。在全球重视生态环境健康的大背景下,地上生物量和物种多样性作为植物群落的重要指标,促使其成为生态研究的热点问题。根据目前已有研究,草地地上生物量与海拔间主要表现为无显著关系、先降低后增加、先增加后降低、正相关和负相关 5 种关系。物种多样性随海拔梯度的变化主要有与海拔高度负相关、与海拔高度正相关、在中等海拔高度最大、在中等海拔高度最小和无规律变化 5 种模式。在物种多样性与地上生物量的相互关系表现为单峰关系、正相关关系和负相关关系。例如潘晓婷等^[5]和刘冲等^[6]研究中地上生物量与多样性指数呈显著正相关关系,随着海拔上升,物种多样性指数均呈先上升后下降再上升的趋势,地上生物量呈先下降后上升的变化特征。张静等^[7]研究发现草本层物种丰富度在海拔梯度上呈明显的“偏锋”格局。王金兰等^[8]和 Wilson 等^[9]研究表明地上生物量随海拔升高呈先显著增加后显著降低的变化趋势,多样性指数和丰富度指数均随海拔升高呈先增加后减小的变化趋势,多样性指数与地上生物量呈显著正相关。雅鲁藏布江作为青藏高原最重要的河流,研究雅鲁藏布江流域草地资源对保护青藏高原生态环境具有重要

意义。目前,国内外对该区域不同海拔梯度下植物丰富度、植物物候、植被覆盖度变化等方面对植物多样性开展相关研究,但研究对象多基于林下草地、沙化地区、公路沿线及整体草地群落,主要以雅鲁藏布江上游高寒草甸为对象,分析不同海拔下物种多样性和地上生物量及两者之间的相互关系的研究较少^[10-12]。鉴于此,本研究以雅鲁藏布江上游高寒草甸为研究对象,分析地上生物量和物种多样性沿海拔变化的特征及环境因子对地上生物量和物种多样性的影响,以期为雅鲁藏布江上游植物资源的合理利用和物种多样性保护提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

日喀则地区位于青藏高原西南部,南北地势较高,其间为藏南高原和雅鲁藏布江流域,雅鲁藏布江是青藏高原最重要的河流,同时也是中国重要的国际河流之一,其发源于西藏自治区日喀则市仲巴县海拔 5 590 m 的杰马央宗冰川,由西向东横贯西藏南部,物种丰富。研究区位于西藏自治区日喀则地区雅鲁藏布江流域(图 1),共 12 个研究样点(表 1),经度 $83^{\circ}44'18''$ — $89^{\circ}32'36''$ E,纬度 $27^{\circ}58'45''$ — $29^{\circ}52'23''$ N,海拔 3 774~4 589 m,年均降水量 149.36~293.99 mm,年均气温(-3.01) $^{\circ}\text{C}$ ~ 5.14 $^{\circ}\text{C}$ 。雅鲁藏布江上游流域高寒草甸植物资源丰富,主要物种有高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、藏北嵩草(*K. littledalei*)、矮生嵩草(*K. humilis*)和华扁穗草(*Blysmus sinocompressus*)等。

1.2 植被调查

于 2020 年 8—9 月在植物生长高峰期进行植物群落调查^[13]。沿海拔梯度设置 12 个样点,每个样

点 3 个重复,调查点分布信息如表 1 所示。高寒草甸植被均匀,草地平坦。

年均降雨量和年均气温数据来自 IWMI 在线气候服务平台(<http://wcatlas.iwmi.org/Default.asp>)。

植被盖度:选择群落结构和组成分布均匀的区域,每个采样点随机 3 个 50 cm×50 cm 的样方,将样方框平铺于草地,5 cm×5 cm 作为 1 个单位,将样方框分为 100 个单位,测定总盖度和各物种的分盖度。植物经济功能群分为禾本科、莎草科、阔叶型可食草和毒害草 4 种^[14]。

植物株高:在样地内随机选取同种植物 10 株,利用直尺测量其自然高度,样地内不足 10 株的全部测量,为减小测量误差,将直尺零刻度线至边缘空白处去除,求平均值作为该物种的株高。

地上生物量:分种类齐地面剪取样方内各物种的地上部分,剪下后称量各物种的鲜重,然后带回室

内,于 75 ℃下烘干至恒重,记录干重,作为各物种的地上生物量。地上总生物量采用各物种地上生物量干重之和计算。

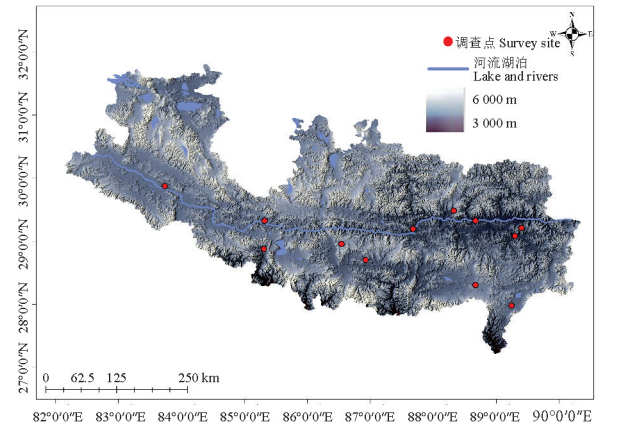


图 1 研究区域

Fig. 1 Map of the area where this study was carried out

表 1 雅鲁藏布江上游流域调查样地信息

Table 1 Information of sample plots in the upper reaches of the Yarlung Zangbo River

