

DOI: 10.20103/j.stxb.202406061313

张艺斐, 王兴, 潘海珠, 孟晨, 张祎, 凡文帅, 李莹莹, 吕浩. 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): - .

Zhang Y F, Wang X, Pan H Z, Meng C, Zhang Y, Fan W S, Li Y Y, Lü H. Long-term enclosure restoration effects and their environmental dependencies in desert steppes of northern China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(17): - .

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

张艺斐^{1,2,3}, 王 兴^{1,2,3,*}, 潘海珠^{1,2,3}, 孟 晨^{1,2,3}, 张 祎^{1,2,3}, 凡文帅^{1,2,3}, 李莹莹^{1,2,3}, 吕 浩^{1,2,3}

1 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

2 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021

3 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

摘要: 围栏封育是荒漠草原脆弱生态系统恢复的有效方式, 为揭示长期围栏封育后荒漠草原生态系统结构和功能的恢复效应及其轨迹, 并探讨其对封育年限、降雨、温度、植被和土壤类型等环境因子的依赖性。本研究以中国北方荒漠草原生态区为研究对象, 基于 2000—2023 年间 165 篇中英文文献的 meta 分析, 整合 99 个独立试验的 7109 条数据; 涵盖植被、土壤及微生物等 66 个属性参数, 展开系统研究, 结果表明: 长期围栏封育后, (1) 植被结构(高度、盖度和密度)、多样性(物种丰富度和香农维纳指数)和功能(生物量、枯落物量和净初级生产力), 分别显著提升了 30%—50%、10%—15% 和 20%—90%; 土壤结构(团聚体)、养分(水分、全磷、全钾)及微生物活性(碳氮含量和土壤呼吸), 分别显著提升了 8%—30%; (2) 植被结构与多样性在封育 0—5 年内显著恢复, 但生态功能和过程(地上地下生物量、净初级生产力、土壤水分养分、土壤呼吸)的全面恢复, 通常需要 11—15 年; (3) 植被和土壤恢复存在显著的时间(4 年和 10 年)、降雨(160 mm、250 mm 和 290 mm)和温度(3.5℃、6℃和 8℃)阈值, 阈值前后生态恢复效果和轨迹表现出显著差异。荒漠草原经历 20 多年围栏封育恢复: 地上植被恢复较快, 但土壤结构和功能恢复滞后, 生态系统过程的稳定性尚未完全实现。生态系统恢复效应存在封育年限、降雨和温度多重环境阈值, 且不同生态系统属性的恢复效果和轨迹, 在环境阈值存在显著差异, 这些可作为长期封育草地的适应性管理的参考点; 未来区域尺度整体多要素、多功能的综合恢复提升, 需要在特定气候、植被类型下, 采取生态恢复与生产利用相结合的道路。

关键词: 围栏封育; 植被恢复; 土壤恢复; 荒漠草原; Meta 分析

Long-term enclosure restoration effects and their environmental dependencies in desert steppes of northern China

ZHANG Yifei^{1,2,3}, WANG Xing^{1,2,3,*}, PAN Haizhu^{1,2,3}, MENG Chen^{1,2,3}, ZHANG Yi^{1,2,3}, FAN Wenshuai^{1,2,3}, LI Yingying^{1,2,3}, LÜ Hao^{1,2,3}

1 College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Breeding Base for State key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration of Northwestern China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3 Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

基金项目: 国家自然科学基金(32171872, 32460427); 中科院西部之光(XAB2022YW14); 宁夏回族自治区农业科技自主创新项目(NGSB-2021-14-03)。

收稿日期: 2024-06-06; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wx08@nxu.edu.cn#限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

Abstract: Enclosure and rehabilitation were effective approaches to restoring fragile ecosystems in desert steppes. To assess the restoration effects and trajectories of desert steppe ecosystem structure and function after long-term enclosure, we investigated their responses to environmental factors, including enclosure duration, precipitation, temperature, vegetation type, and soil properties. This study investigated the desert steppe ecoregion of northern China through a comprehensive meta-analysis of 165 Chinese and English publications (2000—2023). The research synthesized 7,109 experimental data points from 99 independent studies, encompassing 66 key attribute parameters across vegetation, soil, and microbial communities. The results indicated that after long-term enclosure and rehabilitation: (1) Vegetation structure (height, cover, and density), diversity (species richness and Shannon-Wiener index), and function (biomass, litter mass, and net primary productivity) were significantly enhanced by 30%—50%, 10%—15%, and 20%—90%, respectively. Soil structure (aggregates), nutrients (moisture, total phosphorus, and total potassium), and microbial activity (carbon and nitrogen content, and soil respiration) showed significant improvements of 8%—30%; (2) Vegetation structure and diversity showed significant recovery within the first 0—5 years of enclosure. However, full restoration of ecosystem functions and key processes—including above and below ground biomass, net primary productivity, soil moisture and nutrients, and soil respiration—typically required an extended period of 11—15 years. (3) Vegetation and soil recovery exhibited significant threshold effects temporally (4 and 10 years), with precipitation thresholds at 160 mm, 250 mm, and 290 mm, and temperature thresholds at 3.5 °C, 6 °C, and 8 °C; ecological restoration trajectories differed markedly across these threshold boundaries. After more than 20 years of enclosure and rehabilitation in desert steppes, above-ground vegetation recovered rapidly, but soil structure and function lagged behind, and the stability of ecosystem processes was not yet fully achieved. The restoration effects of ecosystems exhibited multiple environmental thresholds related to enclosure duration, rainfall, and temperature, and there were significant differences in the restoration effects and trajectories of different ecosystem attributes at these environmental thresholds. These could serve as reference points for adaptive management of long-term enclosed grasslands. For future comprehensive restoration and enhancement of multiple elements and functions at the regional scale, we recommend adopting an approach that combines ecological restoration with productive use under specific climates and vegetation types.

