

阿尔泰山两河源牧区草地群落生物量及物种多样性

郭建兴^{1,2}, 叶 茂^{1,2*}, 殷锡凯^{1,2}, 张凯丽^{1,2}

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

摘 要: 群落生物量和物种多样性是表征草地生态系统数量特征的重要指标。该研究以新疆阿尔泰山南麓两河源放牧区草地为研究对象, 利用样方法对两河源不同放牧区的草地植被进行调查, 分析研究区生物量和物种多样性变化, 探讨二者与环境因子之间的关联性, 为草地群落物种保护以及草地可持续利用提供理论依据。结果表明: (1) 两河源不同牧区间群落盖度、高度、植株密度、地上生物量和单位盖度生物量存在差异。(2) 两河源牧区草地群落地上生物量与群落盖度、植株密度呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 且地上生物量主要受草地群落盖度的影响; 不同牧区的物种多样性指数有一定差异, 但物种分布相对均匀。(3) 两河源牧区草地群落生物量及物种多样性主要受气温和降水的影响。

关键词: 物种多样性; 生物量; 灰色关联分析; 两河源牧区

中图分类号: Q948.11

文献标志码: A

Biomass and Diversity of Grassland Community in the Two-river Source Pastoral Areas of Altai Mountains

GUO Jianxing^{1,2}, YE Mao^{1,2*}, YIN Xikai^{1,2}, ZHANG Kaili^{1,2}

(1 School of Geographical Sciences and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2 Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China)

Abstract: Community biomass and species diversity are important indicators to characterize the quantitative characteristics of grassland ecosystems. This study conducted in the grasslands of the Two-river Source grazing areas in the southern Altai Mountains of Xinjiang and a survey of grassland vegetation in different grazing areas of the Two-river Source using the sample method, analyzed the changes in biomass and species diversity in the study area, and explored the correlation between the two and environmental factors, in order to provide a theoretical basis for the conservation of grassland community species and sustainable use of grassland. The results showed that: (1) there were differences in community cover, height, plant density, above-ground biomass and biomass per unit of cover among different grazing areas in the Two-river Source. (2) The above-ground biomass of grassland communities in the Two-river Source rangelands was significantly and positively correlated with community cover and plant density ($P < 0.05$), and above-ground biomass was mainly influenced by the cover of grassland communities. The species diversity index varied somewhat among the different grazing areas, but the species distribution was relatively uniform. (3) Grassland community biomass and species diversity in the Two-river Source rangelands are mainly influenced by temperature and precipitation.

Key words: species diversity; biomass; the grey correlate analysis; Two-river Source pastoral area

收稿日期: 2022-06-13; 修改稿收到日期: 2022-10-31

基金项目: NSFC-新疆联合基金(U1803245)

作者简介: 郭建兴(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为干旱区恢复生态学。E-mail: guojianxing199800@163.com

* 通信作者: 叶 茂, 教授, 硕士生导师, 研究方向为干旱区生态水文过程。E-mail: yemao1111@163.com

草地群落是植物生态系统的组成部分之一,其生物量和物种多样性是草地生态系统数量特征、生态系统功能的重要指标^[1]。同时生物量不仅是表征生态系统数量特征的重要指标,而且能够反映生态系统生产力,是研究生态系统功能的基础。生物量的生产及分配受多种因素影响(气温、降水、海拔、地形条件、人类活动),其中气候和人类活动是较为常见的因素,气候决定着生物量的生产和分配,但在个体水平和群落水平上生物量与气候的关系差异较大^[2-4]。在生态学领域,植物群落物种多样性指植物群落中物种数目以及每个物种个体数目与物种的均匀状况,不仅可衡量群落组织水平也是群落生境条件评价的重要生物学指标,其对于反映植物群落功能有着特殊意义。同时物种多样性也是衡量植物生态系统内物种丰富程度、群落组成、植物群落与环境间相互关系的重要指标之一,物种多样性与气候、海拔、地形、土壤等环境因子紧密相关^[5-10]。因此,草地群落植物物种多样性与生物量的研究对于阐明物种多样性对生态系统结构功能具有重要作用。

中国草地资源十分丰富,其中新疆牧区是中国的重要牧区之一。两河源牧区地处中国西北干旱区,属大陆性温带草地,是典型的山地牧区,同时也是生态环境变化的敏感区域。因此针对两河源牧区草地群落生物量和多样性的研究对于该区草地长期可持续经营发展具有重要意义。目前,对两河源牧区的研究多集中在物种多样性^[11-12]、湿地退化与保护^[13]、矿区修复与治理^[14]、草牧业发展^[15-16]、生态环境问题^[17]等方面。针对两河源牧区物种多样性和草地生产力的研究,王山等^[11]研究表明两河源区生境多样性是新疆地区独特的、具有潜在经济和生态价值,其物种多样性在新疆乃至全国占有相当重要地位;赵芸君等^[15]发现春季牧草品质比秋季好;王楚含等^[16]研究发现适度放牧可以增加草地整体的生态服务价值。但其草地群落生物量和物种多样性研究缺乏相应的数据和理论支撑。因此,本研究在探讨两河源牧区不同地点草地群落生物量和物种多样性变化的基础上,进一步分析两河源牧区环境、气候因素对地上生物量与物种多样性的影响,旨在为草地牧场生态系统功能的动态变化研究提供基础数据,并对当地草场可持续利用提供一定理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆维吾尔自治区阿尔泰山中段南

