

DOI: 10.5846/stxb202203010475

袁梓裕, 张路, 廖李容, 王杰, 雷石龙, 刘国彬, 方怒放, 张超. 黄土高原草地植物多样性与群落稳定性的关系及其驱动因素. 生态学报, 2023, 43(1): 60-69.

Yuan Z Y, Zhang L, Liao L R, Wang J, Lei S L, Liu G B, Fang N F, Zhang C. Relationship between grassland plant diversity and community stability and its driving factors on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 60-69.

# 黄土高原草地植物多样性与群落稳定性的关系及其驱动因素

袁梓裕<sup>1,2</sup>, 张路<sup>1,2</sup>, 廖李容<sup>1,2</sup>, 王杰<sup>3</sup>, 雷石龙<sup>3</sup>, 刘国彬<sup>1</sup>, 方怒放<sup>3</sup>, 张超<sup>3,\*</sup>

1 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

**摘要:** 植物多样性对维持生态功能的稳定发挥具有重要作用。以黄土高原不同植被带草地为研究对象, 基于野外调查和实验分析, 探究黄土高原不同植被带草地植物多样性与群落稳定性特征和二者之间的关系以及影响因素。结果表明: 黄土高原草地群落结构特征(地上生物量、地下生物量)与植物多样性具有明显的纬度分布格局, 草地植物多样性和生物量均表现出自东南向西北沿森林草原带—森林带—草原带—草原荒漠带逐渐递减趋势。森林草原带草地植物多样性和群落稳定性显著高于森林带、草原带和草原荒漠带; 植物多样性与群落稳定性之间存在显著正相关关系, 可以作为衡量群落稳定性的指标, 其稳定性大小表现为森林草原带>森林带>草原带>草原荒漠带。降雨量是影响植物多样性和群落稳定性的主要因素, 并通过改变土壤含水量影响群落稳定性。研究结果揭示了草地植物多样性与群落稳定性之间的关系及驱动机制, 为维持黄土高原草地生态系统的群落稳定性提供了科学依据。

**关键词:** 黄土高原; 草地; 植物多样性; 群落稳定性; 环境因子

## Relationship between grassland plant diversity and community stability and its driving factors on the Loess Plateau

YUAN Ziyu<sup>1,2</sup>, ZHANG Lu<sup>1,2</sup>, LIAO Lirong<sup>1,2</sup>, WANG Jie<sup>3</sup>, LEI Shilong<sup>3</sup>, LIU Guobin<sup>1</sup>, FANG Nufang<sup>3</sup>, ZHANG Chao<sup>3,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

**Abstract:** Plant diversity plays an important role in maintaining the stability of ecological functions. Based on field investigation and empirical analysis, this study took the grassland in different vegetation zones of the Loess Plateau as the research object, explored the characteristics of plant diversity and community stability, assessed the relationship between the two indicators, and further revealed the essential drivers that affected the relationships. The results showed that the characteristics of community structure (aboveground biomass, underground biomass) and plant diversity (richness, diversity and evenness) in grassland on the Loess Plateau had an obvious latitudinal distribution pattern, and the diversity and biomass of grassland plant showed the following trend from southeast to northwest: forest steppe belt>forest belt>

**基金项目:** 黄土高原干旱胁迫下白羊草根分泌物介导的土壤氮转化机制项目(42177449); 陕西省基础研究计划项目(2021JM-605)

**收稿日期:** 2022-03-01; **采用日期:** 2022-08-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangchaolynn@163.com

grassland belt>desert grassland belt. The plant diversity and community stability of grassland in forest steppe belt were significantly higher than those in the other belts; There was a significantly positive correlation between plant diversity and community stability, suggesting that the plant diversity could be used as an index to estimate the stability. The order of stability was forest-steppe belt>forest belt>steppe belt>steppe desert belt. Rainfall was the main factor that influenced plant diversity and community stability, further affecting community stability by changing soil moisture content. The results of this study revealed the relationship between grassland plant diversity and community stability and the underlying driving mechanism, which provided a scientific basis for maintaining the community stability of grassland ecosystem on the Loess Plateau.

**Key Words:** Loess Plateau; grassland; plant diversity; community stability; environmental factors

黄土高原是世界上水土流失最为严重的区域之一,气候变化与人类活动引起的植被覆盖率降低是黄土高原水土流失的重要原因<sup>[1]</sup>。近年来,随着国家对生态文明建设的重视以及相关法律法规的颁布落实,过度农垦放牧等破坏植被的现象已明显减少,植被恢复取得很大成效<sup>[2]</sup>,水土流失与自然生态状况不断改善,但黄土高原草地生态系统仍处于退化的状态<sup>[1-2]</sup>。黄土高原地区总面积为 62.38 万 km<sup>2</sup>,其中草地面积 20.15 万 km<sup>2</sup>,天然草地面积占该区草地总面积的 92.2%<sup>[3]</sup>。草地是重要的生物资源,是黄土高原地区畜牧业发展的基础,在维持生态系统稳定性中起着举足轻重的作用<sup>[4]</sup>。因此,研究黄土高原不同类型草地植物群落特征,可以充分了解气候对植被的影响,为草地的保护和恢复工作提供理论指导,对维持生态系统稳定性具有重要意义。

