

DOI: 10.20103/j.stxb.202401300279

李江文, 房美艳, 张晓曦, 李彩, 裴婧宏, 韩国栋. 降水和载畜率对短花针茅荒漠草原物种及功能多样性的影响. 生态学报, 2024, 44(19): 8627-8635.

Li J W, Fang M Y, Zhang X X, Li C, Pei J H, Han G D. Analyzing the influences of precipitation and grazing intensity on species and functional diversity in the desert steppe of *Stipa breviflora*. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8627-8635.

# 降水和载畜率对短花针茅荒漠草原物种及功能多样性的影响

李江文<sup>1,2</sup>, 房美艳<sup>1,2</sup>, 张晓曦<sup>1,2</sup>, 李彩<sup>1</sup>, 裴婧宏<sup>1,2</sup>, 韩国栋<sup>3,\*</sup>

1 延安大学生命科学学院, 延安 716000

2 延安市草业工程技术研究中心, 延安 716000

3 草地资源教育部重点实验室, 呼和浩特 010020

**摘要:**物种多样性和功能多样性反映了草地植物群落物种组成和功能的变化, 然而影响荒漠草原物种及功能多样性的关键因素尚存争议。以短花针茅荒漠草原为研究对象, 系统探讨了载畜率和降水量对物种及功能多样性的影响, 结果发现: (1) 降水量与群落特征之间呈显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 降水量增加将显著促进物种多样性的提升, 但对功能多样性产生负面影响 ( $P < 0.01$ ); (2) 载畜率与植物群落特征之间呈显著的负相关关系 ( $P < 0.01$ ), 载畜率增加将降低群落物种和功能多样性, 但载畜率与物种及功能多样性不存在线性关系 (路径系数分别为  $-0.17$  和  $-0.15$ , 但  $P > 0.05$ ); (3) Rao 二次熵指数与物种多样性之间表现出显著的正相关线性回归关系 ( $P < 0.01$ ), 功能丰富度指数与物种多样性指数之间呈现幂指数关系 ( $P < 0.01$ )。功能均匀度指数与 Pielou 均匀度指数之间呈显著的正相关线性回归关系 ( $P < 0.01$ )。荒漠草原物种及功能多样性变化受到降水、载畜率和群落特征的综合影响, 揭示了其对草地生态系统健康和可持续性的重要性。

**关键词:**物种多样性; 功能多样性; 载畜率; 降水; 短花针茅荒漠草原

## Analyzing the influences of precipitation and grazing intensity on species and functional diversity in the desert steppe of *Stipa breviflora*

LI Jiangwen<sup>1,2</sup>, FANG Meiyang<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoxi<sup>1,2</sup>, LI Cai<sup>1</sup>, PEI Jinghong<sup>1,2</sup>, HAN Guodong<sup>3,\*</sup>

1 College of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an 716000, China

2 Pratacultural Engineering Research Center of Yan'an City, Yan'an 716000, China

3 Key Laboratory of Grassland Resources of the Ministry of Education of China, Hohhot 010020, China

**Abstract:** Species and functional diversity reflect the changes in composition and functions of grassland plant communities. However, the key factors affecting species and functional diversity of desert grasslands are still controversial. To reveal the effects of stocking rate and precipitation on species and functional diversity, a survey was conducted in *Stipa breviflora* desert steppe. The results indicate that: (1) increasing precipitation significantly enhanced the species diversity and there was a significant positive correlation between precipitation and community characteristics ( $P < 0.01$ ), but it had a negative impact on functional diversity ( $P < 0.01$ ), (2) there were significant negative correlations ( $P < 0.01$ ) and no correlation (path coefficients of  $-0.17$  and  $-0.15$ , respectively,  $P > 0.05$ ) between stocking rate and plant community characteristics, species diversity, and functional diversity, and increased stocking rates will reduce the species and functional diversity, and

基金项目: 草地资源可持续利用教育部科技创新团队 (IRT\_17R59); 陕西省自然科学基金基础研究项目 (2021JQ-623)

收稿日期: 2024-01-30; 网络出版日期: 2024-07-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hanguodong@imau.edu.cn

(3) the significant positive linear regression relationships were found between Rao's quadratic entropy index and species diversity ( $P < 0.01$ ), as well as the relationship of functional evenness index and Pielou's evenness index ( $P < 0.01$ ), and there was a power-law relationship between functional richness index and species diversity ( $P < 0.01$ ). In summary, the changes of species and functional diversity are comprehensively affected by precipitation, stocking rate, and community characteristics in desert grassland. Our study illustrates the importance of precipitation and stocking rates to the health and sustainability in grassland ecosystems.

