

网络出版时间:2024-10-10 15:45 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.04.012  
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20241010.1121.013

# 阿尔泰山富蕴地区草地群落生物量、物种多样性及其与环境因子的相关性

曾国燕<sup>1,2</sup>, 叶茂<sup>1,2</sup>, 李苗苗<sup>1,2</sup>, 陈维龙<sup>1,2</sup>

(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实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

**【摘要】**【目的】研究阿尔泰山富蕴地区草地群落的结构、生物量、物种多样性及其与环境因子的关系, 为研究区草地保护和可持续发展提供科学依据。【方法】2022 年 7 月, 在新疆阿尔泰山富蕴地区选取 13 个有代表性的草地群落样地, 调查样地中物种数量、各物种的个体数和盖度等, 测定样地中草地群落地上生物量、Sorenson 相似性系数及物种多样性(Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Alatalo 均匀度指数), 并分析地上生物量、物种多样性与环境因子(经度、纬度、海拔、坡度、月均气温、月均降水量、腐殖质层厚度)的相关性。【结果】阿尔泰山富蕴地区草地群落植物共计 18 科 25 属 25 种, 主要为菊科、蔷薇科、禾本科和豆科植物, 植被生活型以多年生草本和一年生草本为主。各样地草地群落间 Sorenson 相似性系数均较低, 地上生物量和物种多样性存在明显差异。地上生物量与 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Alatalo 均匀度指数之间均存在显著的三次函数关系。相关性分析结果表明, 地上生物量与海拔之间呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 与经度呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 与纬度呈显著负相关( $P < 0.05$ ); Margalef 丰富度指数与经度呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 与纬度则呈现极显著负相关( $P < 0.01$ ); Simpson 优势度指数与坡度存在显著负相关关系( $P < 0.05$ ); Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数与纬度存在显著负相关关系( $P < 0.05$ ); Alatalo 均匀度指数与海拔之间呈显著负相关( $P < 0.05$ )。盖度、月均气温、月均降水量、腐殖质层厚度与地上生物量、物种多样性指数均无显著相关性( $P > 0.05$ )。【结论】阿尔泰山富蕴草地群落结构相对简单, 海拔、经度、纬度和坡度对地上生物量和物种多样性指数影响较大。

**【关键词】** 阿尔泰山富蕴地区; 草地群落结构; 地上生物量; 物种多样性; 环境因子

**【中图分类号】** Q948.1

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2025)04-0120-12

## Biomass and species diversity of grassland communities and their correlation with environmental factors in Fuyun area, Altai Mountains

ZENG Guoyan<sup>1,2</sup>, YE Mao<sup>1,2</sup>, LI Miaomiao<sup>1,2</sup>, CHEN Weilong<sup>1,2</sup>

(1 College of Geographical Sciences and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China;

2 Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

**Abstract:** 【Objective】 This research aimed to study the structure, biomass, species diversity and their relationship with environmental factors of grassland communities in Fuyun area of Altai Mountains, so as to provide scientific basis for the conservation and sustainable development of grassland. 【Method】 In July 2022, 13 representative grassland community sample plots were selected in the Fuyun area of Altai Mountains, Xinjiang. The number of species, the number of individuals of each species and cover, etc. in the sample plots were investigated, the aboveground biomass, Sorenson similarity coefficient, and the diversity

**【收稿日期】** 2023-12-28

**【基金项目】** 国家自然科学基金项目(42161004); 国家自然科学基金委和新疆维吾尔自治区人民政府(NSFC-新疆)联合基金项目(U1803245)

**【作者简介】** 曾国燕(1998-), 女, 云南丽江人, 硕士, 主要从事干旱区生态水文过程研究。Email: Zenguoan@163.com.

**【通信作者】** 叶茂(1977-), 女, 陕西绥德人, 教授, 硕士生导师, 主要从事干旱区生态水文过程研究。E-mail: yemao1111@163.com

of species in the grassland communities in the sample plots (Margalef richness index, Simpson dominance index, Shannon-Wiener diversity index and Alatalo evenness index) were determined, and the correlation between aboveground biomass, species diversity and environmental factors (longitude, latitude, altitude, slope, average monthly temperature, average monthly precipitation, humus layer thickness) was analyzed. **【Result】** The total number of plants in grassland communities in Fuyun area, Altai Mountains, was 25 species in 18 families and 25 genera, mainly Asteraceae, Rosaceae, Gramineae, and Leguminosae, and the vegetation life-types were dominated by perennial and annual herbs. The Sorenson similarity coefficients were low among grassland communities in all sample sites, and there were significant differences in aboveground biomass and species diversity. Significant cubic functional relationships were found between aboveground biomass and Margalef richness index, Shannon-Wiener diversity index and Alatalo evenness index. The results of correlation analysis showed that aboveground biomass was significantly positively correlated with elevation ( $P < 0.01$ ), significantly positively correlated with longitude ( $P < 0.05$ ), and significantly negatively correlated with latitude ( $P < 0.05$ ). The Margalef richness index was significantly positively correlated with longitude ( $P < 0.05$ ), and significantly negatively correlated with latitude ( $P < 0.01$ ). There was a significant negative correlation between the Simpson dominance index and slope ( $P < 0.05$ ); a significant negative correlation between the Simpson dominance index, the Shannon-Wiener diversity index, and latitude ( $P < 0.05$ ); and a significant negative correlation between the Alatalo evenness index and elevation ( $P < 0.05$ ). There was no significant correlation ( $P > 0.05$ ) between cover, average monthly temperature, average monthly precipitation, humus layer thickness and aboveground biomass and species diversity index. **【Conclusion】** The grassland community structure in Fuyun area of Altai Mountains is relatively simple, and elevation, longitude, latitude and slope have significant effect on aboveground biomass and species diversity indices.

**Key words:** Fuyun region in Altai Mountains; grassland community structure; aboveground biomass; species diversity; environmental factor

草地生态系统是陆地上分布最广的生态系统之一,是整个生态系统中不可或缺的一部分,对全球的气候调节和碳循环起着非常重要的作用<sup>[1]</sup>。地上生物量是草地生态系统的最基本的数量特征,也是认识生态系统结构和功能的基础,能反映草地植被特征和生产力<sup>[2]</sup>。植物物种多样性能反映区域内物种资源的丰富程度,在维持生态系统功能和稳定的方面具有重要作用<sup>[3]</sup>。草地群落物种多样性包括物种的丰富度、优势度与均匀度<sup>[4]</sup>,群落内部的物种多样性与外部环境有着紧密的联系,如地形、气候、土壤、海拔等,特定的环境因素会直接或间接地影响物种的丰富度、优势度与均匀度<sup>[5-6]</sup>,物种多样性与地上生物量及其与环境因子的相互关系对草地生态系统的演变有着重要的影响<sup>[7-8]</sup>,是草地生态学研究的重要内容。干旱区生态系统非常脆弱且稳定性较低,气候变化和人类活动的频繁干扰使其成为最敏感的生态系统之一<sup>[9]</sup>。研究干旱区草地群落物种组成、物种多样性及其生产力与环境因子之间的相互关系,对中国西北典型干旱区草地生态系统的保护和

可持续发展具有积极意义<sup>[10]</sup>。

阿尔泰山富蕴地区位于新疆北部,是我国重要的生态系统保护和恢复区之一,同时也是较为典型的自然环境敏感区,在人为干扰的影响下极易造成生态破坏及物种多样性降低<sup>[11]</sup>。近年来,随着该社会经济的发展,人为干扰也进一步加剧了物种多样性降低的趋势,这也进一步引发草地群落分布格局的改变,给生态系统的稳定带来挑战<sup>[12-14]</sup>。因此,在阿尔泰山草地生态恢复与保护中,开展草地群落生物量和物种多样性变化及其与环境因子的关系研究显得十分必要<sup>[15]</sup>。