植物多样性不仅是生物多样性的重要组成之一,在维持生态系统功能中也发挥着极大作用<sup>[5]</sup>。而植物群落稳定性是生态系统的最基本的功能之一,植被本身稳定性的特征和变化规律可以通过研究群落稳定性来反映<sup>[6]</sup>。不同群落的演替阶段其群落稳定性与植物多样性差异较大,群落的稳定性直接反应群落当前的演替状态<sup>[7]</sup>。然而,目前关于植物多样性和群落稳定性之间的关系仍存在争议。Ouyang 等<sup>[8]</sup>研究表明草地生态系统的稳定性很大程度上受物种多样性的影响,草地生态系统退化会降低其维持系统稳定性的能力。王晶等<sup>[9]</sup>和 Campbell 等<sup>[10]</sup>认为群落稳定性与物种多样性分别呈正相关和负相关,而 Giehl 等<sup>[11]</sup>研究发现群落稳定性与物种多样性无相关关系。前人对植物多样性-稳定性的关系研究大多集中于定点观测实验,涉及大尺度的研究较少<sup>[12]</sup>,且缺乏对不同类型草地空间分布的对比研究,尤其是自然环境严苛、群落结构简单、生态系统稳定性相对脆弱的黄土高原<sup>[13]</sup>。鉴于此,本研究利用黄土高原从东南向西北逐渐递减的天然降水梯度,选取黄土高原地区的 4 种植被带的草地群落为研究对象,探讨草地植物多样性与群落稳定性的相关关系及其驱动因素,旨在为黄土高原地区的植被恢复和生态建设提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原是中国四大高原之一,东至太行山,南靠秦岭,北抵长城,范围在 33°43'—41°16' N、100°54'—114°33' E,平均海拔为 1000—1500 m,土壤类型主要为黄绵土,主要涉及青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南 7 省,面积为 64 万 km<sup>2</sup><sup>[14]</sup>。夏天炎热少雨,冬季干燥寒冷年平均气温变化在 3.6—14.3 °C 之间,年均降水量变化在 100—800 mm 之间,降水量由东南向西北呈递减的趋势。根据黄土高原降雨量将研究区划分为 4 种植被带,降雨量大于 600 mm 为森林带、降雨量在 400—600 mm 之间为森林草原带、降雨量在 300—400 mm 之间为草原带、降雨量小于 300 mm 为草原荒漠带。研究区内主要植被类型为白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*)、铁杆蒿 (*Artemisia gmelinii*)、长芒草 (*Stipa bungeana*)、茵陈蒿 (*Artemisiacapillaris*)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*) 等。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 样品采集

于2020年8—9月对研究区采用水平样带法采样,保证各样地之间直线距离大于50 km,并且不同草地类型之间自东南向西北的水分梯度逐渐降低。同一草地类型选择气候及环境条件基本一致的草地,从东向西以行政县为单位共选取49个样地(图1),其中森林带选取6个、森林草原带选取17个、草原带和草原荒漠带各选取13个。每个样地面积均为10×10 m,样地内随机设置6个1×1 m的小样方,共计294个样方,使用全球定位系统(GPS)测定每个样地的高程、经纬度坐标。调查每个样方内的植物种类及其数量,采用收获法获取植物地上部分,地下根系部分利用土钻法取样,土钻孔径7.0 cm,在各个样地随机选取10个点,按照0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm 分层钻取,分类清洗后于60℃ 烘箱内烘干至恒重,称重获取地上和地下生物量。

采用五点法取表层0—20 cm 土壤,移除石块、植物枯落物和根系残体等杂物后,将6个样方中的土样充分混匀成一份土样样品<sup>[15]</sup>。于室内自然风干、过2 mm 筛,研磨用于土壤理化性质测定。

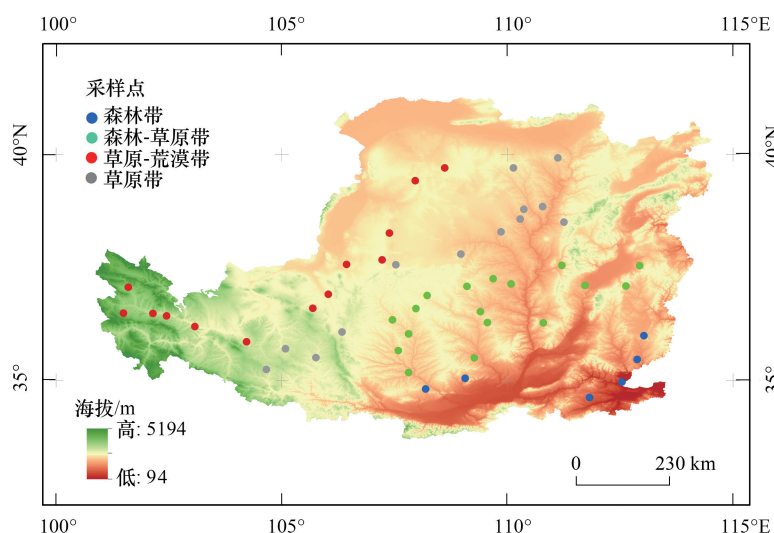


图1 黄土高原采样点分布图

Fig.1 Distribution of sampling points on the Loess Plateau

### 1.2.2 样品处理及室内分析

土壤理化指标采用常规方法测定:有机碳(SOC)含量采用重铬酸盐氧化-外加热法测定,全氮(TN)含量采用半微量凯氏定氮法测定,铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )和硝态氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )含量使用连续流动自动分析仪测定,土壤含水量采用烘箱干燥法测定,土壤pH采用电位法测定,全磷(TP)含量采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定,可溶性有机碳(DOC)和可溶性有机氮(DON)含量使用总有机碳(TOC)分析仪测定<sup>[16]</sup>。

## 1.3 数据分析

### 1.3.1 物种多样性

Patrick 物种丰富度指数( $R$ )、Simpson 多样性指数( $D$ )和Sheldon 均匀度指数( $E_s$ ),各指数的具体计算方法如下<sup>[17]</sup>:

Patrick 丰富度指数:

$$R=S \quad (1)$$

Simpson 多样性指数:

$$D=1-\sum_i^s P_i^2 \quad (2)$$

Sheldon 均匀度指数:

$$Es = \exp(-\sum_i^s P_i \ln P_i) / S \quad (3)$$

式中,  $S$  为样方中总的物种数目;  $P_i = N_i/N$ ,  $P_i$  为某样方中所有物种个体中第  $i$  个物种出现的概率,  $N_i$  为某样方中第  $i$  个物种的重要值,  $N$  为某样方中所有物种的重要值之和。

### 1.3.2 植物群落稳定性

草地植物群落稳定性以群落物种密度变异系数(CV)的倒数(ICV)表示<sup>[18]</sup>:

$$ICV = \mu / \sigma \quad (4)$$

式中,  $\mu$  为样方内每个物种的平均密度,  $\sigma$  为每个物种密度的标准差, ICV 值越大, 群落稳定性越高, 也表示各物种密度变异性较小。

### 1.3.3 统计分析

采用单因素方差分析分析 4 种草地植物群落的生物量(地上、地下)、植物多样性、群落稳定性的差异( $P < 0.05$ ), 利用最小显著性差异法进行多重比较。采用 Pearson 相关分析、混合效应线性模型、结构方程模型, 研究植物多样性与群落稳定性之间的关系以及环境因子与植物多样性和群落稳定性的关联性。其中, 混合效应线性模型以植物多样性为固定因素, 群落稳定性为因变量, 植被类型为随机变量, 得到模型 Model 1; 结构方程模型选用比较拟合指数(CFI>0.9)、标准均方根残差(SRMR<0.05)、渐进残差均方和平方根(RMSEA<0.08)、显著性概率值( $P > 0.05$ )等指标评价模型优度<sup>[19,20]</sup>。最终选取 Simpson 指数代表物种多样性, TP、NO<sub>3</sub>-N、土壤含水量(SM)、土壤容重(SBD)作为土壤因子, 年均降雨量(AR)作为气象因子, 加入 4 个植被类型作为随机因子, 构建出最优结构方程模型。结构方程模型在 Amos 21.0 中建立, 其它分析和作图均在 R v.4.0.2 软件中进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物群落组成及群落稳定性的特征

由表 1 可知, 4 种植被带草地植物多样性存在显著差异。其中, 森林草原带草地植物群落 Patrick 指数和 Simpson 指数显著高于草原带和草原荒漠带( $P < 0.05$ ), 而与森林带草地植物群落差异不显著( $P > 0.05$ )。草原荒漠带草地植物群落 Sheldon 指数显著低于森林带、森林草原带和草原带草地植物群落( $P < 0.05$ ), 而森林带、森林草原带和草原带草地植物群落差异不显著( $P > 0.05$ )。整体而言, 森林草原带草地植物群落的 Patrick 指数、Simpson 指数和 Sheldon 指数最大, 草原荒漠带最小。

表 1 不同植被带草本群落物种多样性比较

Table 1 Comparison of species diversity of herbaceous communities in different vegetation zones

| 多样性指数<br>Diversity index | 森林带<br>Forest belt | 森林草原带<br>Forest steppe belt | 草原带<br>Grassland belt | 草原荒漠带<br>Desert grassland belt | <i>F</i> | <i>P</i> |
|--------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------|----------|
| 丰富度指数 Patrick            | 2.12±0.18ab        | 2.33±0.19a                  | 1.56±0.29b            | 1.43±0.13b                     | 11.42    | <0.001   |
| 多样性指数 Simpson            | 0.79±0.03ab        | 0.85±0.02a                  | 0.77±0.05b            | 0.76±0.02c                     | 9.36     | <0.001   |
| 均匀度指数 Sheldon            | 0.75±0.03a         | 0.76±0.02a                  | 0.72±0.06a            | 0.70±0.02b                     | 5.9      | <0.01    |

表中数值为平均值±标准误, 同行不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

由图 2 可知, 4 种植被带草地植物群落生物量存在显著差异。其中, 森林草原带草地植物群落的地上和地下生物量显著高于草原带和草原荒漠带( $P < 0.05$ )。在不同植被带草地植物群落中, 草原带和草原荒漠带草地植物群落稳定性显著低于森林草原带( $P < 0.05$ )。草地植物群落生物量和群落稳定性大小整体呈现为森林草原带>森林带>草原带>草原荒漠带。

### 2.2 草地功能群丰富度指数与稳定性的变化

由图 3 可知, 4 种植被带草地中各功能群 Patrick 丰富度指数存在显著差异( $P < 0.05$ )。其中, 森林草原带草地的豆科 Patrick 丰富度指数显著高于森林带( $P < 0.05$ ), 而草原荒漠带草地的禾本科和杂草群落 Patrick 丰

富度指数显著低于森林草原带。4种植被带草地功能群稳定性存在显著差异( $P<0.05$ )。其中,草原荒漠带杂草群落稳定性显著高于森林草原带、森林带和草原带,而禾本科和豆科功能群落稳定性在不同植被带草地中不存在显著差异( $P>0.05$ )。