Key Words: enclosure; vegetation restoration; soil restoration; desert grassland; meta-analysis

草地生态系统具有多样性保育、水土保持、畜牧业发展等重要的生态和生产功能^[1-2]。不合理的人为开发利用和全球气候变化,导致草地植被多样性、生产力和土壤养分下降,威胁其生态和生产功能的维持和发挥^[3-4]。围栏封育作为一种近自然恢复手段,在草地植被覆盖度、生产力和土壤质量恢复等方面发挥重要作用^[5-6]。然而,关于长期封育对草地生态系统结构与功能恢复可持续性,依然存在较大的争论。这些争论的科学基础,涉及到长期封育后草地生态系统结构与功能恢复效应的全面评估,尤其是深入理解封育恢复效果对年限、气候、植被和土壤等环境因素的依赖性特征^[2,7]。对上述科学基础的系统性探讨,可为特定气候、土壤和植被条件下,封育恢复的可持续性与适应性管理提供科学依据。

围栏封育生态恢复效果争论的核心主要是长期恢复轨迹的非线性,理论上恢复效果主要刻画为三种轨迹:总体增加、无明显的平衡状态和总体下降趋势^[8]。例如,5—10年的短期封育,显著恢复了植被覆盖度、生产力,但长期(10—20年)封育,并未使得生物质生产和土壤养分积累产生额外的恢复效益^[9],甚至会出现植被属性与土壤养分再退化的迹象^[8,10]。上述生态系统植被与土壤恢复的非线性的变化,可能受到气候(降雨和温度)、植被和土壤类型等环境本底因素的影响。例如,降雨是干旱区植被恢复的主要驱动因子^[4],但较好的降水资源也可能加速某些优势植物种的大面积扩张,进而诱发植被多样性下降和同质化^[11-12];较高的温度通过加剧水分蒸散,会限制荒漠草原植被恢复^[8]。除气候因素外,封育之前植被和土壤的初始状态,也是决定封育之后恢复效果的重要因素:相对于一年生植被,多年生植物因其根系较深,能更好地改善土壤结构、增

加土壤有机质,从而在封育后更有助于带动退化土壤的恢复^[13];相对于原生土壤类型,草地沙化土壤的恢复需要更长的封育年限^[14-15]。因此,长期围栏封育恢复效果的系统客观评价,关键是厘清封育恢复效果对年限、气候、植被和土壤属性等不同时空环境因素的依赖性,尤其是封育恢复效果的拐点及其对应关键环境阈值的识别。然而,由于长期围栏封育恢复后不同时空背景植被和土壤属性、功能系统性监测数据的缺乏,生态系统结构和功能恢复对环境因子的依赖性、恢复整体演变轨迹、恢复轨迹的关键环境阈值等一般性规律依然缺乏清晰解读,无法为长期封育草地的精准恢复和适应性管理提供科学指导。

中国北方荒漠草原脆弱生态区,是典型草原与荒漠、农区与牧区的过渡区^[16],在防止风沙东扩、水土保持和畜牧业发展方面发挥重要作用^[17]。历史上不合理人为利用和严酷自然环境,导致该区域曾发生严重的草地退化和荒漠化。随着上世纪 90 年代围栏封育生态恢复工程的大面积实施^[18],荒漠草原生态系统沙地面积显著下降、植被覆盖度和生物量显著恢复,区域荒漠化趋势得到基本逆转^[19]。但相对典型草原、草甸草原等类型,荒漠草原区降雨稀少且年际波动大,生态系统土壤贫瘠且水分保持能力差,这些自然禀赋限制了退化草地恢复效率和潜力,而且恢复效果对气候和人为干扰的响应较为敏感^[10,20],例如,长期封育草地生态系统的可持续恢复,依然面临植被结构变差、多样性下降、植被恢复带动土壤恢复效益弱等突出问题。因此,长期围栏封育条件下,中国北方荒漠草原生态系统结构和功能的恢复效应及其轨迹如何?恢复效果对封育年限、气候(降雨和温度)、植被和土壤类型等环境因子的依赖性是否具有普遍性?这些科学问题的系统探讨,可为该区域围栏封育生态可持续恢复和适应性管理提供科学依据。

本研究以中国北方荒漠草原生态过渡区为研究对象,基于 2000—2023 年间 165 篇中英文文献的 meta 分析,明确文献采样点分布(图 1),整合 99 个独立试验的 7109 条数据,数据库涵盖植被、土壤及微生物等 66 个属性参数。首先,系统量化围栏封育后草地生态系统结构和功能的总体恢复效应,明确围栏封育下具有显著恢复或退化的生态指标(图 2);其次,针对上述显著恢复或退化的生态指标,厘清降雨、温度、封育年限、群落类型和土壤类型等环境条件的影响作用(图 3);最后,进一步刻画生态系统恢复效应对不同环境因子响应的阈值效应,探明不同环境因子阈值前后生态系统结构和功能的恢复轨迹(图 4、5、6)。研究结果系统梳理了中国荒漠草原生态区围栏封育效果的一般规律和恢复瓶颈,为脆弱生态系统近自然恢复和适应性管理提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