编号 No.	行政区 Areas	采样点 Sample sites	海拔 Altitudes /m	东经(E) The east longitudes	北纬(N) The north latitudes	年降水量 Precipitations of one year /mm	年平均气温 Annual average temperature /℃
1	仁布县 Rinbung County	桑珠孜区江当乡 Jiangdang Town, Sangzhuzi District	3 774	89°24′4″	29°12′40″	168.50	1.82
2	桑珠孜区 Sangzhuzi District	桑珠孜区聂日雄乡 Nierixiong Town, Sangzhuzi District	3 818	88°40′13″	29°19′32″	293.99	5.14
3	白朗县 Bainang County	白朗县洛江镇 Luojiang Town, Bainang County	3 853	89°17′52″	29°4′57″	153.08	1.97
4	拉孜县 Lazi County	拉孜县拉孜镇 Lazi Town, Lazi County	3 935	87°40′47″	29°11′45″	277.65	4.68
5	江孜县 Gyangzê County	江孜县 紫金乡 Zijin Town, Gyangzê County	4 010	89°32′36″	28°57′27″	221.71	3.68
6	吉隆县 Gyirong County	吉隆县 宗嘎镇 Zongga Town, Gyirong County	4 096	85°18′42″	28°52′36″	210.88	−3.01
7	谢通门县 Xietongmen County	谢通门县 卡嘎镇 Kaga Town, Xietongmen County	4 335	88°19′11″	29°29′4″	154.94	0.82
8	定日县 Tingri County	定日县 协格尔镇 Xiegeer Town, Tingri County	4 404	86°55′36″	28°42′8″	174.69	0.41
9	萨嘎县 Saga County	萨嘎县 加加镇 Jiajia Town, Saga County	4 444	85°19′29″	29°19′34″	215.75	−1.52
10	亚东县 Yadong County	亚东县 堆纳乡 Duina Town, Yadong County	4 469	89°14′34″	27°58′45″	149.36	−0.98
11	仲巴县 Zhongba County	仲巴县 拉让乡 Larang Town, Zhongba County	4 542	83°44′18″	29°52′23″	240.02	−1.01
12	岗巴县 Kamba County	岗巴县 龙中乡 Longzhong Town, Kamba County	4 589	88°40′19″	28°18′21″	170.90	−1.03

1.3 植物群落多样性分析^[15]

重要值(I_P): $I_P=(\text{相对高度}+\text{相对盖度}+\text{相对生物量})/3$

Shannon-Weiner 指数(H): $H=-\sum P_i \times \ln P_i$
Simpson 指数(D): $D=1-\sum P_i^2$
Pielou 指数(J): $J=H/\ln S$

Patrick 指数(R): $R=S$

式中: P_i 为物种 i 的相对重要值; S 为所调查样方内物种总数。

1.4 数据分析与处理

1.4.1 回归分析

线性和非线性回归分析。采用单因素方差分析(ANOVA)进行 F 检验,模型成立的前提条件是通过 F 检验,即对应的 P 值小于 0.05。第一步:如果上表显示通过 F 检验,则说明模型成立,反之说明模型完全无意义;第二步:如果未通过 F 检验,进行其他方式的拟合。模型质量分析和模型对比判断。第一步,分析模型拟合情况,即通过 R^2 分析模型拟合情况;第二步,对拟合模型进行多次分析时对比

AIC 和 BIC 值,此两值越低越好,以此综合判定最佳方程。

根据回归分析研究 X 对 Y 的影响关系。如果 P 值小于 0.05 或 0.01,则说明 X 对 Y 有影响关系。对相关指标进行回归分析,不同回归模型的 AIC 和 BIC 指数如表 2 所示。海拔与地上生物量最优拟合方程为二次项回归方程。海拔与 Shannon-Weiner 指数和 Patrick 指数最优拟合方程为线性回归方程。海拔与 Simpson 指数和 Pielou 指数最优拟合方程为三次项回归方程。地上生物量与 Shannon-Weiner 指数和 Simpson 指数最优拟合方程为三次项回归方程。地上生物量与 Patrick 指数和 Pielou 指数最优拟合方程为线性回归方程。

表 2 模型判断指标
Table 2 Indicators for model judgment

回归分析指标 Indicators for regression analysis	回归类型 Regression types	AIC	BIC
海拔与地上生物量 Altitude and above-ground biomass	线性回归 Linear regression	558.087	561.254
	二次项回归 Quadratic regression	552.591	557.342
	三次项回归 Cubic regression	554.452	560.786
海拔与 Shannon-Weiner 指数 Altitude and Shannon-Weiner index	线性回归 Linear regression	7.572	10.739
	二次项回归 Quadratic regression	9.371	14.121
	三次项回归 Cubic regression	11.360	17.694
海拔与 Simpson 指数 Altitude and Simpson index	线性回归 Linear regression	-61.989	-58.822
	二次项回归 Quadratic regression	-61.152	-56.402
	三次项回归 Cubic regression	-60.452	-54.117
海拔与 Pielou 指数 Altitude and Pielou index	线性回归 Linear regression	-66.981	-63.814
	二次项回归 Quadratic regression	-66.223	-61.473
	三次项回归 Cubic regression	-66.397	-60.063
海拔与 Patrick 指数 Altitude and Patrick index	线性回归 Linear regression	217.621	220.788
	二次项回归 Quadratic regression	219.582	224.333
	三次项回归 Cubic regression	219.580	225.914
地上生物量与 Shannon-Weiner 指数 Above-ground biomass and Shannon-Weiner index	线性回归 Linear regression	537.550	540.717
	二次项回归 Quadratic regression	523.917	528.667
	三次项回归 Cubic regression	520.431	526.765
地上生物量与 Simpson 指数 Above-ground biomass and Simpson index	线性回归 Linear regression	547.142	550.309
	二次项回归 Quadratic regression	544.121	548.872
	三次项回归 Cubic regression	542.893	549.227
地上生物量与 Pielou 指数 Above-ground biomass and Pielou index	线性回归 Linear regression	545.352	548.519
	二次项回归 Quadratic regression	547.216	551.967
	三次项回归 Cubic regression	546.797	553.131
地上生物量与 Patrick 指数 Above-ground biomass and Patrick index	线性回归 Linear regression	557.997	561.164
	二次项回归 Quadratic regression	557.461	562.211
	三次项回归 Cubic regression	557.435	563.769

