

DOI: 10.11686/cyxb2024286

http://cyxb.magtech.com.cn

罗顺华, 刘新宇, 孟宝平, 等. 祁连山国家公园高寒草地功能群多样性与生产力研究. 草业学报, 2025, 34(6): 14-26.

LUO Shun-hua, LIU Xin-yu, MENG Bao-ping, *et al.* A study of functional group diversity and productivity of alpine grassland in Qilian Mountain National Park. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(6): 14-26.

祁连山国家公园高寒草地功能群多样性与生产力研究

罗顺华¹, 刘新宇^{2,3,4}, 孟宝平^{5,6}, 陈璇黎^{5,6}, 胡仁杰^{5,6}, 于红妍⁷, 王贤颖⁷, 张勃^{1*}, 秦或^{2,3,4*}

(1. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 冰冻圈科学与冻土工程全国重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 4. 中国科学院大学, 北京 101408; 5. 南通大学地理科学学院, 江苏 南通 226007; 6. 南通大学脆弱生态环境研究所, 江苏 南通 226007; 7. 祁连山国家公园青海服务保障中心, 青海 西宁 810001)

摘要:物种多样性是维持祁连山草地生态系统功能, 进而保障祁连山生态屏障作用的基础。目前关于祁连山高寒草地植物功能群物种多样性与生产力维持机制的研究较为匮乏。本研究基于2023年7月中下旬在祁连山国家公园青海片区7种典型高寒草地的无人机航拍-地面协同调查, 分析了不同高寒草地的植物群落特征, 阐明了植物功能群物种丰富度和地上生物量的特性, 揭示了功能群物种多样性对生产力的影响机制。结果表明: 1) 高寒荒漠植被高度显著高于其他类型草地, 但是山地草甸植被盖度、物种丰富度和地上生物量在7种草地中最高, 分别为91.73%、16种和179.19 g·m⁻², 高寒沼泽草甸的植株密度最高, 达到了4111株·m⁻²。2) 杂类草是多种高寒草地的主要功能群, 在山地草甸中杂类草物种丰富度高达8种, 约占其总物种丰富度的50%; 高寒沼泽草甸中莎草科贡献了地上生物量总量的90%以上, 但是在高寒草甸、高寒草甸草原、高寒草原呈现出莎草科逐渐减少而禾本科增多的特征; 高寒荒漠和高寒荒漠草原仅有2~3种功能群, 物种少且生产力较低。3) 高寒草地群落和功能群物种丰富度与地上生物量的关系总体上呈正相关, 表明维持高寒草地植物功能群物种多样性有利于生态系统生产力的提高。

关键词:高寒草地; 功能群; 物种多样性; 生物量

A study of functional group diversity and productivity of alpine grassland in Qilian Mountain National Park

LUO Shun-hua¹, LIU Xin-yu^{2,3,4}, MENG Bao-ping^{5,6}, CHEN Xuan-li^{5,6}, HU Ren-jie^{5,6}, YU Hong-yan⁷, WANG Xian-ying⁷, ZHANG Bo^{1*}, QIN Yu^{2,3,4*}

1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. State Key Laboratory of Cryospheric Science and Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 5. School of Geographic Sciences, Nantong University, Nantong 226007, China; 6. Institute of Fragile Eco-Environment, Nantong University, Nantong 226007, China; 7. Qinghai Service and Guarantee Center of Qilian Mountain National Park, Xining 810001, China

Abstract: Species diversity plays a vital role in maintaining ecosystem function of grasslands and the role of the Qilian

收稿日期: 2024-07-17; 改回日期: 2024-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071139), 甘肃省杰出青年基金(21JR7RA066), 中国科学院西部之光“西部青年学者”项目(xbzglzb2022022), 甘肃省科技创新人才计划-西部之光“西部青年学者”项目(23JR6KA009), 甘肃省科技计划项目(22JR5RA367)和南通市科技计划(JC12022061)资助。

作者简介: 罗顺华(2001-), 男, 甘肃临夏人, 在读硕士。E-mail: 2045517981@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zbsonny@163.com; qiny@lzb.ac.cn

Mountains as an ecological barrier. However, our understanding about the relationship between species diversity and ecosystem productivity and the mechanisms involved in maintaining that balance remain limited in this region. Using aerial photography by a lightweight unmanned aerial vehicle and field sampling at seven typical alpine grassland sites in Qilian Mountain National Park in mid-to-late July 2023, we first analyzed the plant community composition of the seven alpine grassland sites, then evaluated the species richness and above-ground biomass of plant functional groups, and finally quantified the influence and mechanism of action of functional group species diversity on productivity. Results show that: 1) The vegetation height in alpine desert was significantly higher than in other grassland types. However, mountain meadow had the highest vegetation cover, species richness and aboveground biomass, with mean values of 91.73%, 16 species and 179.19 g·m⁻², respectively. The plant density of alpine swamp meadow was the highest, being up to 4111 plants·m⁻². 2) Forbs were found to be the main functional groups in most types of alpine grassland. In mountain meadows, the species richness of forbs was 8, which accounted for about 50% of the total species richness. The sedges contributed more than 90% of the total aboveground biomass in alpine swamp meadow, nevertheless, the sedges gradually decreased and the grasses increased in series represented by alpine meadow, alpine meadow steppe and alpine steppe grasslands. There were only 2–3 functional groups in alpine desert and alpine desert grassland, resulting in few species. Productivity was also low. 3) Species richness of community and functional groups positively correlated with aboveground biomass, indicating that maintaining plant functional group species diversity was conducive to improving ecosystem productivity.

Key words: alpine grassland; functional group; species diversity; biomass

物种多样性与生态系统功能密切相关,更高的多样性有利于维持更高的生态系统功能,而多样性的丧失会对生态系统功能造成威胁^[1-3]。在物种多样性与生态系统功能的研究中,生产力被认为是受物种多样性影响的一个重要生态系统功能特征^[4]。因此,陆地生态系统物种多样性与生产力的关系一直是生态学研究热点问题^[5]。在草地生态系统中,植物物种多样性与生物量及其相互关系是维持生态系统可持续发展的基础,与人类福祉息息相关。但是,人类活动和气候变化的影响加速了物种多样性的丧失^[6-7],改变了草地植物群落的组成结构和空间格局,对草地生态系统的稳定性和生产力构成了严重威胁^[8]。深入研究草地植物物种多样性与生产力的关系,可为草地植物多样性的保护和退化草地修复提供科学依据。

高寒草地约占全国草地总面积的1/3,不仅是我国畜牧业生产的重要基地^[9],而且因其丰富且独特的野生动植物资源,被认为是全球生物多样性保护的关键地区之一^[10]。同时,高寒草地作为青藏高原生态屏障功能的基础,其稳定性又对于维持我国乃至亚洲的生态平衡具有极其重要的作用^[11]。近年来,随着高寒草地退化问题的日益突出和人们对生物多样性与生态系统功能关系认识的逐渐加深,高寒草地植物物种多样性与生产力的研究受到越来越多的关注^[3,12]。众多学者就高寒草地物种丰富度^[13]、生产力^[14-15]、物种丰富度与生产力的关系^[16]及其影响机制^[4]等方面开展了大量的研究工作。然而,已有研究大都是基于群落物种多样性,缺少有关功能群物种多样性与生产力关系的研究。而功能群通过植物相似的生物生态学特性将不同物种归类组合后同生态系统功能联系起来^[17],对深入认识物种多样性与生态系统功能的关系具有重要意义^[12,18-19]。此外,已有研究主要集中在高寒草甸或者高寒草原某一特定的草地类型,关于不同类型高寒草地考虑不足。因此,亟须开展基于多种类型高寒草地的研究,从功能群视角分析物种丰富度对生物量的影响机制,更为深入地揭示物种多样性与生产力的关系。