国内外学者对草地群落物种多样性和地上生物量的关系展开了大量的研究,结果表明二者存在正相关、负相关、不相关、倒U型和U型等关系<sup>[16-21]</sup>,由于研究区的环境因子各不相同,至今关于草地群落物种多样性与地上生物量的关系并未形成统一的结论。目前,针对阿尔泰山草地的相关研究大多集中于物种多样性<sup>[22-23]</sup>、湿地退化与保护<sup>[24]</sup>、矿区修复与治理<sup>[25]</sup>、草牧业发展<sup>[26-27]</sup>等方面,关于草地群

落物种多样性及其调控因素方面的研究较为缺乏。本研究对阿尔泰山富蕴地区的草地群落进行了调查,在此基础上探究草地群落的结构组成,分析草地上生物量和物种多样性特征及其与环境因子的关系,以为富蕴地区草地资源的高效利用与生态恢复工作提供科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于阿尔泰山南麓、准噶尔盆地北缘,坐标为北纬  $45^{\circ}00' - 48^{\circ}03'$ ,东经  $88^{\circ}10' - 90^{\circ}31'$ ,地势北高南低,平均海拔  $1\ 500 \sim 35\ 00\ \text{m}$ 。属大陆性寒温带干旱气候,具有气候干燥少雨、冬冷夏热、昼夜温差大等特点;年平均温度为  $1.8 \sim 4.3\ ^{\circ}\text{C}$ ,无霜期  $135 \sim 155\ \text{d}$ ,年降水量  $110 \sim 195\ \text{mm}$ ,年蒸发量较大。草地植被种类繁多,主要有千叶蓍(*Achillea*

*millefolium*)、羽衣草(*Alchemilla japonica*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、老鹳草(*Geranium wilfordii*)、野苜蓿(*Medicago falcata*)和大丁草(*Leibnitzia anandria*)等。

### 1.2 样地调查

2022年7月,在牧草生长旺盛期,于阿尔泰山富蕴地区选取13个有代表性的草地群落样地(图1)进行植被调查,同时对样地的相关环境因子(经度、纬度、海拔、坡度、月均气温、月均降水量、腐殖质层厚度)进行调查。样地大小为  $20\ \text{m} \times 20\ \text{m}$ ,在每个样地内随机布设3个  $1\ \text{m} \times 1\ \text{m}$  的小样方,共39个样方,调查样方内的物种数、各物种的个体数和盖度等,之后将各物种齐地面刈割后,带回实验室,在  $65\ ^{\circ}\text{C}$  烘箱内烘干至质量恒定,然后用电子天平称质量,记为地上生物量。13个样地的主要信息见表1。

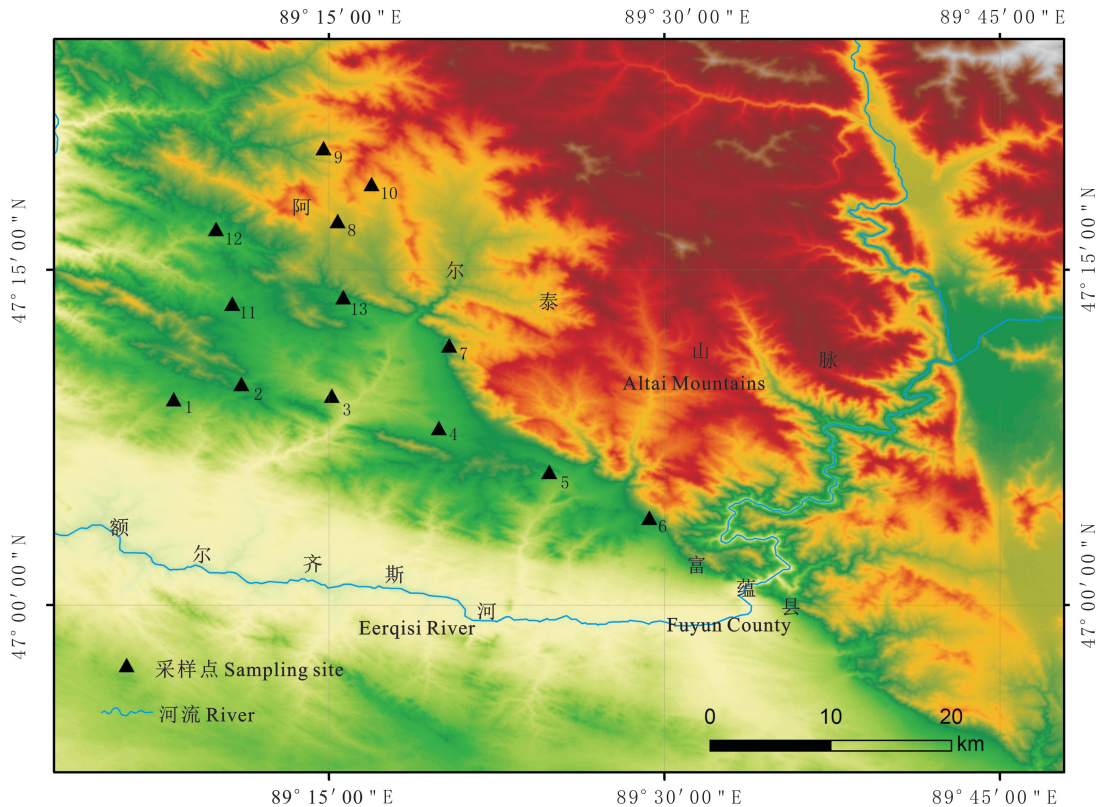


图1 新疆阿尔泰山富蕴地区13个草地群落样地的分布

Fig. 1 Distribution of 13 grassland community sample plots in Fuyun area of Altai Mountains, Xinjiang

### 1.3 物种多样性计算

对各样地草地群落物种数量及其个体数量进行统计,计算样地中各物种的重要值( $P$ )以及不同草地群落之间 Sorenson 相似性系数( $E$ ),并选取 Margalef 丰富度指数( $M$ )、Simpson 优势度指数( $D$ )、Alatalo 均匀度指数( $U$ )、Shannon-Wiener 多样性指

数( $H$ )来表征草地群落物种多样性,以上指标的计算公式为<sup>[28]</sup>:

$$\text{相对盖度} = \frac{\text{植物的盖度}}{\text{群落总盖度}}; \quad (1)$$

$$\text{相对密度} = \frac{\text{植物个体数}}{\text{群落植物总个体数}}; \quad (2)$$

$$\text{相对生物量} = \frac{\text{植物生物量}}{\text{群落总生物量}}; \quad (3)$$

$$P = (\text{相对盖度} + \text{相对密度} + \text{相对生物量}) / 3; \quad (4)$$

$$E = 2C / (A + B); \quad (5)$$

$$M = (S - 1) / \ln N; \quad (6)$$

$$D = 1 - \ln \left[ \sum_{i=1}^S (P_i)^2 \right]; \quad (7)$$

$$U = \left[ \frac{1}{\sum_{i=1}^S (P_i)^2} \right] / [\exp(-P_i \ln P_i) - 1]. \quad (8)$$

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i; \quad (9)$$

式中:  $A$ 、 $B$  分别为样地 I 和样地 II 的全部物种数;  $C$  为样地 I 与样地 II 的共有物种数;  $S$  为样方中的总物种数;  $N$  为样方中的总个体数;  $P_i$  为第  $i$  种植物个体数占总个体数比例,  $P_i = N_i / N$ , 其中  $N_i$  为第  $i$  种植物的个体数。

表 1 新疆阿尔泰山富蕴地区 13 个草地群落样地的主要信息

Table 1 Main information of 13 grassland community sample plots in Fuyun area of Altai Mountains, Xinjiang