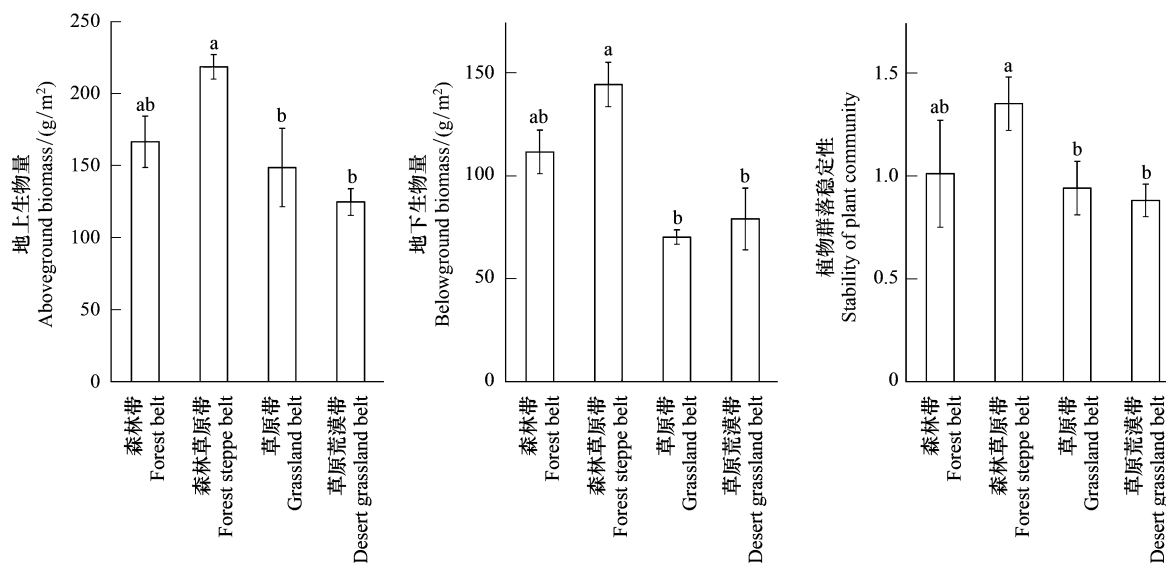


图2 不同植被带草地生物量与群落稳定性变化

Fig.2 Changes of grassland biomass and community stability in different vegetation zones

图中不同字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )

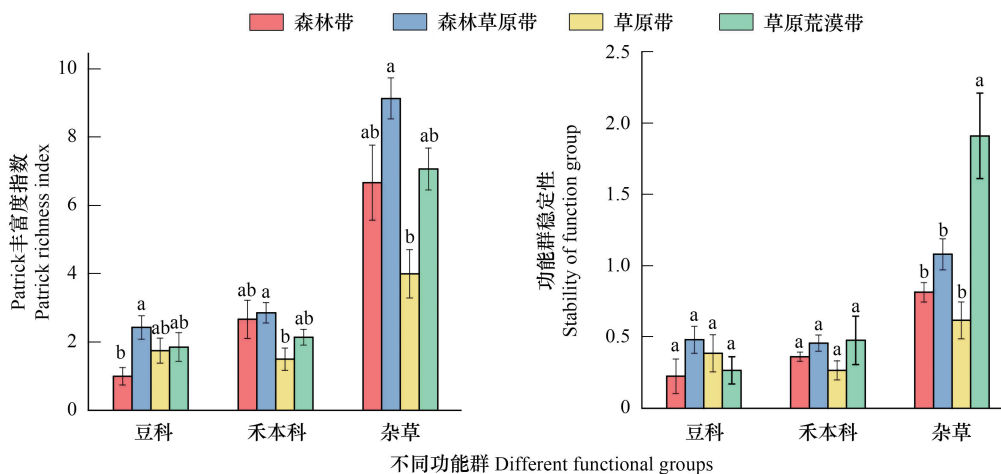


图3 不同植被带草地不同功能群丰富度指数和稳定性变化

Fig.3 Changes of richness index and stability of different functional groups in different vegetation zones

### 2.3 植物多样性与群落稳定性的关系

植物多样性与群落稳定性回归分析结果(图4)显示,群落稳定性与Patrick丰富度指数、Simpson多样性指数、Sheldon均匀度指数均呈正相关,其中与Patrick指数和Simpson指数显著正相关( $P<0.05$ )。从相关系数 $R^2$ 来看,Patrick丰富度指数与群落稳定性的相关系数较大,Simpson多样性指数次之,Sheldon均匀度指数最小。混合线性模型用来进一步分析植物多样性与群落稳定性之间的关系(表2)。建立的模型为 $ICV = Patrick + Simpson + Sheldon + (1/n)$ ;对应模型能解释86.89%的ICV变化。在黄土高原草地植被中Patrick指数和Simpson指数为主导作用因子,其中Patrick指数对群落稳定性的解释率最高;Sheldon指数在草原荒漠带中

