

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.044.

李苗苗, 叶茂, 陈维龙, 等. 阿勒泰林区不同草地群落特征对水热因子的响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6):299-308.

Li Miaomiao, Ye Mao, Chen Weilong, et al. Response of Different Grassland Community Characteristics to Hydrothermal Factors in Altai Forest Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6):299-308.

## 阿勒泰林区不同草地群落特征对水热因子的响应

李苗苗<sup>1,2</sup>, 叶茂<sup>1,2</sup>, 陈维龙<sup>1,2</sup>, 潘晓婷<sup>1,2</sup>, 曾国燕<sup>1,2</sup>, 贺清智<sup>1,2</sup>, 张西<sup>1,2</sup>

(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重点实验室, 乌鲁木齐 830054)

**摘要:** [目的] 探讨阿勒泰林区不同草地群落植物物种丰富度(SR)对年平均温度(MAT)、降水(MAP)、海拔的响应, 为该区退化草地恢复与管理提供科学依据。[方法] 选取阿勒泰林区 600~3 914 m 范围内的 5 种草地类型作为研究对象, 采用样方法对 165 个样方的物种名录进行了调查, 分析了各类草地植物科属种的变化特征。[结果] (1) 在新疆阿勒泰林区草地中, 菊科、禾本科和豆科为优势科, 其中碱茅属、蒲公英属、羽衣草属和发草属表现为优势属; (2) 物种丰富度(SR)在不同草地变化有所不同, 山地草甸草原物种丰富度最高(8.86), 而高寒草甸(4.75)最低。 (3) 全部样地 SR 与 MAP, MAT 和海拔呈线性关系; 在荒漠草原的 SR 与 MAP 和 MAT 的关系表现为先增加后降低的趋势, 同时与海拔呈现先降低再增加的变化趋势。在山地草原中, 其 SR 与 MAP, MAT 无明显相关性, 与海拔的关系呈峰型分布。山地草甸草原的 SR 与 MAP、海拔无明显相关性, 与 MAT 的关系呈峰型分布。山地草甸的 SR 与 MAP、海拔无相关性, 与 MAT 呈峰型关系; 高寒草甸的 SR 与 MAP、海拔均呈先降低后增加的趋势, 与 MAT 呈峰型关系。[结论] 不同草地类型对温度、降水响应的差异是由于植被类型和温度、降水的空间分异性造成的; 而不同海拔梯度水热条件不同, 导致物种丰富度之间存在一定差异。

**关键词:** 植物丰富度; 草地类型; 海拔; 年均降水; 年均温度

中图分类号: Q948.15

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0299-10

## Response of Different Grassland Community Characteristics to Hydrothermal Factors in Altai Forest Area

Li Miaomiao<sup>1,2</sup>, Ye Mao<sup>1,2</sup>, Chen Weilong<sup>1,2</sup>, Pan Xiaoting<sup>1,2</sup>,  
Zeng Guoyan<sup>1,2</sup>, He Qingzhi<sup>1,2</sup>, Zhang Xi<sup>1,2</sup>

(1.School of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054,

China; 2.Xinjiang Key Laboratory of Arid Zone Lake Environment and Resources, Urumqi 830054, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the response of plant species richness (SR) of different grassland communities to mean annual temperature (MAT), precipitation (MAP), and altitude in Altai Forest Region, and to provide scientific basis for the restoration and management of degraded grassland in this region. [Methods] Five grassland types within the range of 600~3 914 m in Altai Forest Region were selected as the research objects. The species lists of 165 sample plots were investigated using sample methods to analyze the changing characteristics of the family and genus species of various types of grassland plants. [Results] (1) The composition of grassland species in Altai forest area of Xinjiang was mainly dominated by *Asteraceae*, *Poaceae* and *Fabaceae*, with *Puccinellia*, *Taraxacum*, *Alchemilla*, and *Deschampsia* as the dominant genera. However, the proportion of each family and genus in different types of grassland varied. (2) Species richness (SR) varied across grasslands, with mountain meadow grassland having the highest

收稿日期: 2024-06-09

修回日期: 2024-06-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(42161004); NSFC-新疆联合资助项目(U1803245)

第一作者: 李苗苗(1996—), 女, 甘肃平凉人, 硕士, 研究方向为干旱区生态水文过程研究。E-mail: limiao\_ly@163.com

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

<http://stbcyj.paperonce.org>

species richness (8.86) and alpine meadow (4.75) the lowest. (3) Differences in the response of species richness of different types of grassland to mean annual temperature (MAT) and precipitation (MAP) in the Altay forest region of Xinjiang were mainly due to differences in vegetation types and spatial variability of climatic factors, whereas their variability for elevation originated from the range of altitudinal gradients and large-scale climatic characteristics of the study area. [Conclusion] Differences in the response of different grassland types to temperature and precipitation are due to the spatial heterogeneity of vegetation types and temperature and precipitation; and the different hydrothermal conditions at different altitudinal gradients lead to some differences between species richness.

**Keywords:** plant richness; grassland type; elevation; mean annual precipitation; mean annual temperature

在全球气候变化对植物影响的大背景下,干旱、盐碱化等环境问题愈加严重,造成草地植物群落结构发生改变、裸地面积不断增加以及生产力下降,使草地生态系统稳定性和功能性下降<sup>[1]</sup>。同时,由于不合理放牧等外界原因,物种丰富度也面临生态系统功能需求增加的挑战<sup>[2]</sup>,这促使了更多学者对水热因子和物种丰富度之间关系进行深入研究。

温度是影响种子萌发和植被蒸散的关键因素,同时也是控制植物群落动态演变的主要因素<sup>[3]</sup>。Adler 的研究发现,随着温度的上升,草地中非禾本植物的数量呈现出显著的增长趋势<sup>[3]</sup>。Dirnbock 等的研究发现<sup>[4]</sup>,气候变化特别是温度和降水等关键因子的变动,使许多高山植物的原生境适宜性发生了变化,导致植物丰富度大幅下降。在 Konza 草原的研究中发现,降水与物种丰富度之间不呈正相关关系<sup>[5]</sup>。同时,一些研究也表明,草原对降水量的波动、持续时长以及频率等都表现出了高度的敏感性,因此,降水量的变化可能会对草原的物种构成、土壤养分平衡状态和碳循环速度产生深远的影响<sup>[6]</sup>。此外,海拔的变动也在一定程度上反映了气候的变迁,它通过改变水热条件的分布,进一步影响了物种的生存抉择和资源竞争,从而对物种丰富度产生了重要的影响<sup>[7]</sup>。在青藏高原的研究发现物种种类在中等海拔梯度时最高,随海拔升高呈单峰分布<sup>[8]</sup>。同时,也有学者提出不同区域的差异,即使是同一山体,阳坡和阴坡物种丰富度也明显不同<sup>[9]</sup>,揭示了水热因子对物种丰富度演变产生根本性影响。然而,因研究尺度及不同草地类型和特定水热因子的差异,物种丰富度与水热因子的关系至今还没有统一的定论。因此,如何充分了解物种丰富度与水热因子的关系需要进一步根据尺度对气候等多重因子进行深入探究,并依据研究结果针对不同区域植物物种特征采取合理的保护措施。