1.4.2 数据处理

用 Excel 2019 对数据进行记录整理。利用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、线性和非线性回归分析和 Pearson 相关性分析:(1)地上生物量和多样性指标数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA);(2)对群落的地上生物量和多样性指数进行回归分析:地上生物量、Shannon-Weiner 指数、Simpson 指数、Pielou 指数、Patrick 指数与海拔之间的关系,地上总生物量与多样性指数之间的关系;(3)对地上生物量、多样性指数和环境因子进行 Pearson 相关性分析。采用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 高寒草甸植物群落组成

在西藏日喀则地区雅鲁藏布江流域共调查 12 个样地,调查物种 225 种,主要物种如表 3 所示。高

寒草甸优势种以莎草科植物为主,包括高山嵩草(*K. pygmaea*),藏北嵩草(*K. littledalei*),矮生嵩草(*K. humilis*)和华扁穗草(*B. sinocompressus*)等。高山嵩草的主要伴生种包括华扁穗草、刺鳞蓝雪花(*Ceratostigma ulicinum*)、丝颖针茅(*Stipa capillacea*),藏北嵩草和矮生嵩草的主要伴生种为青藏藁草(*Carex moorcroftii*),华扁穗草的主要伴生种为尾穗嵩草(*K. cercostachy*)。

2.2 海拔对高寒草甸地上生物量和物种多样性的影响

2.2.1 地上生物量

地上生物量随海拔变化如图 2 所示。在回归分析中,最优拟合曲线为二项式。海拔对地上生物量的解释度为 22%,虽然地上生物量的二次回归曲线拟合呈 U 形,但二者没有显著相关性($P>0.05$),不能说明随海拔升高地上生物量先降低后增大的变化趋势。地上生物量最大值为 4 542 m,最小值为 4 335 m。

表 3 高寒草甸主要物种
Table 3 Main species of the alpine meadows

编号 No.	优势种 Dominant species	主要伴生种 Main companion species
1	高山嵩草 <i>K. pygmaea</i>	华扁穗草、刺鳞蓝雪花、丝颖针茅 <i>B. sinocompressus</i> , <i>C. ulicinum</i> , <i>S. capillacea</i>
2	藏北嵩草 <i>K. littledalei</i>	华扁穗草、青藏藁草,等 <i>B. sinocompressus</i> , <i>C. moorcroftii</i> , etc.
3	矮生嵩草 <i>K. humilis</i>	青藏藁草,等 <i>C. moorcroftii</i> , etc.
4	华扁穗草 <i>B. sinocompressus</i>	尾穗嵩草,等 <i>K. cercostachy</i> , etc.

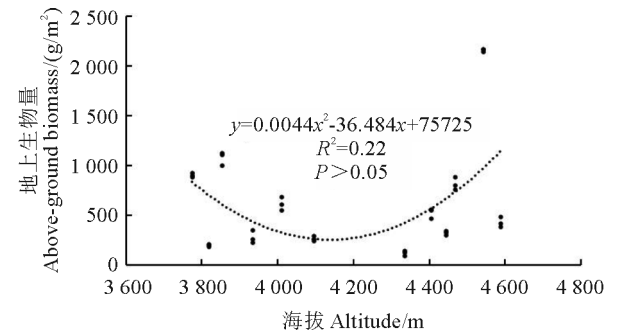


图 2 地上总生物量与海拔的关系

Fig. 2 Total above-ground biomass as a function of the altitude

2.2.2 群落多样性

由图 3 可知,高寒草甸植物群落 Shannon-Weiner 指数(H)和 Patrick 指数(R)的最大值均处于低海拔高度,随海拔升高呈明显的下降趋势。在回归分析中,海拔与 Shannon-Weiner 指数(H)和 Patrick 指数(R)的最优拟合为线性回归,显著相关

($P<0.05$),说明 Shannon-Weiner 指数(H)和 Patrick 指数(R)随海拔升高呈线性降低。海拔与 Simpson 指数(D)和 Pielou 指数(J)最优拟合曲线为三项式,虽然呈 S 形,但是 $P>0.05$,不能解释随海拔升高呈现的变化趋势。

2.3 高寒草甸地上生物量与植物群落多样性的关系

地上生物量和多样性关系如图 4 所示。Shannon-Weiner 指数(H)、Simpson 指数(D)与地上生物量回归分析中拟合最优为三次多项式,Pielou 指数(J)与地上生物量拟合最优为一次函数,均显著相关($P<0.05$)。Shannon-Weiner 指数(H)、Simpson 指数(D)和 Pielou 指数(J)随着地上生物量变化呈减小趋势,Shannon-Weiner 指数(H)对地上生物量的解释达到 70%。Patrick 指数(R)与地上生物量最优拟合为一次函数,但是 $P>0.05$,不能解释随 Patrick 指数(R)增加地上生物量呈线性下降的变化趋势。