为主导因子,解释率占 10.99%。

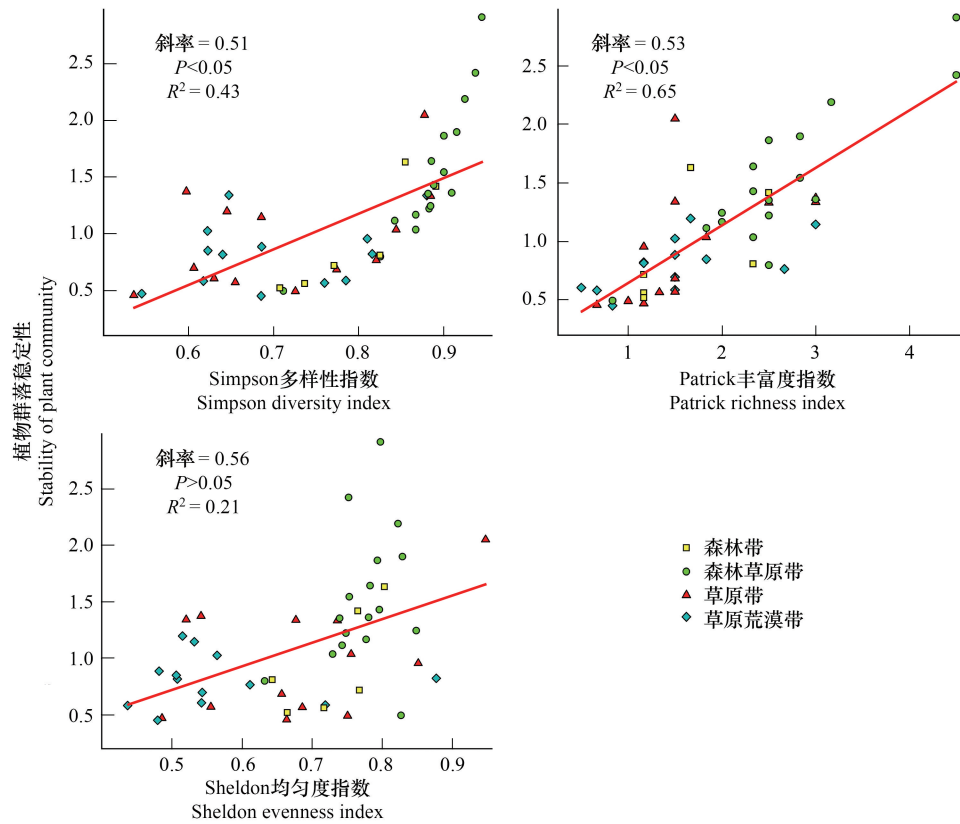


图 4 植物多样性指数与群落稳定性的线性关系

Fig.4 Linear relationship between plant diversity index and community stability

表 2 黄土高原植物多样性与群落稳定性混合线性模型贡献率比较

Table 2 Comparison of contribution rates of mixed linear models of plant diversity and community stability on the Loess Plateau

| 模型固定因子<br>Model fixed factors | $R^2$ | 方差解释量占比/%<br>Percentage of variance explained | $P$       | 赤池信息准则<br>AIC |
|-------------------------------|-------|-----------------------------------------------|-----------|---------------|
| 丰富度指数 Patrick                 | 0.221 | 70.16                                         | 0.000 *** | 60.321        |
| 多样性指数 Simpson                 | 0.401 | 33.01                                         | 0.003 **  |               |
| 均匀度指数 Sheldon                 | 0.009 | 10.99                                         | 0.045 *   |               |

\*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ ; \*\*\*,  $P < 0.001$

## 2.4 植物群落特征与环境因子的关系

环境因子与植被特征、多样性指数和群落稳定性的相关分析如图 5 所示,Patrick 指数、Simpson 指数和 Sheldon 指数和群落稳定性均与年均降雨量和土壤含水量呈显著正相关( $P < 0.05$ ),而与土壤容重呈显著负相关。并且植物多样性指数与年均降雨量相关性最高,而群落稳定性与土壤含水量相关性最高。

结构方程模型(图 6)结果表明,在黄土高原草地中,植物多样性和群落稳定性受多个环境因子共同影响,其中年均降雨量对植物多样性有极显著正直接影响( $P < 0.01$ ),其直接效应为 0.81;土壤含水量和对总磷植物多样性存在显著正影响( $P < 0.05$ ),直接效应分别为 0.53 和 0.31。同时,在群落稳定性方面,植物多样性和土壤含水量对群落稳定性具有极显著正影响( $P < 0.01$ ),直接效应分为 0.65、0.73;其次年均降雨量对群落稳定性有显著正影响( $P < 0.05$ ),直接效应为 0.23。

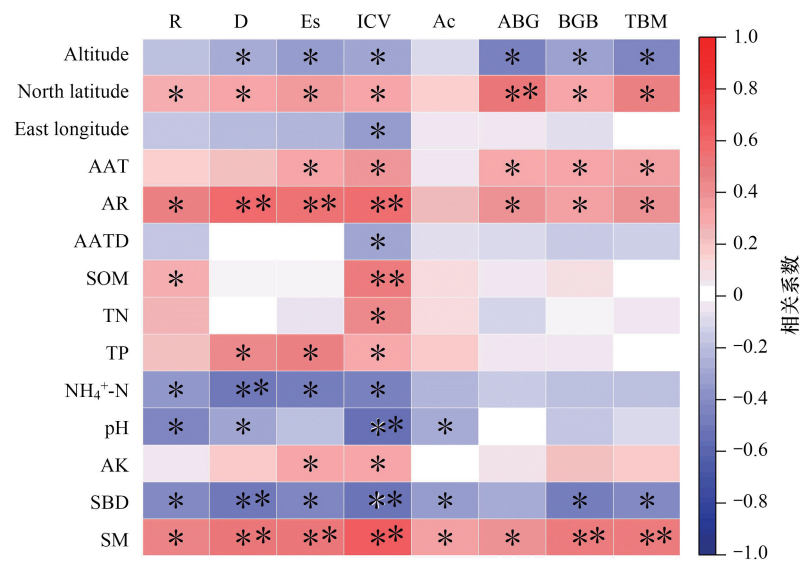


图 5 环境因子与植被特征、多样性指数和群落稳定性的相关性

Fig.5 Correlation between environmental factors and vegetation characteristics, diversity index and community stability

R:丰富度指数 Patrick; D:多样性指数 Simpson; Es:均匀度指数 Sheldon; Ac:平均盖度 Average coverage; ICV:群落稳定性指数 Inverse Coefficient of variation; BGB:地下生物量 Below biomass; AGB:地上生物量 Above biomass; TBM:总生物量 Total biomass; AAT:年均温度 Average annual temperature; AR:年均降雨量 Annual rainfall; AATD:年均温差 Average annual temperature difference; SBD:土壤容重 Soil bulk density; SOM:土壤有机质 Soil organic matter; SM:土壤含水量 Soil moisture; TN:全氮 Total nitrogen; TP:总磷 Total P; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:铵态氮 Ammonium N; AK:速效钾 Available K。\*表示显著相关( $P<0.05$ ), \*\*表示极显著相关( $P<0.01$ )

