

DOI: 10.11686/cyxb2025285

http://cyxb.magtech.com.cn

胡世璐, 冯锦彦, 罗浩, 等. 围栏封育下宁夏盐池荒漠草地生态系统植物群落变化特征及驱动因子. 草业学报, 2026, 35(7): 32—45.

HU Shi-lu, FENG Jin-yan, LUO Hao, *et al.* Characteristics and driving factors of plant community changes under enclosure in the desert grassland ecosystem of Yanchi, Ningxia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2026, 35(7): 32—45.

围栏封育下宁夏盐池荒漠草地生态系统 植物群落变化特征及驱动因子

胡世璐¹, 冯锦彦², 罗浩², 饶宁², 崔盛超³, 黎明杰¹, 查天山^{1,4}, 冯薇^{1,4,5*}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 宁夏哈巴湖国家级自然保护区管理局, 宁夏 盐池 751500; 3. 北京知水水务咨询有限公司, 北京 102200; 4. 北京林业大学水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083; 5. 北京林业大学林业生态工程教育部工程中心, 北京 100083)

摘要: 围栏封育是恢复退化草地的关键措施, 探究不同封育年限下植物群落特征的动态变化对评估封育效果、优化生态工程管理至关重要。本研究以宁夏盐池县柳杨堡荒漠草地为对象, 按封育年限和受干扰程度将其划分为长期完全封育核心区(1991年起完全封育, 持续31年)、短期完全封育边缘区(2002年起完全封育, 持续20年)和短期不完全封育外围区(2002年起不完全封育, 受轻度放牧干扰)。基于2010、2015、2020和2022年野外植被调查(共120个样方)及同期气象数据, 分析了长期封育过程中物种重要值、多样性(Shannon-Wiener指数、Pielou指数、物种丰富度、Simpson指数)的动态变化, 及其与降水量、温度的关系, 并评估了植物群落稳定性[以物种密度变异系数的倒数(ICV)表征]。结果表明: 1) 长期完全封育削弱原优势种如阿尔泰狗娃花、刺沙蓬等的主导地位, 导致其他物种重要值波动加剧, 群落结构改变; 2) 边缘区(20年完全封育)和外围区(20年不完全封育)的物种丰富度和均匀度显著高于核心区(31年完全封育); 3) 当年及前一年降水量增加显著促进了物种多样性, 而当年年均温升高对物种多样性无显著影响, 表明植物群落物种组成和多样性受当年及前期降水共同调控; 4) 群落稳定性表现为外围区(ICV=2.13) > 边缘区(ICV=2.00) > 核心区(ICV=1.74), 反映适度干扰的积极作用和长期封育的潜在风险。综上, 长期完全封育不利于植物群落稳定性的维持和物种多样性的提升, 建议对长期完全封育区(如本研究中的核心区, 封育年限>30年)实施“封育—利用”交替循环的管理模式, 以期通过适度的人为干扰打破生境均质化, 抑制单一优势种的过度扩张, 促进种子传播与土壤种子库更新, 从而在维持生态系统恢复成果的同时, 提升其物种多样性与长期稳定性。本研究为干旱半干旱区封育草地的可持续管理提供了科学依据。

关键词: 封育; 群落特征; 群落稳定性; 降水量; 温度

Characteristics and driving factors of plant community changes under enclosure in the desert grassland ecosystem of Yanchi, Ningxia

HU Shi-lu¹, FENG Jin-yan², LUO Hao², RAO Ning², CUI Sheng-chao³, LI Ming-jie¹, ZHA Tian-shan^{1,4}, FENG Wei^{1,4,5*}

1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Ningxia Haba Lake National Nature Reserve Administration, Yanchi 751500, China; 3. Beijing Zhishui Water Consulting Co., Ltd., Beijing 102200, China; 4. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 5. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

收稿日期: 2025-07-09; 改回日期: 2025-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(32572159), 2025年中央财政国家级自然保护区补助资金项目“哈巴湖国家级自然保护区综合科学考察和专项调查项目”和盐池站荒漠化和沙化定位监测(2024ZXHTSBXY032, 2023ZXHTSBXY010和2022ZXHTSBXY008)资助。

作者简介: 胡世璐(2001—), 女, 天津人, 在读硕士。E-mail: 2833839296@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: weifeng@bjfu.edu.cn

Abstract: Enclosure (fencing) is a key measure to restore degraded grasslands. Investigating the dynamic changes in plant community characteristics under different durations of fencing is crucial to evaluate the effectiveness of fencing for optimizing ecological engineering management. In this study, we focused on the desert grassland of Liuyangbu in Yanchi County, Ningxia. We selected a grassland area that was divided into a long-term fully enclosed core plot (completely enclosed since 1991, 31 years continuous), a short-term fully enclosed edge plot (completely enclosed since 2002, 20 years continuous), and a short-term incompletely enclosed peripheral plot (incompletely enclosed since 2002, subject to light grazing disturbance); i. e., three zones that differed in terms of their fencing duration and disturbance levels. Based on field vegetation surveys conducted in 2010, 2015, 2020, and 2022 (a total of 120 plots) and concurrent meteorological data, we analyzed dynamic changes in species importance values and species diversity (Shannon-Wiener index, Pielou index, species richness, Simpson's index), and their relationships with precipitation and temperature during long-term fencing. We also assessed the stability of the plant community (characterized by the inverse of the coefficient of variation in species density, *ICV*). The results show that: 1) Long-term complete enclosure weakened the dominant position of original dominant species such as *Aster altaicus* and *Salsola ruthenica*, leading to increased fluctuations in the importance values of other species and changes in community structure; 2) Species richness and evenness were significantly higher in the edge plot (20 years of complete enclosure) and the peripheral plot (20 years of incomplete enclosure) than in the core plot (31 years of complete enclosure); 3) Increased precipitation in the current and previous years significantly promoted species diversity, whereas increases in annual mean temperature had no significant effect on species diversity, indicating that the species composition and diversity of plant communities is jointly regulated by precipitation in the current and previous years; 4) Community stability was manifested as peripheral plot ($ICV=2.13$) > edge plot ($ICV=2.00$) > core plot ($ICV=1.74$), reflecting the positive effects of moderate disturbance and the potential risks of long-term enclosure. In summary, long-term complete enclosure is detrimental to the maintenance of plant community stability and the enhancement of species diversity. It is recommended to implement an alternating "enclosure-utilization" management cycle for long-term complete enclosed areas (such as the core plot in this study, with enclosure periods exceeding 30 years). This approach aims to break habitat homogenization through moderate human disturbance, which suppresses the excessive expansion of dominant species and promotes seed dispersal and soil seed bank renewal. Consequently, this approach will enhance species diversity and long-term stability while preserving ecosystem restoration outcomes. Our findings provide a scientific basis for the sustainable management of grasslands in arid and semi-arid regions.

Key words: enclosure; community characteristics; community stability; precipitation; temperature

草地生态系统是我国重要的生态屏障和自然资源,总面积约 2.6 亿 hm^2 , 占国土面积的 41%, 主要分布于西部和北部地区^[1-2]。它不仅为畜牧业发展提供基础, 更在防风固沙、保持水土和维持生物多样性等方面发挥着关键作用^[3]。然而, 我国草地多位于干旱半干旱生态脆弱区, 面临着不合理人类活动和气候变化的双重压力, 退化问题普遍且严重^[4]。作为陆地生态系统的重要组成部分, 草地的健康直接关系到区域生态安全 and 国家粮食安全的保障^[5], 因此, 其修复及可持续管理具有重要战略意义。

作为恢复退化草地的常用措施, 围栏封育通过物理隔离减少外部干扰(如过度放牧), 依赖生态系统自身的恢复力实现植被的自然更新^[6]。因其成本相对较低、实施便捷, 已成为全球及我国生态工程中的重要手段^[7]。然而, 关于封育对植物群落结构与功能的影响, 学界尚未达成共识。大量研究表明, 短期封育能有效提高物种多样性和群落稳定性^[8-10], 而长期封育可能导致生境均质化, 反而降低生物多样性与生态系统稳定性, 不利于生态系统的可持续发展^[11-13]。亦有研究指出, 围栏封育下生态系统植被恢复的非线性变化还会受到降水和温度的影响。例如, 降水是驱动干旱区物种多样性年际变化的主导因子^[14], 但从更长的时间尺度来看, 相对丰富的降水条件可能