中国北方荒漠草原生态区(36°N—45°N, 103°E—118°E),属于干旱半干旱气候类型,地理分布位于草原向荒漠的过渡带,包括内蒙古西南部、陕西北部 and 宁夏北部,与“内蒙古高原中部—陇中荒漠草原生态区”范围基本重合,自西南向东北毗邻青藏高原东北缘、黄土高原西北缘和鄂尔多斯台地西部^[21]。该区域主要以草地生态系统为主,北部、中部和南部分别为浑善达克沙地、库布齐沙漠和毛乌素沙地;区域年均温为 1.5—8.5 °C,年均降雨量约 100—380 mm;土壤类型主要为钙土、漠土和退化风沙土,植被类型包括以针茅属为建群种的荒漠草原和灌木、半灌木为主的荒漠灌丛。历史上荒漠草原生态区普遍的过度放牧利用,导致区域发生严重的植被退化、土壤退化沙化及水土流失等生态问题。自 20 世纪 90 年代以来,区域各级政府主要采取划区轮牧、禁牧封育等措施,有效遏制了区域草地退化和荒漠化趋势,但资源稀薄的自然禀赋和高度变异的环境条件,导致该区域生态恢复和管理依然面临复杂和不确定性。

1.2 数据收集和筛选

本研究重点关注围栏封育措施下中国干旱半干旱带荒漠草原恢复情况,以“TS=((arid OR semi-arid OR desert) AND(enclosed OR fenced OR grazing))”和“SU%=(‘荒漠草原’+‘荒漠’+‘干旱’+‘半干旱’)*(‘围栏’+‘封育’+‘禁牧’+‘放牧’)”为检索式,分别在 Web of Science 和中国知网 CNKI 数据库,检索的时间范围设定为 2000 年 1 月至 2023 年 8 月,对我国北方荒漠草地已有的封育放牧实验研究文献进行了检索与系统收集。使

用以下选择标准来对文献进行筛选:(1)文献研究内容为我国北方荒漠开展的封育放牧实验,剔除在农田、人工草地上进行的模拟放牧研究;(2)实验包括实验组(封育草地/未放牧草地)和对照组(自由放牧/划区轮牧);(3)文献中实验组和对照组对应数值直接提供了样本量、均值、标准差、标准误,也可以从报告的数据中间接估计。

1.3 数据分析

1.3.1 效应值计算

文献中的表格数据直接提取,图片格式数据利采用 Web Plot Digitizer 软件进行数据提取。若文献中提供的数据为标准误(SE),使用如下计算公式将其换算成标准差(SD)

$$SD = SE \sqrt{n} \quad (1)$$

式中, n 为试验的重复次数。若文献中提供的数据为箱线图五位数,采用估计方法^[22]从五位数汇总中估计样本均值和标准差。

筛选出的文献中收集到以下具有代表性指标的数据,包括群落多样性:香农维纳指数、丰富度指数、辛普森指数、均匀度指数、总物种数和各生活型物种数;群落生产力:地上生物量、地下生物量、枯落物量、地上净初级生产力;群落特征:高度、盖度、密度、比叶面积、叶干物质含量和植物 C、N、P 养分含量及比例;土壤理化性质指标:土壤含水量、田间持水量、pH、电导率、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度、土壤容重、砂粒、粉粒、粘粒比例、大小团聚体比例、团聚体平均质量直径、团聚体几何平均重量直径、土壤全碳、有机碳、全氮、速效氮、氨态氮、硝态氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、土壤 C、N、P 比例;土壤微生物指标:微生物香农维纳指数、微生物辛普森指数、Chao 1 指数、ACE 指数、微生物量碳、微生物量氮、过氧化氢酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶和脲酶。

从文献中提取试验地经纬度坐标、年平均温度(mean annual temperature, MAT)、年平均降水量(mean annual precipitation, MAP)、土壤类型、实验持续年限、群落类型,并通过全球气候数据库(<http://www.worldclim.org/>)对缺失气象数据的研究进行补充。

本研究依据年平均温度将研究区域分为 $MAT < 4$ 、 $4-6$ 、 $> 6^\circ\text{C}$ 三类;沿降水梯度将研究区域分为 $MAP < 180$ 、 $180-280$ 、 > 280 mm 三类;群落类型分为草本和灌草两类;土壤类型分为原始土壤和退化土壤两类;围栏封育年限分为 $0-5$ 、 $6-10$ 、 $11-15$ 、 > 16 年四类。共纳入来自不同区域的 165 篇中英文文献,共 99 个独立试验。有 7109 条数据适合 Meta 分析。根据文献中所获取的位置信息,数据库中采样点分布如图(1)所示。

计算各组数据效应值($\ln RR$)^[23],反映实验处理的影响效应采用标准差计算权重,效应值 $\ln RR$ 和案例内方差 v_i 的计算公式如下:

$$\ln RR = \ln \left(\frac{X_e}{X_c} \right) \quad (2)$$

$$v_i = \frac{S_e^2}{n_e X_e^2} + \frac{S_c^2}{n_c X_c^2} \quad (3)$$

式中, v_i 为与效应值相对应的研究内方差, S_e^2 、 S_c^2 、 X_e 、 X_c 、 n_e 、 n_c 分别为封育草地和放牧草地的标准差、均值和样本量。观测值权重越大,表明其对总体效应值的贡献越大。

由于同一研究中的观测数据存在相互不独立问题,多个处理公用一个对照时,为消除案例之间的相关性,构建方差-协方差矩阵(variance-covariance matrix)计算 V 替换案例内方差 v_i 运算^[24]。基于随机因素分层模型,将每一篇独立文献和每一个独立实验案例作为随机因子纳入模型分析,计算累积效应值。其中单个研究的权重计算公式如下:

$$w_i = \frac{1}{V^2 + \tau^2} \quad (4)$$

累积效应值 RR_{++} 和其标准误 SE 的计算公式如下:

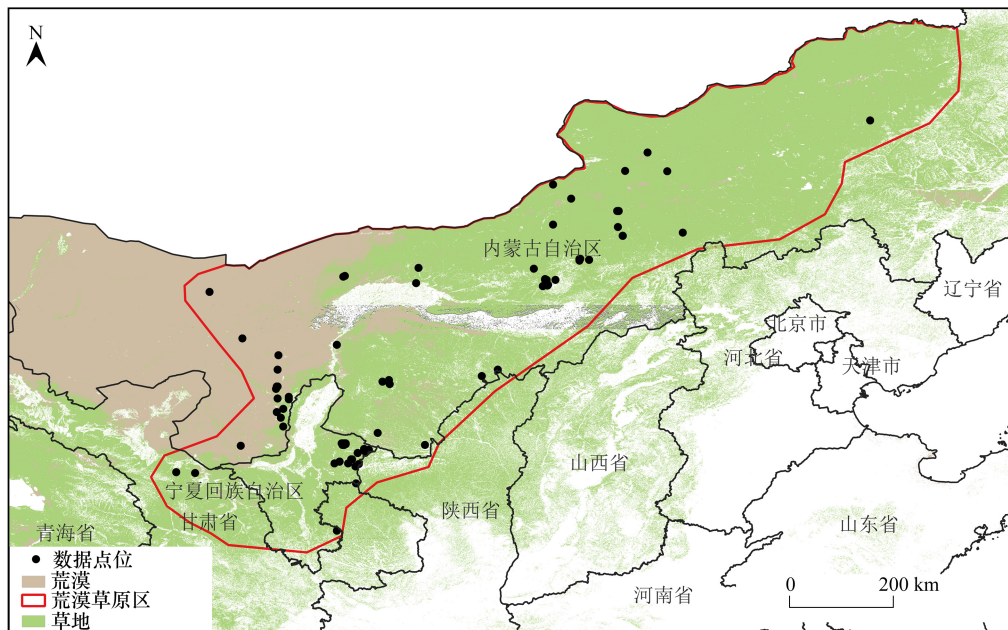


图 1 实验位点分布

Fig.1 Distribution of experimental sites

$$RR_{++} = \frac{\sum_{i=1}^k w_i RR}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad (5)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i}} \quad (6)$$

累积效应值的 95% 置信区间为:

$$95\% CI = RR_{++} \pm 1.96 SE \quad (7)$$

式(4)中, τ^2 为研究间方差; 式(5)中, k 为该指标所对应的总的研究数据组数, RR 为每组数据的效应值。为了便于解释, 我们将 RR_{++} 及其对应的 CI 转换为百分比变化率展示:

$$p_c = (e^{RR_{++}} - 1) \times 100 \quad (8)$$

式中, P_c 为百分比变化率;

当累积效应值的置信区间不与零重叠时, 认为结果显著。通过 Q -test 方法检验效应值整体异质性 (Q_t) 以及解释变量对效应值的影响 (Q_m)。当效应值的整体异质性很强 (Q_t 值较高, 且 $P < 0.05$), 即各围栏封育试验的效应值间均存在较大差异时, 引入解释变量对这种差异进行分析。基于随机因素分层模型, 引入分类型解释变量年均温度、年均降水、群落类型、土壤类型及封育年限对数据进行亚组分析。

1.3.2 模型诊断

文献偏倚的存在将影响 Meta 分析研究结果的有效性, 通过计算失安全系数来评估可能存在的文献偏倚。失安全系数采用罗森塔尔法 (Rosenthal's method) 计算所得^[25], 当其值足够大 ($> 5N + 10$) 时^[26], 即便存在文献偏倚, 结果也是可信的。通过对本研究所采用数据指标的失安全系数进行计算, 结果显示无发表偏爱性, 数据具备充分可信度。

1.3.3 阈值回归分析

荒漠草原作为广域复杂生境, 其环境因子对退化草地恢复效果的影响过程复杂多变, 简单线性拟合难以解释这种关系。因此, 非线性回归模型更适用于描述该区域环境与恢复效应之间的拟合关系, 且存在明显的

阈值效应^[27],本研究采用阈值回归方法(分段、阶跃和铰链)^[28],深入分析环境因子(包括封育年限、气温和降水)与地上植被、地下土壤各指标之间的阈值效应,探明阈值前后生态系统植被和土壤的恢复轨迹。

利用 R 4.2.3 软件中的“metafor”包的 rma.mv 函数完成 Meta 分析;“chngpt”包的 chngptm.xy 函数完成效应值阈值分析;“ggplot2”包完成结构图绘制。

2 结果与分析

2.1 围栏封育下植被和土壤恢复的总效应

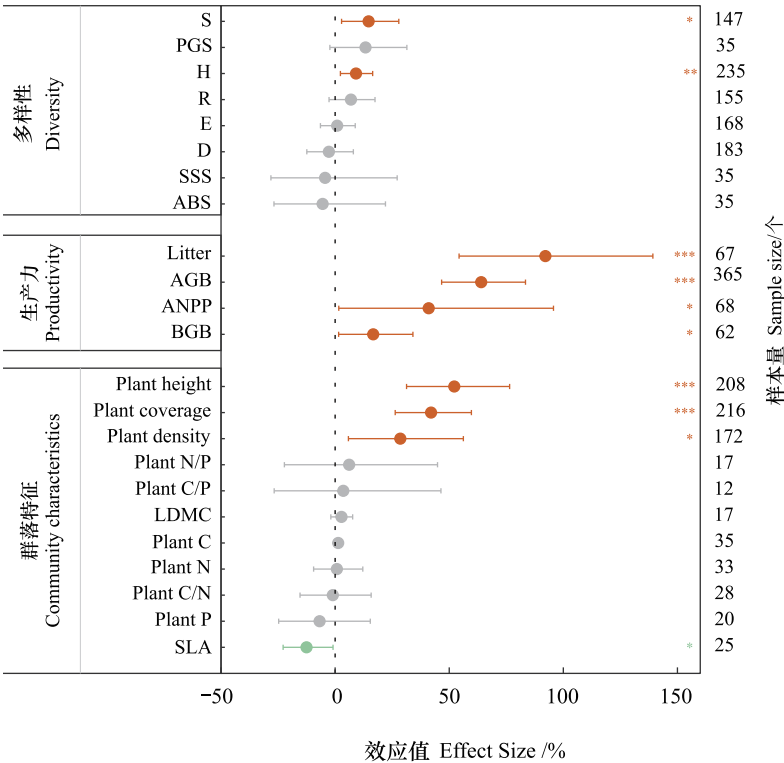
相对于自由放牧状态 CK,围栏封育使得植被总物种数、香农维纳指数分别显著增加了 14.7%和 9.1% ($P<0.05$),植被地上生物量、地下生物量、枯落物和地上净初级生产力分别增加了 64.0%、16.7%、92.1%和 41.0% ($P<0.05$);群落高度、盖度、密度分别增加 52.2%、42.0%和 28.6% ($P<0.05$);比叶面积降低了 12.5% ($P<0.05$) (图 2)。