麓两河源自然保护区(87°30′~91°0′ E、46°30′~48°10′ N),总面积 $1.13 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中草场总面积达 $5.753 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占全区总面积的 51% 左右,放牧天数可达 130 多天。该区域属典型大陆性温带寒冷气候区,该区夏季多雨冬有积雪,气候、地貌和植被垂直分带明显,年平均温度在 -2℃ 左右,极端最高气温 33.3℃,极端最低气温 -51.5℃,平均海拔 2 500~3 500 m;年降水量随海拔每升高 100 m 增加 30~70 mm,低山带为 200~300 mm,中山带为 300~500 mm,高山区域年降水量可达 500~800 mm^[12]。两河源牧区地形以山地为主,地势西北高东南低;区内主要有森林草甸、亚高山草甸、高山草甸等多种草地类型;土壤类型为山地栗钙土、山地灰色森林土、亚高山草甸土和高山草甸土。草地物种类型多样,如小针茅(*Stipa klemenzi*)、大针茅(*Stipa grandis*)、羊草(*Leymus chinensis*)、新疆针茅(*Stipa sareptana*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、千叶蓍(*Achillea millefolium*)、羽衣草(*Alchemilla japonica*)等。

1.2 数据来源

本研究以两河源 6 个牧区(表 1)为研究区,在每个牧区中各选取 5 个典型的草地群落样地进行样地调查。每个样地大小设置为 20 m×20 m,并在样地内随机选取 3 个 1 m×1 m 的典型草地小样方(图 1)。于 2020 年 9 月份进行野外调查,对每个样地进行群落特征调查,获取草地群落总盖度、物种组成、植物密度、植株高度、地上生物量等数据,样地基本情况见表 1。气象数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供的 2000—2020 年新疆富蕴气象站点的月平均气温和月降水量资料。