会促进某些优势种的生态位扩张,最终导致植物群落多样性降低和生态系统结构趋同^[15-16];高温则通过增强水分蒸散作用,在季节尺度上抑制荒漠草原的植被恢复^[17]。上述分歧提示,封育效果可能受到封育年限、区域环境(特别是水热条件)等多种因素的复杂影响,因此,科学评估围栏封育对退化草地的恢复效果,关键在于厘清其对封育年限及气候条件等时空环境因子的响应。

宁夏盐池县地处我国西北干旱半干旱区典型农牧交错带,生态环境脆弱,早期草地退化严重。自1990年国家启动防沙治沙工程以来,盐池县作为重点示范区,于1991年在柳杨堡建立了综合整治试验区,并实施了以围栏封育为主的退化草地治理措施,成效显著^[18]。这为评估长期封育效果提供了理想平台。

基于上述背景,本研究以盐池县柳杨堡围栏封育区为对象,旨在解决以下关键科学问题:1)荒漠草地不同封育年限及干扰强度(有无牲畜采食或人为活动)区域植物群落物种组成和多样性呈现怎样的动态变化规律?2)不同封育模式下植物群落物种多样性的年际变化与同期降水、温度的年际变化是否存在相关性及滞后效应?3)不同封育年限及干扰强度(有无牲畜采食或人为活动)区域植物群落稳定性有何差异?研究结果将为优化封育草地管理策略、促进退化生态系统可持续恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于距盐池县城20 km的柳杨堡围栏封育区(37°50' N, 107°19' E),属于我国干旱与半干旱区、草原与荒漠草原的过渡区,典型的温带大陆性季风气候,年均气温8.3℃,年均降水量280 mm。土壤类型以灰钙土为主,植被类型以沙生、旱生植物为主,包括猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)、砂珍珠豆(*Oxytropis racemosa*)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、赖草(*Leymus secalinus*)、老瓜头(*Cynanchum komarovii*)、芨芨草(*Neotrinia splendens*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)等。

1.2 气象数据获取

本研究采用盐池国家基准气象站(53723)的观测数据,数据源引自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)。数据集包括8个年份(2009、2010、2014、2015、2019、2020、2021、2022)的逐日降水数据及同期日平均温度数据。所有数据均经过严格的质量控制,确保其可靠性和准确性。

1.3 样地布设及植被调查

研究区为地形平坦、生境梯度变化较小的连续草地,环境异质性低,这有效降低了空间因素对研究结果的潜在影响。因此本研究根据长期完全封育、短期完全封育及短期不完全封育3种不同的封育条件将研究区划分为核心区、边缘区及外围区,各样地的大小均为500 m×500 m且在同一条直线上(图1)。核心区(core plot)自1991年以来使用铁丝网围栏,完全排除野生动物和家畜的采食;边缘区(edge plot)自2002年开始采用同样规格的铁丝网围栏实施围栏封育,其间围栏完好,实现了完全封育;外围区(peripheral plot)自2002年开始进行封育,其间由于围栏破坏严重受到了轻微人为干扰和放牧的影响,载畜率约为 $0.75 \text{只} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,为当地较适宜的放牧强度^[19]。

3个样地之间有长期固定的围栏及水泥桩作为标识,因此本研究采用样方和样线相结合的方法,即以核心区的固定水泥桩为起点布设一条样线,沿箭头所指方向(图1)在核心区、边缘区、外围区内每隔5 m设置一个1 m×1 m的样方,各样地10个样方,3个样地共计30个样方(核心区虽距省道最近,但其自1991年

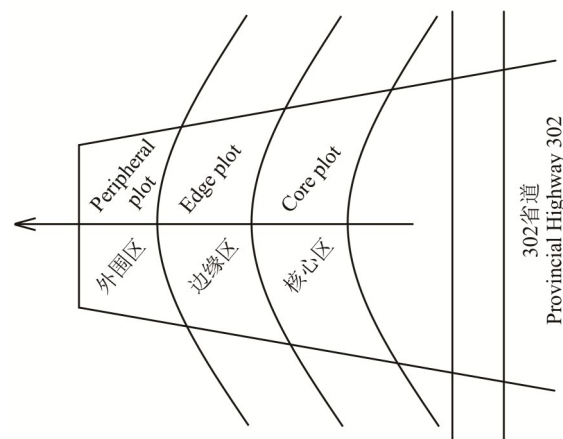


图1 样地分布^[20]

Fig. 1 Distribution of plots^[20]

采用铁丝网围栏实施封育以来,完全排除了家畜、野生动物采食及人为活动干扰,是一个受人为强力保护的干扰隔离区)。调查时间为 2010、2015、2020、2022 年 7—8 月,共计 120 个样方。调查内容包括海拔、经纬度、物种种类、株数、高度、盖度、密度等。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 降水及温度动态变化特征 本研究的植被调查在每年 7—8 月进行,但生长季定义为每年 5—9 月,这与研究区主要植物的物候期相符^[21]。为验证生长季降水量与野外调查时段降水量的匹配性,对二者进行 Pearson 相关性分析,结果呈显著正相关($r=0.956, P<0.01$)关系。且植物群落的物种组成与多样性是其对整个生长季水分条件的综合响应,而非仅取决于特定月份的降水^[22],故本研究采用生长季降水量而非野外调查时段降水量。

研究区年降水量、生长季降水量均显现出“减少—增加—减少—增加”的“W”型变化特征,总体均呈下降趋势(表 1)。多年平均降水量为 290.9 mm,最低年降水量为 205.8 mm,出现在 2020 年,最高年降水量为 365.6 mm,出现在 2015 年。生长季降水量占全年降水量的 54.7%~86.0%,多年平均生长季降水量为 225.4 mm,最低生长季降水量为 129.5 mm,出现在 2019 年,最高生长季降水量为 312.9 mm,出现在 2015 年。年均温呈“升高—降低—升高—降低”的变化动态,总体呈升高趋势(表 1)。多年平均温度为 9.30 °C,最低年均温为 8.59 °C,出现在 2009 年,最高年均温为 10.15 °C,出现在 2021 年。

表 1 研究区年降水量、生长季降水量及年均温

Table 1 Annual precipitation, precipitation during the growing season and mean annual temperature in the study area

项目 Items	年份 Year							
	2009	2010	2014	2015	2019	2020	2021	2022
年降水量 Annual precipitation (mm)	280.7	248.4	346.9	365.6	236.9	205.8	323.2	319.9
生长季降水量 Precipitation during the growing season (mm)	241.4	187.6	254.7	312.9	129.5	163.6	252.6	261.1
年均温 Mean annual temperature (°C)	8.59	8.78	9.27	9.43	9.32	9.06	10.15	9.83

1.4.2 植物群落物种重要值及多样性 根据样地调查结果,采用重要值(important value, IV)衡量物种在群落中的优势度,采用 α 多样性指数表征植物群落物种多样性特征,包括 Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Pielou 均匀度指数(J)、物种丰富度(R)、Simpson 多样性指数(D),计算公式如下^[23]:

$$IV=(RH+RD+RC)/3 \tag{1}$$

$$H=-\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \tag{2}$$

$$J=H/\ln S \tag{3}$$

$$R=S \tag{4}$$

$$D=1-\sum_{i=1}^s P_i^2 \tag{5}$$

式中: RH 为相对高度(relative height), RD 为相对密度(relative density), RC 为相对盖度(relative coverage), P_i 为第 i 种植物在样地出现的概率, S 为出现在样方内物种的总数目。

1.4.3 植物群落稳定性 采用群落物种密度变异系数的倒数(inverse of the coefficient of variation, ICV)表征植物群落时间稳定性^[24],该指标有效量化了群落水平上物种多度(本研究以密度表征)在时间序列中波动的整体幅度:

$$ICV=\mu/\sigma \tag{6}$$

式中: μ 为样方中各物种的平均密度, σ 为各物种密度的标准差。

1.5 结果统计与分析

使用 R 4.2.0 进行数据整理与核算,所得指标包括重要值、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数、物种丰富度、Simpson 指数和群落稳定性。使用 SPSS 26.0 进行 Shapiro-Wilk 检验和 Levene 检验(显著性水平设置为 $\alpha=$