祁连山位于甘肃省与青海省交界处,是我国西北部重要的生态安全屏障和生物多样性保护区^[20-21]。高寒草地作为祁连山地区主要植被类型之一,在涵养水源、保持水土、调节气候和为野生动物及家畜提供栖息地和食物等方面发挥着重要作用^[8,22]。由于该区高寒草地脆弱敏感,加之过去几十年不合理的人类活动和气候变化的综合影响,祁连山地区部分草地出现不同程度的退化,导致草地生态和生产功能受损,生物多样性减少,草产量下降等^[22-23]。为保护受损的生态系统,2017年9月,祁连山成为我国首批设立的10个国家公园体制试点之一,旨在保护祁连山生物多样性和自然生态系统的原真性和完整性。高寒草地功能群物种多样性和生产力及二者关系的研

究可以进一步揭示物种多样性对草地生态系统功能的作用,对祁连山生物多样性保护和退化草地修复具有重要意义。为此,本研究在祁连山中段地区开展了不同类型高寒草地的群落特征、功能群物种丰富度和地上生物量调查,分析了物种丰富度与地上生物量的关系,揭示了植物功能群多样性对草地生产力的贡献及其影响机制。以期丰富生物多样性和草地生产力的理论,为祁连山高寒草地的生态保护和管理利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山国家公园青海片区(图1),主要涉及青海省东北部的祁连县、刚察县和天峻县,海拔2700~4200 m^[24]。该区属高原大陆性气候,具有高海拔高纬度山区气候特点,气温和降水地带性明显,多年年均气温为-3.7~-2.9℃,年降水量260~390 mm^[25]。独特的地理位置和气候条件形成了多种典型高寒草地,包括高寒荒漠、高寒荒漠草原、高寒草甸、高寒草甸草原、高寒草原、高寒沼泽草甸和山地草甸。草地常见植物种有草地早熟禾(*Poa pratensis*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、高山嵩草(*Carex parvula*)、矮生嵩草(*Carex alatauensis*)、黑褐苔草(*Carex atrofusca* subsp. *minor*)、青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、花苜蓿(*Medicago ruthenica*)、高山豆(*Tibetia himalaica*)、二裂委陵菜(*Sibbaldianthe bifurca*)、珠芽蓼(*Bistorta vivipara*)、火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)等。

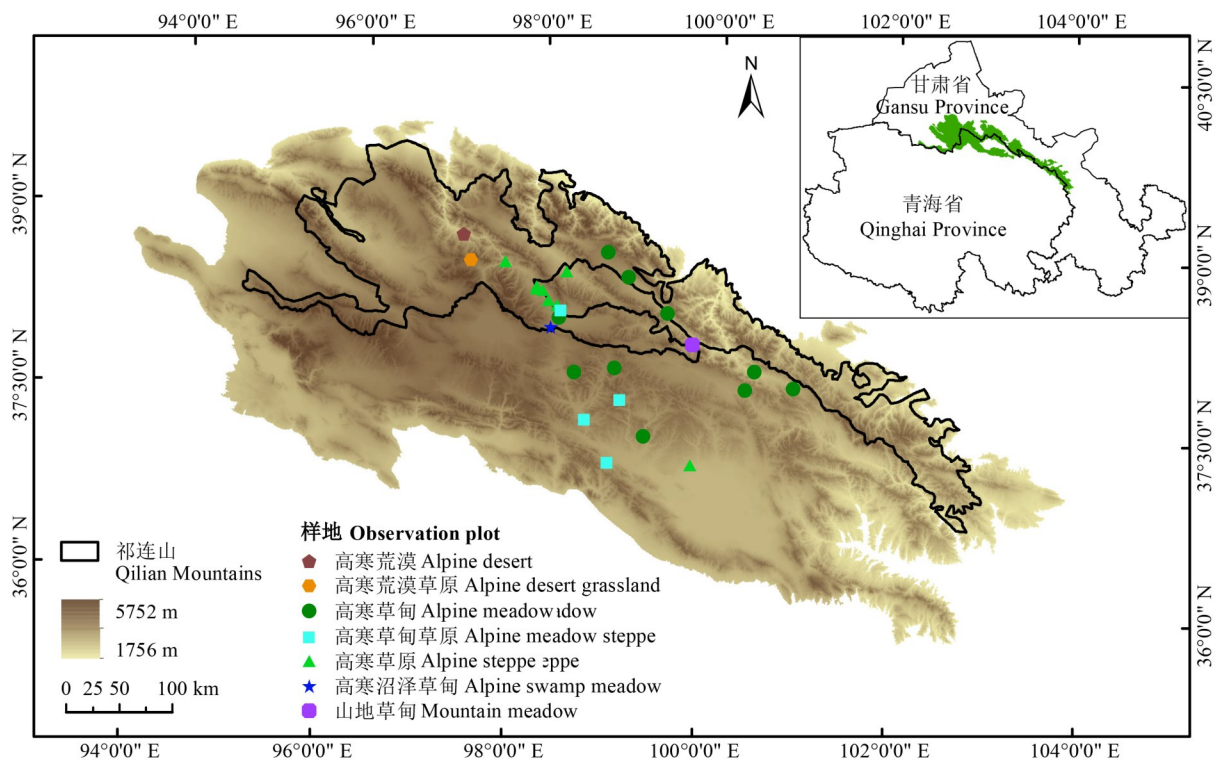


图1 研究区位置及样地分布

Fig. 1 The location of study region and the distribution of observation plot

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1822号标准地图制作,底图边界无修改。The map was based on the standard map service website of the Ministry of Natural Resources with the drawing review NO. GS(2019)1822, and the base map borders was not modified.

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 于2023年7月中旬在研究区选择高寒荒漠(alpine desert, AD)、高寒荒漠草原(alpine desert grassland, ADG)、高寒草甸(alpine meadow, AM)、高寒草甸草原(alpine meadow steppe, AMSt)、高寒草原(alpine steppe, AS)、高寒沼泽草甸(alpine swamp meadow, ASwM)和山地草甸(mountain meadow, MM)7种类型高寒草地布设了26个无人机航拍—地面协同调查样地(图1,大小为200 m×200 m)。每个样地随机设置5~6个样方

(高寒荒漠由于植被稀疏且植株体型较大,样方大小为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$,其余类型草地为 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$)用于植被高度、植株密度、功能群物种组成以及生物量的调查。根据7种草地面积分布实际情况,高寒荒漠、高寒荒漠草原、高寒沼泽草甸和山地草甸各布设1个样地,每个样地包含6个样方;高寒草甸布设10个样地,包含57个样方;高寒草甸草原布设4个样地,包含23个样方;高寒草原布设8个样地,包含46个样方。

1.2.2 植被调查 首先,采用本研究团队自主开发的无人机航拍系统(FragMAP)^[26]在样地尺度调查高寒草地植被盖度和裸地斑块面积信息。具体步骤为,先在目标区域添加工作点和飞行航线(安装载体为华为平板电脑),然后设置无人机(DJI Mavic 2 Zoom,中国制造)相机参数(白平衡、感光度等)和20 m飞行高度以及 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 飞行速度,最后上传航线和航点至无人机,无人机即可根据预设参数开始自主飞行与拍摄,每个采样点可以获取16张分辨率为1 cm的航拍照片。