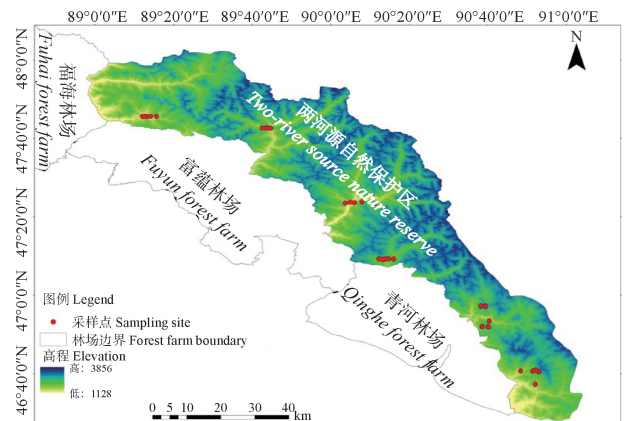


图 1 研究区采样点概况图

Fig. 1 Overview of sampling points in the study area

表 1 两河源牧区不同区域草地群落样地基本情况

Table 1 Basic situation of grassland community sample plots in different regions of Two-river Source pastoral area					
牧区 Pastoral area	样地编号 Sample number	地理位置 Geographical location	海拔 Altitude /m	物种数量 Number of species	优势种 Dominant species
阿布盖 Abugai	A1	90°52′08.421″E 46°37′19.179″N	2 401	8	小针茅、大针茅、羽衣草、千叶蓍 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Stipa grandis</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i>
	A2	90°52′58.069″E 46°40′30.749″N	2 438	10	小针茅、大针茅、羽衣草、千叶蓍、鹅绒委陵菜 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Stipa grandis</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Potentilla anserina</i>
	A3	90°52′12.540″E 46°40′55.211″N	2 464	7	羊草、羽衣草、千叶蓍、鹅绒委陵菜 <i>Leymus chinensis</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Potentilla anserina</i>
	A4	90°51′24.880″E 46°40′38.719″N	2 485	10	大针茅、羽衣草、新疆针茅、千叶蓍、鹅绒委陵菜 <i>Stipa grandis</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Stipa sareptana</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Potentilla anserina</i>
	A5	90°48′21.070″E 46°40′40.610″N	2 506	11	小针茅、大针茅、羽衣草、千叶蓍、鹅绒委陵菜 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Stipa grandis</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Potentilla anserina</i>
三道海子 Sandaohaizi	S1	90°40′06.319″E 46°51′54.330″N	2 713	7	小针茅、大针茅、羊草、羽衣草、千叶蓍 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Stipa grandis</i> , <i>Leymus chinensis</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i>
	S2	90°39′25.200″E 46°57′12.510″N	2 641	6	大针茅、羽衣草、千叶蓍、鹅绒委陵菜 <i>Stipa grandis</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Potentilla anserina</i>
	S3	90°38′32.301″E 46°51′58.540″N	2 759	10	小针茅、大针茅、新疆针茅、羽衣草 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Stipa grandis</i> , <i>Stipa sareptana</i> , <i>Alchemilla japonica</i>
	S4	90°40′22.339″E 46°53′28.259″N	2 649	8	小针茅、大针茅、新疆针茅、千叶蓍、鹅绒委陵菜 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Stipa grandis</i> , <i>Stipa sareptana</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Potentilla anserina</i>
	S5	90°38′11.400″E 46°57′15.491″N	2 645	8	羽衣草、千叶蓍、鹅绒委陵菜 <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Potentilla anserina</i>
阿克布拉克 Akebulake	AK1	90°16′01.099″E 47°09′15.051″N	1 946	7	大针茅、新疆针茅、碱蓬、千叶蓍 <i>Stipa grandis</i> , <i>Stipa sareptana</i> , <i>Suaeda glauca</i> , <i>Achillea millefolium</i>
	AK2	90°14′44.189″E 47°09′16.369″N	1 992	9	大针茅、碱蓬、千叶蓍、蒲公英 <i>Stipa grandis</i> , <i>Suaeda glauca</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i>
	AK3	90°12′16.251″E 47°09′16.081″N	2 010	9	小针茅、羊草、千叶蓍、蒲公英 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Leymus chinensis</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i>
	AK4	90°14′01.219″E 47°09′17.150″N	2 012	8	小针茅、羊草、千叶蓍、蒲公英 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Leymus chinensis</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i>
	AK5	90°13′15.550″E 47°09′06.501″N	2 024	12	小针茅、大针茅、新疆针茅、羽衣草、千叶蓍、蒲公英 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Stipa grandis</i> , <i>Stipa sareptana</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i>
喀依尔特 Kaiyerte	K1	89°44′45.100″E 47°42′38.300″N	1 842	8	小针茅、新疆针茅、千叶蓍、蒲公英 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Stipa sareptana</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i>
	K2	89°44′07.199″E 47°42′39.100″N	1 814	7	大针茅、新疆针茅、羽衣草、千叶蓍 <i>Stipa grandis</i> , <i>Stipa sareptana</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i>
	K3	89°43′29.071″E 47°42′40.021″N	1 819	8	小针茅、羊草、新疆针茅、千叶蓍 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Leymus chinensis</i> , <i>Stipa sareptana</i> , <i>Achillea millefolium</i>
	K4	89°42′30.701″E 47°42′41.299″N	1 827	9	小针茅、羊草、新疆针茅、羽衣草、千叶蓍、蒲公英 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Leymus chinensis</i> , <i>Stipa sareptana</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i>
	K5	89°43′51.280″E 47°42′42.099″N	1 836	8	小针茅、新疆针茅、千叶蓍、蒲公英 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Stipa sareptana</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i>
库木阿拉散 Kumualasan	KM1	89°15′40.169″E 47°45′36.339″N	1 693	10	小针茅、羊草、新疆针茅、大针茅、蒲公英 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Leymus chinensis</i> , <i>Stipa sareptana</i> , <i>Stipa grandis</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i>
	KM2	89°13′14.240″E 47°45′36.479″N	1 693	10	小针茅、羽衣草、蒲公英、鹅绒委陵菜 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i> , <i>Potentilla anserina</i>
	KM3	89°12′01.170″E 47°45′37.320″N	1 695	8	小针茅、新疆针茅、大针茅、羽衣草、千叶蓍 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Stipa sareptana</i> , <i>Stipa grandis</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i>
	KM4	89°14′08.949″E 47°45′39.370″N	1 699	9	小针茅、大针茅、羽衣草、千叶蓍 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Stipa grandis</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i>
	KM5	89°12′47.830″E 47°45′41.119″N	1 706	7	小针茅、羽衣草、千叶蓍 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i>
库依尔特 Kuyierte	KY1	90°10′58.001″E 47°23′04.261″N	1 573	10	羊草、新疆针茅、羽衣草、千叶蓍、车前草 <i>Leymus chinensis</i> , <i>Stipa sareptana</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Plantago depressa</i>
	KY2	90°07′56.179″E 47°23′52.400″N	1 502	9	新疆针茅、大针茅、千叶蓍、车前草、蒲公英 <i>Stipa sareptana</i> , <i>Stipa grandis</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Plantago depressa</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i>
	KY3	90°04′55.150″E 47°23′43.500″N	1 532	11	小针茅、大针茅、羽衣草、老鹳草、蒲公英 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Stipa grandis</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Geranium wilfordii</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i>
	KY4	90°03′40.500″E 47°23′30.999″N	1 521	10	羊草、大针茅、羽衣草、老鹳草、车前草 <i>Leymus chinensis</i> , <i>Stipa grandis</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Geranium wilfordii</i> , <i>Plantago depressa</i>
	KY5	90°06′02.190″E 47°23′37.500″N	1 524	13	小针茅、羊草、羽衣草、蒲公英 <i>Stipa klemenzii</i> , <i>Leymus chinensis</i> , <i>Alchemilla japonica</i> , <i>Taraxacum mongolicum</i>

注：A、S、AK、K、KM、KY 分别代表阿布盖、三道海子、阿克布拉克、喀依尔特、库木阿拉散和库依尔特；优势种为相对生物量大于 10% 的物种
Note: A, S, AK, K, KM and KY stand for Abugai, Sandaohaizi, Akebulake, Kaiyerte, Kumualasan and Kiyerte, respectively; The dominant species were those with more than 10% relative biomass

1.3 研究方法

(1)不同地点草地群落平均高度:以多度为权重对草样方内所有物种的高度加权平均求得平均高度。各物种的高度从草样方中随机选取 5 株植株个体,用皮尺从草皮部垂直量至物种自然直立状态最高点,取 5 个高度的平均值为该物种高度^[18]。

(2)地上生物量和群落盖度:采用刈割法对样方内的各植物进行刈割,并进行生物量称重,样方内植物群落盖度用针刺法进行测定^[10]。

(3)单位盖度生物量:地上生物量与群落总盖度的比值($\text{g} \cdot \%^{-1}$),即单位盖度生物量,该值越大说明单位草地植被覆盖面积上初级生产力就越高^[10,19]。

(4)物种多样性指数:物种多样性采用 α -多样性测度中的 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Alatalo 均匀度指数,计算公式如下^[20-21]:

Margalef 丰富度指数: $M = (S - 1) / \ln N$

Simpson 优势度指数: $D = 1 - \ln \left[\sum_{i=1}^S \left(\frac{N_i}{N} \right)^2 \right]$