0.05), 确认所有指标数据均符合正态分布和方差齐性后, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同封育条件下物种多样性及群落稳定性的组间差异; 并通过 Pearson 相关性分析检验各物种多样性指数与气候因子(年降水量、生长季降水量、年均温)之间的相关性。所有图表均使用 Origin 2021 绘制。

2 结果与分析

2.1 植物群落物种重要值的动态变化

在干旱区植物群落中, 会出现受微生境异质性驱动而非主导环境因子影响的边际分布种或临时定居种, 其存在具有偶然性, 会模糊封育对植物群落结构的影响^[25]。为消除随机波动对优势种竞争格局分析的干扰, 本研究剔除 $IV < 1$ 的偶见种后(表 2), 通过优势种重要值变异系数(coefficient of variation, CV)和更替频率(以第一优势种变化计^[26])分别对 3 个封育区植物群落优势种的动态变化进行定量分析(表 3)。核心区在研究期内发生了 2 次优势种的更替, 且重要值变幅均高于其他区域(CV: 83.5%~143.7%), 优势种年际波动最为剧烈。具体表现为: 2010 年阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*, $IV=46.98$)为优势种, 2015 年更替为刺沙蓬(*Salsola ruthenica*, $IV=38.60$), 2020 年狗尾草(*Setaria viridis*, $IV=19.15$)作为第一优势种与叉枝鸦葱(*Scorzonera divaricata*, $IV=12.31$)共优, 2022 年狗尾草($IV=17.36$)仍为第一优势种但共优种更替为黑沙蒿($IV=13.71$)。该区处于持续的演替波动中, 群落结构极不稳定。边缘区和外围区均未发生第一优势种的更替, 黑沙蒿始终占据优势地位(边缘区 $IV: 8.29 \sim 29.16$, 外围区 $IV: 15.49 \sim 32.38$), 重要值变异系数也较低(如边缘区黑沙蒿 $CV=40.3\%$), 与核心区形成鲜明对比。

2.2 物种多样性的动态变化

不同样地的物种多样性指数呈规律性年际波动(图 2)。时间动态分析显示, Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数和物种丰富度随封育年限的增加呈“增大—减小—增大”模式, 均在 2015 年达到峰值, 在 2020 年降至谷值, 2022 年有所回升。Simpson 指数则呈现相反的“减小—增大—减小”模式, 在 2015 年最低, 2020 年最高。空间异质性分析表明, 边缘区和外围区的物种丰富度和均匀度在各调查年份显著高于核心区。相反, 核心区的 Simpson 指数显著高于边缘区和外围区, 表明其物种优势度更高。

2.3 降水和温度对物种多样性的影响

相关性分析揭示了物种多样性对降水变化的显著响应及其滞后效应(图 3~6)。就降水效应而言, Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数和物种丰富度均与当年年降水量、前一年年降水量及当年生长季降水量呈显著正相关($P < 0.05$)关系, Simpson 指数与上述降水指标均呈显著负相关($P < 0.05$)关系, 但物种多样性与前一年生长季降水量无显著相关性($P > 0.05$), 这表明物种多样性不仅受当年降水调控, 也受前一年降水的显著影响, 支持降水响应的滞后性理论。温度效应方面, 物种多样性与年均温无显著相关性($P > 0.05$, 图 7), 但 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数、物种丰富度随年均温升高呈现微弱上升趋势, Simpson 指数则呈现微弱下降趋势。

2.4 植物群落稳定性的动态变化

基于群落物种密度变异系数的倒数(ICV)表征群落时间稳定性, ICV 值越大表明植物群落稳定性越高, 反之植物群落稳定性越低。外围区的植物群落稳定性最高($ICV=2.13$), 边缘区的稳定性次之($ICV=2.00$), 核心区的稳定性最低($ICV=1.74$)。统计分析表明, 外围区和边缘区的稳定性均显著高于核心区, 而外围区与边缘区之间的差异未达显著水平(图 8)。

3 讨论

3.1 不同封育年限对植物群落的影响

本研究发现, 长期完全封育(核心区, 31 年)导致植物群落稳定性最低($ICV=1.74$), 低于边缘区(20 年, $ICV=2.00$)和外围区(20 年且有轻度干扰, $ICV=2.13$)。这一结果与传统认知“封育时间越长效果越好”不一致, 印证了王明明等^[27]在科尔沁沙地的研究结果。核心区稳定性下降的核心表现是优势种的剧烈更替, 阿尔泰狗娃花($IV: 46.98 \rightarrow 9.26$)、刺沙蓬($IV: 38.60 \rightarrow 0$)等物种重要值断崖式下降, 原因可能是: 1) 长期隔离消除了大型

表 2 不同封育区主要植物物种重要值年际变化

Table 2 Interannual changes in the importance values of major plant species in different enclosure areas

主要植物 Main plants	核心区 Core plot				边缘区 Edge plot				外围区 Peripheral plot			
	2010	2015	2020	2022	2010	2015	2020	2022	2010	2015	2020	2022
阿尔泰狗娃花 <i>A. altaicus</i>	46.98	6.13	5.46	9.26	4.54	7.64	5.21	6.01	2.11	16.81	6.46	7.35
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	9.45	6.92	1.17	1.82	—	—	5.80	—	—	3.41	—	2.53
苦豆子 <i>S. alopecuroides</i>	1.75	5.64	3.39	8.08	12.52	3.15	6.90	11.80	4.82	7.99	11.29	4.70
披针叶野决明 <i>Thermopsis lanceolata</i>	1.81	2.56	1.55	1.53	1.55	5.00	—	—	—	4.89	4.98	1.43
刺沙蓬 <i>S. ruthenica</i>	1.48	38.60	4.33	—	13.78	13.39	7.21	—	9.39	7.26	11.74	—
狗尾草 <i>S. viridis</i>	—	3.54	19.15	17.36	17.05	4.14	6.23	24.43	5.91	—	8.08	13.12
叉枝鸢葱 <i>S. divaricata</i>	6.85	1.00	12.31	—	—	—	—	6.71	—	1.21	—	—
丝叶山小苦荬 <i>Ixeridium graminifolium</i>	4.05	2.71	4.97	—	9.05	—	3.19	—	13.52	—	—	—
草木樨状黄芪 <i>A. melilotoides</i>	2.61	1.14	8.68	—	—	4.92	1.60	—	2.25	5.62	3.27	—
砂蓝刺头 <i>Echinops gmelini</i>	2.46	2.96	—	3.33	—	1.51	—	1.19	—	—	—	3.23
老瓜头 <i>C. komarovii</i>	3.47	1.90	3.96	—	1.04	1.19	1.94	—	1.50	7.44	5.83	5.80
沙生针茅 <i>Stipa glareosa</i>	—	1.67	1.89	1.64	—	—	5.66	2.62	—	—	—	—
黑沙蒿 <i>A. ordosica</i>	2.92	2.34	—	13.71	17.76	27.03	8.29	29.16	32.38	23.48	16.26	15.49
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	7.59	6.30	—	—	3.68	—	3.92	—	—	3.91	—	—
茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	—	7.78	7.15	—	—	—	3.19	—	—	—	2.64	—
沙鞭 <i>Psammochloa villosa</i>	3.10	—	—	—	1.97	—	—	—	—	—	—	—
蒙古冰草 <i>Agropyron mongolicum</i>	—	—	6.41	1.10	—	—	5.30	2.14	5.17	—	—	—
蒙古岩黄芪 <i>Hedysarum mongolicum</i>	—	3.56	—	4.19	—	10.97	5.62	12.41	—	—	—	—
乳浆大戟 <i>Euphorbia esula</i>	—	—	—	—	—	—	5.45	1.70	—	—	4.29	1.58
远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	—	—	—	—	—	3.62	—	1.05	—	—	—	1.08
雾冰藜 <i>Bassia dasyphylla</i>	—	—	—	—	1.59	4.40	—	—	—	—	—	—
花棒 <i>Hedysarum scoparium</i>	—	—	—	—	3.39	—	—	—	7.30	—	—	—
鹅绒藤 <i>Cynanchum chinense</i>	—	—	—	—	—	1.43	—	—	—	—	—	—
地锦草 <i>Euphorbia humifusa</i>	—	—	—	—	1.39	—	—	—	2.07	—	—	—
飞廉 <i>Carduus nutans</i>	—	—	—	—	—	—	—	1.94	—	—	—	—
二色补血草 <i>Limonium bicolor</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.94	2.44
尖头叶藜 <i>Chenopodium acuminatum</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.64	—
蒺藜 <i>Tribulus terrestris</i>	—	—	—	5.21	—	—	—	—	—	—	—	—
牻牛儿苗 <i>Erodium stephanianum</i>	—	—	—	2.73	—	—	—	—	—	—	—	—
猪毛菜 <i>Kali collinum</i>	—	—	—	6.55	—	—	—	3.60	—	—	—	9.17
赖草 <i>L. secalinus</i>	3.70	—	—	—	8.14	1.62	—	—	3.81	13.86	—	—
角蒿 <i>Incarvillea sinensis</i>	—	3.65	—	—	—	—	—	—	2.82	3.09	—	5.67
羊草 <i>Leymus chinensis</i>	—	—	3.11	—	—	—	5.32	—	—	—	4.63	—
乳苣 <i>Mulgedium tataricum</i>	—	—	—	2.51	—	—	—	—	—	—	—	1.76
蒙古虫实 <i>Corispermum mongolicum</i>	—	—	1.70	—	—	10.82	—	1.26	—	—	6.46	—
香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i>	—	—	—	1.20	—	—	—	—	—	—	—	—
蒙古韭 <i>Allium mongolicum</i>	—	—	—	1.01	—	—	—	—	—	—	—	—
柠条 <i>C. korshinskii</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.07	—