**Key Words:** species diversity; functional diversity; stocking rate; precipitation; *Stipa breviflora* desert steppe

物种多样性和功能多样性反映了草地植物群落结构和功能的变化<sup>[1]</sup>。物种多样性不仅展现了物种数量和种类的广泛性,也揭示了物种间复杂的相互作用及其生态位的多元性<sup>[2]</sup>。而功能多样性则通过量化和分析植物功能性状,揭示植物对环境变化的适应性<sup>[3]</sup>。物种多样性和功能多样性的结合增强了生态系统的韧性,使其更能适应环境变化,促进养分循环和群落稳定性,提升生态系统对外部环境干扰的恢复力。因此,为了深入理解降水及载畜率变化对短花针茅荒漠草原物种及功能多样性的影响,必须综合考虑外部环境因素的影响<sup>[4]</sup>。

水分是影响草原物种及功能多样性的关键环境因子,降水增加通常会促进物种存活和繁衍,提升物种多样性<sup>[5]</sup>。同时,降水增加对草原生态系统产生双重影响,一方面,适度降水可以加速植物的生长和养分循环,从而增强植物群落对环境变化的适应性和恢复力,有利于提高功能多样性<sup>[6]</sup>。然而,极端降水事件,如持续干旱或过量降雨,则可能带来负面影响。干旱条件会限制植物的生长和物种的分布,而过量的降水可能导致土壤侵蚀和营养流失,进而影响植物群落的多样性指标<sup>[7]</sup>。放牧对物种多样性的影响与放牧优化假说(Grazing optimization hypothesis, GOH)相符<sup>[8]</sup>,适度的放牧有助于增加群落物种多样性和功能多样性<sup>[9-10]</sup>。降水和放牧被认为是影响草地植物群落的两个重要因子<sup>[11]</sup>,但降水对物种及功能多样性的作用通常受到放牧活动的影响<sup>[12]</sup>。在湿润环境中,放牧可增加物种多样性,但在干旱环境中,放牧对物种多样性无影响<sup>[13]</sup>。因此,在研究物种及功能多样性的影响因素时,需要综合考虑降水及载畜率对群落物种功能多样性的影响。

基于此,本研究以短花针茅荒漠草原为研究对象,通过采集不同载畜率下丰水年和干旱年植物群落特征及植物功能性状数据,核算群落物种及功能多样性指标。通过构建群落特征与环境因子的回归关系,并利用结构方程模型(SEM)探究载畜率、降水量、群落特征、物种多样性及功能多样性之间的复杂关系。以揭示降水、载畜率及土壤化学对短花针茅荒漠草原物种及功能多样性的影响,为荒漠草原生态系统功能的提升提供理论支持,预期将为草地管理和生态保护提供科学参考,促进荒漠草原的可持续发展。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 试验样地

试验地位于内蒙古自治区四子王旗(41°47'17" N, 111°53'46" E),平均海拔 1455 m,面积约 50 hm<sup>2</sup>,该区域属温带大陆性季风气候,气候干旱,降水少而集中(主要集中于 6—9 月),年均降水 223.5 mm,年均气温 3.7 °C,无霜期约 108 d。土壤类型为淡栗钙土,土壤质地为沙壤土。该地区属短花针茅(*Stipa breviflora*)荒漠草原地带性植被,草层群落平均高度约 7.5 cm,盖度为 15%—20%,建群种为短花针茅,主要优势物种:无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、木地肤(*Kochia prostrata*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)等。

### 1.2 试验地降水标准选择

试验地近 20 年降水量(图 1)中,2016 年(丰水年)年降水 337 mm,为历年最高降水纪录,相邻年份的 2017 年(干旱年)降水量为 185.2 mm,低于多年平均降水量。本研究选择具有显著不同降水量的连续年份,可以直接比较影响因素在短时间尺度内的变化,显示出降水量变化对物种及功能多样性的影响,减少了长期

时间跨度可能引入的其他变量影响。

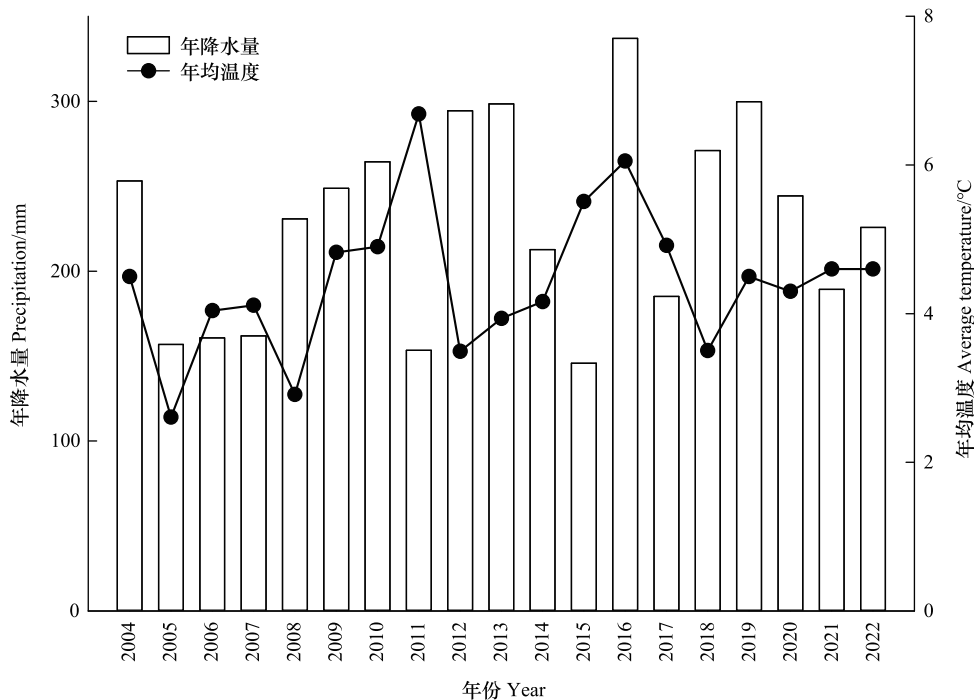


图1 试验地 2004—2022 年降水量及年均温度变化图

Fig.1 Precipitation and temperature variations at the experimental site from 2004 to 2022