样地编号 Sample number	东经(E) East longitude	北纬(N) North latitude	海拔/m Altitude	月均气温/℃ Average monthly temperature	月均降水量/mm Average monthly precipitation
1	89°08'06"	47°09'00"	1 946.0	25	15.0
2	89°11'24"	47°09'36"	1 816.5	24	15.0
3	89°15'00"	47°09'00"	1 761.7	19	14.8
4	89°19'48"	47°07'48"	2 012.4	20	15.3
5	89°24'36"	47°06'00"	2 140.0	19	15.1
6	89°29'24"	47°04'12"	2 066.0	20	21.7
7	89°20'24"	47°11'24"	2 192.0	21	20.5
8	89°15'36"	47°17'24"	2 263.0	17	20.0
9	89°15'00"	47°20'24"	2 301.0	18	21.0
10	89°16'48"	47°18'36"	2 418.0	20	21.3
11	89°10'49"	47°13'12"	2 130.0	16	17.0
12	89°10'12"	47°16'48"	1 998.0	18	18.3
13	89°15'36"	47°13'48"	2 060.0	20	18.5

样地编号 Sample number	坡度/(°) Slope	腐殖质层厚度/cm Humus layer thickness	盖度/% Cover degree	主要物种 Main species	物种数 Species number
1	19.0	9.0	80	AJ,AM	10
2	20.3	10.2	85	MA,GW	7
3	11.2	6.0	80	VP,MA	9
4	12.0	3.0	80	AJ,SO	10
5	17.0	6.0	80	AJ,TM	6
6	14.0	6.0	75	HS,GW	9
7	13.0	8.0	70	AJ,MF	8
8	13.0	3.0	70	AJ,LA	14
9	10.0	4.5	80	AJ,PO	5
10	15.0	3.0	70	AJ,EB	12
11	18.0	7.0	76	AJ,HS	7
12	17.0	6.0	72	AJ,HS	6
13	16.0	5.0	40	AJ,HS	8

注:月均气温及月均降水量为 2000—2022 年样地 7 月年平均气温及降水量,下同。AJ. 羽衣草;AM. 千叶蓍;MA. 勿忘我;GW. 老鹳草;VP. 紫花地丁;SO. 苦苣菜;TM. 蒲公英;HS. 葎草;MF. 野苜蓿;LA. 大丁草;PO. 马齿苋;EB. 雪灵芝。

Note: The average monthly temperature and average monthly precipitation are the average annual temperature and precipitation in July of the sample sites from 2000 to 2022. The same below. AJ. *Alchemilla japonica*; AM. *Achillea millefolium*; MA. *Myosotis alpestris*; GW. *Geranium wilfordii*; VP. *Viola philippica*; SO. *Sonchus oleraceus*; TM. *Taraxacum mongolicum*; HS. *Humulus scandens*; MF. *Medicago falcata*; LA. *Leibnitzia anandria*; PO. *Portulaca oleracea*; EB. *Eremogone brevipetala*.

根据前人的研究结果<sup>[29]</sup>,将 Sorenson 相似性系数( $E$ )分为 5 个级别: Sorenson 相似性系数  $\geq 0.80$ , 样地间极相似; Sorenson 相似性系数  $> 0.60 \sim < 0.80$ , 样地间中等相似; Sorenson 相似性系数  $> 0.50 \sim \leq 0.60$ , 样地间低等相似; Sorenson 相似性系数  $> 0.25 \sim \leq 0.50$ , 样地间中等不相似;

Sorenson 相似性系数为  $0 \sim 0.25$ , 样地间极不相似。

#### 1.4 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2019 对数据进行整理和标准误差处理,使用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析(One Way ANOVA)、相关性分析和回归方程分析,使用 Origin 2018 和 ArcGIS 10.2 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 新疆阿尔泰山富蕴地区草地群落物种组成、结构特征及物种重要值

统计发现,新疆阿尔泰山富蕴地区草地共出现植物 25 种,属 18 科 25 属,其中样地 8 物种最多,植物种类有 14 种;样地 9 物种最少,植物种类有 5 种,研究区平均物种丰富度为 8.54 种(表 1)。其中,菊科数目最多,为 4 属 4 种;其次为禾本科和蔷薇科,都为 3 属 3 种;豆科 2 属 2 种;其他的各科均为 1 属 1 种。可知菊科、禾本科、蔷薇科和豆科物种占比较

高,这与其较适应干旱生境有关。富蕴地区草地群落中灌木较少,只有铺地柏、山柳、黑茶藨子 3 种,属 3 科 3 属,占总种数的 12%;多年生和一年生草本的种类较多,其中多年生草本 16 种,属 11 科 11 属,占总种数的 64%,一年生草本 6 种,属 4 科 6 属,占总种数的 24%(表 2)。可知在不同生境的草地群落中,均以多年生和一年生草本生活型为主。综上阿尔泰山富蕴草地群落结构比较简单,科属组成比较分散,草地群落的结构功能与稳定性的维持主要依靠多年生草本层与一年生草本层。

表 2 新疆阿尔泰山富蕴地区草地群落 25 个物种的科属

Table 2 Families and genera of 25 species of grassland communities in Fuyun area, Altai Mountains, Xinjiang

生活型 Life form	物种 Species	科 Family	属 Genus
灌木 Shrub	铺地柏 <i>Juniperus procumbens</i>	柏科 Cupressaceae	刺柏属 <i>Juniperus</i>
	山柳 <i>Salix pseudotangii</i>	杨柳科 Salicaceae	柳属 <i>Salix</i>
	黑茶藨子 <i>Ribes nigrum</i>	茶藨子科 Grossulariaceae	茶藨子属 <i>Ribes</i>
多年生草本 Perennial herb	羽衣草 <i>Alchemilla japonica</i>	蔷薇科 Rosaceae	羽衣草属 <i>Alchemilla</i>
	野草莓 <i>Fragaria vesca</i>	蔷薇科 Rosaceae	草莓属 <i>Fragaria</i>
	委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	蔷薇科 Rosaceae	委陵菜属 <i>Potentilla</i>
	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	菊科 Asteraceae	蒲公英属 <i>Taraxacum</i>
	千叶蓍 <i>Achillea millefolium</i>	菊科 Asteraceae	蓍属 <i>Achillea</i>
	大丁草 <i>Leibnitzia anandria</i>	菊科 Asteraceae	大丁草属 <i>Leibnitzia</i>
	三叶草 <i>Trifolium repens</i>	豆科 Fabaceae	车轴草属 <i>Trifolium</i>
	野苜蓿 <i>Medicago falcata</i>	豆科 Fabaceae	苜蓿属 <i>Medicago</i>
	勿忘草 <i>Myosotis alpestris</i>	紫草科 Boraginaceae	勿忘草属 <i>Myosotis</i>
	酸模 <i>Rumex acetosa</i>	蓼科 Polygonaceae	酸模属 <i>Rumex</i>
	老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>	牻牛儿苗科 Geraniaceae	老鹳草属 <i>Geranium</i>
	雪灵芝 <i>Eremogone brevipetala</i>	石竹科 Caryophyllaceae	老牛筋属 <i>Eremogone</i>
	紫花地丁 <i>Viola philippica</i>	堇菜科 Violaceae	堇菜属 <i>Viola</i>
	鹿蹄草 <i>Pyrola calliantha</i>	杜鹃花科 Ericaceae	鹿蹄草属 <i>Pyrola</i>
	党参 <i>Codonopsis pilosula</i>	桔梗科 Campanulaceae	党参属 <i>Codonopsis</i>
	葎草 <i>Humulus scandens</i>	大麻科 Cannabaceae	葎草属 <i>Humulus</i>
一年生草本 Annual herb	三芒草 <i>Aristida adscensionis</i>	禾本科 Poaceae	三芒草属 <i>Aristida</i>
	锋芒草 <i>Tragus mongolorum</i>	禾本科 Poaceae	锋芒草属 <i>Tragus</i>
	芨芨草 <i>Neotrinia splendens</i>	禾本科 Poaceae	芨芨草属 <i>Neotrinia</i>
	附地菜 <i>Trigonotis peduncularis</i>	紫草科 Boraginaceae	附地菜属 <i>Trigonotis</i>
	马齿苋 <i>Portulaca oleracea</i>	马齿苋科 Portulacaceae	马齿苋属 <i>Portulaca</i>
	苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	菊科 Asteraceae	苦苣菜属 <i>Sonchus</i>