—: 该物种在此样地中未出现 This species does not occur in this plot.

干扰,使种间竞争成为主导生态过程,初期先锋种(如阿尔泰狗娃花)凭借快速生长占据优势^[28],但长期封闭导致枯落物堆积、生物结皮发育,阻碍水分入渗,改变土壤微环境^[20],同时,次生优势种(如黑沙蒿)的化感物质积累(如酚类分泌物)及其诱导的土壤生物反馈(如病原体积累或养分失衡)共同削弱了原有优势种的竞争力,引发物种更替^[29-30];2)完全排除动物活动切断了依赖动物传播物种(如达乌里胡枝子)的种子扩散途径,导致其种群持续衰退,群落更新机制受损;3)长期封育下,小种群受环境随机性(如生态漂变)的影响加剧,在缺乏适度干扰重塑竞争格局的情况下,群落演替易受偶然事件驱动,导致优势种不可预测的剧烈波动^[31-32]。这种状态表明核心区可能处于亚稳态,而非向稳定顶极群落发展^[33]。

边缘区作为中期封育系统,其过渡性特征明显,部分物种(如蒙古岩黄芪)显示恢复趋势,但整

表3 不同封育区优势种重要值变异系数及更替频率

Table 3 Coefficient of variation of important values and turnover frequency for dominant species in different enclosure areas

封育区 Fenced area	优势种 Dominant species	重要值变异系数 Coefficient of variation (%)	更替频率 Turnover frequency
核心区 Core plot	阿尔泰狗娃花 <i>A. altaicus</i>	102.6	2
	刺沙蓬 <i>S. ruthenica</i>	143.7	
	狗尾草 <i>S. viridis</i>	83.5	
	叉枝鸦葱 <i>S. divaricata</i>	98.1	
	黑沙蒿 <i>A. ordosica</i>	111.6	
边缘区 Edge plot	黑沙蒿 <i>A. ordosica</i>	40.3	0
	刺沙蓬 <i>S. ruthenica</i>	65.2	
	狗尾草 <i>S. viridis</i>	63.5	
外围区 Peripheral plot	黑沙蒿 <i>A. ordosica</i>	31.1	0
	阿尔泰狗娃花 <i>A. altaicus</i>	65.5	
	刺沙蓬 <i>S. ruthenica</i>	61.9	
	狗尾草 <i>S. viridis</i>	69.4	

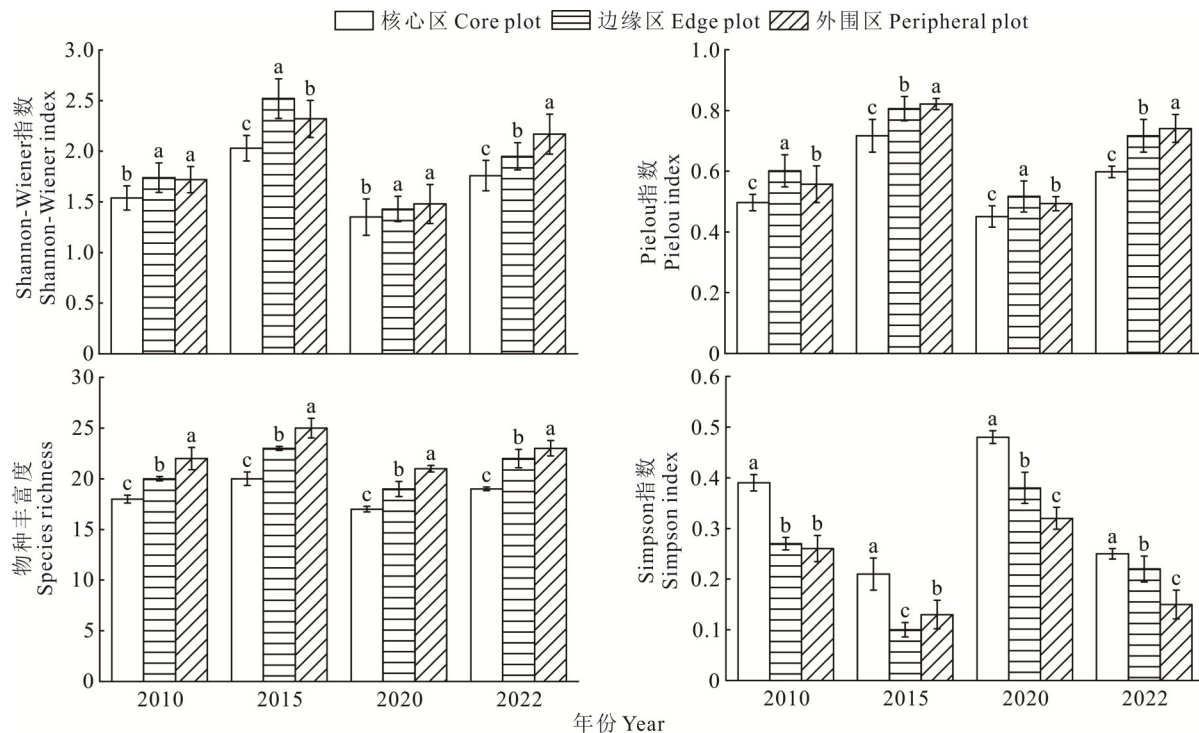


图2 不同封育区物种多样性指数年际变化

Fig. 2 Interannual changes in species diversity indices in different enclosure areas

不同小写字母表示不同封育区间差异显著($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different enclosure areas. The same below.