### 1.3 研究方法

试验采用完全随机区组设计,通过设置 3 个不同绵羊载畜率放牧区:轻度放牧(light grazing, LG):0.93 羊单位  $\text{hm}^{-2}$  半年 $^{-1}$ 、中度放牧(moderate grazing, MG):1.82 羊单位  $\text{hm}^{-2}$  半年 $^{-1}$ 、重度放牧(high grazing, HG):2.71 羊单位  $\text{hm}^{-2}$  半年 $^{-1}$  和 1 个对照区(CK):围封禁牧,开展放牧试验,每个载畜率设置 3 个重复,共计 12 个放牧小区(图 2)。载畜率设定标准在结合实地调查的情况下,参考王明玖<sup>[14]</sup> 和卫智军等<sup>[15]</sup> 提出内蒙古短花针茅荒漠草原的理论载畜量,并依据实际调查设定。该放牧试验从 2004 年开始至今,通过夏季放牧,冬季休牧的措施开展控制性研究,放牧时间:每年 6 月 1 日—12 月 1 日,早 6:00—晚 18:00,放牧自 2004 年至今,经历 20 年连续放牧。

CK1	LG1	HG1	MG1	HG2	CK2	MG2	LG2	LG3	CK3	MG3	HG3
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

图 2 试验样地设计示意图

Fig.2 The schematic diagram of experimental site

CK:对照区,常年围封不放牧 Control;LG:轻度放牧区 Light grazing;MG:中度放牧区 Moderate grazing;HG:重度放牧区 High grazing;1、2、3 表示 3 个重复

### 1.4 数据采集与处理

在 12 个放牧小区内,每个小区随机设置 10 个重复  $1\text{m}\times 1\text{m}$  的固定样方,合计 120 个样方,每个样方采集草地植物群落特征(地上生物量、高度、盖度和密度)、植物功能性状及不同土层(0—100cm,每 10cm 为一层)中的全氮(N)、全碳(C)、全磷(P)含量。其中,植物功能性状指标包含:个体地上生物量(权重)、植株高度、叶面积、叶干重、比叶面积、茎叶比、叶长和植株全氮、全碳、全磷含量。其中,植物个体地上生物量为植物个体在自然条件下地上部分的总干重量,茎叶比指植物茎干重与叶干重的比值,比叶面积(SLA)是指植物叶片的

面积与其干重的比值。植物全碳(C)和全氮(N)含量的测定依据《植物化学分析方法-微量燃烧法》(GB/T6432—1994)进行,该方法通过完全燃烧样品并测量CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>的释放量来计算C和N的含量。全磷(P)含量的测定则参照《土壤和植物化学分析方法-钼蓝光度法》(GB/T6437—2002),此方法通过测定样品中钼蓝复合物的吸光度来间接计算P含量。土壤全氮含量采用凯氏定氮法,全碳含量采用Elementar vario MACRO CUBE元素分析仪测定,参考标准NY/T 53—1987,全磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法。

通过分析不同载畜率下丰水年和干旱年群落特征与环境因子的关系,采用SPSS 20.0 (SPSS, Chicago, IL, USA)分析不同土层全氮(N)、全碳(C)、全磷(P)含量与多样性指标(物种多样性和功能多样性)之间的Pearson相关系数。利用结构方程模型构建载畜率、降水量、群落特征与物种多样性和功能多样性等相互之间的关系。其中,物种多样性指标主要选取丰富度指数、Shannon-Wiener指数、Pielou均匀度指数和物种优势度指数<sup>[5]</sup>,计算公式及指数意义见表1。功能多样性指标主要选多维的功能多样性指标:Rao二次熵指数、功能丰富度指数、功能均匀度指数和功能离散度指数<sup>[16]</sup>。功能多样性指标计算采用F-Diversity软件<sup>[17]</sup>,利用SigmaPlot 12.5拟合群落特征与环境因子间的回归关系,采用AMOS 21完成结构方程模型构建。

表1 物种多样性指标相关计算公式表

Table 1 The species diversity index and calculation formula

多样性指数 Diversity index	公式 Formulas	公式说明 Description of the formula	指数意义 Meaning of an index
丰富度指数 Species richness index	$S=S'$	$S'$ 为群落中的物种数	反映群落物种丰富度,值越大,丰富度越高
Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index	$H = - \sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{N_i}{N} \right) \times \ln \left( \frac{N_i}{N} \right) \right]$	$N_i$ 为第 <i>i</i> 个物种的个体数, $N$ 为所有物种个体数	基于物种数量反映群落种类多样性,值越大,群落所含的信息量愈大
Pielou均匀度指数 Evenness index	$E = \frac{H'}{H_{\max}}$	$H'$ 为Shannon-Wiener指数, $H_{\max}$ 为最大的物种多样性指数, $S$ 为群落中的物种数。 $H_{\max} = \ln S$	描述物种中的个体的相对丰富度或所占比例,反映群落均匀度,值在0—1之间,越接近1,均匀度越高
优势度指数 Dominance index	$D = 1 - \sum_{i=1}^N \left( \frac{N_i}{N} \right)^2$	$N_i$ 为第 <i>i</i> 个物种的个体数, $N$ 为所有物种个体数	随即抽取的两个个体属于不同种的概率,值越小,多样性越高