地下土壤层在封育状态下,土壤水分、全磷、全钾和全碳含量,分别增加了 13.7%、10.47% ($P<0.05$) 和 7.8%、16.2% ($P>0.05$),对土壤物理属性(孔隙度、黏粉粒、容重等)、土壤速效养分的恢复并未达到显著水平;土壤大团聚体含量显著提升 ($P<0.05$);土壤呼吸及微生物量碳、氮增加了 29.8%、13.7%和 25.8% ($P<0.05$) (图 2)。

2.2 围栏封育下生态系统恢复的环境影响

随着恢复年限增加,群落物种数、净初级生产力、枯落物、地下生物量和土壤水分均呈单调递增趋势(图 3);群落比叶面积呈递减趋势(图 3);群落香农维纳指数、地上生物量、高度、盖度、密度、土壤全磷、土壤微生物碳氮呈先增加后降低趋势(图 3)。上述植被恢复的时间效应及变化趋势中,除地下生物量外,均在不同年限间存在显著差异 ($P<0.05$);短期的恢复正效应(0—5 年)显现,主要体现在物种多样性、结构多样性(高度、盖度和密度),但封育 11—15 年左右才能实现生态系统功能、过程的有效恢复(地上地下生物量、净初级生产力、土壤水分养分、土壤呼吸)。

植被、土壤的恢复同样依赖于气候、植被和土壤类型 ($P<0.05$),植物群落类型的影响方面:植物香农维纳



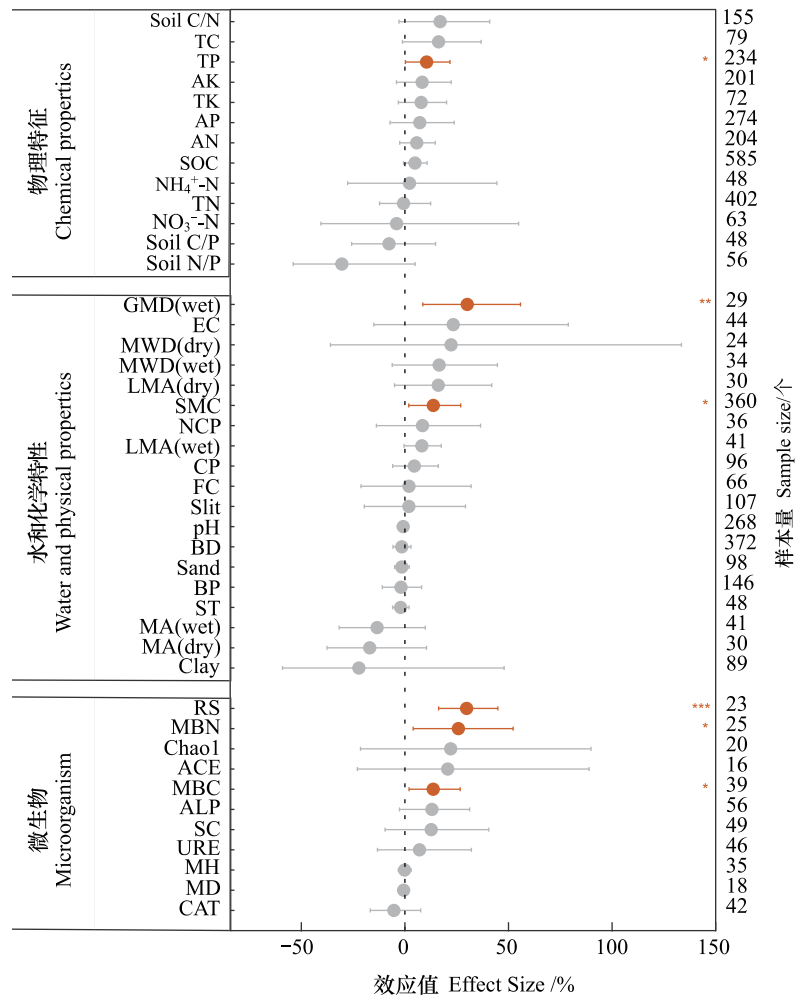
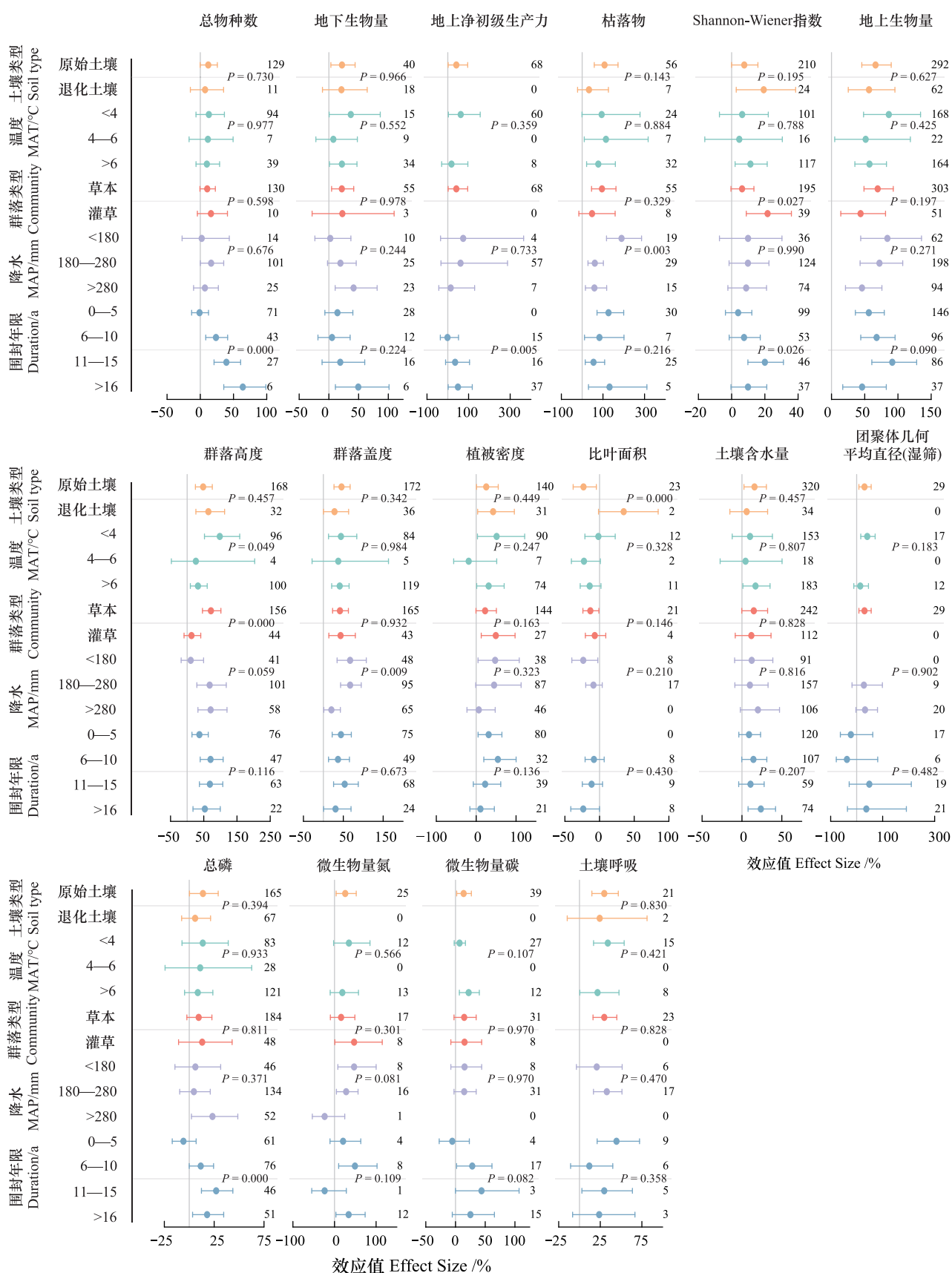