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

Alatalo 均匀度指数:

$J = [1 / (\sum P_i^2) - 1] / [\exp(-P_i \ln P_i) - 1]$

$P_i = N_i / N$

式中: S 为样方中的总物种数; N 为样方中的总个体数; N_i 为第 i 种物种的个体数; P_i 为第 i 种物种个体数占总个体数比例。

1.4 数据分析与处理

1.4.1 方差分析 方差分析(analysis of variance, ANOVA)主要应用于两个以上样本均数差别的显著性检验(F 检验)。Duncan 新复极差法(SSR)是方差分析的一种方法,适用于对某一结果有影响的各个因素之间的显著性分析^[22]。本研究采用 Duncan 新复极差法进行多重比较分析,对两河源牧区不同地点草地群落基本特征进行差异显著性分析。

1.4.2 灰色关联分析 灰色关联分析是对于一个动态的系统进行定量描述和比较,经判定参考数据列和比较数据列形态来确定其关联性,本研究参照邓聚龙^[23]灰色系统理论和李想等^[10]对草地群落多样性研究的文献方法计算生物量、物种多样性与环境因子之间的关联度系数。

首先,确定参考数列和比较数列。生物量、物种多样性和各环境因子分别设为一个整体,设生物量(物种多样性)为参考数列 X_0 ;各环境因子设置为比较数列 $Y_1, Y_2, Y_3, \dots$ 。将原始数据中生物量、多

样性和各环境因子进行标准化处理。其次,计算灰色关联系数:根据标准化处理后的数据,求出各样地草地群落生物量(物种多样性) X_0 与环境因子 Y_i 对应点的绝对值,再求出关联系数并进行排序^[10]。计算公式如下:

$$\Delta Q_i(k) = |X_0(k) - Y_i(k)|$$

$$\delta Q_i(k) = \frac{\Delta \min + \rho \Delta \max}{\Delta Q_i(k) + \rho \Delta \max}$$

$$rQ_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \delta Q_i(k)$$

其中, $\Delta \min, \Delta \max$ 表示所有比较序列各样地绝对差中的最小值与最大值, ρ 为分辨系数,此处为 0.5; rQ_i 为比较数列 i 与参考数列 Q 的关联度, n 为比较序列的长度。

1.4.3 数据处理 利用 Excel 2010 软件对数据进行初步整理, SPSS 20.0 软件进行相关性分析, DPS 数据处理系统进行方差分析和灰色关联分析,作图用 Origin 2018 软件。

2 结果与分析

2.1 不同牧区草地群落基本特征

两河源不同牧区草地群落基本特征如表 2。从草地群落盖度、高度、植株密度、生物量来看,阿克布拉克平均群落盖度最高(67%),三道海子最低(40.6%);库木阿拉散平均群落高度最高(3.41 cm),喀依尔特最低(1.45 cm);草地群落植株密度的最大值出现在阿布盖(356.81 株 $\cdot \text{m}^{-2}$),最小值为喀依尔特(171.02 株 $\cdot \text{m}^{-2}$);生物量和单位盖度生物量都是阿布盖最高,库木阿拉散最低。不同牧区中,阿克布拉克、库木阿拉散草地群落平均高度与其他牧区存在显著差异($P < 0.05$);阿布盖植株密度显著高于其他牧区($P < 0.05$);阿克布拉克、阿布盖群落盖度显著高于其他牧区($P < 0.05$);阿布盖生物量、单位盖度生物量与库木阿拉散存在显著差异($P < 0.05$)。不同牧区间群落盖度、高度、植株密度、地上生物量和单位盖度生物量存在差异性,说明不同牧区草地群落的植被丰茂程度存在着差异。

2.2 不同牧区草地群落生物量分析

通过表 3 可知,阿布盖草地群落盖度和生物量为显著正相关关系($P < 0.05$),阿克布拉克群落盖度与生物量为极显著正相关关系($P < 0.01$),库依尔特群落盖度与生物量为极显著正相关关系($P < 0.01$),喀依尔特草地群落平均高度与地上生物量存在显著正相关关系($P < 0.05$),库木阿拉散草地群

表 2 不同牧区草地群落基本特征

Table 2 Basic characteristics of grassland communities in different pastoral areas

牧区 Pastoral area		群落平均高度 Mean community height/cm	植株密度 Plant density /(株·m ⁻²)	群落盖度 Community coverage/%	地上生物量 Aboveground biomass /(g·m ⁻²)	单位盖度生物量 Biomass per unit coverage /(g·% ⁻¹)
阿布盖 Abugai	范围 Scope	2.43~3.52	204~440	50~68	88.1~160.5	2.11~3.83
	平均值 Mean	2.77±0.19A	356.81±21.23B	64.20±1.59C	121.86±14.47C	2.77±0.35A
三道海子 Sandaohaizi	范围 Scope	1.16~4.26	124~318	30~50	52.3~80	1.16~2.23
	平均值 Mean	2.68±0.61A	213.64±21.65A	40.60±3.85A	67.36±5.11AB	1.71±0.18B
阿克布拉克 Akebulake	范围 Scope	2.54~3.75	86~529	50~85	44.1~123	0.88~1.64
	平均值 Mean	3.07±0.24B	250.66±70.74A	67.00±6.44C	87.92±14.38B	1.28±0.12B
喀依尔特 Kayierte	范围 Scope	1.18~1.62	98~260	45~61	51~70.7	1.02~1.56
	平均值 Mean	1.45±0.08A	171.02±16.62A	52.80±5.93AB	65.54±3.69AB	1.25±0.09B
库木阿拉散 Kumualasan	范围 Scope	0.54~3.15	79~331	42~62	25.1~70.6	0.31~0.86
	平均值 Mean	3.41±0.69B	203.08±31.35A	46.80±8.92A	42.30±7.72A	0.58±0.11C
库依尔特 Kuyierte	范围 Scope	3.23~4.85	184~470	50~66	61~122	1.15~1.84
	平均值 Mean	2.07±0.26A	202.62±26.68A	59.00±6.55B	78.79±11.98B	1.46±0.13B