新疆草地为中国草地资源的重要组成部分,目前对新疆草地研究文献较多,根据研究尺度的差异,主要有以下几种类型:针对特定草地类型,如荒漠草原

等研究在不同处理条件下植物丰富度的变化特性<sup>[10]</sup>;另一些研究则以特定区域为研究对象,如天山北坡等,重点分析植物丰富度如何随环境因素的变化而变化<sup>[11]</sup>;还有一些研究基于对植物志的整理数据,将新疆作为一个整体,深入探究植物丰富度与气候之间的关联<sup>[12]</sup>。然而,这些大尺度的植物丰富度研究是基于植物志所提供的分布信息,通过运用统计或插值等技术方法,来获取新疆不同区域(如不同栅格或按县域划分)中草本植物丰富度<sup>[13]</sup>。在新疆草地植物丰富度变化的研究中,尽管已经取得了一些进展,但仍缺乏基于实测数据在小尺度上的研究。为此,本研究聚焦于新疆阿勒泰林区的五种草地类型,对这些草地类型中样方进行植物丰富度实测。依据这些实测数据,开展以下三个方面的研究:(1)不同草地类型和区域植物分布特征;(2)在不同草地类型物种丰富度变化有何差异?(3)不同草地类型物种丰富度对水热因子(海拔、年均降水、年均温度)的响应如何?研究清楚这些问题可以为阿勒泰林区草地物种演替与保护,及生态系统管理与草地资源调查奠定科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

中国新疆位于亚欧大陆中部,阿勒泰山脉地处新疆北部(东经 87°25′—88°42′,北纬 47°48′—48°39′),与蒙古国和俄罗斯接壤。阿勒泰山脉地形复杂多样,海拔 600~3 914 m。该地区属于温带半干旱大陆性气候,其中南北地区的气候差异较为明显。年均降雨量为 217.47 mm,降雨集中于 6—8 月,年平均气温 5℃。草地是新疆主要植被类型之一,沿着海拔梯度,阿勒泰林区草地类型具有明显的垂直分布特征且草地植被种类丰富,如碱茅(*Puccinellia distans*)、羽衣草(*Alchemilla japonica*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、蓍(*Achillea millefolium*)、蒺藜(*Polygonum aviculare*)、发草(*Deschampsia cespitosa*)等。

## 1.2 试验设计

于2020—2023年每年草地植物生物量达到最大时,对5种草地类型(荒漠草原、山地草原、山地草甸草原、山地草甸、高寒草甸)分别进行物种丰富度的调查。共布设55个20 m×20 m的大样方,并在每个样地内随机布设3个1 m×1 m的草地小样方,分别记录每个样方中的物种名录。同时,对地理信息(如经纬度、海拔)进行详尽的调查,涵盖编号和灾害等方

面。其中,荒漠草原(DS)包含14个大样方,42个小样方;山地草原(MS)为11个大样方,33个小样方;山地草甸草原(MMS)7个大样方,21个小样方;山地草甸(MM)16个大样方,48个小样方;高寒草甸(AM)7个大样方,21个小样方,如图1所示。年均温和年降水量通过GPS所测定的经纬度在全球1 km×1 km插值获取气候数据集WorldClim中(<https://www.worldclim.org/>)提取。

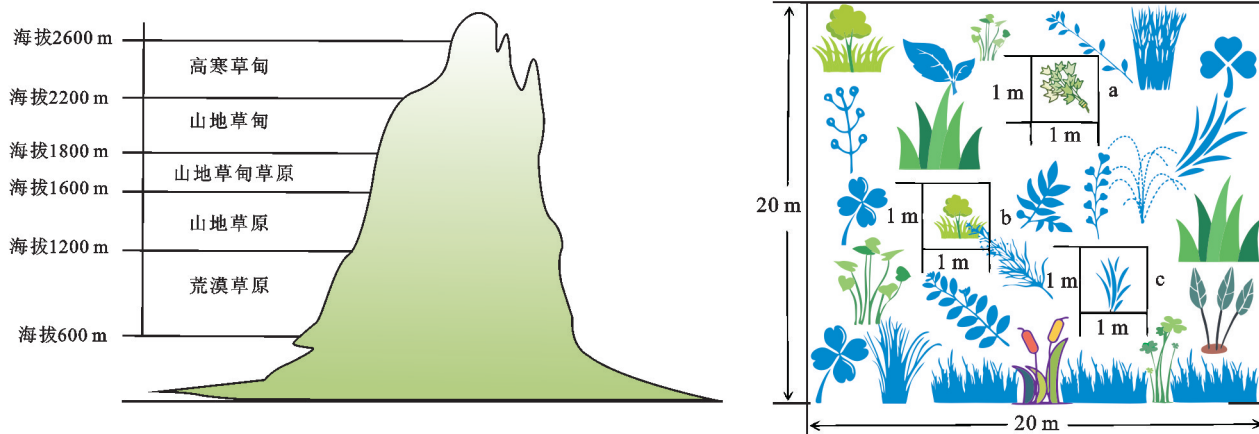


图1 草地类型划分与样方设计

Fig. 1 Classification of grassland types and sample design

## 1.3 数据统计分

本研究通过运用Excel软件对所得数据进行初步整理与计算,利用单因素方差分析(One-way ANOVA)及最小显著差异法(LSD)对各草地类型中植物科属种的变化特征进行分析;揭示不同草地类型间植物科属种在各层次上的变化规律和特点。同时,通过利用Origin 2022软件进行拟合分析,探究物种丰富度在不同草地类型下如何响应降水、温度和海拔的变化。