体波动仍较大,这表明群落尚未跨越演替阈值^[34],竞争重组过程仍在继续。而黑沙蒿(17.76→29.16)的扩张趋势可能预示着未来会重复核心区的单优化路径,这种时间滞后效应突显了生态恢复的非线性特征^[35]。

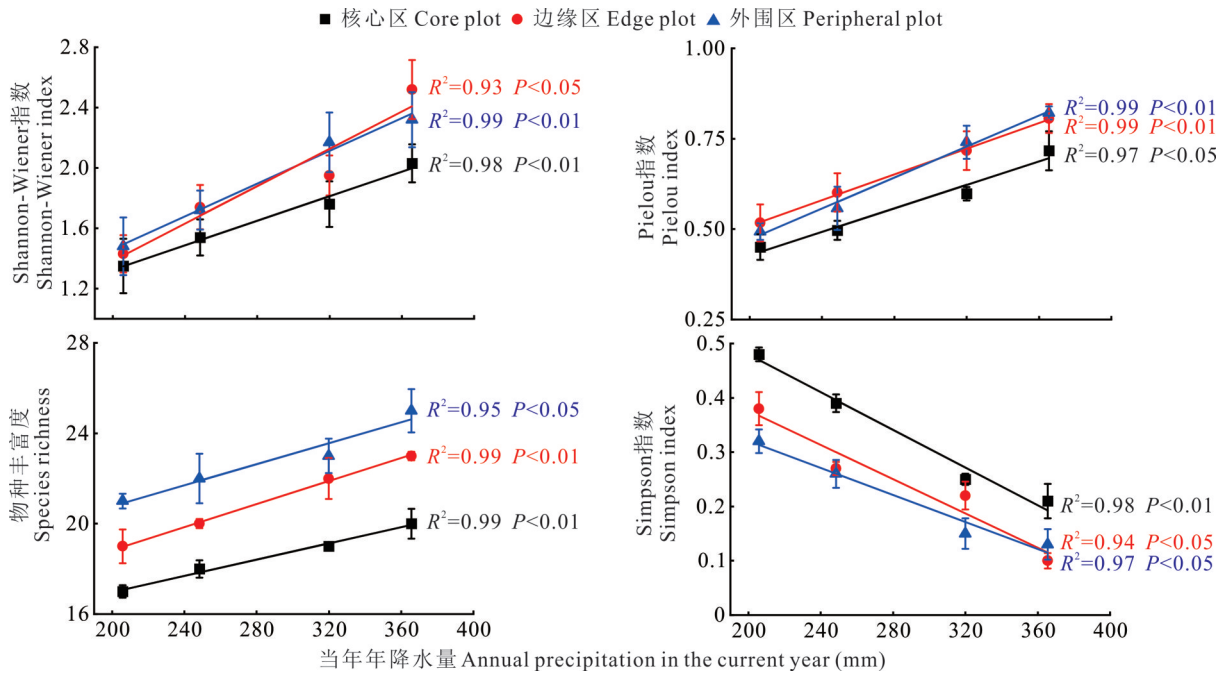


图 3 物种多样性与当年年降水量的关系

Fig. 3 Relationship between species diversity and annual precipitation in the current year

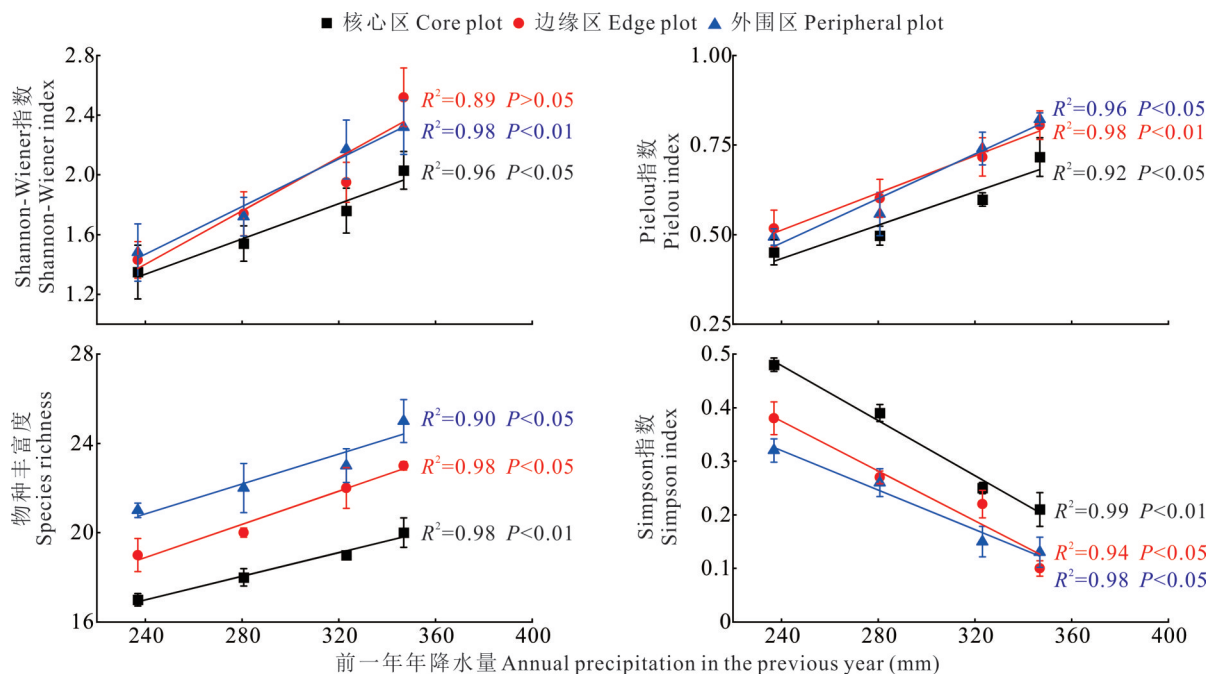


图 4 物种多样性与前一年年降水量的关系

Fig. 4 Relationship between species diversity and annual precipitation in the previous year

与长期完全封育区形成鲜明对比,经历轻度放牧干扰的外围区展现出最高的物种多样性和群落稳定性。该结果有力支持了“中度干扰假说”^[36]和“动态平衡”理论^[37]。轻度干扰通过多维度机制促进系统稳定:1)轻度采食抑制了单一强竞争物种(如黑沙蒿)的绝对垄断,为更多物种(如阿尔泰狗娃花和刺沙蓬)创造了生存空间,维持了较高的物种丰富度和均匀度(图2),同时,干扰下 *r*-策略物种(快速生长、高繁殖力,如狗尾草)和 *K*-策略物种(慢生长、高竞争力,如黑沙蒿)的共存,增强了群落对环境波动的整体抵抗力和恢复力,实现了动态平衡;2)动物活动(踩踏、排泄)破坏了过厚的生物结皮,加强了土壤通透性和水分入渗,同时促进了种子传播、土壤种子库周转以及

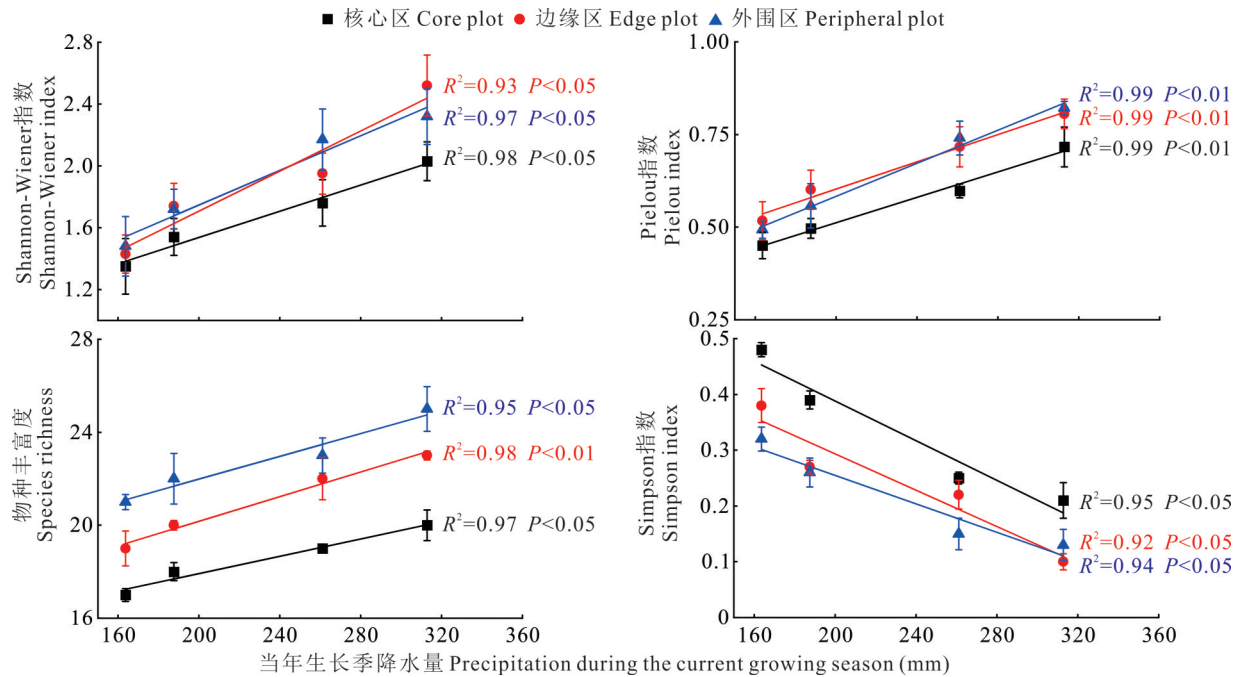


图5 物种多样性与当年生长季降水量的关系

Fig. 5 Relationship between species diversity and precipitation during the current growing season