注:不同大写字母表示不同牧场草地群落间差异性显著($P<0.05$)

Note: Different capital letters indicate significant difference among grassland communities in different pastures ($P<0.05$)

落平均高度与生物量存在极显著正相关关系($P<0.01$)。不同牧区草地群落地上生物量与群落植株密度均无显著相关性。由此表明,在小区域尺度范围内,草地群落植株密度的变化对群落生产力影响较小,草地群落盖度和平均高度则影响较大。

将两河源不同牧区草地群落特征综合起来分析,如图 2 所示。群落地上生物量与群落盖度和植株密度均有显著正相关关系。线性回归分析表明,随着群落盖度的增加,地上生物量呈显著增加趋势($P<0.05$),相关系数为 0.64;随着群落植株数的增多,地上生物量呈显著增加趋势($P<0.05$),相关系数为 0.76。随着群落平均高度增高,地上生物量呈现出先增后减的趋势($P<0.05$),相关系数为 0.47。

进一步分析可知,在较大区域尺度上,草地群落生物量与群落盖度、群落平均高度和植株密度存在着密切关系,生物量的大小受三者的影响,经过线性回归模型,得到两河源牧区草地群落地上生物量的表达式:

$$y = 0.603X_1 - 14.5X_2 + 0.36X_3 + 2.417$$

($R^2=0.89$, $F=14.57$, $P<0.05$)

上式中, y 为草地群落生物量, X_1 为草地群落盖度, X_2 为草地群落平均高度, X_3 为草地群落植株密度,0.603、-14.5、0.36 为相应各自变量偏回归系数值,2.417 为常数。再结合相关分析可知,草地群落盖度对生物量影响最大。

2.3 不同牧区草地群落物种多样性分析

由图 3 可知,两河源不同牧区中 Margalef 丰富度指数最高为三道海子(0.93),最低为喀依尔特(0.49);Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数则是库依尔特最高,喀依尔特最低;Alatalo 均匀度指数则是三道海子最大,阿克布拉克最小。根据差异性结果发现,Margalef 丰富度指数中三道海子和库木阿拉散与其他牧区存在显著差异性($P<0.05$);Simpson 优势度指数则是阿克布拉克和喀依尔特与其他牧区存在显著差异($P<0.05$);Shannon-Wiener 多样性指数中阿布盖、库木阿拉散和库依尔特与其他牧区存在显著差异性($P<0.05$)。其中 Alatalo 均匀度指数不同牧区无显著差异,说明各牧区物种分布相对均匀。

2.4 两河源牧区草地群落生物量、物种多样性与环境因子关联度分析

本研究采用灰色关联度法,选取 Y_1 (海拔), Y_2 (群落盖度), Y_3 (多年平均气温), Y_4 (多年平均降水量)4 个指标作为子因子集。草地群落生物量和物种多样性指数分别作母因子集: X_1 (生物量), X_2 (Margalef 丰富度指数), X_3 (Simpson 优势度指数), X_4 (Shannon-Wiener 多样性指数), X_5 (Alatalo 均匀度指数)。根据标准化处理的环境因子分别与生物量、物种多样性得出其关联系数并排序(表 4)。

通过关联分析可知,群落生物量大小主要受群

表 3 不同牧区草地群落特征相关性

Table 3 Correlation of grassland community characteristics in different pastoral areas

牧区 Pastoral area	草地群落指标 Grassland community index	地上生物量 Aboveground biomass					
		阿布盖 Abugai	三道海子 Sandaohaizi	阿克布拉克 Akebulake	喀依尔特 Kaierte	库木阿拉散 Kumualasan	库依尔特 Kuyierte
阿布盖 Abugai	群落盖度 Community coverage	0.75 *	—	—	—	—	—
	群落密度 Community density	0.39	—	—	—	—	—
	群落平均高度 Mean community height	−0.31	—	—	—	—	—
三道海子 Sandaohaizi	群落盖度 Community coverage	—	0.29	—	—	—	—
	群落密度 Community density	—	0.65	—	—	—	—
	群落平均高度 Mean community height	—	−0.08	—	—	—	—
阿克布拉克 Akebulake	群落盖度 Community coverage	—	—	0.92 **	—	—	—
	群落密度 Community density	—	—	0.57	—	—	—
	群落平均高度 Mean community height	—	—	0.02	—	—	—
喀依尔特 Kaierte	群落盖度 Community coverage	—	—	—	0.13	—	—
	群落密度 Community density	—	—	—	0.34	—	—
	群落平均高度 Mean community height	—	—	—	0.79 *	—	—
库木阿拉散 Kumualasan	群落盖度 Community coverage	—	—	—	—	0.33	—
	群落密度 Community density	—	—	—	—	0.67	—
	群落平均高度 Mean community height	—	—	—	—	0.93 **	—
库依尔特 Kuyierte	群落盖度 Community coverage	—	—	—	—	—	0.95 **
	群落密度 Community density	—	—	—	—	—	0.43
	群落平均高度 Mean community height	—	—	—	—	—	0.28