由表 3 可知,各草地群落中灌木和一年生草本的重要值均较低,而多年生草本重要值均较高,表明在各样地中多年生草本占据了明显的优势地位,对群落环境的形成演变以及结构有明显的影响。在多年生草本植物中,蔷薇科羽衣草在各样地中的重要值均较高(0.030~0.908),且分布广泛,同时菊科的千叶蓍、大丁草的重要值在各样地中也较高,充分说明阿尔泰山富蕴高山草原非常适宜蔷薇科和菊科草本植物的生长。

### 2.2 新疆阿尔泰山富蕴地区草地群落相似性比较

如表 4 所示,样地 6 与 7 和 8 以及样地 8 与 7

和 10 的 Sorenson 相似性系数  $\geq 0.80$ ,说明物种组成一致性高,为极相似;样地 1 与 2、样地 7 和 9 与 10 以及样地 11,12,13 之间的 Sorenson 相似性系数为 0.60~0.80,为中等相似;样地 1 和 2 与 3,样地 4 与 5 以及样地 9 与 6、7、8 和 11 之间的 Sorenson 相似性系数为 0.50~0.60,为低等相似;样地 2 与 8,样地 3 与 6、7、8 和 10,样地 4 与 7、10 和 13,样地 5 与 7,样地 6 与 11,样地 7 与 11 和 12 之间 Sorenson 相似性为 0~0.25,为极不相似;其余样地间的 Sorenson 相似性系数为 0.25~0.50,为中等不相似。样地 7 与 8 之间的 Sorenson 相似性系数最高(0.88),

样地 7 与 3 之间 Sorenson 相似性系数最低(0.16),表明不同样地的草地群落相似性存在着差异。

表 3 新疆阿尔泰山富蕴地区 13 个草地群落样地中各物种的重要值

Table 3 Importance values of each species in 13 grassland community samples in Fuyun area,

Altai Mountains, Xinjiang

物种 Species	1	2	3	4	5	6	7
铺地柏 <i>Juniperus procumbens</i>	0.020		0.004	0.031			
山柳 <i>Salix pseudotangii</i>				0.032			
黑茶藨子 <i>Ribes nigrum</i>				0.005			
千叶蓍 <i>Achillea millefolium</i>	0.234		0.236		0.011		
三叶草 <i>Trifolium repens</i>	0.278						
羽衣草 <i>Alchemilla japonica</i>	0.578	0.030		0.263	0.655	0.020	0.516
勿忘草 <i>Myosotis alpestris</i>	0.184	0.318	0.248				
酸模 <i>Rumex acetosa</i>	0.118					0.075	0.041
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	0.199		0.070	0.050	0.121		
老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>	0.021	0.115				0.272	0.096
野草莓 <i>Fragaria vesca</i>		0.040	0.016				
紫花地丁 <i>Viola philippica</i>			0.309	0.006			
鹿蹄草 <i>Pyrola calliantha</i>				0.050	0.070		
野苜蓿 <i>Medicago falcata</i>						0.150	0.202
党参 <i>Codonopsis pilosula</i>						0.026	
葎草 <i>Humulus scandens</i>				0.002		0.316	0.009
大丁草 <i>Leibnitzia anandria</i>			0.005			0.263	0.109
委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>		0.008					
雪灵芝 <i>Eremogone brevipetala</i>							
三芒草 <i>Aristida adscensionis</i>	0.002		0.056			0.038	
锋芒草 <i>Tragus mongolorum</i>	0.006	0.005		0.042			0.008
苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>				0.089	0.005		
附地菜 <i>Trigonotis peduncularis</i>						0.228	
马齿苋 <i>Portulaca oleracea</i>			0.005				0.006
芨芨草 <i>Neotrinia splendens</i>		0.014			0.009		
物种 Species	8	9	10	11	12	13	平均值
铺地柏 <i>Juniperus procumbens</i>	0.007			0.008		0.005	0.006
山柳 <i>Salix pseudotangii</i>							0.002
黑茶藨子 <i>Ribes nigrum</i>							0.075
千叶蓍 <i>Achillea millefolium</i>	0.073		0.064		0.165	0.192	0.023
三叶草 <i>Trifolium repens</i>		0.023					0.359
羽衣草 <i>Alchemilla japonica</i>	0.285	0.588	0.363	0.908	0.592	0.452	0.058
勿忘草 <i>Myosotis alpestris</i>							0.028
酸模 <i>Rumex acetosa</i>	0.021		0.112				0.034
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>							0.047
老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>	0.086		0.012		0.004		0.008
野草莓 <i>Fragaria vesca</i>	0.080						0.005
紫花地丁 <i>Viola philippica</i>				0.017			0.026
鹿蹄草 <i>Pyrola calliantha</i>			0.002			0.014	0.010
野苜蓿 <i>Medicago falcata</i>	0.025		0.002				0.029
党参 <i>Codonopsis pilosula</i>	0.006				0.001		0.003
葎草 <i>Humulus scandens</i>	0.095		0.013	0.058	0.027	0.009	0.041
大丁草 <i>Leibnitzia anandria</i>	0.151		0.083	0.003	0.004		0.641
委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	0.002	0.141	0.020				0.013
雪灵芝 <i>Eremogone brevipetala</i>			0.263				0.202
三芒草 <i>Aristida adscensionis</i>	0.027			0.112		0.068	0.023
锋芒草 <i>Tragus mongolorum</i>				0.005			0.005
苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	0.010						0.008
附地菜 <i>Trigonotis peduncularis</i>	0.033		0.020			0.002	0.022
马齿苋 <i>Portulaca oleracea</i>		0.238	0.101				0.270
芨芨草 <i>Neotrinia splendens</i>		0.008				0.006	0.003

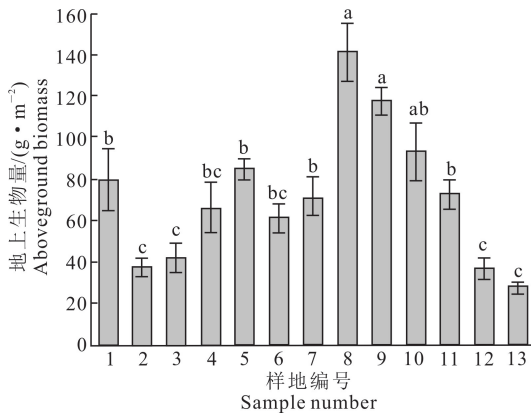
表 4 新疆阿尔泰山富蕴地区 13 个草地群落间的 Sorenson 相似性系数

Table 4 Sorenson similarity coefficients among 13 grassland communities in Fuyun area, Altai Mountains, Xinjiang, China

样地编号 Sample number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1												
2	0.67	1											
3	0.52	0.56	1										
4	0.34	0.40	0.32	1									
5	0.36	0.34	0.34	0.58	1								
6	0.46	0.28	0.22	0.28	0.38	1							
7	0.28	0.28	0.16	0.22	0.24	0.80	1						
8	0.25	0.17	0.21	0.26	0.32	0.81	0.88	1					
9	0.32	0.27	0.30	0.29	0.32	0.51	0.53	0.56	1				
10	0.42	0.40	0.24	0.23	0.41	0.57	0.71	0.80	0.75	1			
11	0.27	0.55	0.38	0.35	0.27	0.21	0.21	0.29	0.50	0.35	1		
12	0.38	0.50	0.47	0.33	0.38	0.30	0.20	0.27	0.46	0.33	0.67	1	
13	0.27	0.36	0.38	0.24	0.27	0.32	0.32	0.29	0.33	0.35	0.75	0.66	1

### 2.3 新疆阿尔泰山富蕴地区草地群落地上生物量及物种多样性特征

新疆阿尔泰山富蕴地区 13 个草地群落样地的地上生物量见图 2。



图柱上标不同小写字母表示不同样地间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Different lowercase letters in the superscripts of the figure columns indicate significant differences ( $P < 0.05$ ) between different sites.