## 2 结果与分析

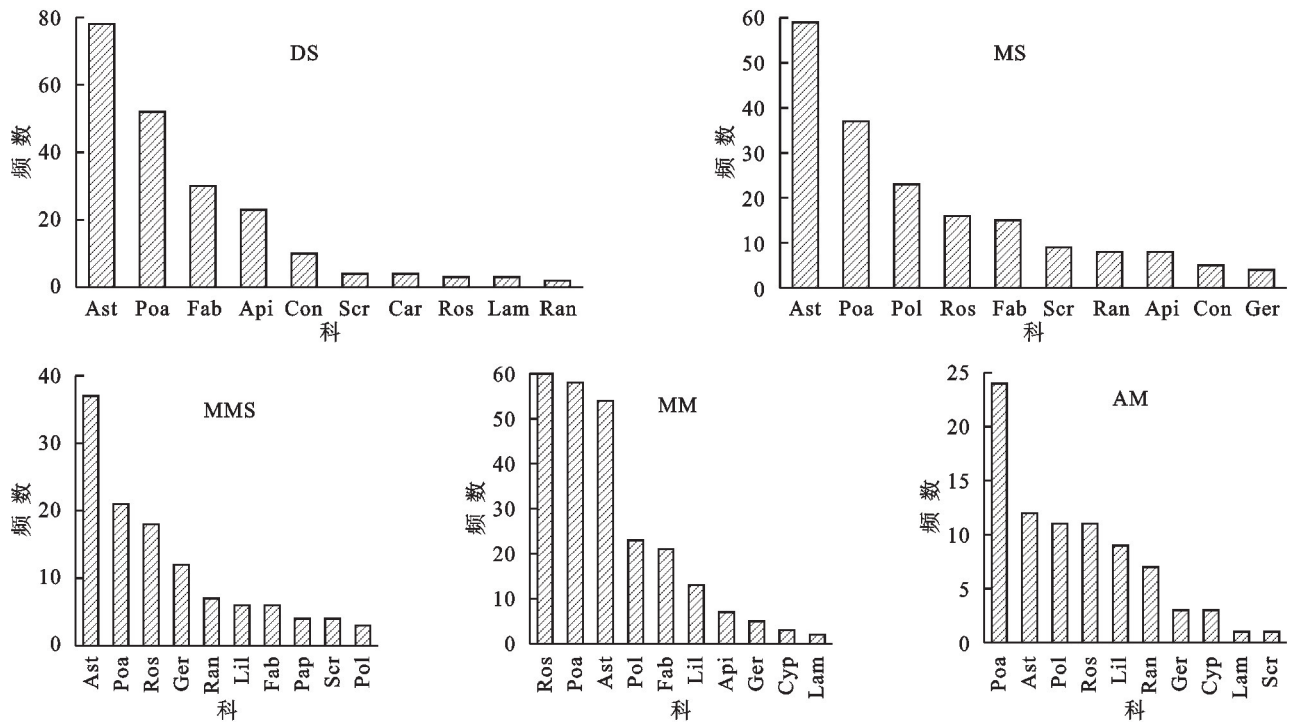
### 2.1 各草地类型中植物科属频数特征

在被调查的165个样方中,各类草地植物物种构成及其优势科均呈现出明显的差异(图2)。在荒漠草原中,优势科以菊科(Asteraceae)、禾本科(Poaceae)和豆科(Fabaceae)为主;其中,菊科频数为78,占总频数的36.1%,表现出绝对优势地位;禾本科占比24.1%,显现出次优势特征;豆科占比为13.9%。在山地草原中,禾本科(Poaceae)、菊科(Asteraceae)、廖科(Polygonaceae)为优势科,廖科比例有所上升且占比为11.9%,蔷薇科(Rosaceae)占比也大幅度增加,菊科所占比例由在荒漠草原中的36.1%下降至山地草原中的19.1%,禾本科由荒漠草原中的24.1%上升至山地草原中的30.4%。在山地草甸草原中,菊科、禾本科、蔷薇科为优势科,分别占29.15,16.5%和14.2%,

牻牛儿苗科出现且占比为9.4%,豆科、廖科植物在此草地类型中逐渐退化,频数分别为4.7%,2.4%。在山地草甸中,蔷薇科、禾本科、菊科为优势科,分别占24.4%,23.6%,22.0%。在高寒草甸中,禾本科、菊科、廖科为优势科,占比分别为29.3%,14.6%和13.4%。且出现了莎草科(Cyperaceae)。

从图3可以看出,碱茅属(*Puccinellia*)在所有草地类型中,是草地群落生态功能的主要维持者,除了山地草甸中占比仅为13.6%之外,该属在其他草地类型中均为最大优势属。在荒漠草原中,蒲公英属(*Taraxacum*)和苜蓿属(*Medicago*)表现为次优势特征,占比为13.8%和12.9%;同时又有岩风属(*Libanotis*)、蓍草属(*Achillea*)、牛蒡属(*Arctium*)、发草属(*Deschampsia*)等多属植物存在。在山地草原中,牵牛属(*Pharbitis*)、莴苣属(*Lactuca*)消失了,出现了委陵菜属(*Potentilla*)和廖属(*Polygonum*),且所占比例较高,分别为8.5%和8.0%。在山地草甸草原中,出现了老鹳草属(*Geranium*)及羽衣草属(*Alchemilla*),占比为98%,4.9%,且廖属消失了。山地草甸中,碱茅属在群落中的比例有所降低,不再是主导物种,而羽衣草属则成为了最主要的优势属,占据了22.2%的比例;发草属作为次优势属,占比为8.9%。在高寒草甸中,碱茅属、发草属均为最大优势属,占比14.6%;羽衣草属、廖属为次优势特征,占比为13.4%。