待无人机航拍完成后,开展样方尺度的地面调查。测量样方框内植物生殖枝和叶顶端齐地面的绝对高度(不分物种,均为10个重复),直接计数框内植物株丛数获取植株密度,记录框内植物物种名称用于统计物种丰富度和划分功能群,最后将框内植物地上部分分功能群齐地面剪下(灌木剪取当年新生枝条)装入纸袋,带回实验室,在烘箱内于 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘24 h,称得地上生物量干重。

1.2.3 功能群划分 根据植物物种科属、生物学特征和生长期内草畜动物可食用性,将样方框内植物划分为禾本科、莎草科、豆科、杂类草、毒害草和灌木(划分时优先考虑有毒属性)6种功能群。本研究共统计植物145种,其中,禾本科有草地早熟禾、紫花针茅、垂穗披碱草、芨芨草(*Neotrinia splendens*)等14种,莎草科有西藏嵩草(*Carex tibetikobresia*)、高山嵩草、矮生嵩草、黑褐苔草、青藏苔草等14种,豆科有花苜蓿、高山豆、黄芪(*Astragalus purpurinus*)等7种,杂类草有二裂委陵菜、珠芽蓼、昆仑蒿(*Artemisia nanschanica*)、火绒草等91种,毒害草有甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)、瑞香狼毒(*Stellera chamaejasme*)、黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、披针叶野决明(*Thermopsis lanceolata*)、云生毛茛(*Ranunculus nephelogenes*)、黄花水毛茛(*Ranunculus flavidus*)、镰荚棘豆(*Oxytropis falcata*)、麻花苳(*Gentiana straminea*)、甘青大戟(*Euphorbia micractina*)、高原毛茛(*Ranunculus tanguticus*)、欧亚马先蒿(*Pedicularis oederi*)、管花秦艽(*Gentiana siphonantha*)、毛茛状金莲花(*Trollius ranunculoides*)和青海翠雀花(*Delphinium qinghaiense*)共14种,灌木有金露梅(*Dasiphora fruticosa*)、肋果沙棘(*Hippophae neurocarpa*)等6种。

1.2.4 航拍照片处理 基于无人机在样地尺度获取的航拍照片,采用本研究团队自主开发的草地植被盖度分析软件(Pixel Classifier Manual)进行植被盖度和裸地斑块提取^[27]。基于绿度指数(excess green index, EGI= $2G-R-B$;其中R、G、B分别为红、绿、蓝波段可见光)的阈值法来提取植被盖度。首先,计算EGI的初始阈值,然后与每个植被像元进行比较。其次,根据该阈值将一张照片的每个像素划分为绿色植被像元或裸土像元。最后,利用OpenCV包根据绿色植被像元的位置勾出植被轮廓,然后将此轮廓与原始照片进行叠加比较。如果此轮廓与植被斑块的形状不匹配,则重新调整阈值直到与原始照片中的植被斑块非常匹配,然后统计植被斑块和裸地斑块面积占整个照片的面积比例即为植被盖度和裸地斑块占比。

1.3 数据处理

不同类型高寒草地植物群落的生殖枝高度、叶顶端高度、植被盖度、裸地斑块占比、植株密度、物种丰富度、地上生物量 and 功能群丰富度差异以及高寒草地植物功能群的物种丰富度和地上生物量差异采用单因素方差分析(one-way ANOVA)或者非参数检验(Kruskal-Wallis)进行分析。采用Pearson相关性分析评估物种丰富度与地上生物量的相关性,并进行线性拟合。所有数据分析均在SPSSAU(<https://spssau.com>)中完成。所有绘图均使用R软件(版本4.3.2;<https://www.r-project.org>)中的tidyverse^[28]包和ggpubr^[29]包完成。

2 结果与分析

2.1 高寒草地植物群落特征

不同类型高寒草地植物群落生殖枝高度、叶顶端高度、植被盖度、裸地斑块占比、植株密度、物种丰富度和地上生物量均具有显著差异(图2, $P < 0.05$)。高寒荒漠植被生殖枝和叶顶端高度平均值分别为30.65和21.76