注: ** 表示极显著差异($P<0.01$), * 表示显著差异($P<0.05$)
Note: ** represents extremely significant difference ($P<0.01$), * represents significant difference ($P<0.05$)

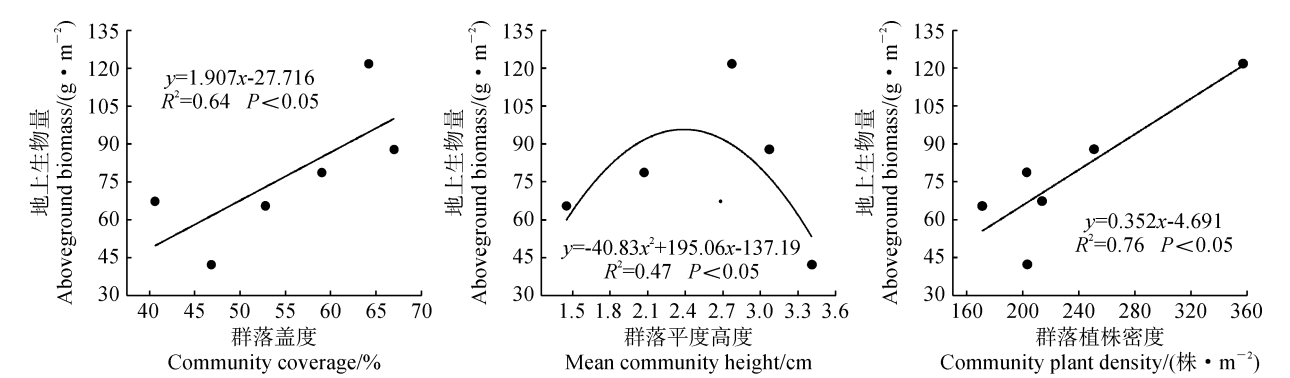


图 2 地上生物量与群落盖度、群落平均高度、植株密度的关系

Fig. 2 Relationship between aboveground biomass and community coverage, average community height and plant density

落盖度、多年平均气温和多年平均降水量三个环境因子影响,其关联系数分别为 0.467、0.511 和 0.508,它们之间共同作用,影响着草地群落生物量的大小;因此,两河源牧区牧草生长和发育、群落生物量的提高与气温和降水关系十分密切,与地形条件关系则较弱。影响 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指

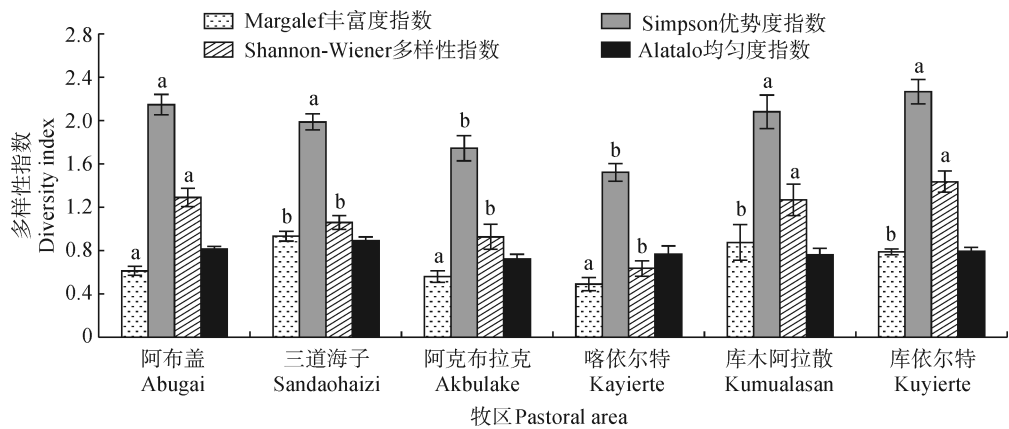


图 3 不同牧区草地群落物种多样性指数

Fig. 3 Species diversity index of grassland communities in different pastoral areas

表 4 草地群落生物量、物种多样性与环境因子关联度

Table 4 Correlation between grassland community biomass, species diversity and environmental factors

环境因子 Environmental factor	生物量 Biomass		Margalef 丰富度指数		Simpson 优势度指数		Shannon-Wiener 多样性指数		Alatalo 均匀度指数	
	关联系数 Correlation coefficient	排序 Sort	关联系数 Correlation coefficient	排序 Sort	关联系数 Correlation coefficient	排序 Sort	关联系数 Correlation coefficient	排序 Sort	关联系数 Correlation coefficient	排序 Sort
海拔 Altitude	0.295	4	0.236	4	0.231	4	0.223	4	0.239	4
盖度 Coverage	0.437	3	0.467	3	0.414	3	0.418	3	0.411	3
多年平均气温 Perennial mean temperature	0.511	1	0.615	2	0.625	2	0.597	2	0.574	2
多年平均降水 Perennial mean precipitation	0.508	2	0.812	1	0.639	1	0.663	1	0.634	1

数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Alatalo 均匀度指数的因子基本一致,影响较大的因子为多年平均气温和多年平均降水量,影响较小的因子为海拔,盖度则影响居中;环境因子由大到小依次为多年平均降水量>多年平均气温>群落盖度>海拔。由此表明,草地物种多样性主要受气温和降水影响,水热条件制约着物种多样性、丰富度和均匀度的大小。