图 2 新疆阿尔泰山富蕴地区 13 个草地群落样地的地上生物量

Fig. 2 Aboveground biomass of 13 grassland communities in Fuyun area, Altai Mountains, Xinjiang

从图 2 可以看出,阿尔泰山富蕴地区草地群落地上生物量整体不高,同时各样地之间具有明显差异。样地 8 和 9 地上生物量均较高,总体上与其他样地间差异显著 ( $P < 0.05$ ),样地 2,3,12,13 地上生物量均较低,总体上与其他样地间差异显著 ( $P < 0.05$ ),样地 1,4,5,6,7,10,11 之间均无显著差异性 ( $P > 0.05$ )。13 个样地中,地上生物量最高的是样地 8 ( $141.02 \text{ g/m}^2$ ),最低的是样地 13 ( $28.07 \text{ g/m}^2$ )。

从表 5 可以看出,草地群落 Margalef 丰富度指数为  $0.78 \sim 2.06$ ,其中样地 6 的 Margalef 丰富度指数最高,这与该样地物种数较多有关;样地 9 的 Margalef 丰富度指数最低,这与该样地无灌木且以多年生草本为优势种有关。草地群落 Simpson 优势度指数为  $1.25 \sim 2.55$ ,说明各样地中物种的数量分布不均匀。Shannon-Wiener 多样性指数为  $0.66 \sim 1.82$ ,其中样地 6 的最高,样地 11 最低,说明样地 6 的物种数量较多,群落结构复杂。草地群落 Alatalo 均匀度指数为  $0.54 \sim 0.93$ ,其中样地 13 最高,样地 11 最低。

表 5 新疆阿尔泰山富蕴地区草地群落的物种多样性

Table 5 Species diversity of grassland communities in Fuyun area, Altai Mountains, Xinjiang

样地编号 Sample number	Margalef 丰富度指数 Margalef richness index	Simpson 优势度指数 Simpson dominance index	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	Alatalo 均匀度指数 Alatalo evenness index
1	$1.28 \pm 0.26 \text{ b}$	$2.27 \pm 0.48 \text{ a}$	$1.58 \pm 0.34 \text{ a}$	$0.65 \pm 0.16 \text{ ab}$
2	$0.94 \pm 0.17 \text{ c}$	$1.56 \pm 0.64 \text{ b}$	$1.03 \pm 0.32 \text{ b}$	$0.78 \pm 0.25 \text{ a}$
3	$1.03 \pm 0.25 \text{ bc}$	$2.07 \pm 0.23 \text{ ab}$	$1.31 \pm 0.21 \text{ b}$	$0.71 \pm 0.07 \text{ ab}$
4	$1.22 \pm 0.22 \text{ b}$	$2.23 \pm 0.22 \text{ ab}$	$1.46 \pm 0.14 \text{ ab}$	$0.72 \pm 0.09 \text{ ab}$
5	$0.98 \pm 0.26 \text{ c}$	$2.08 \pm 0.15 \text{ ab}$	$1.34 \pm 0.15 \text{ b}$	$0.69 \pm 0.06 \text{ ab}$
6	$2.06 \pm 0.52 \text{ a}$	$2.55 \pm 0.43 \text{ a}$	$1.82 \pm 0.37 \text{ a}$	$0.71 \pm 0.08 \text{ ab}$
7	$1.51 \pm 0.12 \text{ a}$	$2.03 \pm 0.15 \text{ ab}$	$1.31 \pm 0.17 \text{ b}$	$0.68 \pm 0.01 \text{ ab}$
8	$1.91 \pm 0.31 \text{ a}$	$2.24 \pm 0.28 \text{ a}$	$1.63 \pm 0.28 \text{ a}$	$0.59 \pm 0.08 \text{ b}$
9	$0.78 \pm 0.13 \text{ c}$	$1.67 \pm 0.14 \text{ b}$	$0.88 \pm 0.09 \text{ c}$	$0.67 \pm 0.11 \text{ ab}$

表5(续) Table 5(continued)

样地编号 Sample number	Margalef 丰富度指数 Margalef richness index	Simpson 优势度指数 Simpson dominance index	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	Alatalo 均匀度指数 Alatalo evenness index
10	1.26±0.51 b	1.78±0.39 b	1.09±0.41 b	0.58±0.11 b
11	1.21±0.09 b	1.25±0.28 c	0.66±0.32 c	0.54±0.15 b
12	1.28±0.09 b	1.72±0.32 b	0.81±0.24 c	0.85±0.21 a
13	1.33±0.11 b	1.87±0.17 b	0.92±0.19 bc	0.93±0.06 a

注:同列数据后标不同小写字母表示不同样地间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Data in the same column followed by different lowercase letters indicate significant differences between different sites ( $P<0.05$ ).

## 2.4 新疆阿尔泰山富蕴地区草地群落地上生物量与物种多样性的关系

由图3可知,草地群落地上生物量与物种 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Alatalo 均匀度指数呈显著的三次函数关系( $P<0.05$ );随着地上生物量的增加,物种 Margalef 丰富

度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数均呈先增加后减小又增加的趋势,当地上生物量为  $60 \text{ g/m}^2$  左右时出现第一个峰值;当地上生物量为  $120 \text{ g/m}^2$  左右时出现低值。Alatalo 均匀度指数随着地上生物量增加总体呈降低的趋势。