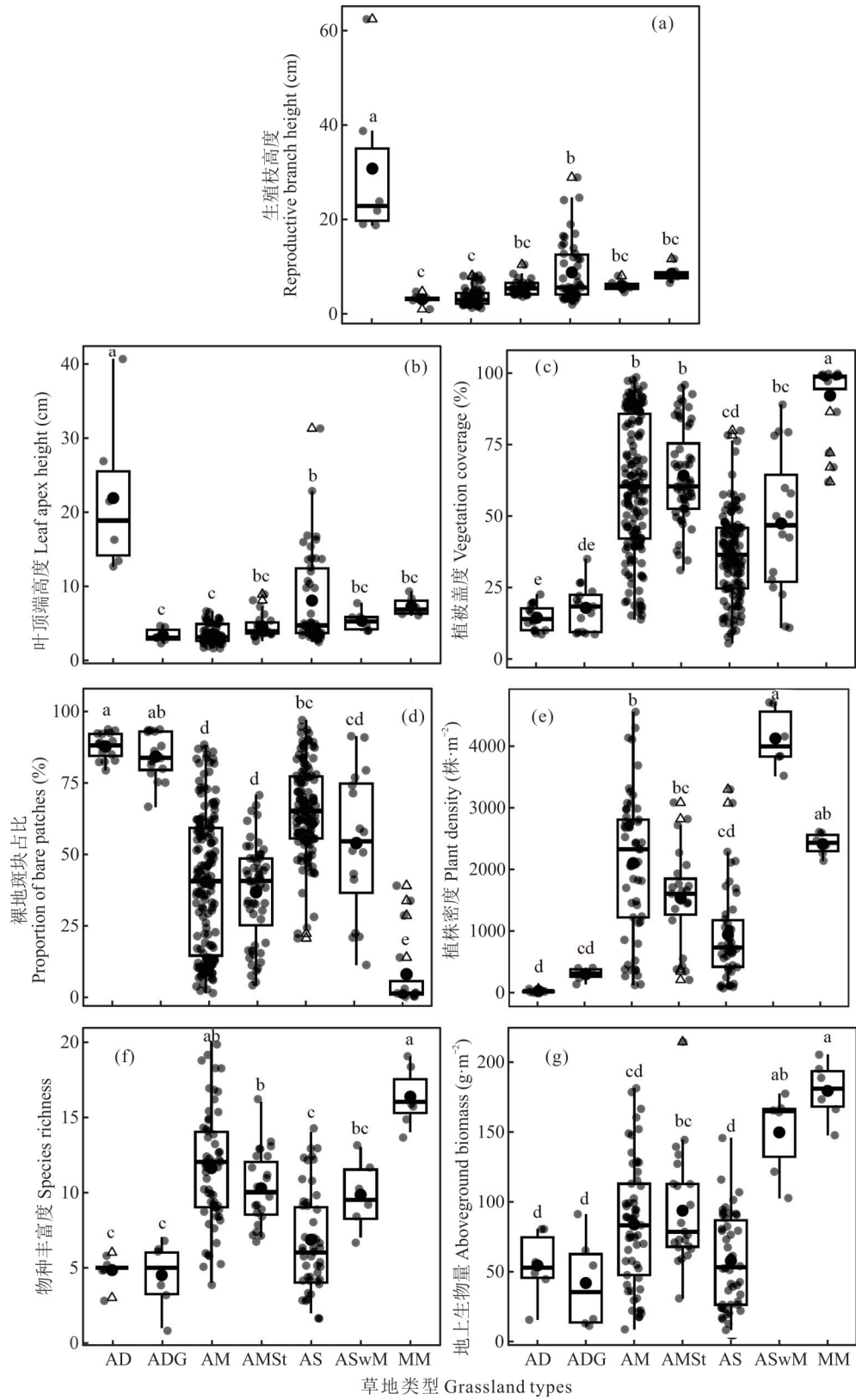


图2 不同类型高寒草地植物群落特征

Fig. 2 Plant community characteristics of different types of alpine grassland

AD: 高寒荒漠 Alpine desert; ADG: 高寒荒漠草原 Alpine desert grassland; AM: 高寒草甸 Alpine meadow; AMSt: 高寒草甸草原 Alpine meadow steppe; AS: 高寒草原 Alpine steppe; ASwM: 高寒沼泽草甸 Alpine swamp meadow; MM: 山地草甸 Mountain meadow. 灰色实心点表示所有样方的观测值, 黑色实心点表示平均值, 三角形表示离群值. 不同小写字母表示不同草地类型平均值在0.05水平差异显著. 下同. Solid gray dots represent the observed values of all quadrats, solid black dots represent the mean values, and triangles represent outliers. Different lowercase letters indicate the significant differences among the mean values of different grassland types at the level of 0.05. The same below.

cm,高寒草甸草原、高寒草原、高寒沼泽草甸和山地草甸生殖枝和叶顶端高度约为4~9 cm,而高寒荒漠草原和高寒草甸均不足4 cm(图2a,b)。山地草甸植被盖度高达91.73%,而高寒荒漠和高寒荒漠草原植被盖度都在20%以下,其余类型草地植被盖度为36.02%~64.03%(图2c)。裸地斑块占比与植被盖度表现出相反的变化趋势,高寒荒漠和高寒荒漠草原裸地斑块占比都在80%以上,而山地草甸裸地斑块占比仅为8.27%,其余类型草地裸地斑块占比为35.97%~63.98%(图2d)。高寒沼泽草甸植株密度在7种类型草地中最高,为4111株·m⁻²,而高寒荒漠仅有33株·m⁻²,高寒荒漠草原和高寒草原分别为307和945株·m⁻²,高寒草甸、高寒草甸草原和山地草甸植株密度为1538~2407株·m⁻²(图2e)。山地草甸物种丰富度最高,约为16种,高寒草甸次之,约为12种,高寒草甸草原、高寒草原和高寒沼泽草甸物种丰富度约为7~10种,而高寒荒漠和高寒荒漠草原均不足5种(图2f)。山地草甸和高寒沼泽草甸地上生物量分别为179.19和149.46 g·m⁻²,高寒草甸和高寒草甸草原地上生物量约为90 g·m⁻²,高寒荒漠、高寒荒漠草原和高寒草原都低于58 g·m⁻²(图2g)。

2.2 高寒草地植物功能群物种丰富度和地上生物量

不同类型高寒草地植物功能群丰富度具有显著差异(图3, $P < 0.05$)。山地草甸功能群丰富度约为5种,显著高于其他类型草地,而高寒荒漠草原功能群丰富度只有2种,其余类型草地功能群丰富度为3~4种。

从高寒草地系统整体来看,各功能群物种丰富度中杂类草表现最高,约为5种,禾本科和莎草科均为2种左右,豆科、毒害草和灌木的平均值都不足1种(图4a)。从不同草地类型来看,除高寒荒漠中灌木和禾本科以及高寒沼泽草甸中莎草科功能群的物种丰富度高于杂类草外(图4b,g),其余类型草地中杂类草功能群对群落物种丰富度的贡献最高。其中,山地草甸的杂类草物种丰富度高达8种,约占其总物种丰富度的50%(图4h),高寒荒漠草原中杂类草物种丰富度占比更是达到了75%左右(图4c),但是高寒草原中禾本科也有较高的物种丰富度,占比为35%左右(图4f)。此外,在高寒草甸、高寒草甸草原和高寒草原中,禾本科植物物种逐渐增加,而莎草科逐渐减少。

从高寒草地系统整体来看,各功能群地上生物量表现为杂类草显著高于其他功能群,为35.55 g·m⁻²;莎草科的地上生物量为26.19 g·m⁻²,是禾本科的2倍;豆科、毒害草和灌木的地上生物量均不足3 g·m⁻²(图4a)。从不同草地类型来看,高寒草甸中杂类草和莎草科地上生物量均在35 g·m⁻²左右,山地草甸中两者均在75 g·m⁻²左右,都是群落生物量的主要贡献功能群(图4d,h);而在高寒沼泽草甸中,莎草科的地上生物量高达145.43 g·m⁻²,贡献了群落总量的90%以上(图4g);其他类型草地中,功能群的地上生物量特征与物种丰富度相似。高寒草甸、高寒草甸草原、高寒草原的禾本科和莎草科地上生物量变化趋势同物种丰富度一致,禾本科占比增加,莎草科占比逐渐减少。

2.3 高寒草地植物功能群物种丰富度与地上生物量的关系

整体来看,高寒草地植物群落物种丰富度与地上生物量,以及功能群丰富度与地上生物量均表现为极显著正相关关系(图5, $P < 0.001$)。从不同草地类型来看(图5a),除高寒荒漠植物群落的物种丰富度与地上生物量关系呈负相关外,高寒草甸草原、高寒沼泽草甸和山地草甸植物群落的物种丰富度与地上生物量呈正相关,高寒荒漠草原、高寒草甸和高寒草原表现为显著正相关关系($P < 0.05$)。从功能群来看(图5b),除山地草甸植物功能群丰富度与地上生物量的关系呈负相关外,高寒荒漠草原、高寒草甸草原和高寒沼泽草甸植物群落的功能群丰富度与地上生物量呈正相关,高寒草甸和高寒草原表现为极显著正相关关系($P < 0.001$)。

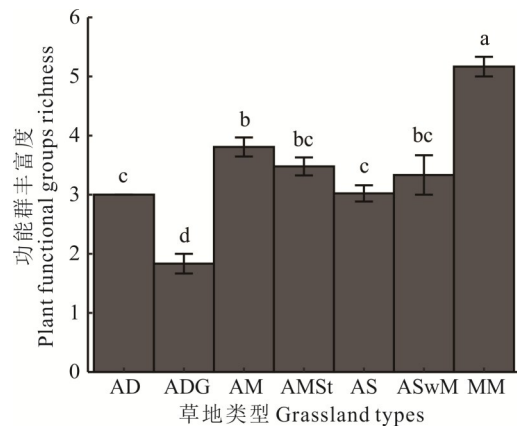


图3 不同类型高寒草地植物功能群丰富度

Fig. 3 Plant functional groups richness in different types of alpine grassland

误差棒表示±标准误差,下同。The error bar means ± standard error, the same below.