图2 围栏封育对荒漠草原群落多样性、生物量、特征;土壤理化性质和土壤微生物的影响

Fig.2 Effects of fencing on the diversity, biomass, and characteristics of desert grassland communities; soil physicochemical properties and soil microorganisms.

误差线表示 $RR \pm 95\%$ 的置信区间;误差线右侧的数字表示每个分组样本量; * 表示显著 ($P < 0.05$); ** 表示非常显著 ($P < 0.01$); *** 表示极显著 ($P < 0.001$); S: 总物种数; PSG: 多年生禾草物种数; H: 香农维纳指数; R: 丰富度指数; E: 均匀度指数; D: 辛普森指数; SSS: 灌木半灌木物种数; ABS: 一二年生草本物种数; Litter: 凋落物; AGB: 地上生物量; ANPP: 地上净初级生产力; BGB: 地下生物量; Plant height: 植被高度; Plant coverage: 植被盖度; Plant density: 植被密度; Plant N/P: 植物氮磷比; Plant C/P: 植物碳磷比; LDMC: 叶干物质含量; Plant C: 植物碳; Plant N: 植物氮; Plant C/N: 植物碳氮比; Plant P: 植物磷; SLA: 比叶面积; Soil C/N: 土壤碳氮比; TC: 全碳; TP: 全磷; AK: 速效钾; TK: 全钾; AP: 速效磷; AN: 速效氮; SOC: 有机碳; NH₄⁺-N: 氨态氮; TN: 全氮; NO₃⁻-N: 硝态氮; Soil C/P: 土壤碳磷比; Soil N/P: 土壤氮磷比; GMD (wet): 团聚体几何平均重量直径 (湿筛); EC: 电导率; MWD (dry): 团聚体平均重量直径 (干筛); MWD (wet): 团聚体平均重量直径 (湿筛); LMA (dry): 机械稳大团聚体; SMC: 土壤含水量; NCP: 非毛管孔隙度; LMA (wet): 水稳大团聚体; CP: 毛管孔隙度; FC: 田间持水量; Slit: 粉粒; pH: 土壤 pH 值; BD: 容重; Sand: 砂粒; BP: 总孔隙度; ST: 土壤温度; MA (wet): 水稳小团聚体; MA (dry): 机械稳小团聚体; Clay: 粘粒; RS: 土壤呼吸; MBN: 微生物量氮; Chao1: Chao1 指数; ACE: Ace 指数; MBC: 微生物量碳; ALP: 碱性磷酸酶; SC: 蔗糖酶; URE: 脲酶; MH: 微生物香农维纳指数; MD: 微生物辛普森指数; CAT: 过氧化氢酶