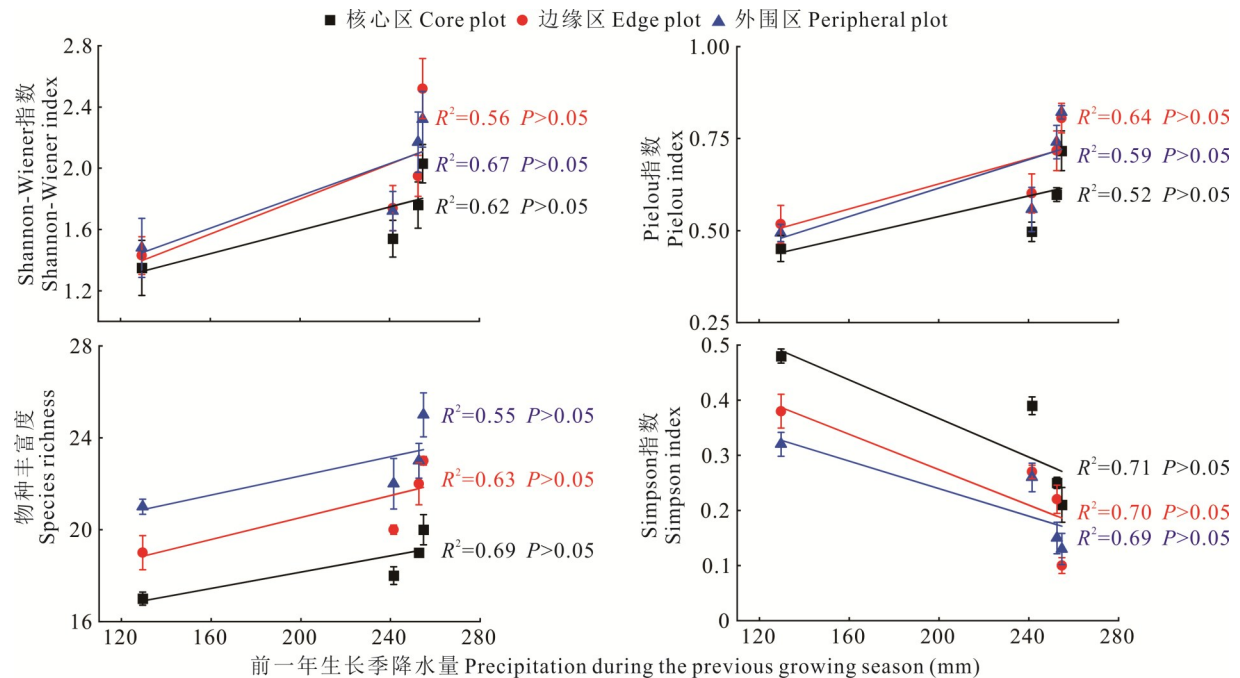


图6 物种多样性与前一年生长季降水量的关系

Fig. 6 Relationship between species diversity and precipitation during the previous growing season

微生境异质性形成^[20]。这些过程有效缓解了长期封闭导致的土壤反馈极端化(如化感抑制、病原积累)^[29-30],维持了土壤-植物相互作用的健康循环。

因此,本研究表明,在干旱半干旱荒漠草原区,长期完全封育并非维持高稳定性的理想路径,而适度的人为干预(如科学管理的轻度放牧)对于促进物质循环、能量流动、种子更新和维持群落结构功能平衡至关重要。

3.2 降水和温度对植物群落的影响

降水是限制荒漠草地生态系统植物生存繁育的主要因素,本研究表明降水的增加对物种多样性具有显著促

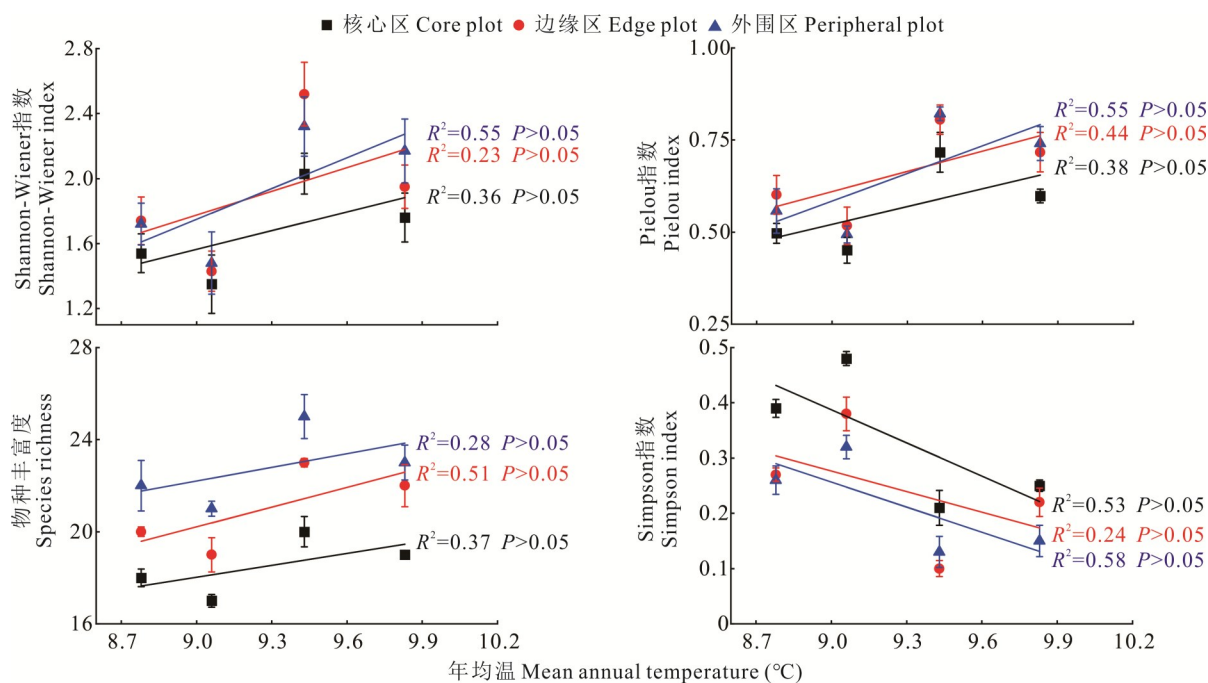


图7 物种多样性与年均温的关系

Fig. 7 Relationship between species diversity and mean annual temperature

进作用,且植被对降水的响应存在滞后性,这与费诚等^[38]和滑永春等^[39]的研究结果一致。降水的增加一方面促使休眠种子膨胀吸水,稀释种子萌发抑制物浓度,缩短休眠时间,加速种子萌发^[40],另一方面增加土壤含水量,提高根际微生物数量和活性,加强植物对养分的吸收和利用^[41]。在对降水等因素长期变化作用的适应过程中,植物群落特征显著改变且对水分胁迫建立了耐受,导致了对降水响应的滞后性^[15]。

气候变暖背景下关于荒漠草原物种多样性对温度响应的研究较少,本研究表明物种多样性随温度升高呈增大趋势,但相关性不显著,这与杨晓艳等^[42]的研究结果相似。温度的升高一方面为草地植被提供热量,促进植物的光合作用,增加凋落物积累,加快植物生长发育^[43],另一方面减少土壤含水量,引发干旱胁迫,增强植物的呼吸作用,减少干物质积累,抑制植物生长发育^[44-45]。因此,受增温幅度和持续时间的影响,温度的升高对物种多样性具有双重作用。未来需结合更大时空尺度和控制试验,深入解析温度与水分的交互作用及其对荒漠草原多样性的影响机制。