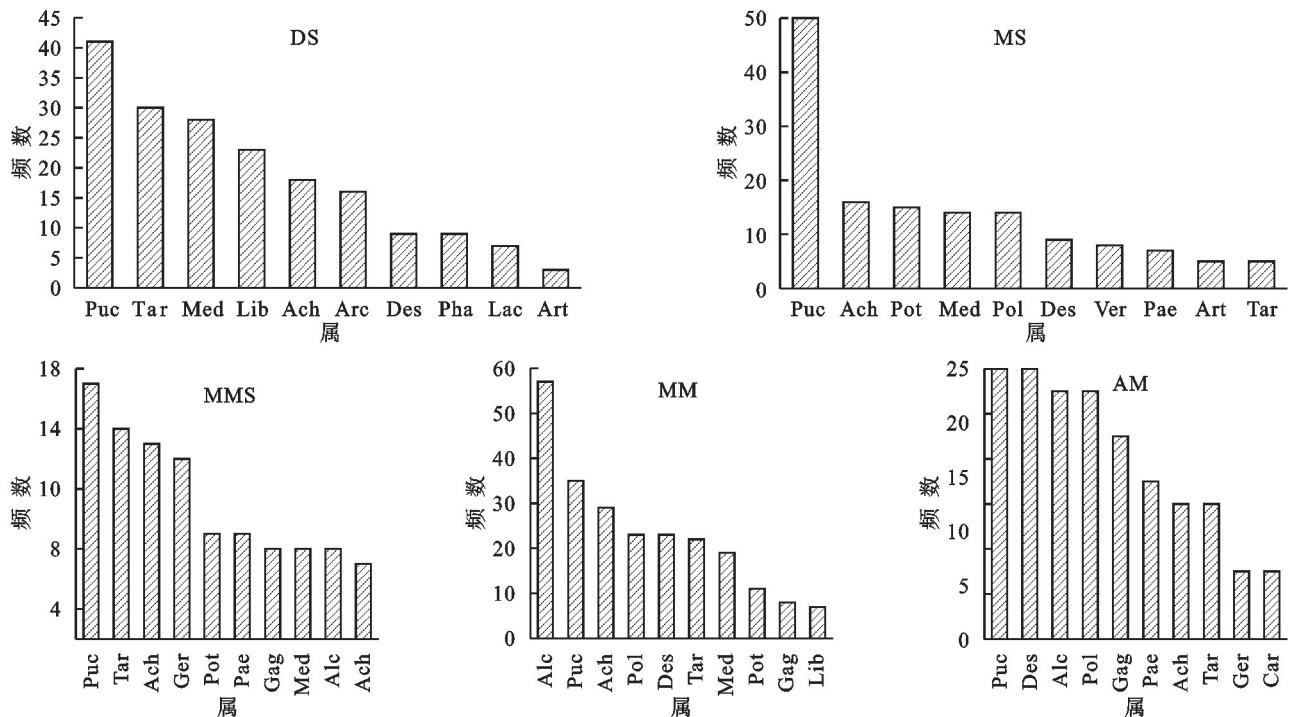




注:DS 表示荒漠草原;MS 表示山地草原;MMS 表示山地草甸草原;MM 表示山地草甸;AM 表示高寒草甸,下同。Ast 表示菊科 Asteraceae;Poa 表示禾本科 Poaceae;Fab 表示豆科 Fabaceae;Api 表示伞形科 Apiaceae;Con 表示旋花科 Convolvuliaceae;Scr 表示玄参科 Scrophulariaceae;Car 表示石竹科 Caryophyllaceae;Ros 表示蔷薇科 Rosaceae;Lam 表示唇形科 Lamiaceae;Ran 表示毛茛科 Ranunculaceae;Pol 表示蓼科 Polygonaceae;Ger 表示牻牛儿苗科 Geraniaceae;Lil 表示百合科 Liliaceae;Pap 表示罂粟科 Papaveraceae;Cyp 表示莎草科 Cyperaceae

图 2 各类草地植物科频数分布 (排名前 10)

Fig. 2 Frequency distribution of various grassland plant families (top ten)



注:Puc 表示碱茅属 *Puccinellia*;Tar 表示蒲公英属 *Taraxacum*;Med 表示苜蓿属 *Medicago*;Lib 表示岩风属 *Libanotis*;Ach 表示蓍草属 *Achillea*;Arc 表示牛蒡属 *Arctium*;Des 表示发草属 *Deschampsia*;Pha 表示牵牛属 *Pharbitis*;Lac 表示莴苣属 *Lactuca*;Pot 表示委陵菜属 *Potentilla*;Pol 表示蓼属 *Polygonum*;Ver 表示婆婆纳属 *Veronica*;Pae 表示芍药属 *Paeoniaceae*;Ger 表示老鹳草属 *Geranium*;Gag 表示顶冰花属 *Gagea*;Alc 表示羽衣草属 *Alchemilla*;Car 表示苔草属 *Carex*。

图 3 不同草地类型植物属频数统计 (位于前 10)

Fig. 3 Frequency statistics of plant genera in different grassland types (in the top ten)

## 2.2 不同草地类型中植物科属种的变化

各类草地间,植物科属种的演变展现出一定的规律性特征。由单因素方差分析表明,山地草甸草原的科数量最多,该草地的平均值为 6.86 个,明显高于其他类型的草地( $p < 0.05$ )。荒漠草原和山地草原科数量分别为 5.14, 5.27 个,数量相当。相比之下,山地草甸和高寒草甸科数最少,分别为 4.44, 3.43, 均显著低于其他草地类型(图 4A)。山地草甸草原属为 8.86 个,高寒草甸为 4.57 个,此两种草地间有显著差异( $p < 0.05$ )。而荒漠草原和山地草原属数分别为 7.29, 7.45 个,数量相当。山地草甸平均为 6.06 个,与其他草地类型草地差异均不显著(图 4B)。拥有最高物种丰富度的是山地草甸草原,为 8.86 个物种,与高寒草甸(4.57 个)差异显著( $p < 0.05$ )。荒漠草原丰富度和山地草原丰富度分别为 7.79 个和 7.45 个,数量相当,两者之间无显著差异。山地草甸为 6.00 个,除了高寒草甸与山地草甸草原有显著性差异之外,其余草地之间均无明显差异(图 4C)。

## 2.3 不同类型草地物种丰富度对环境因子的响应

### 2.3.1 年均降水量对不同植被类型物种丰富度的影响

如图 5A 所示,在该研究区域内,总样地的物种丰富度(SR)与年均降水量(MAP)之间存在着一种线性关联。详细分析表明,每增加 100 mm 的降水量,物种数量会减少 6.68 个。阿勒泰林区各类草地类型中物种丰富度与年均降水量的关系研究结果显示,荒漠草原物种丰富度与 MAP 的关系表现为先上升后下降的趋势(图 5B),在降水量为 182.39 mm 时达到峰值(6.07)。高寒草甸的 SR 与 MAP 呈先降低再增加的趋势(图 5F),当降水量为 239.86 mm 时物种数为最小值(0.67)。山地草原、山地草甸草原和山地草甸的 SR 与 MAP 之间并未表现出显著的相关性(图 5C,D,E)。

### 2.3.2 年均温对不同植被类型物种丰富度的影响

在该研究区内,总样地物种丰富度(SR)与年均温度(MAT)有明显的线性关系,温度每上升 5 °C,物种数增加 6.02 个(6A)。荒漠草原的 SR 随 MAT 的升高呈先增加再降低的趋势(图 6B),当温度为 4.94 °C 时,物种数达到最大值(6.60)。山地草甸草原和高寒草甸的 SR 与 MAT 之间的关系表现为先降低后增加、再降低的趋势(图 6D,F),当温度分别为 -6.13 °C 和 -6.95 °C 时物种数达到最小值(4.03, 3.18),当温度为 -1.10 °C 和 -3.64 °C 时物种数达到最大值(7.18, 5.36)。山地草甸的 SR 与 MAT 呈先升后降再升的趋势(图