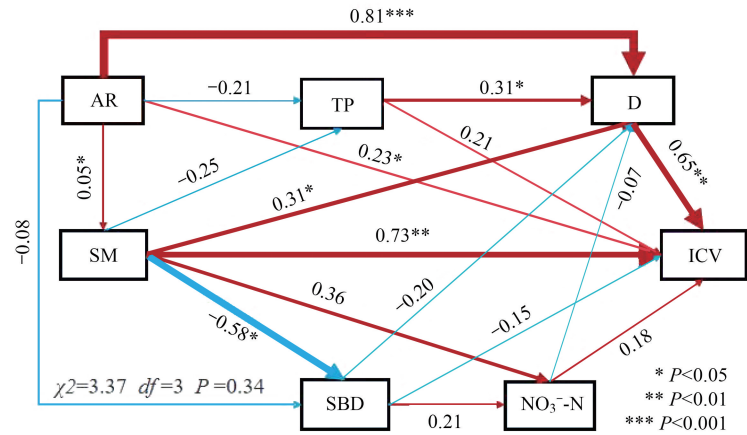


图 6 黄土高原气象、土壤因子与植物多样性和群落稳定性的结构方程模型

Fig.6 Structural equation models of climate, soil factors, plant diversity and community stability on the Loess Plateau

图中红线和蓝线分别表示正作用和负作用,箭头的宽度与作用强度成正比,箭头上的数字是标准化路径系数

3 讨论

3.1 草地群落组成特征变化

本研究表明,森林草原带草地植物群落 Patrick 丰富度指数、Simpson 多样性指数和 Sheldon 均匀度指数显著高于森林带、草原带和草原荒漠带。随着降雨量的减小,植物可利用的水分减少,种群之间对于资源的竞争变大,草地群落物种多样性随之减小,这与王继丰等<sup>[21]</sup>研究三江平原湿地群落的结果一致。然而,从森林带过渡到森林草原带的草地群落植物多样性增加,这可能是由于森林带中的乔木与灌木使得草本群落之间的竞

争增加<sup>[22]</sup>,导致草地群落植物多样性降低,森林带和森林草原带的植物多样性变化规律存在偏差。本研究不同草地群落生物量随纬度梯度变化而呈现出逐渐递减的趋势,这是由于影响黄土高原天然草地生物量的诸多因素中水分占据了主导地位,伴随着纬度梯度的变化降雨量和温度也发生改变从而直接影响草本群落的生长发育<sup>[23]</sup>。李镇清等<sup>[24]</sup>和郝彦宾等<sup>[25]</sup>也发现了类似的结果。本研究发现,森林带与森林草原带的草地群落生物量存在交替变化,是本研究仅考虑草地群落生物量,而没有将草本之外的植物生物量纳入其中,比如乔木和灌木等;当物种结构组成发生变化时草地群落生物量会随之改变,因此森林带草地生物量低于森林草原带,这与姜基春和王国强等<sup>[26]</sup>对研究黄土高原草地群落特征对降雨量的响应研究结果一致。

### 3.2 群落稳定性特征及其与植物多样性之间的关系

群落稳定性是指群落维持各物种之间的相互作用关系并使其达到相对平衡的能力,以及群落受到外界影响时恢复到稳定状态的能力<sup>[27]</sup>。本研究选取 ICV 植物群落稳定性方法分析黄土高原 4 种植被带草地植物群落稳定性的变化。本研究发现,森林草原带草地群落稳定性显著高于森林带、草原带和草原荒漠带,群落稳定性整体呈现出随着降雨梯度降低而下降的趋势,前人<sup>[19]</sup>也得出了类似的结果。在水分相对充足的条件下,为植物创造了良好的生长环境,植物多样性与稳定性因此可以保持相对稳定状态;当含水量相对匮乏时,不利于一些物种的正常生长,从而导致群落稳定性随之下降<sup>[28]</sup>。

本研究中,不同植被带草地群落稳定性与植物多样性变化趋势相同,并且两者呈现极显著正相关关系。张继义<sup>[29]</sup>和 Yang 等<sup>[30]</sup>研究发现,物种多样性可以提高群落生产力,对生态系统功能起到优化作用,同时提高群落稳定性。王国宏等<sup>[31]</sup>报道了生物多样性与生态系统稳定性的关系,植物多样性是植物群落遭到外界环境的严重干扰时,维持生态系统功能的重要屏障,是维持群落稳定性不可或缺的条件之一,植物多样性的增加会促进群落稳定性。这与本研究结果相似,在群落总密度保持恒定状态时,物种密度的变异性会随着物种多样性的增加而呈现减小的趋势,从而提高了群落的稳定性<sup>[18]</sup>。本研究发现,森林带草地植物群落稳定性低于森林草原带,从森林带过渡到森林草原带的草地群落植物多样性的减少可能是导致群落稳定性降低的主要原因<sup>[32]</sup>。

本研究结果表明,不同植被带的不同功能群丰富度指数与功能群稳定性也表现出相同的变化趋势(图 3)。白永飞等<sup>[33]</sup>研究表明,植物多样性对群落稳定性的影响可能是通过不同功能群间的生态补偿作用来实现的。范高华等<sup>[34]</sup>研究发现,草地功能群多样性与植物多样性之间呈极显著正相关,植物多样性在一定程度上能够指示草地功能群多样性。因此,当植物多样性增大其功能群丰富度也呈现上升趋势,此时功能群之间的生态补偿作用也越明显,从而更有效地维持草地群落稳定性。另有研究表明<sup>[35]</sup>,在处于不同降雨梯度的环境下,受水分胁迫的植物群落更加脆弱,从而更加依赖植物多样性去维持群落稳定性,使得植物多样性与群落稳定性形成协同变化关系。以上是本研究结果中植物多样性与群落稳定性呈极显著正相关的内在机制。