3 讨 论

两河源牧区草地群落随着水热条件的分配及不同的地域差异,其各牧区的草地群落平均高度、群落盖度、地上生物量和单位盖度生物量等群落特征也有所差异。综合来看,群落地上生物量与群落盖度和植株密度均有显著正相关关系($P<0.05$),草地群落地上生物量与盖度、植株平均高度之间的正相关关系能反映牧区草地群落的基本特征,即群落盖度越高、植株高度越大的物种组合能更加有效地获取和利用水气等环境因子,进而促进了地上生物量提升^[24-26]。同时相关研究表明草地群落盖度与生物量之间在一定范围内具有正相关关系^[9-10],当盖度达到 85%,地上

生物量高于 285 g·m⁻²时,生物量增加将对盖度影响不大,本研究中草地群落盖度最高为 82%,生物量最大为 160.5 g·m⁻²,在该阈值范围内,与其研究结果相吻合^[19]。此外,李想等^[10]对锡林郭勒不同草原类型群落生物量和群落盖度关系研究表明二者也具有正相关关系,与本研究结果一致。

通过不同牧区草地群落物种多样性分析可知,不同牧区多样性指数具有一定差异,其中 Alatalo 均匀度指数不同牧区间无显著差异,这与李想等^[10]、杨利民等^[26]学者的研究一致,即草地群落物种均匀度指数在小区域范围内变化不明显。同时,喀依尔特牧区的 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数相对于其他牧区低,其原因一方面是受物种群落特征影响,其群落平均高度(1.45 cm)和植株密度(171.1 株·m⁻²)都较低;另一方面受放牧活动干扰,进而导致其生境遭到破坏,物种多样性偏低^[27-28]。此外,物种多样性还会受气候条件、土壤条件和地形因素等影响,针对两河源不同牧区其环境因子存在一定差异,其中库木阿拉散和三道海子牧区年均温、年降

水量较其他牧区较高,土壤类型以栗钙土和森林土为主,且牧区坡度相较其他牧区地势起伏较小,利于草地植被的生长;但阿克布拉克和喀依尔特牧区草地群落相对较差,地势起伏较大;进而导致两河源不同牧区物种多样性、丰富度、优势度和均匀度存在差异,这与郑晓翾等^[29]对呼伦贝尔草原物种多样性的研究结果相类似。

两河源牧区草地基本以天然高山草地为主,草地群落生物量和多样性变化是多种因素相互耦合的结果,本研究通过灰色关联度分析可知,两河源牧区草地群落生物量、物种多样性与降水和气温关系十分密切,地上生物量、Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Alatalo 均匀度指数与多年平均降水量、多年平均气温关联系数达 0.5 以上,各因子关联系数综合排序为多年平均降水

量>多年平均气温>群落盖度>海拔,充分说明牧区草地主要受气温和降水影响,水热条件是制约着牧区草地的关键因子。该结果与阿尔泰山布尔津林区高寒草地群落不同,高寒草地群落水分相对充足,气温是主要限制因子;与哈巴河林区荒漠草地也有所差异,荒漠草地群落水分是主要限制因子^[30-31]。

综上所述,两河源不同牧区间群落盖度、高度、植株密度、地上生物量和单位盖度生物量存在差异性;两河源牧区草地群落地上生物量与群落盖度和植株密度均有显著正相关关系($P < 0.05$),草地群落盖度对生物量影响最大。不同牧区的物种多样性指数具有一定差异,均匀度指数不同牧区无显著差异,群落物种分布相对均匀。两河源牧区草地植被的生长发育与气温和降水关系密切,物种多样性也受气温和降水双重影响。

参考文献:

- [1] 徐满厚,李晓丽. 基于物种多样性与生物量关系的草地群落稳定性对全球变暖的响应研究进展[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(2): 348-358.
XU M H, LI X L. Review of response of grassland community stability to global warming based on correlation between species biodiversity and biomass[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(2): 348-358.
- [2] PAUSAS J G, AUSTIN M P. Patterns of plant species richness in relation to different environments: An appraisal[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2001, **12**(2): 153-166.
- [3] 胡云锋,巴图娜存,毕力格吉夫,等. 乌兰巴托—锡林浩特样带草地植被特征与水热因子的关系[J]. 生态学报, 2015, **35**(10): 3 258-3 266.
HU Y F, BATUNACUN, BILIGEJIFU, *et al.* The relationship between vegetation characteristics and hydro-thermic factors along the Ulanbattar-Xilinhot Grassland Transect of the Mongolian Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(10): 3 258-3 266.
- [4] 杜忠毓,安 慧,王 波,等. 养分添加和降水变化对荒漠草原植物群落物种多样性和生物量的影响[J]. 草地学报, 2020, **28**(4): 1 100-1 110.
DU Z Y, AN H, WANG B, *et al.* Effects of nutrient addition and precipitation manipulation on plant species diversity and biomass of in a desert grassland[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, **28**(4): 1 100-1 110.
- [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] 朱桂丽,李 杰,魏学红,等. 青藏高原高寒草地植被生产力与生物多样性的经度格局[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(2): 210-222.
ZHU G L, LI J, WEI X H, *et al.* Longitudinal patterns of productivity and plant diversity in Tibetan alpine grasslands[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, **32**(2): 210-222.
- [7] 左小安,赵学勇,赵哈林,等. 科尔沁沙质草地群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. 环境科学, 2007, **28**(5): 945-951.
ZUO X A, ZHAO X Y, ZHAO H L, *et al.* Changes of species diversity and productivity in relation to soil properties in sandy grassland in horqin sand land[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(5): 945-951.
- [8] 刘万弟,李小伟,黄文广,等. 宁夏草原针茅属植物群落物种多样性和生产力格局及影响因素研究[J]. 草业学报, 2021, **30**(1): 12-23.
LIU W D, LI X W, HUANG W G, *et al.* Community diversity, patterns of productivity, and factors influencing them in *Stipa* in Ningxia grassland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, **30**(1): 12-23.
- [9] 何美悦,王迎新,彭泽晨,等. 祁连山草原地上生物量和物种丰富度的空间格局[J]. 草业科学, 2020, **37**(10): 2 012-2 021.
HE M Y, WANG Y X, PENG Z C, *et al.* The spatial pattern of aboveground biomass and species richness in the grassland of Qilian Mountain[J]. *Pratacultural Science*, 2020, **37**(10): 2 012-2 021.
- [10] 李 想,于红博,刘月璇,等. 锡林郭勒不同草原类型群落生物量及多样性研究[J]. 草地学报, 2022, **30**(1): 196-204.
LI X, YU H B, LIU Y X, *et al.* Study on community biomass and diversity of different grassland types in Xilingol[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, **30**(1): 196-204.
- [11] 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.
- [12] 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 TUMUR, ABDULLA Abbas. 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.