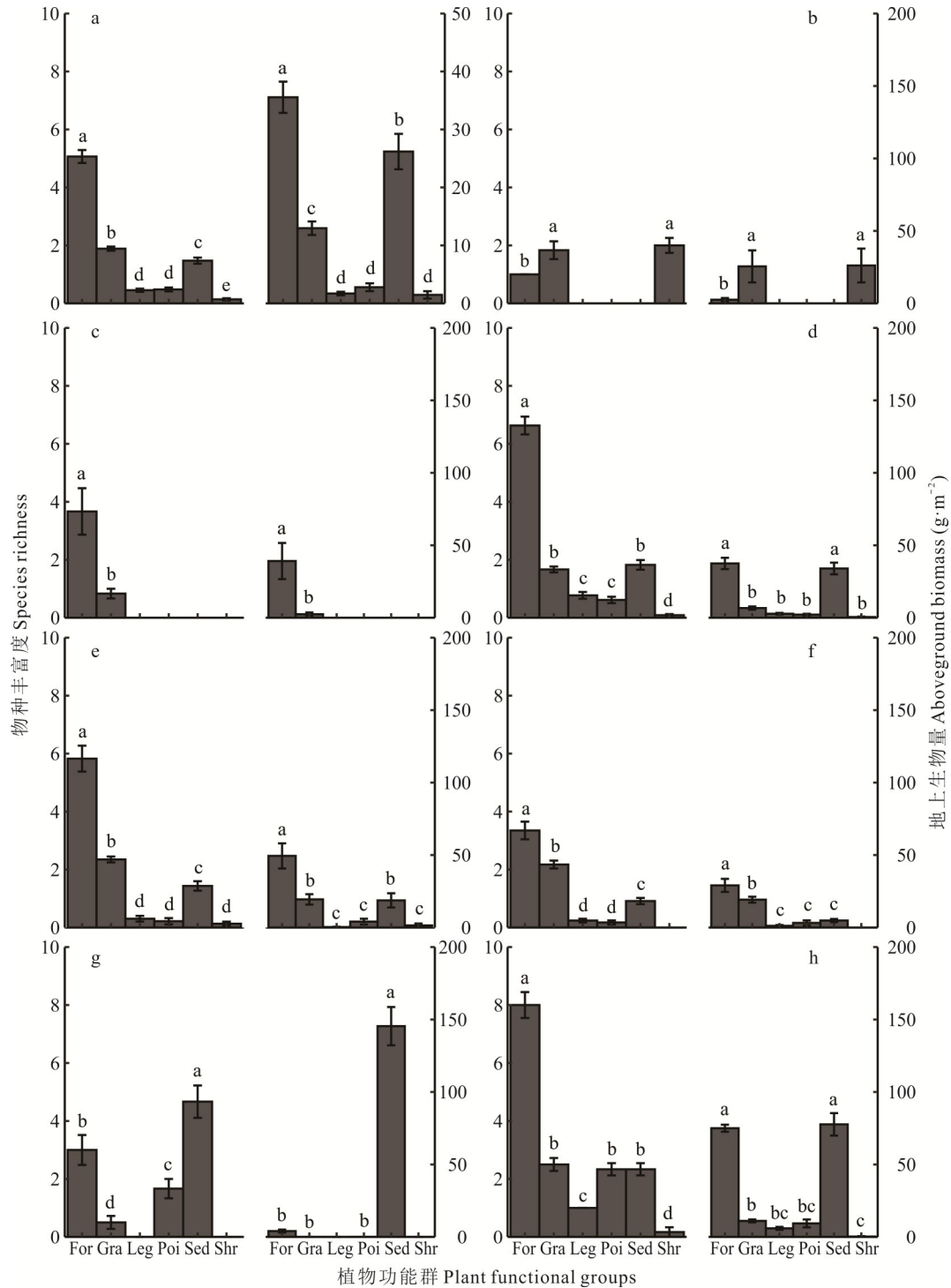


图4 高寒草地植物功能群物种丰富度和地上生物量

Fig. 4 Species richness and aboveground biomass of plant functional groups in alpine grassland

(a): 高寒草地系统 Alpine grassland system; (b): 高寒荒漠 Alpine desert; (c): 高寒荒漠草原 Alpine desert grassland; (d): 高寒草甸 Alpine meadow; (e): 高寒草甸草原 Alpine meadow steppe; (f): 高寒草原 Alpine steppe; (g): 高寒沼泽草甸 Alpine swamp meadow; (h): 山地草甸 Mountain meadow. 下同 The same below. For: 杂类草 Forbs; Gra: 禾本科 Grasses; Leg: 豆科 Legumes; Poi: 毒害草 Poisonous-weeds; Sed: 莎草科 Sedges; Shr: 灌木 Shrubs. 不同小写字母表示同类型草地不同功能群平均值在0.05水平差异显著。Different lowercase letters indicate the significant differences among the mean value of different functional groups of the same type grassland at the level of 0.05.

整体来看,高寒草地6种功能群植物物种丰富度与地上生物量均呈极显著正相关关系($P < 0.001$,图6a)。但是不同类型高寒草地功能群的物种丰富度与地上生物量关系略有差异。其中,高寒荒漠禾本科植物的物种丰富

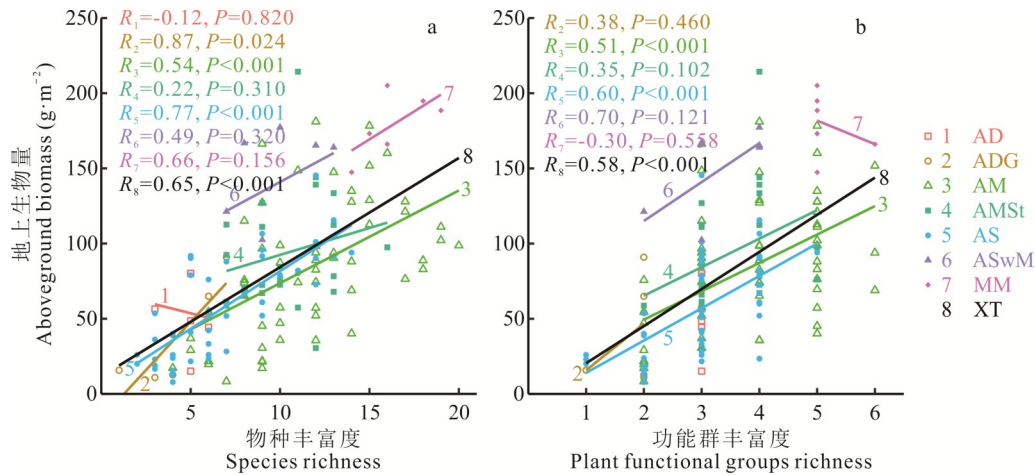


图 5 高寒草地植物群落物种丰富度和功能群丰富度与其地上生物量的关系

Fig. 5 Relationship between species richness and functional group richness of plant communities and aboveground biomass in alpine grassland

XT: 高寒草地系统 Alpine grassland system.