6E),当温度为 0.55 °C 时物种数达到最大值(6.59)。山地草原的物种丰富度(SR)与平均气温(MAT)之间并无显著相关性(图 6C)。

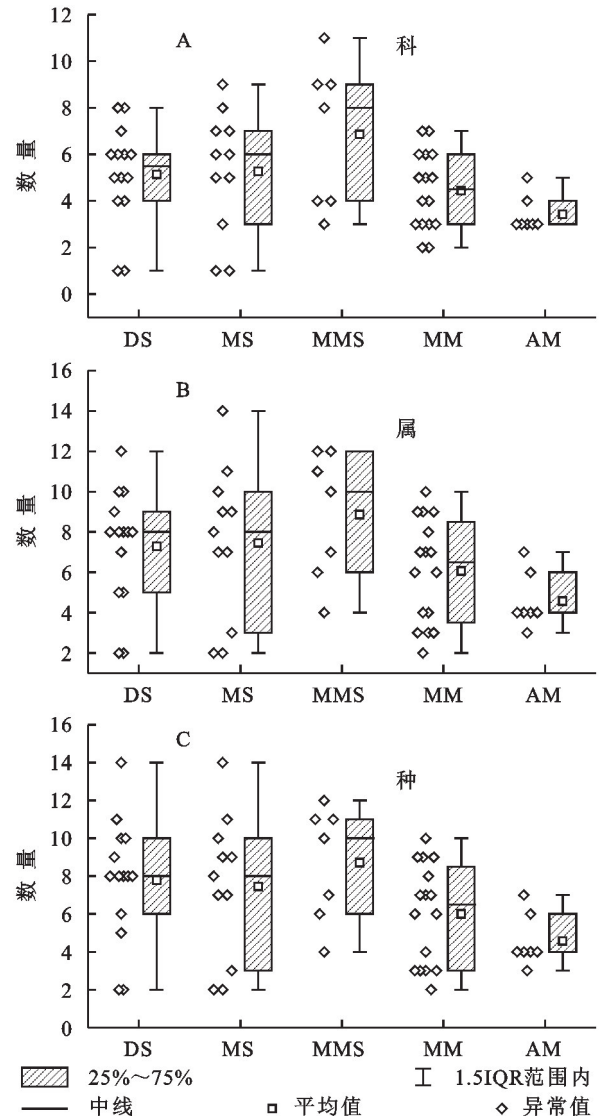


图 4 不同草地类型间植物科属种的差异特征

Fig. 4 Changes in plant families, genera, and species among different grassland types

## 2.4 不同植被类型物种丰富度与海拔之间的关系

该研究区总样地 SR 与海拔呈线性相关关系(图 7A)。进一步分析不同植被类型 SR 与海拔之间的关系,荒漠草原和高寒草甸的 SR 与海拔呈先降低再增加的趋势(图 7B,F),当海拔为 1 089.01 m, 2 322.41 m 时物种丰富度达到最小值(4.72, 3.02)。山地草原的 SR 与海拔呈先升后降再升的趋势(图 7C),当海拔为 1 289.44 m 时物种数达到最大值(6.76),当海拔为 1 504.68 m 时物种数达到最小值(3.15)。山地草甸草原与山地草甸的物种丰富度(SR)与海拔之间未表现出显著相关性(图 7D,E)。

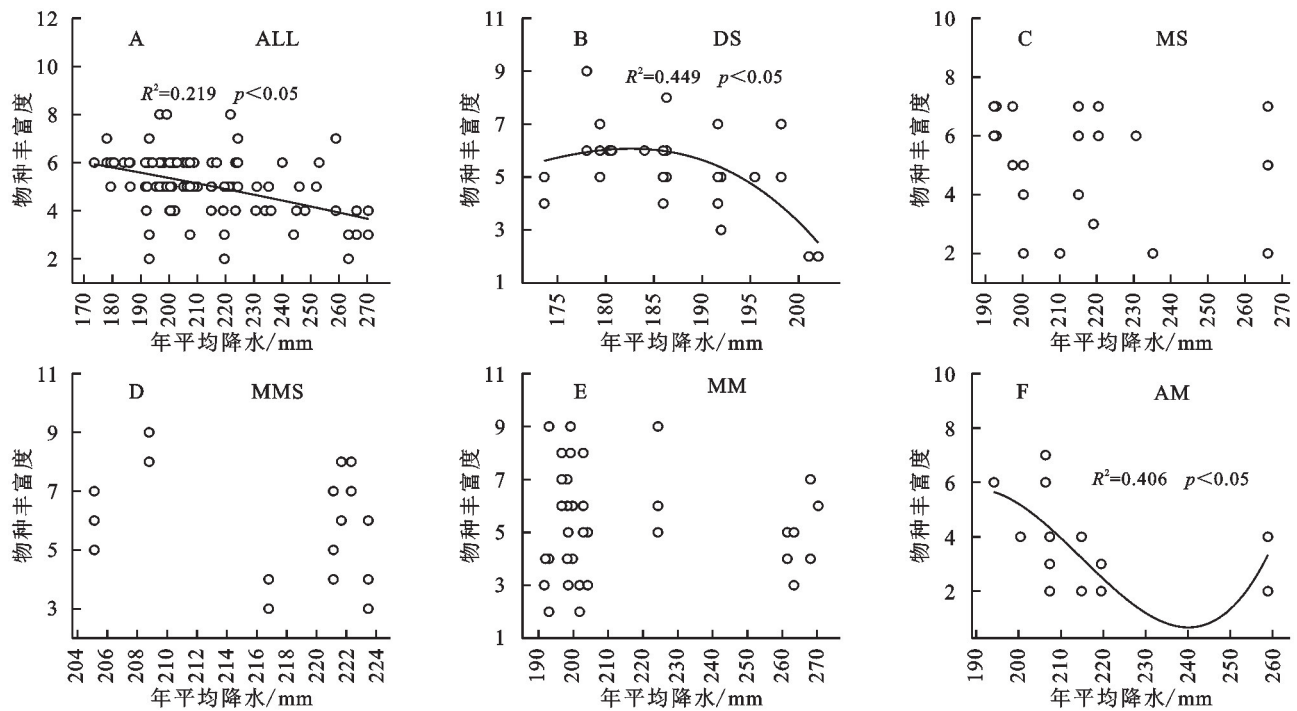


图 5 物种丰富度与年平均降水量在不同植被类型中的关系

Fig. 5 Relationship between species richness and annual average precipitation in different vegetation types