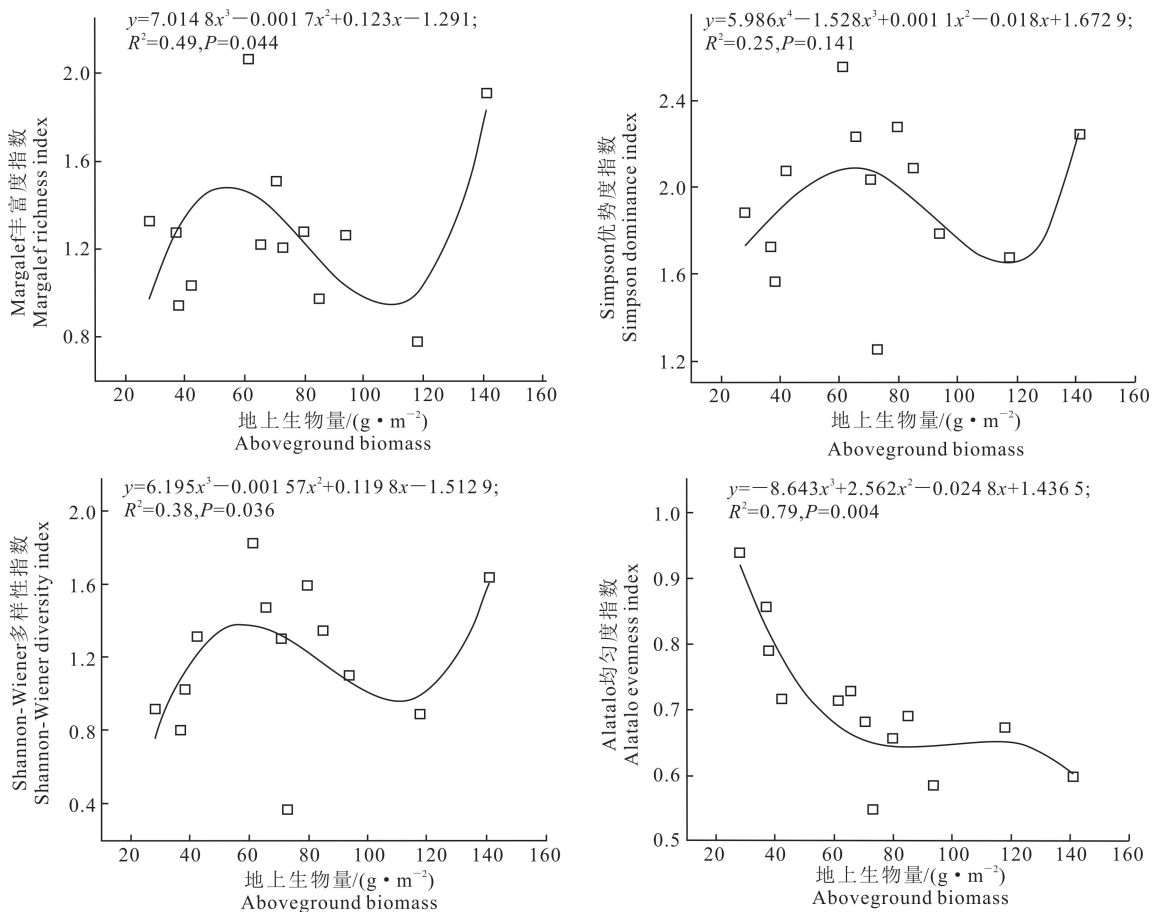


图3 新疆阿尔泰山富蕴地区草地群落地上生物量与物种多样性指数的关系

Fig. 3 Relationship between aboveground biomass and species diversity indices of grassland communities in

Fuyun area of Altai Mountains, Xinjiang

## 2.5 新疆阿尔泰山富蕴地区草地群落地上生物量、物种多样性指数与环境因子之间的相关性

如表6所示,地上生物量与海拔极显著正相关( $P<0.01$ ),与经度呈显著正相关( $P<0.05$ ),与纬度呈显著负相关( $P<0.05$ )。Margalef 丰富度指数

与经度呈显著正相关( $P<0.05$ ),与纬度则呈极显著负相关( $P<0.01$ )。Simpson 优势度指数与经度和坡度呈显著负相关( $P<0.05$ ),Shannon-Wiener 多样性指数与纬度呈显著负相关关系( $P<0.05$ )。Alatalo 均匀度指数与海拔呈显著负相关关系( $P<$



0.05)。环境因子中的盖度、月均气温、月均降水量、腐殖质层厚度与地上生物量、物种多样性指数均无显著相关性( $P>0.05$ )。

表 6 新疆阿尔泰山富蕴地区草地群落地上生物量、物种多样性指数与环境因子之间的相关性

Table 6 Correlation between aboveground biomass, species diversity index and environmental factors of grassland communities in Fuyun area, Altay Mountains, Xinjiang

环境因子 Environmental factor	地上生物量 Aboveground biomass	Margalef 丰富度指数 Margalef richness index	Simpson 优势度指数 Simpson dominance index	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	Alatalo 均匀度指数 Alatalo evenness index
海拔 Altitude	0.716**	0.176	-0.089	-0.085	-0.584*
盖度 Cover degree	0.227	0.237	0.012	0.173	-0.479
经度 Longitude	0.609*	0.590*	0.240	0.284	-0.368
纬度 Latitude	-0.615*	-0.777**	-0.660*	-0.624*	0.297
月均气温 Average monthly temperature	-0.317	0.239	0.256	0.377	0.242
腐殖质层厚度 Humus layer thickness	-0.446	-0.143	-0.203	-0.114	0.146
月均降水量 Average monthly precipitation	0.395	0.326	0.078	0.044	-0.164
坡度 Slope	-0.236	-0.334	-0.612*	-0.264	-0.157

注: \* 表示在  $P<0.05$  水平上显著相关, \*\* 表示在  $P<0.01$  水平上极显著相关。

Note: \* indicates significant correlation at the  $P<0.05$  level and \*\* indicates highly significant correlation at the  $P<0.01$  level.

## 3 讨论

### 3.1 富蕴地区草地群落组成特征

草地群落的科、属、种结构能有效反映植物群落组成的变化情况<sup>[30]</sup>。本研究中,阿尔泰山富蕴地区草地群落中主要构成者是多年生草本植物,如菊科、蔷薇科、禾本科和豆科等,而其一年生草本和灌木分布较少,科属分布比较分散,这与王山等<sup>[22]</sup>关于阿尔泰山两河源地区的研究结果一致。表明菊科、蔷薇科、禾本科和豆科植物具有较强的生态适应性,能够适应较为干旱的生态环境,是该地区草地的主要组成部分<sup>[31]</sup>。

### 3.2 草地群落地上生物量与物种多样性

地上生物量与物种多样性都是评价草地生态系统的重要指标,也是生态学家关注的重点<sup>[32-34]</sup>。本研究发现,富蕴地区各样地草地群落地上生物量之间差异明显,其中样地 8 最高,样地 13 最低,二者相差近 5 倍,这可能是由于这 2 个样地草地群落主要物种存在差异所致,因为样地 8 草地群落的主要物种为羽衣草和大丁草,其分别属于蔷薇科和菊科;样地 13 草地群落的主要物种为羽衣草、菵草,其分别属于蔷薇科和大麻科,而阿尔泰山富蕴地区草原非常适宜蔷薇科和菊科植物生长。

草地物种多样性对生态系统功能复杂性有重要影响<sup>[24]</sup>。本研究中,新疆阿尔泰山富蕴地区草地群落平均物种丰富度(8.54 种)明显高于新疆草地平均物种丰富度(7.73 种)<sup>[35]</sup>,这与潘晓婷等<sup>[36]</sup>对新疆阿尔泰山布尔津地区草地物种群落的研究结果相

似。这主要是因为新疆阿尔泰山地区受到西风带气流的影响,而山地地形又起着阻挡抬升作用,该地区降水量较多,使得该地区草地群落物种较多<sup>[37]</sup>。本研究中,富蕴地区 13 个草地群落的 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Alatalo 均匀度指数差异均较大,这是因为多样性指数变化与草地群落的物种数量、群落结构复杂程度和稳定性有关,群落物种数、大小、空间配置格局等形成了不同的结构水平,群落结构越复杂,多样性指数越大<sup>[38]</sup>。此外,本研究中,草地群落 Simpson 优势度指数大的样地,则其 Alatalo 均匀度指数较小,可知草地群落优势度与均匀度指数的变化相反,这与杨阳等<sup>[39]</sup>关于宁夏荒漠草原群落多样性指数的研究结果一致。

本研究发现, Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Alatalo 均匀度指数与富蕴地区各草地群落地上生物量呈显著的三次函数关系( $P<0.05$ ),表明了地上生物量与物种多样性指数更具相关性,随着地上生物量的增加,物种 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数均呈先增加后减小又增加的趋势,这与郭轶瑞等<sup>[40]</sup>的研究结果一致。

### 3.3 草地群落地上生物量、物种多样性指数与环境因子的相关性

不同环境因子影响着草地群落的演变,探明草地群落地上生物量、物种多样性与环境因子间的关系,有助于草地群落物种多样性保护<sup>[41]</sup>。本研究发现,富蕴地区草地群落地上生物量与海拔、经度、纬度显著相关,表明垂直地带性因素和水平地带性因

素对草地群落地上生物量有显著影响。

关于环境因子与植物群落物种多样性之间的相关性已有很多研究,研究结果复杂多样,并未形成统一的结论<sup>[40-45]</sup>。这是因为在不同生态系统中,植物物种多样性与环境因子间相关性不仅是由植物群落所处的特定生境特征和生态功能所决定的,而且可能还受到外界干扰因素等的影响<sup>[46]</sup>,环境因子只是调节植物多样性的重要环境因素之一<sup>[47]</sup>。本研究中,富蕴地区草地群落物种多样性指数与海拔、经度、纬度和坡度的相关性总体较高,表明海拔、经度、纬度和坡度对该地区物种多样性指数影响较大,这与张鸿南等<sup>[43]</sup>的结果基本一致。本研究中,环境因子中的月均气温、月均降水量与富蕴地区草地群落地上生物量、物种多样性指数均不存在显著的相关性,一方面是因为该地区7月降水和气温对草地群落影响较小,另一方面是草地群落发展演变对降水和气温响应存在一定的“滞后效应”<sup>[48-50]</sup>。