度与地上生物量呈显著负相关关系 ($P < 0.05$), 而灌木呈正相关关系 (图 6b)。高寒荒漠草原和高寒沼泽草甸各功能群植物的物种丰富度与地上生物量都呈正相关关系 (图 6c, g)。高寒草甸和高寒草原各功能群植物的物种丰富度与地上生物量均呈显著正相关关系 ($P < 0.05$, 图 6d, f)。高寒草甸草原中除禾本科植物的物种丰富度与地上生物量呈负相关关系外, 其余 5 种功能群均呈显著正相关关系 ($P < 0.05$, 图 6e)。山地草甸中杂类草的物种丰富度与地上生物量呈负相关关系, 而禾本科、毒害草、莎草科和灌木呈正相关关系 (图 6h)。

3 讨论

3.1 不同类型高寒草地植物群落分异特征

不同类型高寒草地植物群落具有显著的分异特征, 与前人研究结果相似^[30]。这可能是由于不同类型高寒草地的气候条件和土壤理化性质不同^[31-32], 从而影响了植物物种组成和生长状况。高寒荒漠和高寒荒漠草原分布区气候干燥、蒸发量大, 土壤有机质含量低^[33], 植被以耐旱型灌木和草本为主。尽管高寒荒漠植株高大, 但是由于稀疏的植被覆盖、较少的物种组成和严酷的生长条件导致这两类草地具有较低的地上生物量。高寒草甸、高寒草甸草原和高寒草原在祁连山地区广泛分布。高寒草甸的水热条件和土壤养分含量优于高寒草原, 使得两种草地除了杂类草外, 高寒草甸莎草科植物居多, 高寒草原禾本科植物居多, 进而表现为高寒草甸具有较高的植被盖度、植株密度和物种多样性, 但是高寒草原的植被高度较高。山地草甸主要分布在降水充足的山坡峡谷, 土壤水分条件良好且有机质含量高, 导致其植被盖度、物种组成和地上生物量在 7 种草地中最高。高寒沼泽草甸分布区土壤水分含量较高, 物种组成以西藏嵩草为主, 虽然植被低矮, 但植株密度极高。

3.2 不同类型高寒草地植物功能群物种丰富度和地上生物量特征

功能群是具有相似性状或功能物种的集合, 其丰富度变化可能与物种相似。本研究结果表明不同类型高寒草地不同功能群的物种丰富度和地上生物量具有显著差异。这主要是因为物种丰富度和地上生物量受环境因子影响^[34], 而水热因子是主要的环境因子^[13, 35]。有研究表明, 祁连山草地的物种丰富度或地上生物量与年降水量和年均温显著相关^[36]。杂类草作为物种组成最多的功能群, 能广泛适应各类气候条件, 是高寒草地植物群落物种丰富度和地上生物量的主要贡献者。但是在高寒荒漠和高寒沼泽草甸, 杂类草并不是主要功能群, 这可能是由于水热差异进一步导致的草地优势种不同以及环境养分供给的能力高低直接决定和影响着植物不同功能群的表现^[9, 37]。高寒荒漠以早生的灌木和芨芨草为优势种, 导致该草地类型灌木和禾本科植物的物种丰富度和地上生物量高。高寒沼泽草甸以湿生的西藏嵩草和矮生嵩草为优势种, 由于沼泽草甸在生长季长期处于积水和水分过饱和状态, 在某种程度上对中生植物形成了水分胁迫, 导致其物种丰富度和功能群丰富度下降, 而适于湿生的莎草

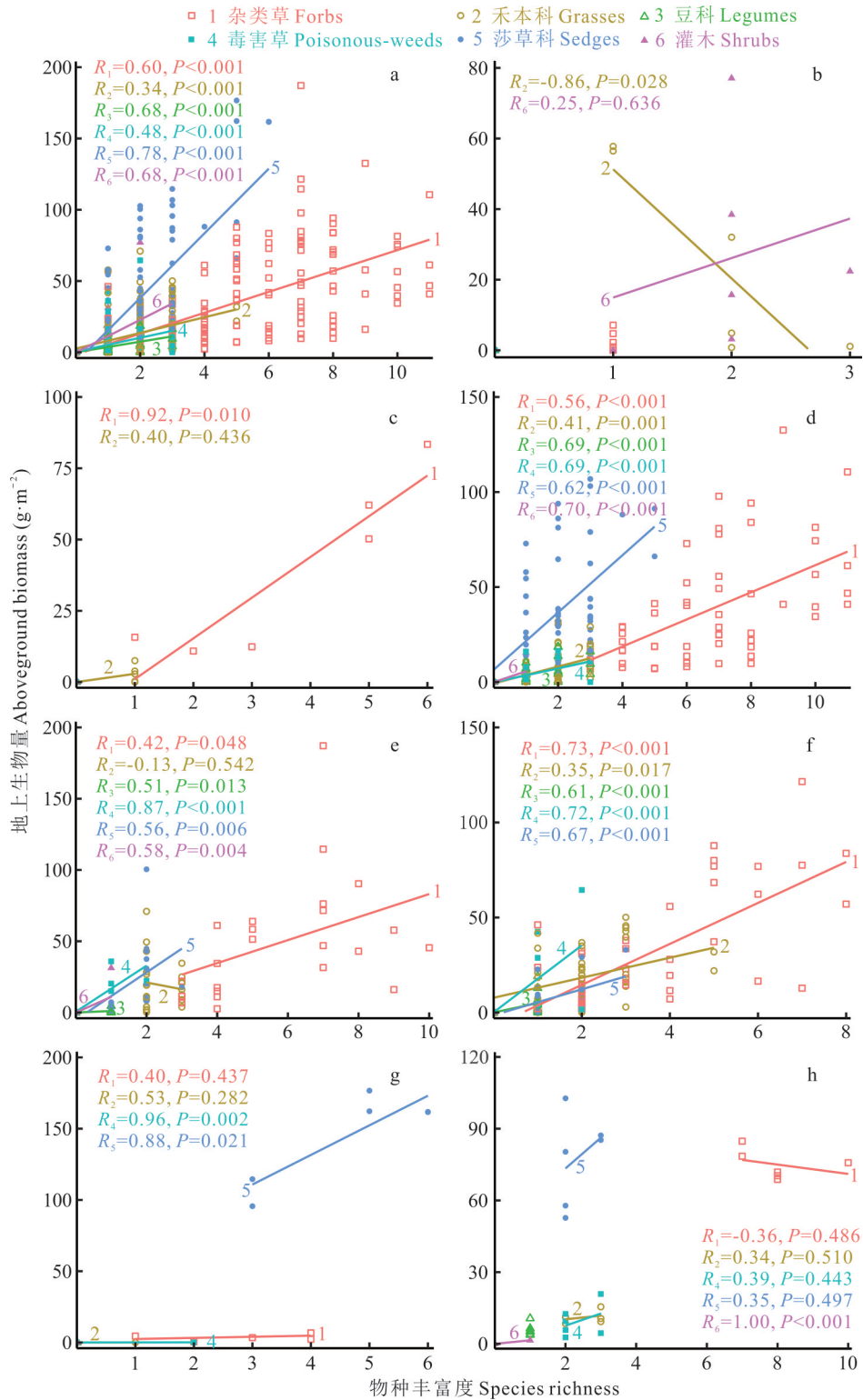


图6 高寒草地植物功能群物种丰富度与地上生物量的关系

Fig. 6 Relationship between species richness and aboveground biomass of plant functional groups in alpine grassland

科功能群生物量明显增加^[12]。高寒草甸、高寒草甸草原和高寒草原随着水热条件和土壤养分的下降^[38],莎草科植物逐渐减少,而耐旱耐贫瘠的禾本科植物比例增加。

3.3 高寒草地植物群落及功能群物种丰富度与地上生物量的关系

草地物种丰富度与地上生物量表现出多种形式的关系,有正相关^[13,16,39]、负相关^[40]、单峰曲线^[30]和无明显关系^[19]等。本研究结果表明高寒草地群落功能群丰富度与地上生物量、功能群和群落层面物种丰富度与地上生物