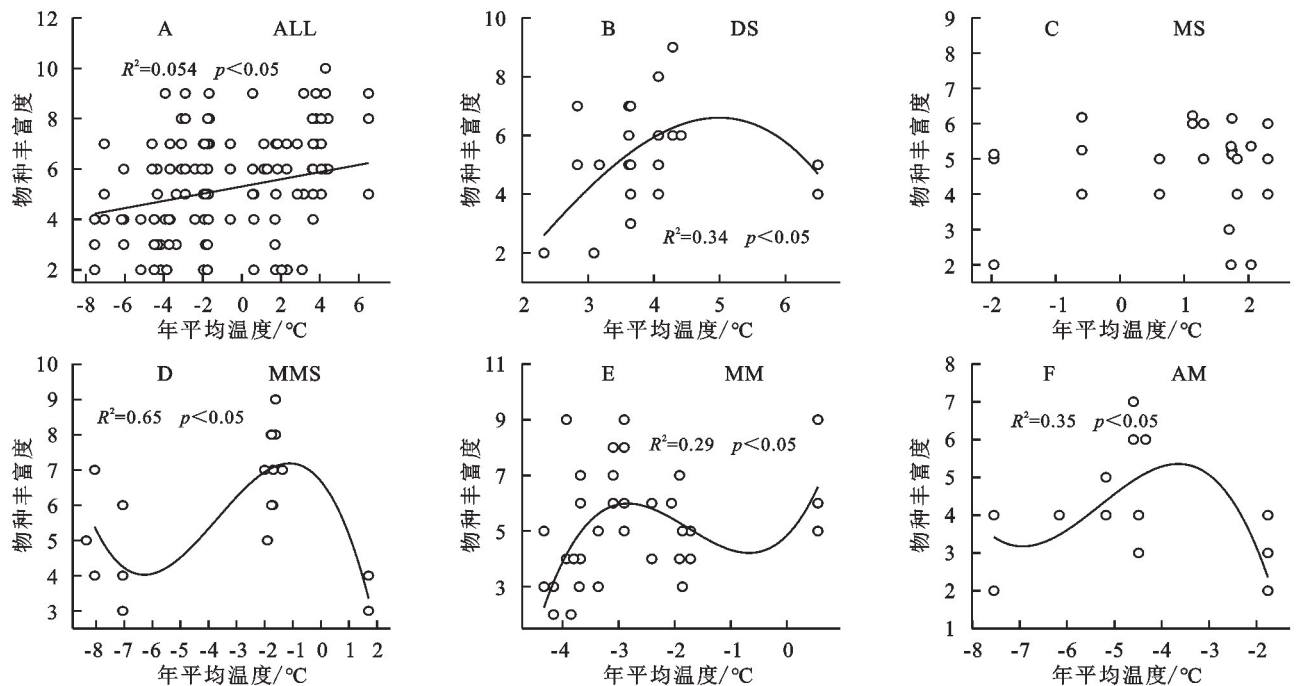


图 6 物种丰富度与年均温在不同植被类型中的关系

Fig. 6 Relationship between species richness and mean annual temperature in different vegetation types

### 3 讨论

#### 3.1 不同草地类型植物物种特征

新疆草地呈现出显著的垂直地带性特征,这使得在较小的空间范围内,气候因素呈现出更为广泛的变动幅度,从而孕育出多样的草地类型。通过调查发现,草地中科、属和种随海拔呈先增后降及先减后增再减的趋势。本研究与在新疆和布尔津草地中物种组成的研究

结果相似,然而,这些区域的物种丰富度却呈现出一定的差异。阿勒泰草地平均物种丰富度为 6.93,明显高于布尔津(6.85)<sup>[14]</sup>;生境条件不同,导致物种丰富度有差异。在内蒙古草原<sup>[15]</sup>的研究发现其物种丰富度为 20 左右。经比较分析,阿勒泰林区草地物种丰富度明显低于内蒙古;这种差异可能源于盐分和水分限制,相对于内蒙古,新疆的降水量偏少而蒸发量偏高,这导致其土壤含盐量相对较高。土壤盐分胁迫可能导致局域群落内



物种数量减少,在资源有限的情况下种间竞争激烈,造成丰富度降低<sup>[16]</sup>。祁连山 DS 主要以菊科、禾本科为优势科<sup>[17]</sup>,这与本研究结果相似。但本研究 AM 以禾本科、菊科、廖科为优势科,因观测尺度不同以及水热条件差异导致了物种生境的多样性,致使优势科属有

差异。不同类型草地的水热条件不同,使植物功能在不同类型草地中差异较大,而 AM 丰富度低于其他类型草地。因此,对科、属、种组成单一的 AM 应该实施禁牧等生态保护,对其他类型草地因地制宜合理利用,共同促进阿勒泰林区草地健康持续发展。

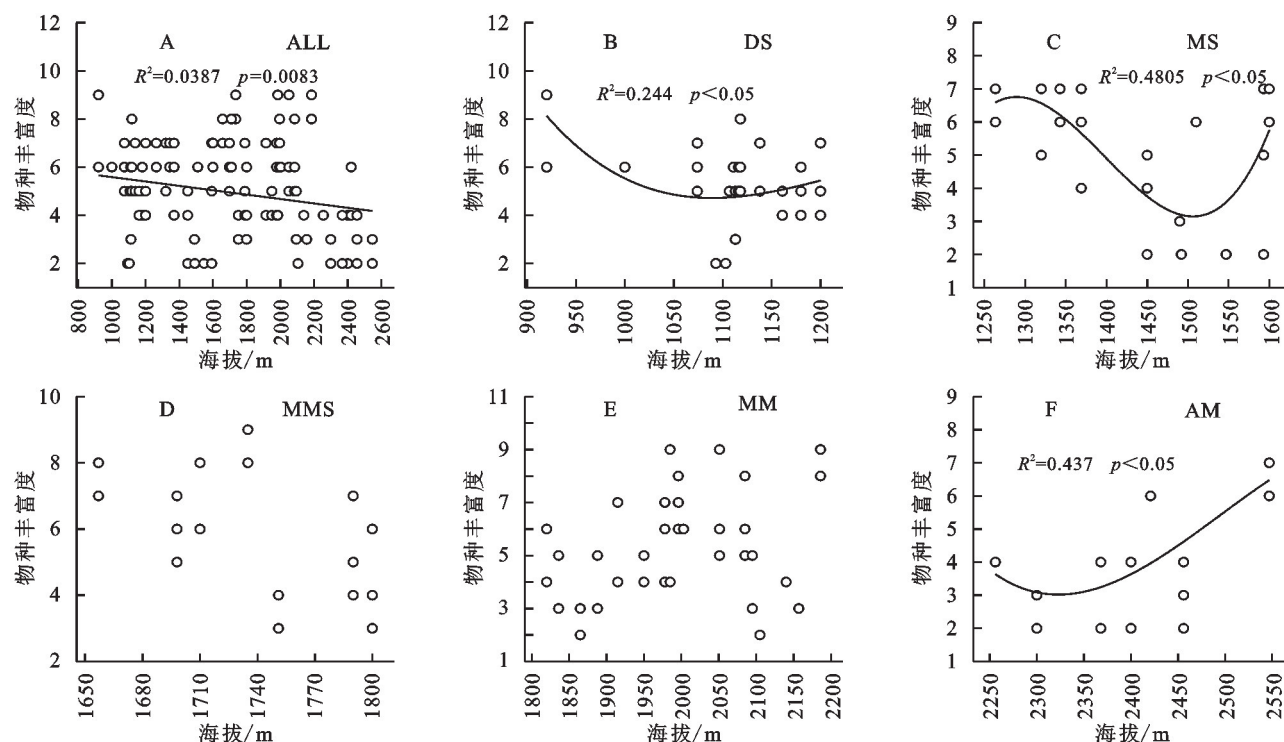


图7 不同植被类型物种丰富度与海拔之间的关系

Fig. 7 Relationship between species richness and altitude of different vegetation types

### 3.2 物种丰富度受温度与降水的影响

植物丰富度分析是研究草原可持续发展的重要内容之一。草地生态系统的物种丰富度主要受水热因子的影响,如降水量、温度等<sup>[18]</sup>。研究结果显示,在我国阿勒泰林区草地中,较高的降水量(180~225 mm)条件下,物种丰富度较高。这一发现与 Chen 等<sup>[19]</sup>在内蒙古的研究成果存在一定差异,表明在部分干旱和半干旱地区,除水分外,其他因素也可能对物种丰富度产生限制。同时,随着降水量的增加,物种丰富度呈现下降趋势。在 DS 地区,水分供应有限,但 SR 与 MAP 表现出先增后减的趋势。原因可能是放牧等人为干扰,由于 DS 海拔较低,地势平坦且植被低矮,适宜放牧,导致物种生长受到迫害,物种丰富度下降。AM 物种丰富度随着降水量呈先降低再升高的趋势,原因可能是 AM 主要分布在气候冷凉、土壤湿润的高寒偏远区域,导致喜热植物生长受到威胁,物种丰富度降低;丰富度又升高是因为 AM 群落以羽衣草、碱茅、发草等植物为优势种,群落结构稳定,人为干扰较少,物种丰富度又增加,这与在青藏高原<sup>[20]</sup>的研究