## 4 结 论

阿尔泰山富蕴地区草地群落共有植物25种,属18科25属,主要以菊科、蔷薇科、禾本科和豆科植物为主,生活型主要为多年生草本和一年生草本。各样地草地群落间相似性整体较低,地上生物量和物种多样性存在较大差异。草地群落地上生物量与物种 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Alatalo 均匀度指数呈显著的三次函数关系( $P < 0.05$ )。海拔、经度、纬度和坡度对地上生物量和物种多样性指数影响较大。

## [参考文献]

- [1] SCURLOCK J M O, HALL D O. The global carbon sink: a grassland perspective [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 229-233.
- [2] 王德旺, 盛建东, 刘耘华, 等. 天山北坡草地生物量分布特征及影响因子 [J]. *草业科学*, 2014, 31(1): 125-131.  
WANG D W, SHENG J D, LIU Y H, et al. Analysis of grassland biomass characteristics and its impact factors in north slope of Tianshan [J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(1): 125-131.
- [3] 吴昊, 贾少奇, 朱亚星. 物种多样性及环境因子对入侵植物空心莲子草群落稳定性的影响 [J]. *生态学杂志*, 2022, 41(1): 33-41.  
WU H, JIA S Q, ZHU Y X. Effects of species diversity and environmental factors on the stability of the invasive *Alternanthera philoxeroides* communities [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(1): 33-41.
- [4] 郝建锋, 李艳, 齐锦秋, 等. 人为干扰对碧峰峡栲树次生林群落物种多样性及其优势种群生态位的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7678-7688.  
HAO J F, LI Y, QI J Q, et al. Effects of anthropogenic disturbances on the species diversity and niche of the dominant populations in a *Castanopsis fargesii* secondary forest community in Bifengxia, Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(23): 7678-7688.
- [5] 刘庆福, 刘洋, 孙小丽, 等. 气候假说对内蒙古草原群落物种多样性格局的解释 [J]. *生物多样性*, 2015, 23(4): 463-470.  
LIU Q F, LIU Y, SUN X L, et al. The explanation of climatic hypotheses to community species diversity patterns in Inner Mongolia grasslands [J]. *Biodiversity Science*, 2015, 23(4): 463-470.
- [6] 王军强, 刘彬, 常凤, 等. 巴音布鲁克新疆假龙胆适地植物群落物种多样性及其环境解释 [J]. *中国草地学报*, 2021, 43(3): 29-36.  
WANG J Q, LIU B, CHANG F, et al. Species diversity of plant communities and their environmental interpretation in *Gen-tianella turkestanorum* habitat in Bayinbrook [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(3): 29-36.
- [7] 王伯荪, 王昌伟, 彭少麟. 生物多样性刍议 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2005, 44(6): 68-70.  
WANG B S, WANG C W, PENG S L. A rustic opinion of biodiversity [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005, 44(6): 68-70.
- [8] 马克平. 试论生物多样性的概念 [J]. *生物多样性*, 1993, 1(1): 20-22.  
MA K P. On the concept of biodiversity [J]. *Chinese Biodiversity*, 1993, 1(1): 20-22.
- [9] HU W G, RAN J Z, DONG L W, et al. Aridity-driven shift in biodiversity-soil multifunctionality relationships [J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5350.
- [10] 马文静, 张庆, 牛建明, 等. 物种多样性和功能群多样性与生态系统生产力的关系: 以内蒙古短花针茅草原为例 [J]. *植物生态学报*, 2013, 37(7): 620-630.  
MA W J, ZHANG Q, NIU J M, et al. Relationship of ecosystem primary productivity to species diversity and functional group diversity: evidence from *Stipa breviflora* grassland in Nei Mongol [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(7): 620-630.
- [11] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势 [J]. *中国沙漠*, 2009, 29(1): 1-9.  
WANG T. Review and prospect of research on oasisification and desertification in arid regions [J]. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(1): 1-9.
- [12] PIMM S L, RUSSELL G J, GITTLEMAN J L, et al. The future of biodiversity [J]. *Science*, 1995, 269(5222): 347-350.
- [13] HOOPER D U, III CHAPIN F S, EWEL J J, et al. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge [J]. *Ecological Monographs*, 2005, 75(1): 3-35.
- [14] CARDINALE B J, DUFFY J E, GONZALEZ A, et al. Biodiversity loss and its impact on humanity [J]. *Nature*, 2012,

- 486;59-67.
- [15] VILLAGRA P E, CAVAGNARO J B. Water stress effects on the seedling growth of *Prosopis argentina* and *Prosopis al-pataco* [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 64(3): 390-400.
- [16] TILMAN D. Biodiversity: population versus ecosystem stability [J]. Ecology, 1996, 77(2): 350-363.
- [17] LANTA V, LEPS J. Effects of species and functional group richness on production in two fertility environments: an experiment with communities of perennial plants [J]. Acta Oecologica, 2007, 32(1): 93-103.
- [18] GRACE J B, ANDERSON T M, SEABLOOM E W, et al. Integrative modelling reveals mechanisms linking productivity and plant species richness [J]. Nature, 2016, 529: 390-393.
- [19] 张建贵, 王理德, 姚拓, 等. 祁连山高寒草地不同退化程度植物群落结构与物种多样性研究 [J]. 草业学报, 2019, 28(5): 15-25.
- ZHANG J G, WANG L D, YAO T, et al. Plant community structure and species diversity differences in alpine grassland in the Qilian Mountains with different levels of degradation [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(5): 15-25.
- [20] HUANG X B, SU J R, LI S F, et al. Functional diversity drives ecosystem multifunctionality in a *Pinus yunnanensis* natural secondary forest [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 6979.
- [21] 王晓芬, 马源, 张格非, 等. 高寒草甸退化阶段植物群落多样性与系统多功能性的联系 [J]. 草地学报, 2021, 29(5): 1053-1060.
- WANG X F, MA Y, ZHANG G F, et al. Relationship between plant community diversity and ecosystem multifunctionality during alpine meadow degradation [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(5): 1053-1060.
- [22] 王山, 努尔巴衣·阿不都沙勒克. 阿尔泰两河源物种多样性及其保护 [J]. 甘肃联合大学学报(自然科学版), 2006, 20(5): 83-86.
- WANG S, NARBAY · ABDUSALLIH. The protection of species diversity of the two rivers area in Altay Mountains [J]. Journal of Gansu Lianhe University (Natural Science Edition), 2006, 20(5): 83-86.
- [23] 艾尼瓦尔·吐米尔, 阿不都拉·阿巴斯. 新疆阿勒泰山两河源自然保护区地面生地衣的物种多样性 [J]. 生物多样性, 2006, 14(5): 444-450.
- ANWAR T, ABDULLA A. Floor lichen diversity under different vegetation types in Two-river Source Nature Reserve in Altay Mountains, Xinjiang [J]. Biodiversity Science, 2006, 14(5): 444-450.
- [24] 杜松华. 阿尔泰山两河源部分湿地退化与保护初探 [J]. 新疆林业, 2012(5): 13-14.
- DU S H. Preliminary study on wetland degradation and protection at the source of two rivers in Altai Mountain [J]. Forestry of Xinjiang, 2012(5): 13-14.
- [25] 阿勒泰·塔依巴扎尔, 徐海量. 两河源矿区修复措施及思路 [J]. 新疆林业, 2018(4): 38-40.
- ALTAI T, XU H L. Restoration measures and ideas of Liangheyuan mining area [J]. Forestry of Xinjiang, 2018(4): 38-40.
- [26] 赵芸君, 哈尔·阿力, 雒诚龙, 等. 阿勒泰富蕴县春秋牧场生产能力的研究 [J]. 草地学报, 2018, 26(4): 1020-1025.
- ZHAO Y J, HA ER, LUO C L, et al. Study on the production of spring and autumn pasture in Fuyun County, Aletai Region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(4): 1020-1025.
- [27] 王楚含, 徐海量, 徐福军, 等. 放牧对草地生态经济价值的影响: 以新疆阿尔泰山两河源自然保护区为例 [J]. 草地学报, 2017, 25(1): 42-48.
- WANG C H, XU H L, XU F J, et al. Effect of grazing on grassland ecosystem function service value in natural protection zone of Altai Mountain [J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(1): 42-48.
- [28] 刘灿然, 马克平. 生物群落多样性的测度方法: V. 生物群落物种数目的估计方法 [J]. 生态学报, 1997(6): 39-48.
- LIU C R, MA K P. Measurement of biotic community diversity: V. methods for estimating the number of species in a Community [J]. Acta Ecologica Sinica, 1997(6): 39-48.
- [29] 陈娟, 宋乃平, 陈林, 等. 荒漠草原不同覆被类型土壤水分动态及其对降水的响应 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 198-206.
- CHEN J, SONG N P, CHEN L, et al. Soil moisture dynamics and its response to precipitation in different cover types of desert steppe [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 198-206.
- [30] 鲁元波, 严成, 宋春武, 等. 天山南坡山前荒漠草地植物群落分布对环境因子的响应: 以拜城县为例 [J]. 干旱区研究, 2023, 40(8): 1346-1357.
- LU Y B, YAN C, SONG C W, et al. Response of plant community distribution in the pre-montane desert grassland on the southern slope of Tianshan Mountain to environmental factors: a case study in Baicheng County [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(8): 1346-1357.
- [31] 杨晓玫, 姚拓, 王理德, 等. 天祝不同退化程度草地植物群落结构与物种多样性研究 [J]. 草地学报, 2018, 26(6): 1290-1297.
- YANG X M, YAO T, WANG L D, et al. Community structure and plant diversity under different degrees of degraded grassland in Tianzhu, Gansu [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(6): 1290-1297.
- [32] TILMAN D, REICH P B, ISBELL F. Biodiversity impacts ecosystem productivity as much as resources, disturbance, or herbivory [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(26): 10394-10397.
- [33] HOOPER D U, ADAIR E C, CARDINALE B J, et al. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change [J]. Nature, 2012, 486(7401): 105-108.
- [34] 王兆东, 谢利娟, 龙丹丹, 等. 湖银山郊野公园典型植物群落物种多样性比较 [J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(4): 16-24.
- WANG Z D, XIE L J, LONG D D, et al. Comparison on plant species diversity of typical plant communities in the Yinshushan Country Park [J]. Journal of Southwest Forestry University