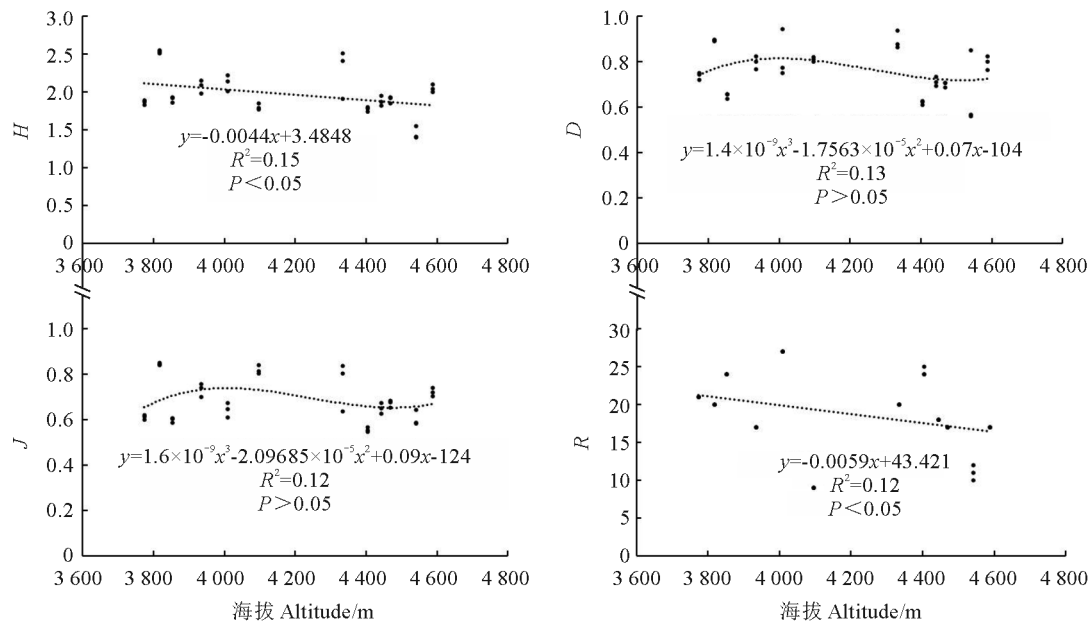


图 3 不同海拔梯度下植物群落多样性指数变化情况
Fig. 3 Diversity indices of plant communities at different altitudes

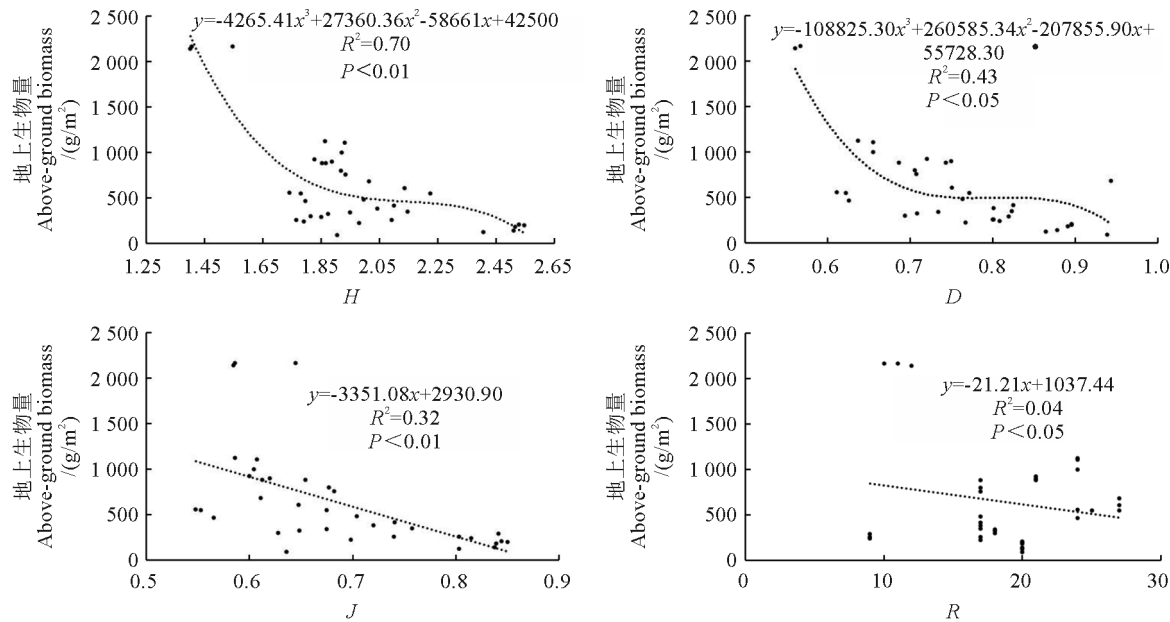


图 4 地上生物量和物种多样性的关系
Fig. 4 Relationship between above-ground biomass and species diversity

2.4 地上生物量、多样性指数与环境因子的关系

不同海拔下地上生物量、多样性和环境因子的相关性分析如表 4 所示。地上总生物量与 Shannon-Weiner 指数(H)、Simpson 指数(D)、Pielou 指数(J)呈显著负相关($P < 0.01$)。Shannon-Weiner 指数(H)与海拔和气温之间呈显著负相关。Shannon-Weiner 指数(H)和海拔之间的相关系数值为 -0.385 , $P < 0.05$ 。