[13] 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 degradation and protection of some wetlands at the headwaters of Two Rivers in Altai Mountain[J]. *Forestry of Xinjiang*, 2012, (5): 13-14.

[14] 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.

ALTA T, XU H L. Restoration measures and ideas of the Two-river Source mining area[J]. *Xinjiang Forestry*, 2018, (4): 38-40.

[15] 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): 1 020-1 025.

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): 1 020-1 025.

[16] 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.

[17] 武胜利. 阿尔泰山两河源区生态环境问题研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2004.

[18] 师阳阳, 陈云明, 张光辉, 等. 不同退耕年限撂荒地植物多样性及生物量分析[J]. 水土保持研究, 2012, **19**(6): 36-40.

SHI Y Y, CHEN Y M, ZHANG G H, *et al.* Investigation into the species diversity and biomass of plants in the abandoned farmlands with different restoration years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, **19**(6): 36-40.

[19] 贾 昭, 简春霞, 熊沛枫, 等. 黄土丘陵区退耕草地群落盖度与地上生物量关系[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(1): 319-327.

JIA Z, JIAN C X, XIONG P F, *et al.* Relationship between community coverage and aboveground biomass in farming-withdrawn grasslands in loess hilly-gully region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(1): 319-327.

[20] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性, 1994, **2**(3): 229-239.

MA K P. Measuring methods of biodiversity i . Measuring methods of α diversity (part one)[J]. *Chinese Biodiversity*, 1994, **2**(3): 229-239.

[21] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, **2**(4): 231-239.

MA K P, LIU Y M. Measuring methods of biodiversity i . Measuring methods of α diversity (part two) [J]. *Chinese Biodiversity*, 1994, **2**(4): 231-239.

[22] 李永宏, 黄清臻. 新复极差法在生物统计中的应用[J]. 医学动物防制, 2002, **18**(5): 270-272.

LI Y H, HUANG Q Z. Application of new complex polar difference method in biostatistics [J]. *Chinese Journal of Pest Control*, 2002, **18**(5): 270-272.

[23] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 2 版(修订本). 武汉: 华中理工大学出版社, 1993.

[24] JI S J, GENG Y, LI D F, *et al.* Plant coverage is more important than species richness in enhancing aboveground biomass in a premature grassland, Northern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **129**(4): 491-496.

[25] 赖炽敏, 赖日文, 薛 炯, 等. 基于植被盖度和高度的不同退化程度高寒草地上生物量估算[J]. 中国沙漠, 2019, **39**(5): 127-134.

LAI C M, LAI R W, XUE X, *et al.* Estimation of aboveground biomass of different degraded alpine grassland based on vegetation coverage and height[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, **39**(5): 127-134.

[26] 杨利民, 韩 梅, 李建东. 中国东北样带草地群落放牧干扰植物多样性的变化[J]. 植物生态学报, 2001, **25**(1): 110-114.

YANG L M, HAN M, LI J D. Plant diversity change in grassland communities along a grazing disturbance gradient in the northeast China transect [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(1): 110-114.

[27] HUANG X B, SU J R, LI S F, *et al.* Functional diversity drives ecosystem multifunctionality in a *Pinus yumanensis* natural secondary forest[J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1): 6 979.

[28] 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.

[29] 郑晓翻, 靳甜甜, 木丽芬, 等. 呼伦贝尔草原物种多样性与生物量、环境因子的关系[J]. 中国草地学报, 2008, **30**(6): 74-81.

ZHENG X X, JIN T T, MU L F, *et al.* The relationship between plant species richness in Hulunbeier grassland and biomass and environmental factors [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, **30**(6): 74-81.

[30] 殷锡凯, 叶 茂, 郭建兴, 等. 阿尔泰山布尔津林区不同草地类型物种多样性特征与生产力的关系[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(1): 110-115.

YIN X K, YE M, GUO J X, *et al.* Relationship between species diversity and productivity of different grassland types in Buerjin forest area of Altai Mountains[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(1): 110-115.

[31] 张凯丽, 叶 茂, 何强强, 等. 阿尔泰山哈巴河地区不同草地类型物种多样性及 VOR 指数分析[J/OL]. 水土保持学报, 2022: 1-11. (2022-09-14). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1362.TV.20220909.1736.004.html>.

ZHANG K L, YE M, HE Q Q, *et al.* Analysis of species diversity and VOR index of different grassland types in the Habahe region of the Altai Mountains[J/OL]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022: 1-11. (2022-09-14). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1362.TV.20220909.1736.004.html>.