多样性在灌草群落的恢复效应是草本群落的 3.4 倍 (图 3); 生物量恢复效应在草本群落中是灌草群落的 1.6 倍 (图 3); 植被高度在草本群落恢复效应是灌草群落的 5.5 倍 (图 3)。气候对恢复的影响方面: 枯落物累积量在降雨小于 180 mm 区域是降雨大于 180 mm 区域的 3.2 倍 (图 3); 植被高度、盖度等结构恢复效应在温度较低区 (年均温度 $< 4^{\circ}\text{C}$) 是其它温度区的 3 倍, 但植被盖度的恢复效应呈相反趋势 (图 3); 土壤类型并未显著影响植被和土壤功能的恢复效应 ($P < 0.05$), 尤其是土壤水分和养分的显著恢复效应, 基本不依赖于降雨、温度、年限、植被和土壤类型 (图 3)。



<http://www.ecologica.cn>

2.3 围栏封育下生态系统恢复轨迹的环境阈值效应

植被地上生物量和比叶面积分别在 4 年和 7 年达到快速恢复高峰后趋于稳定 ($P < 0.05$) (图 4); 多样性指标在封育 10 年内显著增加但随后略微下降 ($P < 0.05$) (图 4); 土壤有机碳的显著改善则出现在封育 4 年后并呈缓慢增加趋势 (图 4)。阈值前 (< 10 年), 封育对地上生态系统的恢复效果显著; 阈值后 (> 10 年), 地上植被功能趋于稳定, 但多样性可能略呈下降趋势, 地下土壤功能逐步改善。

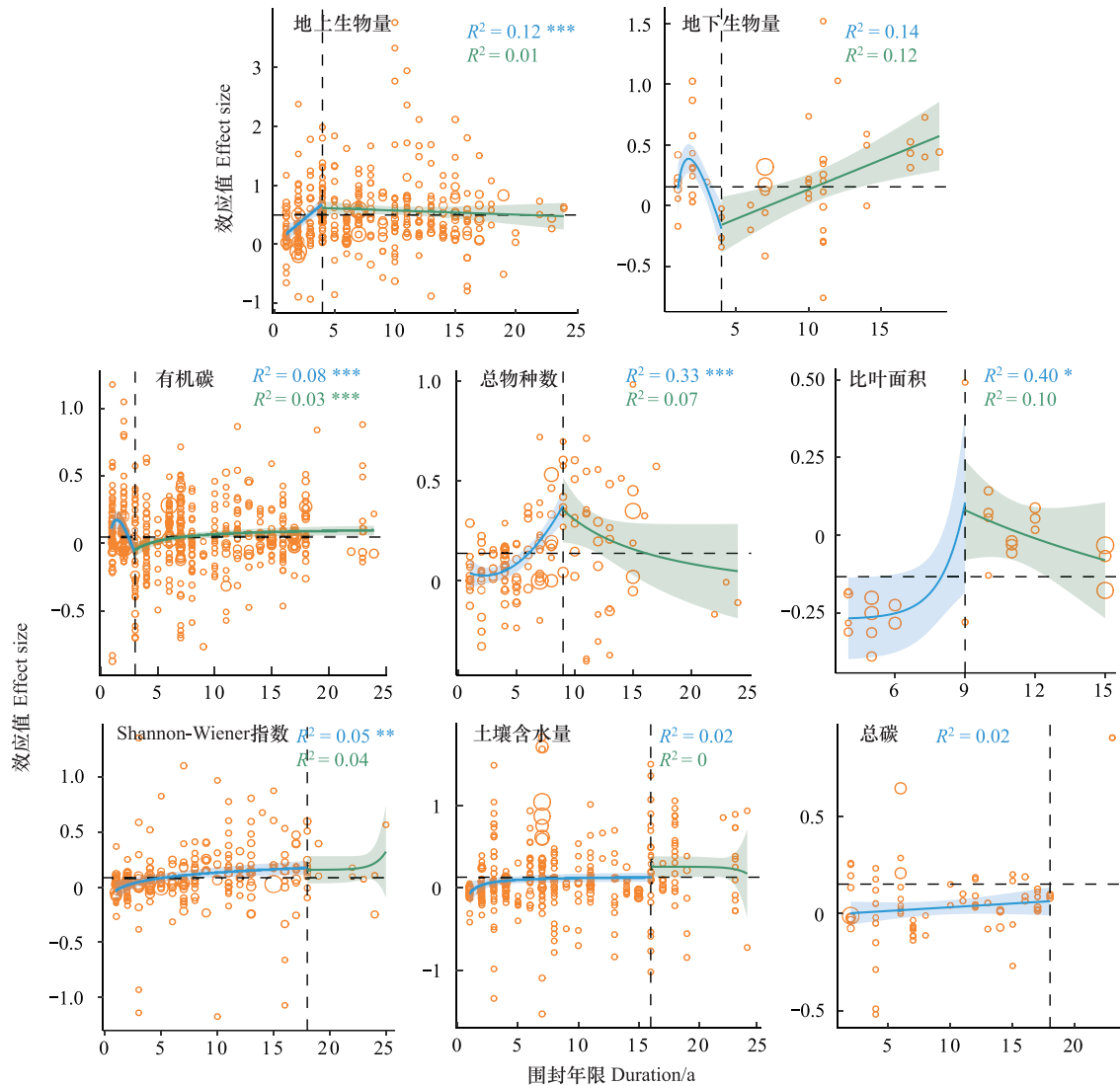


图 4 封育恢复效应的年限阈值及变化轨迹

Fig.4 The duration threshold and changing trajectory of the enclosure restoration effect