Shannon-Weiner 指数(H)和气温之间的相关

系数值为 0.602 , $P < 0.01$ 。Simpson 指数(D)与海拔、降水和气温之间无显著性。Pielou 指数(J)与降水之间呈显著正相关($P < 0.05$)。Patrick 指数(R)与海拔、气温之间的具有相关性。Patrick 指数(R)和海拔之间的相关系数值为 -0.343 , $P < 0.05$,说明 Patrick 指数(R)和海拔之间显著负相关。Patrick 指数(R)和气温之间的相关系数值为 0.588 , $P < 0.01$,Patrick 指数(R)和气温呈显著正相关关系。

表 4 高寒草甸地上生物量、多样性指数与环境因子的 Pearson 相关性分析

项目 Items	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>J</i>	<i>R</i>	地上生物量 Total above-ground biomass (g/m ²)	海拔 Altitudes /m	年降水量 Precipitations of one year /mm	气温 Temperature /℃
<i>H</i>	1							
<i>D</i>	0.665 **	1						
<i>J</i>	0.686 **	0.713 **	1					
<i>R</i>	0.374 *	−0.044	−0.386 *	1				
地上生物量 Total above-ground biomass/(g/m ²)	−0.675 **	−0.537 **	−0.569 **	−0.196	1			
海拔 Altitude/m	−0.385 *	−0.259	−0.188	−0.343 *	0.190	1		
年降水量 Precipitation of one year/mm	0.252	0.318	0.412 *	−0.228	−0.079	−0.306	1	
气温 Temperature/℃	0.602 **	0.323	0.117	0.588 **	−0.192	−0.701 **	0.487 **	1

注：* 表示在 0.05 水平(双尾)相关性显著。 ** 表示在 0.01 水平(双尾)相关性显著。
Note: * indicates significant correlation at the 0.05 level (two-tailed). ** indicates correlation is significant at the 0.01 level (two-tailed).

总生物量与海拔、降水和气温之间无显著性, 关系数值分别是 0.190, −0.079, −0.192, 均接近于 0, 并且 $P>0.05$, 表明总生物量与海拔、降水和气温之间均无相关关系。

3 讨 论

3.1 雅鲁藏布江上游高寒草甸植物群落特征

高寒草甸是青藏高原主要的草地类型之一, 是高寒草地生态系统的重要组成部分。雅鲁藏布江流域中上游的高寒草甸主要以高山嵩草, 藏北嵩草为主^[16]。本研究中雅鲁藏布江上游主要植物包括高山嵩草, 藏北嵩草, 矮生嵩草和华扁穗草。主要伴生种包括华扁穗草、刺鳞蓝雪花、丝颖针茅, 青藏藁草, 尾穗嵩草等。崔恒心等在调查中表明西藏高寒草甸主要植物有高山嵩草、矮生嵩草、藏北嵩草、华扁穗草、圆穗蓼(*Bistorta macrophylla*)和黑褐穗藁草(*Carex atrofusca*)等^[17], 可能由于调查局限性, 未能涉及圆穗蓼和黑褐穗藁草等植被类型。

本研究调查显示样地中优势种主要以莎草科植物为主, 这与上述研究结果吻合, 尽管杂类草的入侵会影响莎草科植物的优势地位, 但其在植物群落中依然保持着较高的生物量, 这可能是因为莎草科在植物群落中占据着优势地位, 也可能由于高寒草甸在长期群落演替过程中形成较稳定的生态系统^[18-22]。

3.2 不同海拔梯度下雅鲁藏布江上游高寒草甸地上生物量和多样性变化特征

海拔对植物的影响是热量、水分、养分和光照等多个环境因子的综合效应, 决定着植物种的分布格局, 研究表明草地中物种地上生物量随着海拔变化有 5 种趋势: 无显著关系、先降低后增加、先增加后降低、正相关和负相关的变化特征^[23]。白晓航等^[24]和牛钰杰等^[25]在研究中指出在一定海拔范围内, 不同物种对海拔的响应呈现多种变化趋势, 同一地区出现多种变化趋势并不矛盾, 这可能与物种适应特征和分布范围不同有关。郭建兴等^[26]和常风^[27]研究结果表明在草地生态系统中植被地上生物量随海拔变化先升高后降低, 研究者认为是区位、气候条件和人类活动等因素共同作用所导致, 经度、纬度和植被盖度也是导致地上生物量变化的原因。也有研究认为水分是造成地上生物量变化的主要原因, 其次土壤养分也有可能影响地上生物量^[28], 已有研究表明因特定生态环境和研究尺度的差异, 研究人员对地上生物量与海拔梯度的关系仍没有统一的定论。在本研究中地上总生物量与海拔之间无显著关系, 地上生物量与海拔、气温和降水无显著关系, 可能与人为活动有关。雅鲁藏布江流域水源充足, 草地资源丰富, 畜牧业得到良好发展, 沿线的放牧活动会降低地上生物量, 导致不同海拔地上生物量呈无规律变化; 其次土壤理化性质也可能影响地上生物量, 雅鲁藏布江两岸良好的水热条件可以满

足较多物种的生存需求,但对于植物良好生长发育的土壤养分需求还未可知,因此该区域植被和土壤理化性质的关系也是将来需要研究的内容。本研究区域跨经度较广,植被的地域性特征较强,导致地上生物量表现出不规律特征。