4 结论

本研究通过调查不同封育年限荒漠草地的植物群落特征,结合当地降水、温度变化,对研究区物种多样性的动态变化及植物群落稳定性进行分析。研究发现,封育能够减弱原优势种的主导地位,使其他植物种的重要值呈波动变化,进而影响植物群落的结构。降水的增加对物种多样性具有显著的促进作用,且植物生长对降水的响应存在一定程度的滞后性,而温度的升高对物种多样性无显著影响。人工封育是恢复退化草地的有效措施,但长期完全的封育并不利于植物群落稳定性的维持,应对封育区进行适当的干预和利用。

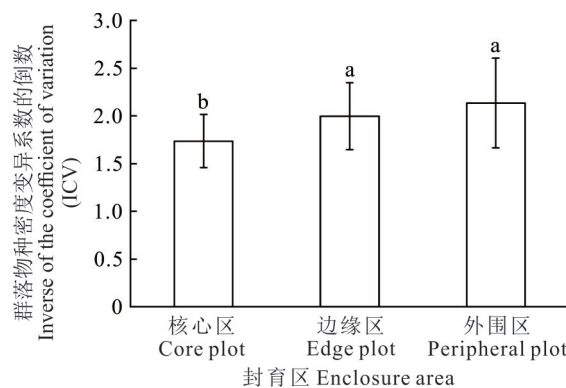


图8 不同封育区植物群落稳定性

Fig. 8 Plant community stability in different enclosure areas

参考文献 References:

- [1] Dong S K. Views on distinguishing the concepts of rangeland and grassland and proposing proper use of their terminology. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(5): 992–1000.
董世魁. 草原与草地的概念辨析及规范使用刍议. *生态学杂志*, 2022, 41(5): 992–1000.
- [2] Zhou Q Y, Dong Q M, Wang F C, *et al.* Effects of mixed grazing on aggregates and organic carbon in rhizosphere soil of *Stellera chamaejasme* in alpine grassland. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(4): 660–667.
周沁苑, 董全民, 王芳草, 等. 放牧方式对高寒草地瑞香狼毒根际土壤团聚体及有机碳特征的影响. *生态环境学报*, 2023, 32(4): 660–667.
- [3] Bai Y F, Zhao Y J, Wang Y, *et al.* Assessment of ecosystem services and ecological regionalization of grasslands support establishment of ecological security barriers in northern China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(6): 675–689.
白永飞, 赵玉金, 王扬, 等. 中国北方草地生态系统服务评估和功能区划助力生态安全屏障建设. *中国科学院院刊*, 2020, 35(6): 675–689.
- [4] Duan J G, Fang K, Chu J M, *et al.* Effect of degradation stage on the relationship between species diversity and soil nutrients in typical steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(9): 2890–2899.
段俊光, 房凯, 褚建民, 等. 退化程度对典型草原物种多样性和土壤养分关系的影响. *草地学报*, 2025, 33(9): 2890–2899.
- [5] Li Y F, Sun B, Nan Z B, *et al.* Classification system of inter-silva grasslands in northern China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(3): 175–188.
李毅夫, 孙斌, 南志标, 等. 中国北方林间草地分类体系研究. *草业学报*, 2025, 34(3): 175–188.
- [6] Zhang Y X, Fan J W, Li Y Z, *et al.* Effects of grassland reuse after short-term grazing exclusion on plant community. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(8): 3295–3306.
张雅娴, 樊江文, 李愈哲, 等. 短期围栏封育后再利用对草地植物群落的影响. *生态学报*, 2023, 43(8): 3295–3306.
- [7] Li Z W, Miao Y J, Zong N. Effects of grazing exclusion on plant diversity and ecosystem multifunctionality of alpine grasslands in northern Xizang. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(2): 596–608.
李振威, 缪雨珏, 宗宁. 围栏封育对藏北高寒草地植物多样性与生态系统多功能性的影响. *草地学报*, 2025, 33(2): 596–608.
- [8] Zuo W Q, Wang Y H, Wang F Y, *et al.* Effects of enclosure on the community characteristics of *Leymus chinensis* in degenerated steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(3): 12–19.
左万庆, 王玉辉, 王凤玉, 等. 围栏封育措施对退化羊草草原植物群落特征影响研究. *草业学报*, 2009, 18(3): 12–19.
- [9] Liu X D, Li R, Zhang K B, *et al.* Diversity of plant species and communities complexity in artificial fencing region of semi-arid area—A case study of Yanchi County of Ningxia. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(7): 1093–1101.
刘小丹, 李瑞, 张克斌, 等. 半干旱区人工封育草场植物群落物种多样性与复杂性研究——以宁夏盐池为例. *生态环境学报*, 2014, 23(7): 1093–1101.
- [10] Nie Y Y, Xu L J, Xin X P, *et al.* Effects of fence enclosure on the plant community composition and niche characteristics in a temperate meadow steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(11): 11–22.
聂莹莹, 徐丽君, 辛晓平, 等. 围栏封育对温性草甸草原植物群落构成及生态位特征的影响. *草业学报*, 2020, 29(11): 11–22.
- [11] Yan Y C, Tang H P. Effects of enclosure on typical steppe community properties in Inner Mongolia. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(6): 1225–1232.
闫玉春, 唐海萍. 围栏禁牧对内蒙古典型草原群落特征的影响. *西北植物学报*, 2007, 27(6): 1225–1232.
- [12] Liu X Q, Zhang X, Zhang L F, *et al.* Effects of enclosure duration on the community structure and species diversity of an alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5150–5162.
刘晓琴, 张翔, 张立锋, 等. 封育年限对高寒草甸群落组分和物种多样性的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 5150–5162.
- [13] Zhang Y, Cheng J, Su J S, *et al.* Diversity-productivity relationship of plant communities in typical grassland during the long-term grazing exclusion succession. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(2): 176–187.
张义, 程杰, 苏纪帅, 等. 长期封育演替下典型草原植物群落生产力与多样性关系. *植物生态学报*, 2022, 46(2): 176–187.
- [14] Chen X Y. Ecohydrological processes and adaptation of tree, shrub and herbs in desert steppe. Yinchuan: Ningxia University, 2024.