S:丰富度指数 Species richness index; H:Shannon-Wiener指数 Shannon-Wiener index; E:Pielou均匀度指数 Evenness index; D:优势度指数 Dominance index

## 2 结果与分析

### 2.1 降水及载畜率对植物群落特征的影响

根据调查数据构建植物群落特征与环境因子间的回归方程结果如下(表2)。植物群落地上生物量、高度、盖度、密度与降水、载畜率之间存在线性相关关系( $P < 0.01$ )。具体而言,群落地上生物量、高度、盖度和密度与年降水量呈现显著正相关关系( $P < 0.01$ ),而与载畜率之间则存在显著的负相关关系( $P < 0.01$ )。总体而言,植物群落的特征与载畜率之间呈现负相关关系,而与年降水之间存在显著正相关关系。

表2 群落特征与环境之间关系拟合方程及特征参数

Table 2 The fitting equations and characteristic parameters of community's characteristics and environment

群落 Community	拟合方程 Fitted equation	R	P
地上生物量 Aboveground biomass	$Y = -61.17054 + 2.81146X_1 - 8.78058X_2 + 0.43377X_3 - 0.22386X_4$	0.43	<0.01
群落平均高度 Average height	$Y = 4.07084 + 0.61626X_1 - 2.75897X_2 + 0.10219X_3 - 1.96189X_4$	0.59	<0.01
单位面积总盖度 Total cover	$Y = 50.33011 + 1.97042X_1 - 6.29282X_2 + 0.02577X_3 - 0.78247X_4$	0.20	<0.01
单位面积总密度 Total density	$Y = 99.93799 - 2.22534X_1 - 16.82423X_2 + 0.56461X_3 - 13.87437X_4$	0.57	<0.01

$X_1$ :放牧年限 Grazing years;  $X_2$ :载畜率 Stocking rate;  $X_3$ :年降水 Precipitation;  $X_4$ :年均温度 Temperature



## 2.2 植物群落功能多样性与物种多样性回归性分析

根据构建的功能多样性与物种多样性之间的回归关系(见图 3),结果显示,Rao 二次熵指数与物种多样性之间呈现显著的线性回归关系( $P < 0.01$ ),且 Rao 二次熵指数随着物种多样性的增加而增加。功能丰富度指数与物种多样性指数之间呈现幂指数关系( $P < 0.01$ )。值得一提的是,物种多样性指数较低时,功能丰富度指数随着物种多样性的增加而迅速减小,而随着物种多样性指数的增加,功能丰富度指数的变化幅度相对较小。功能均匀度指数与 Pielou 均匀度指数之间存在显著的线性回归关系( $P < 0.01$ ),且功能均匀度指数随物种多样性的增加而增加。