物种多样性沿海拔梯度的变化格局一直是生物多样性研究的一项重要内容。贺金生等^[29]学者指出随海拔高度的变化,物种多样性有 5 种模式:与海拔高度负相关,与海拔高度正相关,在中等海拔高度最大,在中等海拔高度最小和无规律变化。周芸芸等^[30]研究发现多样性指数随海拔升高降低。常学向等^[31]的研究中多个多样性指数趋势表现出不一致的情况,卢慧等^[32]和林红^[33]也发现多样性指数会随海拔梯度的增加表现出正相关及先增加后减少等不同变化趋势,综合多位学者研究结果,均认为海拔梯度会造成降水、气温等环境因子变化^[34],加之人类干扰多种因素导致物种分布格局发生相应变化。本研究发现海拔与多样性呈负相关关系,Shannon-Weiner 指数和 Patrick 指数的最大值均处于低海拔高度。在海拔梯度下,环境异质性和对气候的敏感程度和人类活动的扰乱都会造成不同梯度下物种分布发生变化^[35],西藏地广人稀,在雅鲁藏布江上游调查过程中发现人为干扰因素并不会对草地生态系统造成严重破坏,虽然会对地上生物量造成影响,但减少物种多样性可能性较低。在本研究中多样性与气温、降水呈显著正相关关系,多样性随气温升高表现出增加趋势,说明水热条件越优越,越适宜更多物种生存,海拔越高,水热条件越差,因此物种多样性越低。

3.3 雅鲁藏布江上游高寒草甸地上生物量和植物群落多样性的关系

在物种多样性与地上生物量的相关研究中,二者的主要关系有:单峰关系^[36]、正相关关系^[37]、负

相关关系^[38]。本研究中地上生物量与物种多样性呈负相关关系,物种丰富的植物群落反而表现出低生产力。这种关系的出现可能与群落组成的差异有关,有研究表明优势物种能驱动地上生物量变化^[39],在本研究中莎草科植物作为优势种,其绝对的竞争优势导致物种多样性减小、地上生物量增加。地上生物量和物种多样性之间的关系与环境干扰也有关系,当环境对一者起促进作用,对另者起抑制作用,则呈现出负相关关系,若同时起促进作用则呈现正相关关系。水热条件的变化所引起的物种选择、资源竞争、生境变化是影响物种多样性和生产力关系的重要因素。王娟等^[40]提出地上生物量与物种多样性之间存在显著的负相关关系,认为增加人为管理措施后,改善土壤养分条件是植物能获取良好生长条件的主要原因。然而刘哲等^[41]研究发现地上生物量与物种多样性呈 S 形曲线,认为放牧是引起该趋势的重要因素。王长庭等^[42]认为在青藏高原地上生物量与物种多样性主要呈单峰变化,认为此现象符合“中间高度膨胀”观点。青藏高原物种多样性和地上生物量关系复杂多样,造成的原因可能与空间尺度的分布有关,物种资源竞争、生境变化和人为活动等因素均可影响二者之间的关系^[43-44],对多样性和地上生物量的关系仍需进行研究。

4 结 论

通过对雅鲁藏布江上游高寒草甸植被群落的调查,结果表明地上生物量与海拔变化不相关,Shannon-Weiner 指数(H)和 Patrick 指数(R)随海拔升高呈下降趋势,地上生物量和物种多样性表现为负相关关系。海拔与多样性呈负相关,气温、降水与多样性呈正相关。海拔、气温和降水与地上生物关系不显著。研究结果对维护青藏高原物种多样性和草地生态保护具有一定的意义。

参考文献:

- [1] HUSTON M A. Hidden treatments in ecological experiments: Re-evaluating the ecosystem function of biodiversity[J]. *Oecologia*, 1997, 110(4): 449-460.
- [2] NGUYEN H, HERBOHN J, FIRN J, *et al.* Biodiversity-productivity relationships in small-scale mixed-species plantations using native species in Leyte Province, Philippines[J]. *Forest Ecology and Management*, 2012, 274: 81-90.
- [3] CARNICER J, SARDANS J, STEFANESCU C, *et al.* Global biodiversity, stoichiometry and ecosystem function responses to human-induced C-N-P imbalances[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 172: 82-91.
- [4] 赵学勇, 安沙舟, 曹广民, 等. 中国荒漠主要植物群落调查的意义、现状及方案[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(1): 9-19.
- [5] ZHAO X Y, AN S Z, CAO G M, *et al.* Surveying Desert major plant communities in China: Implications, current status, and scheme[J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(1): 9-19.
- [5] 潘晓婷, 叶茂, 曹攀琦, 等. 阿尔泰山布尔津林区不同草地类型物种和生产力关系及随海拔变化特征[J]. *草业科学*, 2023, 40(3): 627-637.
- PAN X T, YE M, CAO P Q, *et al.* Species and productivity relationships with altitudinal variation among different grass-

land types in the Burqin forest region of the Aletai Mountains [J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(3): 627-637.

[6] 刘冲, 野起瑞, 李江文, 等. 黄土丘陵区撂荒年限和坡向对灌丛生物量及丰富度的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(9): 2826-2833. LIU C, YE Q R, LI J W, *et al.* Influences of the uncultivation duration of arable lands and slope aspect on the biomass of shrub and subshrub life-form and species richness on lands in loess hilly region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(9): 2826-2833.

[7] 张静, 陈志林, 侯晓巍, 等. 三江源区祁连圆柏群落物种多样性沿海拔梯度的变化格局[J]. 西北植物学报, 2020, 40(10): 1759-1767. ZHANG J, CHEN Z L, HOU X W, *et al.* Species diversity of *Juniperus przewalskii* community in three river headwater along altitude gradient[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(10): 1759-1767.