### 3.3 植物多样性和群落稳定性与环境因子的关系

不同的草地类型间其环境条件各不相同,导致其结构特征、植物多样性和群落稳定性存在明显差异<sup>[36]</sup>。黄土高原草地植物多样性总体上自东南向西北呈递减的趋势(表 1),年均降雨量、土壤含水量等环境因子对草地植物多样性和群落稳定性存在显著影响(图 6)。其中,年均降雨量和土壤含水量均对植物多样性产生显著影响,并且年均降雨量对植物多样性产生的正影响最高,表明在黄土高原草地生态系统中,年均降雨量对植物多样性起决定作用。这一结果与杨浩等<sup>[37]</sup>研究一致。而拉琼等<sup>[38]</sup>发现雅鲁藏布江河岸植物物种丰富度主要受温度影响而呈现出不同的变化特征。与雅鲁藏布江河谷不同的是,黄土高原地区的地形条件不利于水汽聚集,加之降水稀少,因此使得水分成为影响黄土高原植物多样性和群落稳定性的关键因子<sup>[3]</sup>。

本研究中,草地植物群落稳定性与部分地理、地形、气象和土壤因子同时表现出显著的相关性(图 5;图 6)。前人<sup>[39]</sup>也得到了相似的研究结果,在环境适宜的情况下,土壤容重、土壤含水量等土壤因子对群落稳定性会产生显著影响。其中,土壤容重和土壤含水量大小反映了土壤结构状况和保水性能,并且对植物根系的生长和水分、营养的吸收利用能力产生一定影响<sup>[40]</sup>。本研究中土壤含水量对群落稳定性相关性最高(图 5),

并且年均降雨量和土壤含水量均对群落稳定性产生正影响(图6)。这与司瑞等<sup>[12]</sup>对黑河下游植物群落物种多样性和稳定性分布格局研究发现植物群落稳定性实质上是受土壤水分因子控制的研究结果一致。对草地植被来说,群落的物种组成、植物多样性、内部环境以及较大尺度气候环境的变化等是引起群落外貌、结构与功能发生变化的最重要的因子,必然会影响群落稳定性地维持。本研究结果表明,年均降雨量和土壤含水量同时对植物多样性和群落稳定性产生显著正影响,在共同的环境因素调控下,使得植物多样性和群落稳定性具有协变关系,其内在机制可能是降雨量通过影响植物多样性和土壤含水量,从而间接影响群落稳定性,植物多样性和群落稳定性大小随即保持相同的变化趋势。

#### 4 结论

黄土高原自东南向西北,草地植物生物量、多样性和群落稳定性总体呈递减趋势;森林带和森林草原带显著高于草原带和草原荒漠带,说明降雨量是影响草地植物多样性和群落稳定性的主要环境因素。在黄土高原草地植物群落中,植物多样性和群落稳定性存在正相关关系,即植物多样性高的草地群落具有较高的稳定性。此外,在不同植被带中,对植物多样性和群落稳定性有显著影响的环境因子存在差异性,说明黄土高原草地在不同环境下具有较高的适应能力。因此,为尽可能维持黄土高原草地植物多样性和群落稳定性,应综合考虑草地植物组成和群落结构特征及其影响因素,采用更加合理的恢复方式。

#### 参考文献(References):

- [1] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 侯建, 信忠保, 刘国华, 傅伯杰. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [2] 董凌勃, 海旭莹, 汪晓珍, 邓蕾, 李斌斌, 刘玉林, 李继伟, 李妙宇, 吕文文, 上官周平. 黄土高原退耕还草地植物群落动态对生态系统碳储量的影响. 生态学报, 2020, 40(23): 8559-8569.
- [3] 高阳, 程积民, 刘伟. 黄土高原地区不同类型天然草地群落学特征. 草业科学, 2011, 28(06): 1066-1069.
- [4] 樊勇明, 李伟, 温仲明, 郭倩, 刘晶, 杨雪, 郑诚, 杨玉婷, 姜艳敏, 张博. 黄土区不同恢复年限草地群落生物量及根冠比对氮添加的响应. 生态学报, 2021, 41(24): 9824-9835.
- [5] 朱桂丽, 李杰, 魏学红, 何念鹏. 青藏高原高寒草地植被生产力与生物多样性的经度格局. 自然资源学报, 2017, 32(02): 210-222.
- [6] 刘方炎, 高成杰, 李昆, 张春华. 西南干热河谷植物群落稳定性及其评价方法. 应用与环境生物学报, 2021, 27(02): 334-350.
- [7] 吴昊, 贾少奇, 朱亚星. 物种多样性及环境因子对入侵植物空心莲子草群落稳定性的影响. 生态学杂志, 2022, 41(01): 33-41.
- [8] Ouyang S, Xiang W H, Gou M M, Chen L, Lei P F, Xiao W F, Deng X W, Zeng L X, Li J R, Zhang T, Peng C H, Forrester D I. Stability in subtropical forests: The role of tree species diversity, stand structure, environmental and socio-economic conditions. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(2): 500-513.
- [9] 王晶, 王姗姗, 乔鲜果, 李昂, 薛建国, 哈斯木其尔, 张学耀, 黄建辉. 氮素添加对内蒙古退化草原生产力的短期影响. 植物生态学报, 2016, 40(10): 980-990.
- [10] Campbell V, Murphy G, Romanuk T N. Experimental design and the outcome and interpretation of diversity-stability relations. OIKOS, 2011, 120(3): 399-408.
- [11] Giehl E L H, Jarenkow J A. Disturbance and stress gradients result in distinct taxonomic, functional and phylogenetic diversity patterns in a subtropical riparian tree community. Journal of Vegetation Science, 2015, 26(5): 889-901.
- [12] 司瑞, 刘冰, 赵文智, 朱钊岑, 赵颖. 黑河下游尾间区植物群落物种多样性与稳定性格局. 中国沙漠, 2021, 41(03): 174-184.
- [13] 海旭莹, 董凌勃, 汪晓珍, 邓蕾, 李继伟, 刘玉林, 李妙宇, 潘英杰, 吕文文, 上官周平. 黄土高原退耕还草地 C、N、P 生态化学计量特征对植物多样性的影响. 生态学报, 2020, 40(23): 8570-8581.
- [14] 张家政, 李崇贵, 王涛. 黄土高原植被覆盖时空变化及原因. 水土保持研究, 2022, 29(01): 224-230, 241-241.
- [15] Zhang C, Liu G, Song Z, Wang J, Guo L. Interactions of soil bacteria and fungi with plants during long-term grazing exclusion in semiarid grasslands. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 124: 47-58.
- [16] 吕小娜. 山西省耕地土壤养分分析——评《土壤农化分析(第三版)》. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 145-145.
- [17] 蔡国军, 杨磊, 柴春山, 莫保儒. 半干旱黄土丘陵区不同土地利用类型植物物种多样性研究. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(01): 95-104.
- [18] 张馨文, 安慧, 刘小平, 文志林, 王波, 杜忠毓. 短期氮添加对荒漠草原植物群落组成及稳定性的影响. 生态学杂志, 2021, 40(08):