量总体上呈正相关关系,说明物种多样性以及功能群多样性的维持有利于提高草地生产力。不同功能群及其物种在资源利用上具有互补效应^[17,39],物种丰富度增加有利于提高资源周转和利用效率,从而导致生物量增加。但值得注意的是,不同类型草地或不同功能群物种丰富度与地上生物量也存在负相关关系,这可能是由于除水热条件和资源差异导致的物种丰富度和地上生物量不同外,不同类型草地的优势种和物种本身特征^[37,41]也是影响物种丰富度与生物量关系的重要因素。株丛高大的灌木和芨芨草是高寒荒漠生物量的主要贡献者,该草地类型也存在植株低矮的杂类草和禾草,虽然能直接增加物种多样性,但对生物量的影响较小。当低矮植物增多而株丛较高的植物减少时,高寒荒漠植物群落和禾本科功能群的物种丰富度与地上生物量就会呈现出负相关关系。另外,本研究结果表明如果不考虑草地类型的差异,从高寒草地系统整体进行分析,物种丰富度与地上生物量的关系均呈极显著正相关。这可能是由于当研究尺度扩大到高等级时,个体和种群优势的影响会被削弱,从而表现出另一种形式的物种丰富度与地上生物量关系^[16,35,42-43]。

此外,样本数量的多少可能会影响物种丰富度与地上生物量关系。本研究中样本量较多的高寒草甸、高寒草甸草原和高寒草原物种丰富度与地上生物量关系显著性均强于其他类型草地。尽管山地草甸具有最高的物种多样性和地上生物量,但是群落的功能群丰富度与地上生物量,以及杂类草的物种丰富度与地上生物量呈负相关关系,这可能也与该草地类型调查样方数量较少有关。

4 结论

祁连山国家公园青海片区不同类型高寒草地植物群落具有明显的分异特征,在干旱的高寒荒漠和高寒荒漠草原整体表现出植被覆盖度低、生物量小和物种丰富度少的特征,随着生境的逐渐变湿,山地草甸和高寒沼泽草甸植被盖度、物种多样性和生物量均表现为显著增加的趋势。不同类型高寒草地植物功能群组成具有明显区别且各功能群对物种丰富度和地上生物量的贡献存在显著差异,杂类草是多种高寒草地的主要功能群,禾本科和莎草科植物对群落物种多样性和生产力水平具有重要的影响。在植物群落和功能群两个维度,地上生物量呈现出随物种丰富度增加而增加的趋势,表明功能群物种多样性的增加有利于维持高寒草地生态系统生产力和生态服务功能。

参考文献 References:

- [1] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems. *Nature*, 1996, 379(6567): 718-720.
- [2] Tilman D, Lehman C L, Thomson K T. Plant diversity and ecosystem productivity: theoretical considerations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(5): 1857-1861.
- [3] Zhang Z H, Zhou H K, Zhao X Q, *et al.* Relationship between biodiversity and ecosystem functioning in alpine meadows of the Qinghai-Tibet Plateau. *Biodiversity Science*, 2018, 26(2): 111-129.
张中华, 周华坤, 赵新全, 等. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系. *生物多样性*, 2018, 26(2): 111-129.
- [4] Huang J H, Bai Y F, Han X G. Effects of species diversity on ecosystem functioning: mechanisms and hypotheses. *Biodiversity Science*, 2001, 9(1): 1-7.
黄建辉, 白永飞, 韩兴国. 物种多样性与生态系统功能: 影响机制及有关假说. *生物多样性*, 2001, 9(1): 1-7.
- [5] Zhang Q G, Zhang D Y. Biodiversity and ecosystem functioning: recent advances and trends. *Biodiversity Science*, 2003, 11(5): 351-363.
张全国, 张大勇. 生物多样性与生态系统功能: 最新的进展与动向. *生物多样性*, 2003, 11(5): 351-363.
- [6] Barnosky A, Matzke N, Tomiya S, *et al.* Has the earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 2011, 471(7336): 51-57.
- [7] Wei F W, Nie Y G, Miao H X, *et al.* Advancements of the researches on biodiversity loss mechanisms. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(6): 430-437.
魏辅文, 聂永刚, 苗海霞, 等. 生物多样性丧失机制研究进展. *科学通报*, 2014, 59(6): 430-437.
- [8] Wang J B, Zhang D G, Cao G M, *et al.* Regional characteristics of the alpine meadow degradation succession on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(2): 1-10.

- 王建兵, 张德罡, 曹广民, 等. 青藏高原高寒草甸退化演替的分区特征. 草业学报, 2013, 22(2): 1—10.
- [9] Zi H B, Ade L J, Liu M, *et al.* Difference of community characteristics and niche of dominant species in different grassland types of alpine meadow. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2016, 22(4): 546—554.
字洪标, 阿的鲁骥, 刘敏, 等. 高寒草甸不同类型草地群落特征及优势种植物生态位差异. 应用与环境生物学报, 2016, 22(4): 546—554.
- [10] Ma S L. It is urgent to protect biodiversity on the Qinghai—Tibet Plateau//Proceedings of the national symposium on biodiversity conservation and control of alien harmful species. Shanghai: Chinese Society for Environmental Sciences, 2008: 79—81.
马生林. 保护青藏高原生物多样性刻不容缓//全国生物多样性保护及外来有害物种防治交流研讨会论文集. 上海: 中国环境科学学会, 2008: 79—81.
- [11] Fu B J, Ouyang Z Y, Shi P, *et al.* Current condition and protection strategies of Qinghai—Tibet Plateau ecological security barrier. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(11): 1298—1306.
傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 等. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策. 中国科学院院刊, 2021, 36(11): 1298—1306.
- [12] Wang C T, Long R J, Ding L M. The effects of differences in functional group diversity and composition on plant community productivity in four types of alpine meadow communities. Biodiversity Science, 2004, 12(4): 403—409.
王长庭, 龙瑞军, 丁路明. 高寒草甸不同草地类型功能群多样性及组成对植物群落生产力的影响. 生物多样性, 2004, 12(4): 403—409.
- [13] Yang Y H, Rao S, Hu H F, *et al.* Plant species richness of alpine grasslands in relation to environmental factors and biomass on the Tibetan Plateau. Biodiversity Science, 2004, 12(1): 200—205.
杨元合, 饶胜, 胡会峰, 等. 青藏高原高寒草地植物物种丰富度及其与环境因子和生物量的关系. 生物多样性, 2004, 12(1): 200—205.
- [14] Zhang C H. Effects of grazing and fertilization on community productivity and species richness in eastern alpine meadow of Tibetan plateau. Pratacultural Science, 2014, 31(12): 2293—2300.
张春花. 放牧方式和施肥梯度对高寒草甸群落生产力和物种丰富度的影响. 草业科学, 2014, 31(12): 2293—2300.
- [15] Zheng Q Y, Liu G, Xiao B X, *et al.* Effect of grazing intensity on species richness and biomass of alpine meadow in northwest Sichuan. Pratacultural Science, 2017, 34(7): 1390—1396.
郑群英, 刘刚, 肖冰雪, 等. 放牧对川西北高寒草甸植物物种丰富度和生物量的影响. 草业科学, 2017, 34(7): 1390—1396.
- [16] Du G Z, Qin G L, Li Z Z, *et al.* Relationship between species richness and productivity in an alpine meadow plant community. Chinese Journal of Plant Ecology, 2003, 27(1): 125—132.
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. 植物生态学报, 2003, 27(1): 125—132.
- [17] Hu N, Fan Y L, Ding S Y, *et al.* Progress in researches on plant functional groups of terrestrial ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3302—3311.
胡楠, 范玉龙, 丁圣彦, 等. 陆地生态系统植物功能群研究进展. 生态学报, 2008, 28(7): 3302—3311.
- [18] Niu Y J, Yang S W, Wang G Z, *et al.* Relationship between plant species, life form, functional group diversity, and biomass under grazing disturbance for four years on an alpine meadow. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): 4733—4743.
牛钰杰, 杨思维, 王贵珍, 等. 放牧干扰下高寒草甸物种、生活型和功能群多样性与生物量的关系. 生态学报, 2018, 38(13): 4733—4743.
- [19] Tang J L, Ren Z G, Zhang X Y, *et al.* Relationships between species diversity and productivity of different functional groups in a typical steppe in Inner Mongolia. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(7): 1939—1949.
汤靖磊, 任治国, 张学渊, 等. 典型草原不同功能群物种多样性与生产力关系研究. 草地学报, 2023, 31(7): 1939—1949.
- [20] Wang J H, Chen W. Qilian Mountain natural complex and its ecological efficiency. Journal of Hexi University, 2002, 18(2): 113—117.
王桔红, 陈文. 祁连山自然综合体及其生态效能. 河西学院学报, 2002, 18(2): 113—117.
- [21] Li X, Gou X H, Wang N L, *et al.* Tightening ecological management facilitates green development in the Qilian Mountains. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2928—2937.
李新, 勾晓华, 王宁练, 等. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复. 科学通报, 2019, 64(27): 2928—2937.
- [22] Wang X Y, Yang D W, Zhang L L, *et al.* The causes of grassland degradation and restoration strategies in Qilian Mountain