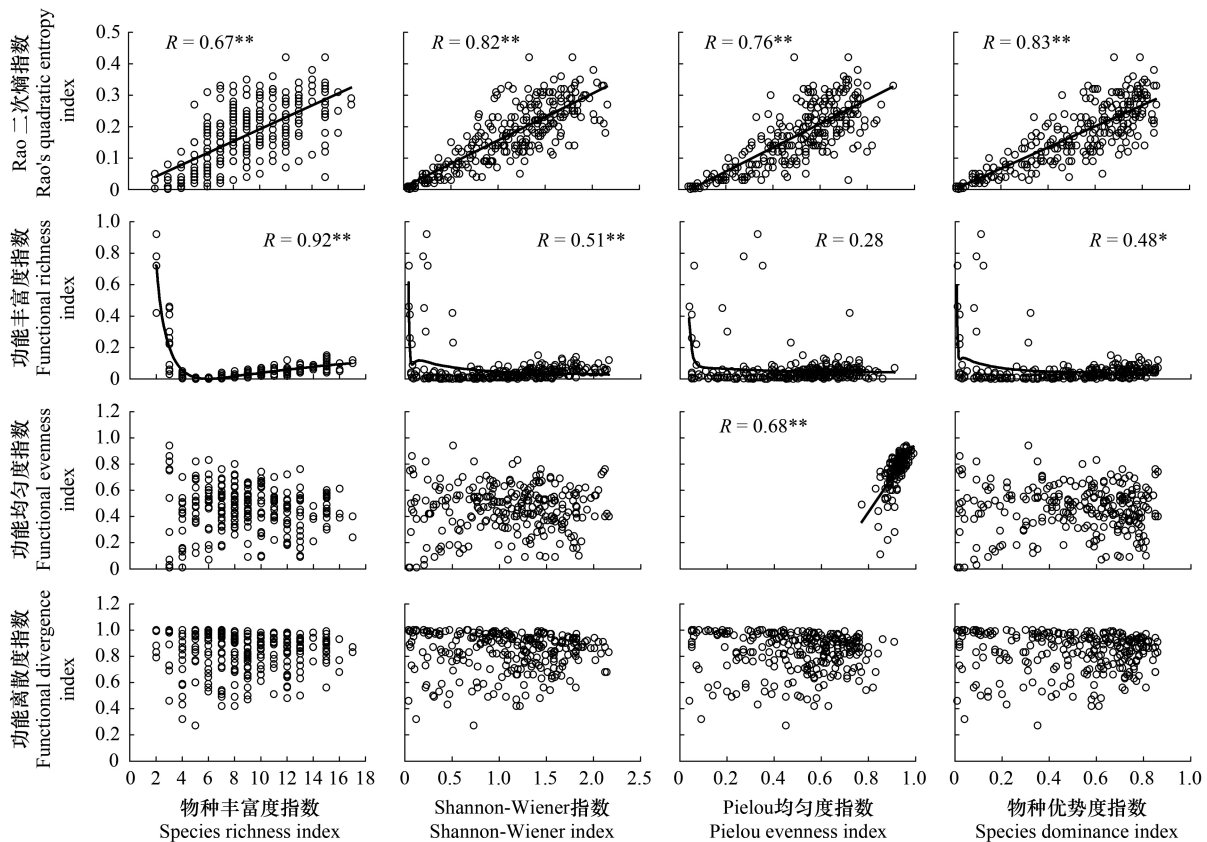


图 3 功能多样性与物种多样性之间的回归关系

Fig.3 The regression relationship of functional diversity and species diversity

## 2.3 载畜率和降水量对植物群落物种及功能多样性的影响

结构方程模型最优分析显示,比较拟合指数 CFI 为 0.97,近似误差的平方根 RMSEA 为 0.06,卡方与自由度的比值为 1.13,显著性检验  $P$  值为 0.04,说明该模型适配度良好,可用于检验载畜率、降水变化和群落特征对物种及功能多样性的耦合影响。

由图 4 可看出,载畜率对物种及功能多样性的路径系数分别为-0.17 和-0.15,尽管未达到显著水平( $P > 0.05$ ),但载畜率不仅对群落特征、物种多样性和功能多样性产生负面影响,还通过影响植物群落特征间接对物种及功能多样性产生影响。群落特征对物种多样性的直接效应为 0.25 ( $P < 0.05$ ),但其对功能多样性的解释作用最为显著,路径系数达到-0.91 ( $P < 0.01$ ),而物种多样性与功能多样性的路径系数为 0.57 ( $P < 0.01$ )。总体而言,载畜率的增加在导致群落特征、物种多样性和功能多样性的降低中扮演着重要的作用( $P > 0.05$ ),植物群落特征对物种及功能多样性的影响起到了决定性作用( $P < 0.01$ )。

由图 5 可知,降水对植物群落、物种多样性和功能多样性的路径系数分别为 0.39 ( $P < 0.05$ )、0.14 和-0.14

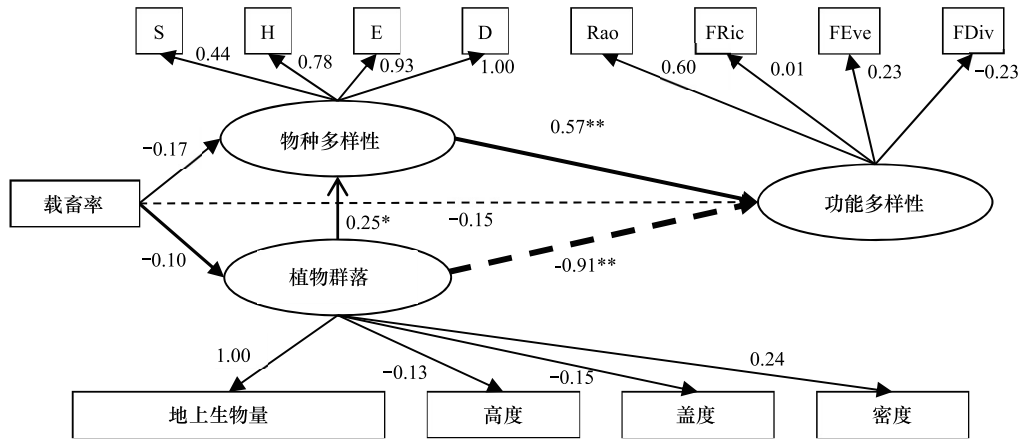


图4 载畜率和群落特征对物种及功能多样性的影响结构方程模型

Fig.4 The structural equation model of the effects of grazing intensity and community characteristics on species diversity and functional diversity

Rao:Rao 二次熵指数 Rao's quadratic entropy index;FRic:功能丰富度指数 Functional richness index;FEve:功能均匀度指数 Functional evenness index;FDiv:功能离散度指数 Functional divergence index;S:丰富度指数 Species richness index;H:Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index; E:Pielou 均匀度指数 Evenness index;D:优势度指数 Dominance index; 线条的粗细表示相关性大小,实线表示正相关,虚线表示负相关;\* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