结果不一致。MS, MMS 和 MM 的 SR 与 MAP 均没有相关性,根据 O'Brien 的研究<sup>[21]</sup>,物种丰富度在很大程度上取决于水分条件。

温度对群落物种丰富度的影响表现为一种更为直接的过程,因为温度决定了水分的蒸散能力。在我国阿勒泰林区草地中,温度作为主要影响因子,对物种丰富度产生显著影响,这与呼伦贝尔草原的研究一致<sup>[22]</sup>。DS, SR 随 MAT 升高呈先增后减的趋势,这之前对维管束植物的研究结果相一致<sup>[23]</sup>。另外,在全球尺度上,有学者发现<sup>[24]</sup>,当蒸散量低于 505 mm 时,被子植物的丰富度会随年最大可能蒸散量的增加而显著增长;然而,一旦蒸散量超过这一数值,丰富度则会开始下降。这种趋势主要源于温度升高对植物生长和碳同化作用的积极影响<sup>[25]</sup>。但值得注意的是,当温度升至最佳水平后,水分蒸发会加剧,导致植物可利用的有效水分减少,从而使植物受到干旱胁迫,进而降低物种丰富度<sup>[26]</sup>。MM 随 MAT 升高呈先增后减再增的趋势,造成这种差异的原因可能是 MM 虽然气候依然干旱,但比 DS 温度有了较大改

善,能够生长的植物种类增多,丰富度上升。此后随着温度的升高,逐渐变得不合适植物生长加之放牧的影响,群落物种丰富度下降。但随着温度继续升高,演替出了新的物种,增加了物种丰富度。MMS 和 AM 均表现出物种丰富度与 MAT 呈先减后增再减的趋势,这与在内蒙古等的研究结果有一定差异<sup>[19]</sup>。造成这种差异的原因可能是由于低温限制,植物光合作用能力有限,地上部分植物生长受到限制,种群间竞争激烈,使物种丰富度下降;随着温度的升高,温度适宜,促进植物生长,物种丰富度升高;但随着温度的继续增高,加速了土壤碳分解,降低了植物丰富度<sup>[27]</sup>。MS 的 SR 与 MAT 之间无相关性,这与在内蒙古的研究一致<sup>[19]</sup>。由此可见,对于不同的研究区域和植被类型,物种丰富度对温度和降水的反应存在明显的差异,这些差异可能源于研究单元的空间分布面积以及单元内气候空间分异程度的不同。然而,温度和降水量为研究单元的整体气候提供了基础信息,但它们仍不足以全面展示研究单元内部气候的空间分布和季节差异<sup>[28]</sup>。

### 3.3 海拔变化对物种丰富度的影响

海拔是水热因子的综合体现,我国贵州亚热带地区草地<sup>[29]</sup>及青藏高原的 AM,草地植物丰富度随着海拔升高呈现先增加后减少的变化规律<sup>[9]</sup>。在伊犁河北岸的科古琴山和伊犁河南岸的乌孙山<sup>[30]</sup>,植物群落的丰富度与海拔呈明显的双峰曲线关系。在长白山<sup>[31]</sup>的植物群落随海拔的升高,其丰富度呈下降的趋势。也有研究显示,在北半球的不同海拔区域中,物种丰富度与海拔的关系呈现出复杂的趋势,既有负相关也有正相关的情况<sup>[32]</sup>。在我国阿勒泰林区,草地物种丰富度随海拔的升高呈下降的趋势,这是由于随着海拔的升高,降水量减少,气温降低,这些环境因素影响了物种的生存和繁衍,导致物种丰富度下降。对于 DS 的 SR 随海拔升高呈先降低再增加趋势,这与 Wang 等的研究结果有所差异<sup>[33]</sup>,导致这种差异可能源于低海拔地区的环境条件相对较好,物种竞争激烈,具有较强竞争力的物种得以占据优势;然而,随着海拔的升高,环境逐渐恶化,使得这些竞争力强的物种面临环境的挑战,从而导致物种丰富度降低<sup>[34]</sup>。MS 的 SR 随海拔升高呈明显先升后降再升的趋势,这与上述前人的研究结果都不相同,可能是由于随海拔升高,物种较 DS 水热条件有了改善,生长的物种种类增多,丰富度增加。但随海拔继续升高环境恶劣,物种减少;物种随着环境逐渐适应,物种开

始逐渐增多,即物种丰富度又呈升高趋势。AM 的 SR 随海拔呈不对称的单峰趋势(即先下降再上升),这可能是由于高海拔地区气温偏低,导致竞争力强的物种也受到环境的威胁,进而影响物种丰富度降低<sup>[34]</sup>;然而,该地区的水分充足,有利于耐寒植物的生长,因此在理论上能够容纳更多种类的植物,从而使物种丰富度呈上升趋势。在 MMS 和 MM 区域,SR 与海拔之间并无显著关联,这一现象与新西兰的研究结果一致<sup>[35]</sup>。然而,先前的研究表明,由于研究尺度的差异,所得结果不尽相同。因此,关于物种丰富度在海拔梯度上同一尺度变化所产生的差异,仍有待进一步探讨。

## 4 结论

(1) 新疆阿勒泰林区草地物种组成以菊科、禾本科、豆科、廖科为优势科,以碱茅属、蒲公英属、羽衣草属、发草属为优势属。但各科、属在不同类型草地中所占比例不同。

(2) 不同草地类型间物种丰富度的变化有差异,MMS 与 AM 之间在物种丰富度上差异显著,而其他草地类型间的物种丰富度差异则不显著。

(3) 新疆阿勒泰林区不同草地类型物种丰富度对年均温度、降水、海拔的差异:DS 中 MAP 为 182.39 mm 时,物种的丰富度较高(6.07)。MS,MMS 和 MM 的丰富度受 MAP 的影响不显著。在 MM 中,MAT 为  $-1.10^{\circ}$  时,物种丰富度较高(7.18)。MS 的丰富度与 MAT 无显著相关性。当海拔为 1 289.44 m 时,MS 的物种丰富度较高(6.76),海拔对 MMS 和 MM 的物种丰富度影响不大。