- National Park. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2020(6): 81–86.
- 王新源, 杨栋武, 张莉丽, 等. 祁连山国家公园草地退化成因及恢复对策. *草学*, 2020(6): 81–86.
- [23] Wang T, Gao F, Wang B, *et al.* Status and suggestions on ecological protection and restoration of Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(2): 229–234.
- 王涛, 高峰, 王宝, 等. 祁连山生态保护与修复的现状问题与建议. *冰川冻土*, 2017, 39(2): 229–234.
- [24] Zhang J T, Zhang C Q. Digital elevation model (DEM) data with the spatial resolution of 90 m in the Qilian Mountains. [2020-11-30]. National Special Environment and Function of Observation and Research Stations Shared Service Platform (<http://www.ncdc.ac.cn/>).
- 张举涛, 张成琦. 祁连山地区 90 m 分辨率数字高程模型 (DEM) 数据. [2020-11-30]. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn/>).
- [25] Peng S, Ding Y, Liu W, *et al.* 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931–1946.
- [26] Yi S. FragMAP: a tool for long-term and cooperative monitoring and analysis of small-scale habitat fragmentation using an unmanned aerial vehicle. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(8/10): 2686–2697.
- [27] Yi S, Chen J, Qin Y, *et al.* The burying and grazing effects of plateau pika on alpine grassland are small: a pilot study in a semiarid basin on the Qinghai–Tibet Plateau. *Biogeosciences*, 2016, 13(22): 6273–6284.
- [28] Wickham H, Averick M, Bryan J, *et al.* Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 2019, 4(43): 1686.
- [29] Kassambara A. ggpubr: “ggplot2” based publication ready plots. R package version 0.6.0. [2023-2-10]. <https://rpkgs.datanovia.com/ggpubr/>.
- [30] Anwar M, Yang Y H, Guo Z D, *et al.* Relationship between the species richness and the productivity of alpine steppes in Bayanbulak, Xinjiang. *Arid Zone Research*, 2006, 23(2): 289–294.
- 安尼瓦尔·买买提, 杨元合, 郭兆迪, 等. 新疆巴音布鲁克高山草地物种丰富度与生产力的关系. *干旱区研究*, 2006, 23(2): 289–294.
- [31] Ma W W. Comprehensive evaluation of climatic conditions on vegetation growth status of alpine grassland in Qinghai Province. *Qinghai Prataculture*, 2023, 32(2): 44–52.
- 马文文. 基于气候因子的青海省高寒草地植被生长状况综合评价. *青海草业*, 2023, 32(2): 44–52.
- [32] Li Y L, Liu X N, Zhang D G, *et al.* Vegetation characteristics and soil physicochemical properties of different grassland types of temperate steppe in Longzhong. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(11): 3405–3414.
- 李娅丽, 柳小妮, 张德罡, 等. 陇中温性草原不同草地型植被特征和土壤理化性质研究. *草地学报*, 2023, 31(11): 3405–3414.
- [33] Chen Z, Xu H Y, Shu Q L, *et al.* Physicochemical properties of soil and enzyme activity characteristics in various grassland types of the Qilian Mountains. *Journal of Green Science and Technology*, 2024, 26(2): 53–59.
- 陈卓, 徐海燕, 殊秋丽, 等. 祁连山不同草地类型土壤理化性质及酶活性特征. *绿色科技*, 2024, 26(2): 53–59.
- [34] Li X, Yu H B, Liu Y X, *et al.* Study on community biomass and diversity of different grassland types in Xilingol. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(1): 196–204.
- 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. *草地学报*, 2022, 30(1): 196–204.
- [35] 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. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(6): 74–81.
- 郑晓翔, 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. *中国草地学报*, 2008, 30(6): 74–81.
- [36] 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. *Pratacultural Science*, 2020, 37(10): 2012–2021.
- 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. *草业科学*, 2020, 37(10): 2012–2021.
- [37] Huang Z L. The relationship between plant species richness and production//The 4th national symposium on biodiversity conservation and sustainable use. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002: 244–250.
- 黄忠良. 试论植物物种多样性与生产力之间的关系//第四届全国生物多样性保护与持续利用研讨会. 北京: 中国林业出版社, 2002: 244–250.
- [38] Qin Y, Yi S, Ren S, *et al.* Responses of typical grasslands in a semi-arid basin on the Qinghai–Tibetan Plateau to climate change and disturbances. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(3): 1421–1431.
- [39] Tilman D, Reich P B, Knops J, *et al.* Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science*, 2001, 294

(5543): 843–845.

- [40] Qin Y. Effect of different land utilization on soil nutrients and grassland vegetation in alpine meadow. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.
秦彧. 不同土地利用方式对玛曲高寒草地土壤养分与植被的影响. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [41] Zhang Q G, Zhang D Y. Biodiversity and ecosystem functioning: recent advances and controversies. *Biodiversity Science*, 2002, 10(1): 49–60.
张全国, 张大勇. 生物多样性与生态系统功能: 进展与争论. *生物多样性*, 2002, 10(1): 49–60.
- [42] Waide R B, Willig M R, Steiner C F, *et al.* The relationship between productivity and species richness. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1999, 30: 257–300.
- [43] Ma W H, Fang J Y. The relationship between species richness and productivity in four typical grasslands of northern China. *Biodiversity Science*, 2006, 14(1): 21–28.
马文红, 方精云. 中国北方典型草地物种丰富度与生产力的关系. *生物多样性*, 2006, 14(1): 21–28.