- ty, 2016, 36(4):16-24.
- [35] 刘利利, 盛建东, 程军回, 等. 新疆不同草地类型植物物种特征与水热因子的关系研究 [J]. 草业学报, 2016, 25(5):1-12.  
LIU L L, SHENG J D, CHENG J H, et al. Relationship between plant species characteristics and climate factors in different grassland types of Xinjiang [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(5):1-12.
- [36] 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 grassland types in the Burqin forest region of the Aletai Mountains [J]. Pratacultural Science, 2023, 40(3):627-637.
- [37] 贺斌, 王国亚, 苏宏超, 等. 新疆阿尔泰山地区极端水文事件对气候变化的响应 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(4):927-933.  
HE B, WANG G Y, SU H C, et al. Response of extreme hydrological events to climate change in the regions of Altay Mountains, Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(4):927-933.
- [38] PETCHHEY O L, MCPHEARSON P T, CASEY T M, et al. Environmental warming alters food-web structure and ecosystem function [J]. Nature, 1999, 402(6757):69-72.
- [39] 杨阳, 刘秉儒. 宁夏荒漠草原不同群落生物多样性与生物量关系及影响因子分析 [J]. 草业学报, 2015, 24(10):48-57.  
YANG Y, LIU B R. Impact factors and relationships between biodiversity and biomass of different communities in the desert steppe of Ningxia, China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(10):48-57.
- [40] 郭轶瑞, 赵哈林, 赵学勇, 等. 科尔沁沙质草地物种多样性与生产力的关系 [J]. 干旱区研究, 2007, 24(2):198-203.  
GUO Y R, ZHAO H L, ZHAO X Y, et al. Study on the relationship between species diversity and productivity of sandy grassland communities in horqin sandland [J]. Arid Zone Research, 2007, 24(2):198-203.
- [41] VAN DE VEN C M, WEISS S B, ERNST W G. Plant species distributions under present conditions and forecasted for warmer climates in an arid mountain range [J]. Earth Interactions, 2007, 11(9):1-33.
- [42] 张树彬, 任启文, 王鑫, 等. 白洋淀湿地水生植物群落物种多样性及对环境因子的响应 [J]. 山东林业科技, 2023, 53(1):35-40.  
ZHANG S B, REN Q W, WANG X, et al. Species diversity of aquatic plant communities and its response with environmental factors in Baiyangdian Wetland [J]. Shandong Forestry Science and Technology, 2023, 53(1):35-40.
- [43] 张鸿南, 邹雯, 陈卓, 等. 藏东地区植物群落分布格局与环境因子的关系 [J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(6):1289-1297.  
ZHANG H N, ZOU W, CHEN Z, et al. Distribution pattern of plant community and its relationship with environmental factors in eastern Xizang, China [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2023, 29(6):1289-1297.
- [44] 吴珠媛, 辛濛濛, 刘宇涵, 等. 小兴安岭主峰平顶山苔藓植物多样性及垂直分布研究 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(2):309-317.  
WU Z Y, XIN M M, LIU Y H, et al. Studies on the diversity and vertical distribution of bryophytes in Pingdingshan of Xiaoxing'an ling [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2020, 35(2):309-317.
- [45] 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 [J]. 中国草地学报, 2021, 43(3):52-59.  
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 [J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(3):52-59.
- [46] 李静, 王恒, 胡杰, 等. 宁武老师傅海湿地植物物种多样性及其与环境因子的关系 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(4):950-958.  
LI J, WANG H, HU J, et al. Plant species diversity and its relationship with environmental factors in Laoshifuhai wetland of Ningwu, Shanxi [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4):950-958.
- [47] 王忠伟, 张科萌, 郭娜, 等. 河南鸡公山落叶阔叶林藤本植物对林下物种多样性的影响 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(3):476-482.  
WANG Z W, ZHANG K M, WU N, et al. Effect of liana on the understory species richness in deciduous broadleaf forest of Jigong Mountain in Henan [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2020, 35(3):476-482.
- [48] 金不换, 陈雅君, 吴艳华, 等. 早熟禾不同品种根系分布及生物量分配对干旱胁迫的响应 [J]. 草地学报, 2009, 17(6):813-816.  
JIN B H, CHEN Y J, WU Y H, et al. Response of root distribution and biomass allocation of different Poa L. varieties to drought stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2009, 17(6):813-816.
- [49] 齐丹卉, 杨洪晓, 卢琦, 等. 浑善达克沙地植物群落物种多样性及环境解释 [J]. 中国沙漠, 2021, 41(6):65-77.  
QI D H, YANG H X, LU Q, et al. Biodiversity of plant communities and its environmental interpretation in the Otindag Sandy Land, China [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(6):65-77.
- [50] 张树斌, 王襄平, 吴鹏, 等. 吉林灌木群落物种多样性与气候和局域环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2018, 38(22):7990-8000.  
ZHANG S B, WANG X P, WU P, et al. Relationship between shrub species diversity and climate and local environmental factors across Jilin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22):7990-8000.

(责任编辑:李小平)