### 参考文献 (References):

- [1] 闫晓红,伊风艳,邢旗,等.我国退化草地修复技术研究进展[J].安徽农业科学,2020,48(7):30-34.  
Yan X H, Yi F Y, Xing Q, et al. Research progress on restoration technology of degraded grassland in China [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48 (7):30-34.
- [2] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, et al. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges[J]. Science, 2001,294(5543):804-808.
- [3] Adler P B, HilleRisLambers J. The influence of climate and species composition on the population dynamics of ten prairie forbs[J]. Ecology, 2008,89(11):3049-3060.
- [4] Dirnböck T, Essl F, Rabitsch W. Disproportional risk for habitat loss of high-altitude endemic species under climate change[J]. Global Change Biology, 2011, 17



- (2):990-996.
- [5] Knapp A K, Fay P A, Blair J M, et al. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland[J]. *Science*, 2002,298(5601):2202-2205.
- [6] Fay P A, Blair J M, Smith M D, et al. Relative effects of precipitation variability and warming on tallgrass prairie ecosystem function[J]. *Biogeosciences*, 2011,8(10):3053-3068.
- [7] 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[J].*草业学报*,2013,22(2):1-10.  
Wang J B, Zhang D G, Cao G M, et al. Regional characteristics of the alpine meadow degradation succession on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013,22(2):1-10.
- [8] 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]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004,28(2):240-245.
- [9] 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 apportionment 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.
- [10] 涂文霞,叶茂,徐海量,等.荒漠草地植物多样性对肥料添加的响应[J].*中国沙漠*,2013,33(5):1349-1355.  
Tu W X, Ye M, Xu H L, et al. Response of plant diversity in desert grassland to nutrient elements addition[J]. *Journal of Desert Research*, 2013,33(5):1349-1355.
- [11] 冯纓,许鹏,安沙舟,等.天山北坡中段草地类型 $\alpha$ 多样性研究[J].*干旱区研究*,2005,22(2):225-230.  
Feng Y, Xu P, An S Z, et al. Study on the diversity of steppe types in the middle section of northern slope of the Tianshan Mountain[J]. *Arid Zone Research*, 2005,22(2):225-230.
- [12] 李利平,安尼瓦尔·买买提,努尔巴依·阿布都沙力克,等.新疆山地森林乔木和草地草本植物个体大小分布特征[J].*生物多样性*,2017,25(11):1202-1212.  
Li L P, Anwar Mohannat, Nurbay Abdusalih, et al. Plant body size patterns of mountainous trees and grassland herbs in Xinjiang region, China[J]. *Biodiversity Science*, 2017,25(11):1202-1212.
- [13] 李利平,尹林克,唐志尧.新疆野生动植物物种丰富度的分布格局[J].*干旱区研究*,2011,28(1):1-9.  
Li L P, Yin L K, Tang Z Y. Distribution patterns of the species richness of plants and animals in Xinjiang, China[J]. *Arid Zone Research*, 2011,28(1):1-9.
- [14] 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.
- [15] Bai Y F, Wu J G, Pan Q M, et al. Positive linear relationship between productivity and diversity: Evidence from the Eurasian Steppe[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007,44(5):1023-1034.
- [16] Cavieres L A, Badano E I. Do facilitative interactions increase species richness at the entire community level? [J]. *Journal of Ecology*, 2009,97(6):1181-1191.
- [17] 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):2012-2021.  
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):2012-2021.
- [18] Wu J S, Zhang X Z, Shen Z X, et al. Species richness and diversity of alpine grasslands on the northern Tibetan Plateau: Effects of grazing exclusion and growing season precipitation[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2012,3(3):236.
- [19] Chen L Y, Li H, Zhang P J, et al. Climate and native grassland vegetation as drivers of the community structures of shrub-encroached grasslands in Inner Mongolia, China[J]. *Landscape Ecology*, 2015,30(9):1627-1641.
- [20] 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[J].*生物多样性*,2004,12(1):200-205.  
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[J]. *Biodiversity Science*, 2004,12(1):200-205.
- [21] O' Brien E M. Biological relativity to water-energy dynamics[J]. *Journal of Biogeography*, 2006,33(11):1868-1888.
- [22] 郑晓翾,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.
- [23] Li L P, Abdusalih N, Wang S P, et al. Distribution patterns and climatic explanations of species richness of vascular plants in Xinjiang, China [J]. Arid Zone Research, 2011,28(1):25-30.
- [24] Kreft H, Jetz W. Global patterns and determinants of vascular plant diversity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007,104(14):5925-5930.
- [25] Walther G R. Plants in a warmer world[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2003,6(3):169-185.
- [26] McCain C M, Sanders N J. Metabolic theory and elevational diversity of vertebrate ectotherms[J]. Ecology, 2010,91(2):601-609.
- [27] 梁艳,干珠扎布,张伟娜,等.气候变化对中国草原生态系统影响研究综述[J].中国农业科技导报,2014,16(2):1-8.
- Liang Y, Liang Y, Zhang W N, et al. A review on effect of climate change on grassland ecosystem in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014,16(2):1-8.
- [28] 冯建孟.中国种子植物物种多样性的尺度分布格局及其气候解释[J].生物多样性,2008,16(5):470-476.
- Feng J M. Spatial patterns of species diversity of seed plants in China and their climatic explanation [J]. Biodiversity Science, 2008,16(5):470-476.
- [29] 柳鑫,杨丰,张明均,等.贵州韭菜坪山区不同海拔草地群落植物多样性和生产力[J].应用与环境生物学报, 2018,24(2):207-213.
- Liu X, Yang F, Zhang M J, et al. Plant diversity and productivity of grassland communities at different altitudes of Jiupaiping Mountain, Guizhou [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(2):207-213.
- [30] 徐远杰,陈亚宁,李卫红,等.伊犁河谷山地植物群落物种多样性分布格局及环境解释[J].植物生态学报, 2010,34(10):1142-1154.
- Xu Y J, Chen Y N, Li W H, et al. Distribution pattern and environmental interpretation of plant species diversity in the mountainous region of Ili River Valley, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010,34(10):1142-1154.
- [31] 郝占庆,于德永,杨晓明,等.长白山北坡植物群落 $\alpha$ 多样性及其随海拔梯度的变化[J].应用生态学报,2002,13(7):785-789.
- Hao Z Q, Yu D Y, Yang X M, et al.  $\alpha$  diversity of communities and their variety along altitude gradient on northern slope of Changbai Mountain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002,13(7):785-789.
- [32] Guo Q F, Kelt D A, Sun Z Y, et al. Global variation in elevational diversity patterns[J]. Scientific Reports, 2013,3:3007.
- [33] Wang W Y, Wang Q J, Li S X, et al. Distribution and species diversity of PlantCommunities along transect on the northeastern Tibetan Plateau[J]. Biodiversity & Conservation, 2006,15(5):1811-1828.
- [34] 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 above-ground biomass in alpine meadows in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Biodiversity Science, 2015,23(4):451-462.
- [35] Ohlemüller R, Wilson J B. Vascular plant species richness along latitudinal and altitudinal gradients: A contribution from New Zealand temperate rainforests[J]. Ecology Letters, 2000,3(4):262-266.