- 陈晓莹. 荒漠草原乔灌草植被生态水文过程及适应性研究. 银川: 宁夏大学, 2024.
- [15] Huang X M, Zhang Y, Li J P. Responses of vegetation characteristics of Mu Us Desert steppe to changes in precipitation. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(1): 178—187.
黄绪梅, 张翼, 李建平. 毛乌素荒漠草原植被特征对降水变化的响应. *草地学报*, 2022, 30(1): 178—187.
- [16] Zhang Y F, Wang X, Pan H Z, *et al.* Long-term enclosure restoration effects and their environmental dependencies in desert steppes of northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(17): 8529—8543.
张艺斐, 王兴, 潘海珠, 等. 中国北方荒漠草原长期围栏封育恢复效应及其环境依赖性. *生态学报*, 2025, 45(17): 8529—8543.
- [17] Zhang C, Wei S T, Liu X Y, *et al.* Spatial-temporal evolution process of vegetation and influencing factors in the arid-hot valley of southwest China based on Google Earth Engine. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(11): 5398—5412.
张成, 韦疏桐, 刘希宇, 等. 基于 Google Earth Engine 平台的西南干热河谷植被时空演变特征及其驱动要素研究. *生态学报*, 2025, 45(11): 5398—5412.
- [18] Zhang P, Kang J L, Yuan Z, *et al.* Similarities and differences of the plant communities on two vegetation-dunes and their responses to dune morphology. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23): 7920—7927.
张萍, 康经理, 袁瑱, 等. 两类植物型沙丘上植物群落的异同及其对沙丘形态的响应. *生态学报*, 2017, 37(23): 7920—7927.
- [19] Liu W S, Xie Y Z, Dai H J, *et al.* Study on community growth of *Stipa bungeana* population under different grazing intensities in desert steppe. *Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 29(2): 50—53.
刘王锁, 谢应忠, 代红军, 等. 荒漠草原不同放牧强度下长芒草种群补偿性生长的研究. *农业科学研究*, 2008, 29(2): 50—53.
- [20] Feng X, Liu B J, Liu J K, *et al.* Study on the dynamics of artificial fenced grassland vegetation, Ningxia Yanchi County, semi-arid regions of China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(10): 1961—1970.
冯湘, 刘宝军, 刘建康, 等. 半干旱区人工封育草地植被动态研究—以宁夏盐池县为例. *生态环境学报*, 2020, 29(10): 1961—1970.
- [21] Yuan H Y, Du L T, Pan H Z, *et al.* Simulation of carbon and water fluxes of planted shrub ecosystem in desert steppe biome zone based on parameter optimization. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(13): 5546—5557.
袁洪艺, 杜灵通, 潘海珠, 等. 基于参数优化的人工灌丛生态系统碳水通量模拟. *生态学报*, 2023, 43(13): 5546—5557.
- [22] Zhang J, Zuo X A, Lv P. Effects of changes in growing season precipitation regimes on plant community structure, function and aboveground biomass in typical habitats in the Horqin Sandy Land. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(4): 1—13.
张晶, 左小安, 吕朋. 生长季降水格局变化对科尔沁沙地典型生境植物群落结构、功能和地上生物量的影响. *中国沙漠*, 2024, 44(4): 1—13.
- [23] Wang J, Zhang D S, Xiao Y M, *et al.* Relationships between the characteristics of root exudate and environmental factors in the alpine steppe following long-term grazing exclusion. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2025, 49(4): 596—609.
王娟, 张登山, 肖元明, 等. 长期围封后高寒草原植物根系分泌物特征与环境因子关系. *植物生态学报*, 2025, 49(4): 596—609.
- [24] Yuan Z Y, Zhang L, Liao L R, *et al.* Relationship between grassland plant diversity and community stability and its driving factors on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1): 60—69.
袁梓裕, 张路, 廖李容, 等. 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.
- [25] Luo L K, Yin M Y, Zhu L, *et al.* Herbaceous plant diversity and environmental interpretation in different habitats: A case study of the Anqing section of the Yangtze River. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(6): 1934—1946.
罗来开, 尹明月, 朱玲, 等. 不同生境草本植物多样性及环境解释: 以长江安庆段河岸带为例. *草地学报*, 2025, 33(6): 1934—1946.
- [26] Modrow T, Kuehne C, Saha S, *et al.* Photosynthetic performance, height growth, and dominance of naturally regenerated sessile oak (*Quercus petraea* [Mattuschka] Liebl.) seedlings in small-scale canopy openings of varying sizes. *European Journal of Forest Research*, 2020, 139(1): 41—52.
- [27] Wang M M, Liu X P, He Y H, *et al.* How enclosure influences restored plant community changes of different initial types in Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(8): 672—684.
王明明, 刘新平, 何玉惠, 等. 科尔沁沙地封育恢复过程中植物群落特征变化及影响因素. *植物生态学报*, 2019, 43(8):

672—684.

- [28] Yin F, Zheng J, Chen Y Y, *et al.* Characteristics of different plant community types, species diversity and biomass accumulation in wetlands of the Three Gorges Reservoir Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(14): 6923—6933.
殷凡, 郑杰, 陈洋溢, 等. 三峡库区湿地植物群落类型、物种多样性与生物量变化特征. *生态学报*, 2025, 45(14): 6923—6933.
- [29] Kong C H, Wang P. Allelopathy and chemical communication among plants: Questions and reflections. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(5): 1540—1552.
孔垂华, 王朋. 植物化感作用和植物化学识别通讯: 问题与思考. *应用生态学报*, 2025, 36(5): 1540—1552.
- [30] Li Y F, Chu X H, Li J Y, *et al.* Allelopathic effects of *Euphorbia jolkinii* on seed germination and seedling growth of alfalfa. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(2): 394—402.
李彦飞, 初晓辉, 李嘉懿, 等. 大狼毒对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的化感效应研究. *草地学报*, 2022, 30(2): 394—402.
- [31] Jiao C C, Zhao D Y, Zeng J. The assembly mechanisms of bacterial communities in lakes and their responses to eutrophication. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(14): 5925—5944.
焦聪聪, 赵大勇, 曾巾. 湖泊细菌群落构建机制及其对富营养化的响应. *生态学报*, 2024, 44(14): 5925—5944.
- [32] Zhang S S, Guan P T, Yang J J, *et al.* Metacommunity theory and its application in community ecology of nematodes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(5): 1590—1598.
张思思, 管平婷, 杨菁婧, 等. 集合群落理论及其在线虫群落生态学中的应用. *应用生态学报*, 2025, 36(5): 1590—1598.
- [33] Ma W J. Nitrogen and phosphorus utilization strategy in *Leymus chinensis* and *Artemisia frigida*. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
马文静. 羊草和冷蒿的氮磷养分利用策略研究. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [34] Tang H P, Chen J, Xue H L. Ecological thresholds: Concept, methods and research outlooks. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(9): 932—940.
唐海萍, 陈皎, 薛海丽. 生态阈值: 概念、方法与研究展望. *植物生态学报*, 2015, 39(9): 932—940.
- [35] Suding K N, Hobbs R J. Threshold models in restoration and conservation: a developing framework. *Trends in Ecology & Evolution*, 2008, 24(5): 271—279.
- [36] Connell J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs: high diversity of trees and corals is maintained only in non-equilibrium state. *Science*, 1978, 199(4335): 1302—1310.
- [37] Bai X H, Zhao W W, Yin C C. Change process and interaction mechanism of ecosystem services from the perspective of regime shift. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(15): 6054—6065.
白晓航, 赵文武, 尹彩春. 稳态转换视角下生态系统服务变化过程与作用机制. *生态学报*, 2022, 42(15): 6054—6065.
- [38] Fei C, Dong Y Q, An S Z. Study on species diversity and influencing factors of desert community vegetation in northern Xinjiang. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(7): 49—59.
费诚, 董乙强, 安沙舟. 新疆北疆荒漠群落植被的物种多样性及影响因素研究. *中国草地学报*, 2023, 45(7): 49—59.
- [39] Hua Y C, Sarula, Bao W X. Temporal lag of grassland vegetation growth response to precipitation in Inner Mongolia. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(7): 47—55.
滑永春, 萨如拉, 包文学. 降水对内蒙古草原植被生长的影响. *东北林业大学学报*, 2021, 49(7): 47—55.
- [40] 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. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(4): 1100—1110.
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. *草地学报*, 2020, 28(4): 1100—1110.
- [41] Wang Y H, Wang Z W, Pan Z L, *et al.* Effects of stocking rate and simulated precipitation on the plant diversity of desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2018, 40(2): 89—94.
王悦骅, 王忠武, 潘占磊, 等. 载畜率和模拟降水对荒漠草原植物物种多样性的影响. *中国草地学报*, 2018, 40(2): 89—94.
- [42] Yang X Y, Zhang S X, Wen J, *et al.* Spatial pattern of herbaceous plant species diversity and its changes due to simulated warming in the forest community of the Luliang Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6642—6654.
杨晓艳, 张世雄, 温静, 等. 吕梁山森林群落草本层植物物种多样性的空间格局及其对模拟增温的响应. *生态学报*, 2018, 38(18): 6642—6654.

- [43] Wang Q, Zheng J H, Zhao M L, *et al.* Effects of warming on early restoration of degraded grassland in desert steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(5): 1077–1085.
王琪, 郑佳华, 赵萌莉, 等. 增温对荒漠草原不同退化程度草地恢复初期影响的研究. *草地学报*, 2022, 30(5): 1077–1085.
- [44] Jiang F Y, Wei X T, Kang B Y, *et al.* Effects of warming on alpine meadow diversity and primary productivity. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(2): 298–305.
姜风岩, 位晓婷, 康濒月, 等. 模拟增温对高寒草甸植物物种多样性与初级生产力的影响. *草地学报*, 2019, 27(2): 298–305.
- [45] Ma L, Zhang Q, Zhang Z H, *et al.* Effects of gradient warming on species diversity and biomass in alpine meadows. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(5): 1395–1402.
马丽, 张骞, 张中华, 等. 梯度增温对高寒草甸物种多样性和生物量的影响. *草地学报*, 2020, 28(5): 1395–1402.