( $P > 0.05$ )。降水主要通过影响植物群落特征,间接地影响物种多样性和功能多样性。降水对物种多样性产生了直接且积极的影响,但对功能多样性产生了直接且消极的影响。群落特征对物种多样性的直接影响系数为 0.21 ( $P < 0.05$ ),对功能多样性的解释作用最为显著,其路径系数达到-0.85 ( $P < 0.01$ ),物种多样性与功能多样性之间的路径系数为 0.60 ( $P < 0.01$ )。总的来说,降水对植物群落特征影响显著 ( $P < 0.05$ ),而群落特征对物种多样性和功能多样性的影响也起到了决定性作用 ( $P < 0.01$ )。

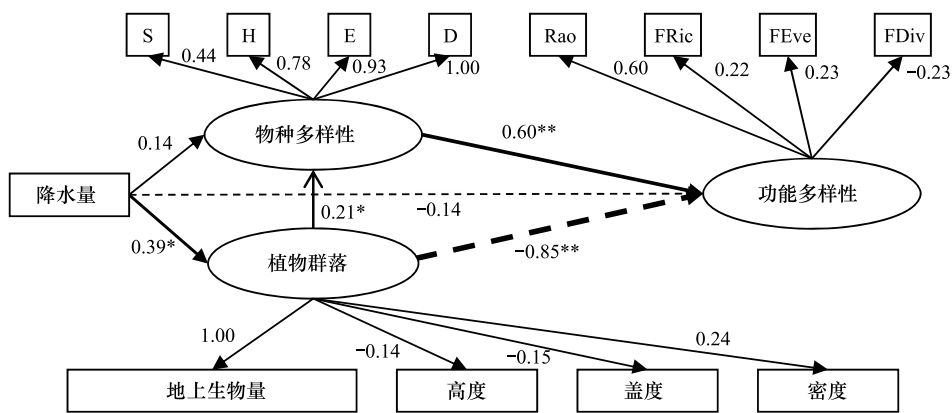


图5 降水和群落特征对物种及功能多样性影响的结构方程模型

Fig.5 The structure equation model of the effects of precipitation and community characteristics on species diversity and functional diversity

### 3 讨论

#### 3.1 载畜率对植物群落物种及功能多样性的影响

本研究结果显示,群落地上生物量、高度、盖度、密度与载畜率负相关,这与张军等<sup>[18]</sup>研究结果基本保持一致。在不同载畜率放牧干扰作用下,群落物种生存策略发生变化,最终引起群落特征的改变<sup>[19-20]</sup>。另外,

载畜率增加对物种与功能多样性有直接的消极影响,这与 Hillebrand 等人的研究结果一致<sup>[21]</sup>,尽管路径系数为-0.17 和-0.15,但由于  $P>0.05$ ,可能是由于载畜率与物种多样性之间存在非线性关系,尤其是在中度放牧条件下,物种多样性和功能多样性表现出显著的响应,即适度的干扰(如放牧)可能通过增加生境异质性来促进多样性的增加,这一结论得到多数学者的广泛认可。通过结构方程模型的分析,载畜率还间接通过影响草地植物群落特征对物种及功能多样性产生影响。这说明载畜率的增加可能导致优势物种的增加,从而降低物种多样性<sup>[22]</sup>。尽管直接效应不显著,但载畜率仍然可能通过间接途径对多样性产生影响。群落特征对物种及功能多样性的影响具有决定性作用,路径系数为-0.91。这意味着草地植物群落的结构和组成对多样性水平有着重要的影响,尤其是对功能多样性的影响最为显著,这与 Schmid 等人的研究相吻合<sup>[23]</sup>。尽管结构方程模型结果显示,载畜率对物种多样性和功能多样性的影响在统计上无显著性,但这并不意味着其影响可以忽略,即使小的改变也可能导致重大的生态效应<sup>[24]</sup>。因此,在制定草地管理和保护策略上,需要特别考虑到载畜率的影响。

### 3.2 降水量变化对植物群落物种及功能多样性影响

降水是影响草地植物群落结构和功能的重要因素。它不仅直接影响物种多样性,并且在植物群落特征形成中发挥着决定性作用,同时,群落特征对物种及功能多样性的影响同样是至关重要的<sup>[25]</sup>。因此,降水对草地生态系统的影响具有多层次的关联性。草地植物群落特征的改变主要体现在地上生物量、高度、盖度和密度的变化上,而环境因子(如降水)的改变会引起群落物种间共生关系及生存空间的变化,进而导致适应性和耐受性强的物种得以保留,影响群落特征。结果显示,群落地上生物量、高度、盖度、密度与降水量正相关。这意味着在降水充足的条件下,降水通过影响植物群落特征,对物种及功能多样性产生了间接影响,更多物种有机会生存和繁衍,从而提高了物种多样性。降水对草地植物群落特征、物种及功能多样性均有影响,降水对物种多样性产生直接的积极影响,但对功能多样性产生直接的消极影响。降水变化引起植物群落特征会发生变化,从而影响物种及功能多样性。这一观点得到了最新研究的支持<sup>[26]</sup>。结果显示,降水对功能多样性产生了直接的消极影响。这表明,尽管物种多样性可能增加,但降水变化可能导致功能多样性的降低。这个观点需要进一步研究,以理解不同降水条件下功能多样性的机制<sup>[27]</sup>。降水在生态系统多样性中扮演着关键角色,其影响可以通过其对植物群落特征的影响进行解释。物种多样性与功能多样性之间存在显著的正向关系,这与陈婷等的研究结果一致<sup>[28]</sup>。