[8] 王金兰, 曹文侠, 张德罡, 等. 东祁连山高寒杜鹃灌丛群落结构和物种多样性对海拔梯度的响应[J]. 草原与草坪, 2019, 39(5): 1-9. WANG J L, CAO W X, ZHANG D G, *et al.* Structure and species diversity of alpine *Rhododendron* shrub-herb community and its response to altitude gradients in eastern Qilian Mountains[J]. *Grassland and Turf*, 2019, 39(5): 1-9.

[9] WILSON J B, LEE W G, MARK A F. Species diversity in relation to ultramafic substrate and to altitude in southwestern New Zealand[J]. *Vegetatio*, 1990, 86(1): 15-20.

[10] 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.

[11] 杜方雪, 李景吉, 吴健辉, 等. 雅鲁藏布江下游高山峡谷区林下草本植物多样性沿海拔梯度变化特征研究[J]. 环境生态学, 2022, 4(12): 37-45. DU F X, LI J J, WU J H, *et al.* Study on the variation characteristics of understory herb diversity along the altitude gradient in the alpine valley area of the lower reaches of the Yarlung Zangbo River[J]. *Environmental Ecology*, 2022, 4(12): 37-45.

[12] 常学向, 陈怀顺, 李志刚, 等. 西藏雅鲁藏布江流域典型沙漠区生态修复植物群落物种多样性[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 187-194. CHANG X X, CHEN H S, LI Z G, *et al.* Species diversity of ecological restoration plant communities in typical desert areas of the Brahmaputra River Basin in Tibet[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(6): 187-194.

[13] 刘玉, 马玉寿, 施建军, 等. 大通河上游高寒草甸植物群落的退化特征[J]. 草业科学, 2013, 30(7): 1082-1088. LIU Y, MA Y S, SHI J J, *et al.* Community characteristics of alpine meadow under different degrees of degradation in the upper area of Daitong River [J]. *Pratacultural Science*, 2013, 30(7): 1082-1088.

[14] 周选博, 王晓丽, 马玉寿, 等. 返青期休牧初期对三江源区高寒草甸植被特征的影响[J]. 青海大学学报, 2020, 38(6): 1-8. ZHOU X B, WANG X L, MA Y S, *et al.* Effects of early period of rest grazing on the vegetation characteristics of alpine meadow in the Sanjiangyuan area[J]. *Journal of Qinghai University*, 2020, 38(6): 1-8.

[15] ZOU J R, LUO C Y, XU X L, *et al.* Relationship of plant diversity with litter and soil available nitrogen in an alpine meadow under a 9-year grazing exclusion[J]. *Ecological Research*, 2016, 31(6): 841-851.

[16] WANG T, WANG J S, DING Y K, *et al.* Quantitative classification and ordination of plant communities in the upper and middle reaches of the Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, 10(4): 389.

[17] 崔恒心, 维纳汉. 西藏草地类型及其地理分布规律[J]. 国外畜牧学(草原与牧草), 1997, 17(4): 11-17. CUI H X, WEI N H. Grassland types and their geographical distribution in Tibet[J]. *Grassland and Turf*, 1997, 17(4): 11-17.

[18] 李邵宇. 青藏高原不同草地类型植物群落化学计量特征对退化的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.

[19] 左小安, 赵学勇, 赵哈林, 等. 科尔沁沙地草地退化过程中的物种组成及功能多样性变化特征[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 181-185. ZUO X A, ZHAO X Y, ZHAO H L, *et al.* Changes on species composition and function diversity in degraded process of grassland in horqin sand land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 181-185.

[20] 姚喜喜, 才桑加, 李长慧, 等. 不同类型草地物种多样性、生产力与牧草品质和体外消化率的关系[J]. 西北农业学报, 2022, 31(10): 1266-1276. YAO X X, CAI S J, LI C H, *et al.* Study on relationship between species diversity, productivity, forage quality and *in vitro* digestibility of different types of grassland[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2022, 31(10): 1266-1276.

[21] 周华坤, 周立, 赵新全, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统稳定性研究[J]. 科学通报, 2006, 51(1): 63-69. ZHOU H K, ZHOU L, ZHAO X Q, *et al.* Study on the stability of alpine meadow ecosystem in qinghai-tibet plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(1): 63-69.

[22] 何淑嫻, 李伟, 程希平, 等. 践踏干扰对碧塔海高寒草甸植被茎叶性状、物种多样性和功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2063-2070. HE S Q, LI W, CHENG X P, *et al.* The effect of trampling disturbance on functional traits, species diversity, and functional diversity of alpine meadows in Bitahai Nature Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(6): 2063-2070.

[23] 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[J]. 草业学报, 2021, 30(8): 25-35. 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 [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2021, 30(8): 25-35.

[24] 白晓航, 张金屯. 小五台山森林群落优势种的生态位分析[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 3815-3826. BAI X H, ZHANG J T. Niche analysis of dominant species of forest community in Xiaowutai Mountain, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(12): 3815-3826.