2400-2409.

- [19] 胡冬, 吕光辉, 王恒方, 杨启, 蔡艳. 水分梯度下荒漠植物多样性与稳定性对土壤因子的响应. 生态学报, 2021, 41(17): 6738-6748.
- [20] 曹小玉, 李际平, 赵文菲, 委霞, 庞一凡. 基于结构方程模型分析林分空间结构对草本物种多样性的影响. 生态学报, 2020, 40(24): 9164-9173.
- [21] 王继丰, 韩大勇, 王建波, 付晓玲, 朱道光, 刘赢男, 曹宏杰, 黄庆阳, 谢立红, 钟海秀, 隋心, 倪红伟. 三江平原湿地小叶章群落沿土壤水分梯度物种组成及多样性变化. 生态学报, 2017, 37(10): 3515-3524.
- [22] 孙天雨, 王雪, 李丹洋, 刘欣蕊, 王瑞丽, 张硕新. 黄土高原草地根系生物量沿环境梯度变化规律. 生态学报, 2021, 41(15): 6234-6244.
- [23] 李林, 魏识广, 练琚瑜, 曹洪麟. 亚热带不同纬度植物群落物种多样性分布规律. 生态学报, 2020, 40(04): 1249-1257.
- [24] 李镇清, 刘振国, 陈佐忠, 杨宗贵. 中国典型草原区气候变化及其对生产力的影响. 草业学报, 2003, 12(01): 4-10.
- [25] 郝彦宾, 王艳芬, 崔骁勇. 干旱胁迫降低了内蒙古羊草草原的碳累积. 植物生态学报, 2010, 34(08): 898-906.
- [26] 姜基春, 王国强, 郭宁, 焦峰. 黄土高原 4 种植被带草本群落特征及其对降水变化的响应. 西北植物学报, 2019, 39(10): 1861-1867.
- [27] 刘瑞雪, 陈龙清. 水淹干扰对水库水滨带植物群落稳定性与种间关系的影响. 生态学报, 2021, 41(16): 6566-6579.
- [28] 巫翠华, 蔡建军, 李华, 张赞, 康永祥. 紫柏山壳斗科植物群落物种多样性和稳定性研究. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(08): 108-115.
- [29] 张继义, 赵哈林. 植被(植物群落)稳定性研究评述. 生态学杂志, 2003, 22(04): 42-48.
- [30] Yang Z L, Zhang Q, Su F L, Zhang C H, Pu Z C, Xia J Y, Wan S Q, Jiang L. Daytime warming lowers community temporal stability by reducing the abundance of dominant, stable species. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 154-163.
- [31] 王国宏. 再论生物多样性与生态系统的稳定性. 生物多样性, 2002, 10(01): 126-134.
- [32] 张景慧, 黄永梅. 生物多样性与稳定性机制研究进展. 生态学报, 2016, 36(13): 3859-3870.
- [33] 白永飞, 陈佐忠. 锡林河流域羊草草原植物种群和功能群的长期变异性及其对群落稳定性的影响. 植物生态学报, 2000, 24(6): 641-647.
- [34] 范高华, 神祥金, 李强, 宋彦涛, 周道玮, 黄迎新. 松嫩草地草本植物生物多样性: 物种多样性和功能群多样性. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3205-3214.
- [35] Allison G. The influence of species diversity and stress intensity on community resistance and resilience. *Ecological Monographs*, 2004, 74(1): 117-134.
- [36] 陈功, 李晓玲, 黄杰, 向玲, 孙雷, 杨进, 胥焘, 黄应平. 三峡水库秭归段消落带植物群落特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 2022, 42(02): 688-699.
- [37] 杨浩, 白永飞, 李永宏, 韩兴国. 内蒙古典型草原物种组成和群落结构对长期放牧的响应. 植物生态学报, 2009, 33(03): 499-507.
- [38] 拉琼, 扎西次仁, 朱卫东, 许敏, 钟扬. 雅鲁藏布江河岸植物物种丰富度分布格局及其环境解释. 生物多样性, 2014, 22(03): 337-347.
- [39] 张雪妮, 李岩, 何学敏, 吕光辉. 水盐变化对荒漠植物功能多样性与物种多样性关系的影响. 生态学杂志, 2019, 38(08): 2354-2360.
- [40] 张梦弢, 张青, 亢新刚, 杨应军, 徐光, 张立新. 长白山云冷杉林不同演替阶段群落稳定性. 应用生态学报, 2015, 26(06): 1609-1616.