### 3.3 物种多样性与功能多样性间的相关关系

物种多样性反映了群落物种数量、多度分布、组成的复杂性,以及是否存在少数物种占主导地位。而功能多样性则反映了群落中物种功能的变化,即每个物种在其生长和发育中所表现出的功能特性<sup>[29]</sup>。尽管有一些学者认为物种多样性和功能多样性是完全独立的概念,其分析方法也不相关<sup>[10,30]</sup>。本研究发现,Rao 二次熵指数与物种多样性之间、功能均匀度指数与 Pielou 均匀度指数之间存在线性回归关系,且均随着物种多样性的增加而增加,这与 Lefcheck 等人的研究结果一致<sup>[31]</sup>,这意味着群落功能变化的大小与物种多样性密切相关,当群落物种多样性较低时,群落中的部分生态位空间虽然被占据,但未被利用,这将增加物种入侵的可能性<sup>[32]</sup>。功能丰富度指数与物种多样性呈幂指数关系,这表明在生态系统中存在一个“临界点”,当物种多样性较低时,群落中存在潜在利用的资源,但随着物种多样性的增加,群落中存在尚未被利用的资源<sup>[33]</sup>。尽管多数学者认为,群落中没有两个物种的生态位完全相同,物种数目的增加使得群落复杂性增加,从而导致功能多样性增加<sup>[29]</sup>,这些结果强调了物种多样性和功能多样性之间复杂的相互关系。然而,功能多样性与物种多样性间的线性或幂指数关系与一些理论概念并不相符<sup>[30,34]</sup>,物种多样性与功能多样性之间存在一定联系,但不同功能多样性指标可能会呈现不同的变化趋势。

植物群落特征对物种和功能多样性影响显著,物种多样性与功能多样性之间存在着显著的正向关系,路径系数为 0.57。这一结果支持了多样性保护的基本理念,即通过保护物种多样性来丰富功能多样性。研究揭示了载畜率及降水变化对群落特征、物种多样性和功能多样性的影响以及彼此之间的相互关系,这为理解和

管理草地生态系统提供了新的视角。

#### 4 结论

降水对草地植物群落特征、物种多样性和功能多样性具有重要影响,降水量增加将显著促进物种多样性的提升,但对功能多样性产生负面影响。载畜率增加将降低群落物种和功能多样性,但载畜率与物种及功能多样性不存在线性关系。荒漠草原的物种及功能多样性变化受到降水、载畜率和群落特征的综合影响。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 陈静, 蒋万祥, 贺诗水, 王洪凯, 卓丽玲, 陈青, 王红妹. 新薛河底栖动物物种多样性与功能多样性研究. 生态学报, 2018, 38(9): 3328-3336.
- [ 2 ] Godsoe W, Murray R, Iritani R. Species interactions and diversity: a unified framework using Hill numbers. *Oikos*, 2023, 2023(3): e09282.
- [ 3 ] Mouchet M A, Villéger S, Mason N W H, Moullot D. Functional diversity measures: an overview of their redundancy and their ability to discriminate community assembly rules. *Functional Ecology*, 2010, 24(4): 867-876.
- [ 4 ] Xu Z W, Li M H, Zimmermann N E, Li S P, Li H, Ren H Y, Sun H, Han X G, Jiang Y, Jiang L. Plant functional diversity modulates global environmental change effects on grassland productivity. *Journal of Ecology*, 2018, 106(5): 1941-1951.
- [ 5 ] 李江文, 何邦印, 回虹燕, 张晓曦, 李彩, 韩国栋. 异常降水对不同载畜率下荒漠草原物种丰富度及优势度的影响. 生态学杂志, 2023, 42(7): 1610-1617.
- [ 6 ] Wang X, Zhang Q, Zhang Z J, Li W J, Liu W C, Xiao N J, Liu H Y, Wang L Y, Li Z X, Ma J, Liu Q Y, Ren C J, Yang G H, Zhong Z K, Han X H. Decreased soil multifunctionality is associated with altered microbial network properties under precipitation reduction in a semiarid grassland. *iMeta*, 2023, 2(2): e106.
- [ 7 ] Zhong M X, Song J, Zhou Z X, Ru J Y, Zheng M M, Li Y, Hui D F, Wan S Q. Asymmetric responses of plant community structure and composition to precipitation variabilities in a semi-arid steppe. *Oecologia*, 2019, 191(3): 697-708.
- [ 8 ] McNaughton S J. Grazing as an optimization process: grass-ungulate relationships in the serengeti. *The American Naturalist*, 1979, 113(5): 691-703.
- [ 9 ] Bräthen K A, Jahiri X, Jurdado J G H, Soininen E M, Jensen J B. Fungal endophyte diversity in tundra grasses increases by grazing. *Fungal Ecology*, 2015, 17: 41-51.
- [ 10 ] De Bello F, Lepš J, Sebastià M T. Variations in species and functional plant diversity along climatic and grazing gradients. *Ecography*, 2006, 29(6): 801-810.
- [ 11 ] Su H, Liu W, Xu H, Wang Z S, Zhang H F, Hu H X, Li Y G. Long-term livestock exclusion facilitates native woody plant encroachment in a sandy semiarid rangeland. *Ecology and Evolution*, 2015, 5(12): 2445-2456.
- [ 12 ] 余轩, 王兴, 吴婷, 王启学, 马响, 谢莉, 宋乃平. 围封对荒漠草原物种多样性和功能多样性的影响. 水土保持学报, 2021, 35(6): 243-250.
- [ 13 ] Olf H, Ritchie M E. Effects of herbivores on grassland plant diversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13(7): 261-265.
- [ 14 ] 王明玖, 马长升. 两种方法估算草地载畜量的研究. 中国草地, 1994, 16(5): 19-22.
- [ 15 ] 卫智军, 韩国栋, 杨静, 吕雄. 短花针茅荒漠草原植物群落特征对不同载畜率水平的响应. 中国草地, 2000, 22(6): 2-6.
- [ 16 ] Villéger S, Mason N W H, Moullot D. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology*, 2008, 89(8): 2290-2301.
- [ 17 ] Mason N W H, de Bello F. Functional diversity: a tool for answering challenging ecological questions. *Journal of Vegetation Science*, 2013, 24(5): 777-780.
- [ 18 ] 张军, 刘菊红, 王忠武, 李治国, 韩国栋, 屈志强. 内蒙古荒漠草原植物群落特征对放牧利用和降水条件的响应. 中国草地学报, 2020, 42(6): 67-74.
- [ 19 ] Brown L E, Milner A M. Rapid loss of glacial ice reveals stream community assembly processes. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 2195-2204.
- [ 20 ] Jung V, Violle C, Mondy C P, Hoffmann L, Muller S. Intraspecific variability and trait - based community assembly. *Journal of Ecology*, 2010, 98(5): 1134-1140.
- [ 21 ] Hillebrand H, Gruner D S, Borer E T, Bracken M E S, Cleland E E, Elser J J, Harpole W S, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Consumer versus resource control of producer diversity depends on ecosystem type and producer community structure. *Proceedings of the National*



- Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(26): 10904-10909.
- [22] Dietrich P, Cesarz S, Liu T, Roscher C, Eisenhauer N. Effects of plant species diversity on nematode community composition and diversity in a long-term biodiversity experiment. *Oecologia*, 2021, 197(2): 297-311.
- [23] Schmid J S, Huth A, Taubert F. Influences of traits and processes on productivity and functional composition in grasslands: a modeling study. *Ecological Modelling*, 2021, 440: 109395.
- [24] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime J P, Hector A, Hooper D U, Huston M A, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle D A. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 2001, 294(5543): 804-808.
- [25] Wang J F, Zhang L H, Xu X X, Zhao R F, Liu B B, Gao J P. Extreme drought alters plant community structure by changing dominant species growth in desert grassland. *Journal of Vegetation Science*, 2023, 34(3): e13189.
- [26] Ouyang S, Gou M M, Lei P F, Liu Y, Chen L, Deng X W, Zhao Z H, Zeng Y L, Hu Y T, Peng C H, Xiang W H. Plant functional trait diversity and structural diversity co-underpin ecosystem multifunctionality in subtropical forests. *Forest Ecosystems*, 2023, 10: 100093.
- [27] Obiang Ndong G, Villerd J, Cousin I, Therond O. Using a multivariate regression tree to analyze trade-offs between ecosystem services: application to the main cropping area in France. *The Science of the Total Environment*, 2021, 764: 142815.
- [28] 陈婷, 张仲伍, 梁少民, 吕宇豪, 张宇, 赵婧婧. 小浪底库区消落带植物物种多样性与生态系统功能的关系. *山西师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 36(1): 80-88.
- [29] 张金屯, 范丽宏. 物种功能多样性及其研究方法. *山地学报*, 2011, 29(5): 513-519.
- [30] Ricotta C, Moretti M. Quantifying functional diversity with graph-theoretical measures: advantages and pitfalls. *Community Ecology*, 2008, 9(1): 11-16.
- [31] Lefcheck J S, Byrnes J E K, Isbell F, Gamfeldt L, Griffin J N, Eisenhauer N, Hensel M J S, Hector A, Cardinale B J, Duffy J E. Biodiversity enhances ecosystem multifunctionality across trophic levels and habitats. *Nature Communications*, 2015, 6: 6936.
- [32] Goodridge L A, Olds A D, Henderson C J, Connolly R M, Schlacher T A, Jones T R, Gilby B L. Linking ecosystem condition and landscape context in the conservation of ecosystem multifunctionality. *Biological Conservation*, 2020, 243: 108479.
- [33] Díaz S, Pascual U, Stenseke M, Martín-López B, Watson R T, Molnár Z, Hill R, Chan K M A, Baste I A, Brauman K A, Polasky S, Church A, Lonsdale M, Larigauderie A, Leadley P W, van Oudenhoven A P E, van der Plaats F, Schröter M, Lavorel S, Aumeeruddy-Thomas Y, Bukvareva E, Davies K, Demissew S, Erpul G, Failler P, Guerra C A, Hewitt C L, Keune H, Lindley S, Shirayama Y. Assessing nature's contributions to people. *Science*, 2018, 359(6373): 270-272.