[25] 牛钰杰, 周建伟, 杨思维, 等. 坡向和海拔对高寒草甸山体土壤水热和植物分布格局的定量分解[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1489-1497. NIU Y J, ZHOU J W, YANG S W, *et al.* Quantitative appor-

- tionment of slope aspect and altitude to soil moisture and temperature and plant distribution on alpine meadow[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5): 1489-1497.
- [26] 郭建兴, 叶茂, 殷锡凯, 等. 阿尔泰山两河源牧区草地群落生物量及物种多样性[J]. 西北植物学报, 2022, 42(11): 1936-1944. GUO J X, YE M, YIN X K, *et al.* Biomass and diversity of grassland community in the two-river source pastoral areas of Altai Mountains[J]. *Acta Botanica Boreali—Occidentalia Sinica*, 2022, 42(11): 1936-1944.
- [27] 常凤. 天山巴音布鲁克新疆假龙胆适生地群落植物多样性与生产力的关系[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2021.
- [28] 孟可爱, 刘小飞. 水分胁迫对禾本科牧草影响研究进展[J]. 畜牧产业, 2020(11): 72-74. MENG K A, LIU X F. Research progress on the influence of water stress on gramineous forage grass[J]. *Animal Agriculture*, 2020(11): 72-74.
- [29] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征[J]. 生态学报, 1997, 17(1): 91-99. HE J S, CHEN W L. A review of gradient changes in species diversity of land plant communities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(1): 91-99.
- [30] 周芸芸, 赵敏杰, 李熙萌, 等. 大坂山不同海拔高寒植被物种多样性研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(13): 8028-8030. ZHOU Y Y, ZHAO M J, LI X M, *et al.* Study on species diversity of alpine vegetation with different altitudes in daban mountain[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(13): 8028-8030.
- [31] 常学向, 赵文智, 赵爱芬. 祁连山区不同海拔草地群落的物种多样性[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1599-1603. CHANG X X, ZHAO W Z, ZHAO A F. Species diversity of pasture community at different altitude levels in Qilian Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1599-1603.
- [32] 卢慧, 丛静, 刘晓, 等. 三江源区高寒草甸植物多样性的海拔分布格局[J]. 草业学报, 2015, 24(7): 197-204. LU H, CONG J, LIU X, *et al.* Plant diversity patterns along altitudinal gradients in alpine meadows in the Three River Headwater Region, China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(7): 197-204.
- [33] 林红. 拉萨河流域洪积扇植被物种组成与多样性及其环境解释[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [34] KITAYAMA K. An altitudinal transect study of the vegetation on Mount Kinabalu, Borneo[J]. *Vegetatio*, 1992, 102(2): 149-171.
- [35] 聂佩潇, 张彩彩, 龙晓斌, 等. 白马雪山自然保护区植物物种多样性海拔分布格局[J]. 四川林业科技, 2022, 43(2): 95-100. NIE P X, ZHANG C C, LONG X B, *et al.* Altitude distribution pattern of plant species diversity in the Baima snow mountain nature reserve, Yunnan Province[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2022, 43(2): 95-100.
- [36] 胡玉昆, 李凯辉, 阿德力·麦地, 等. 天山南坡高寒草地海拔梯度上的植物多样性变化格局[J]. 生态学杂志, 2007, 26(2): 182-186. HU Y K, LI K H, Adeli Maidi, *et al.* Plant species diversity of alpine grasslands on southern slope of Tianshan Mountain along altitude gradient[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(2): 182-186.
- [37] 杜国祯, 覃光莲, 李自珍, 等. 高寒草甸植物群落中物种丰富度与生产力的关系研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(1): 125-132. DU G Z, QIN G L, LI Z Z, *et al.* Relationship between species richness and productivity in an alpine meadow plant community[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(1): 125-132.
- [38] 杨佳云, 胡启武, 刘运媛, 等. 鄱阳湖典型湿地植物群落生物量及分配对植物多样性变化的响应[J/OL]. 应用与环境生物学报, 2023(3): 1-13. YANG J Y, HU Q W, LIU Y Y, *et al.* Responses of plant biomass and allocation to plant diversity changes in typical wetlands of Poyang Lake[J/OL]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023(3): 1-13.
- [39] 张峰, 杨阳, 乔莽, 等. 利用方式对大针茅草原植物多样性、功能性状及地上生物量的影响[J]. 中国草地学报, 2019, 41(1): 1-8. ZHANG F, YANG Y, QIAO J, *et al.* Effects of utilization ways on species diversity, functional traits and aboveground biomass in stipagrandis steppe[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(1): 1-8.
- [40] 王娟, 张登山, 肖元明, 等. 物种多样性和功能性状驱动高寒草原地上生物量对长期禁牧的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(6): 2465-2475. WANG J, ZHANG D S, XIAO Y M, *et al.* Diversity of species and functional traits drive jointly responses of aboveground biomass to long-term grazing exclusion at alpine steppe[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2465-2475.
- [41] 刘哲, 李奇, 陈懂懂, 等. 青藏高原高寒草甸物种多样性的海拔梯度分布格局及对地上生物量的影响[J]. 生物多样性, 2015, 23(4): 451-462. LIU Z, LI Q, CHEN D D, *et al.* Patterns of plant species diversity along an altitudinal gradient and its effect on aboveground biomass in alpine meadows in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Biodiversity Science*, 2015, 23(4): 451-462.
- [42] 王长庭, 王启基, 龙瑞军, 等. 高寒草甸群落植物多样性和初级生产力沿海拔梯度变化的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 240-245. WANG C T, WANG Q J, LONG R J, *et al.* Changes in plant species diversity and productivity along an elevation gradient in an alpine meadow[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(2): 240-245.
- [43] 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[J]. 草业学报, 2017, 26(9): 200-207. 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[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(9): 200-207.
- [44] 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[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6): 1071-1079. 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[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(6): 1071-1079.