点的大小表示权重, 阴影区域表示平均值 95% 置信区间, 竖虚线表示年限阈值, 横虚线表示累积效应值

封育恢复降雨阈值主要集中在 160 mm、250 mm 和 290 mm 左右。在降雨量小于 250 mm 区间, 植被密度和地上生物量恢复效应呈上升趋势 ($P < 0.05$) (图 5); 土壤微生物量碳和微生物量氮分别呈显著上升和下降趋势 (图 5)。在降雨量大于 250 mm 区间, 随降雨增加呈下降趋势 ($P < 0.05$); 枯落物量在降雨小于 160 mm 区间 (图 5), 随着降雨增加呈不显著下降趋势; 在降雨大于 160 mm 区间, 随降雨增加呈显著下降趋势 ($P < 0.05$)。净初级生产力和土壤含水量分别在 290 mm 以下显著提升 ($P < 0.05$), 超过 290 mm 后趋于稳定或略微下降 ($P > 0.05$) (图 5)。

温度阈值对生态系统恢复的影响同样显著。当年均温度高于 8℃ 时, 植物高度和枯落物累积量显著增加

($P < 0.05$) (图 6), 这表明较高的温度有利于植物生长和枯落物积累。年均温度高于 6°C 时, 土壤有机碳显著增加 ($P < 0.05$) (图 6), 显示出适中的温度有助于土壤有机质的积累。此外, 当年均温度高于 3.5°C 时, 土壤全磷和土壤水分显著增加 ($P < 0.05$) (图 6), 进一步证明了温度对土壤肥力和水分保持的重要性。

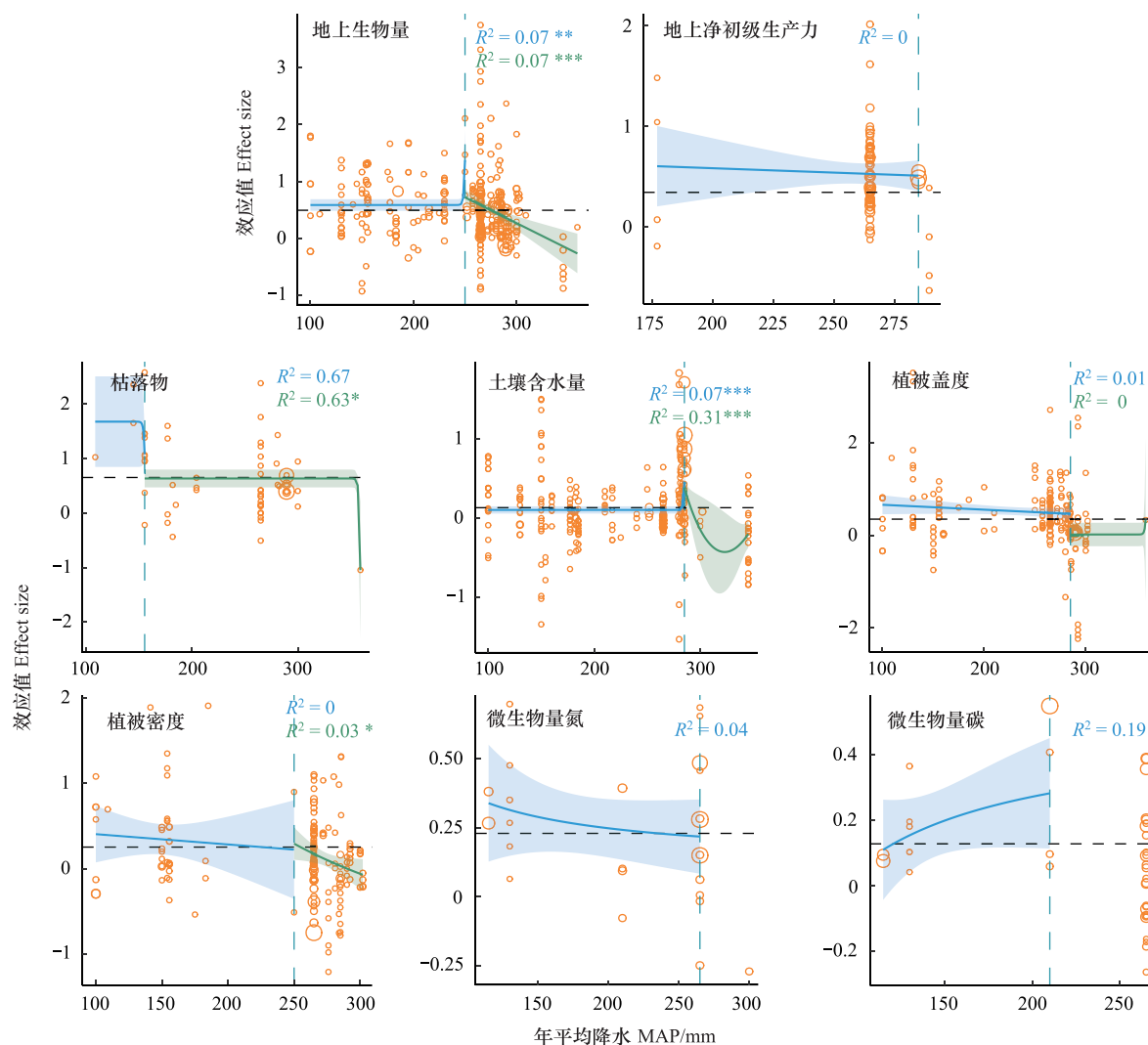


图 5 封育恢复效应的降雨阈值及变化轨迹

Fig. 5 The rainfall threshold and changing trajectory of the enclosure restoration effect

点的大小表示权重, 阴影区域表示平均值 95% 置信区间, 竖虚线表示降水阈值, 横虚线表示累积效应值; MAP: 年平均降水 Mean annual precipitation

3 讨论

经过 20 多年的围栏封育恢复, 中国北方荒漠草原草地植物群落结构 (高度、盖度和密度)、多样性 (物种丰富度、香浓维纳指数) 和功能 (生物量、净初级生产力) 得到显著恢复; 土壤结构 (大团聚体比例和几何平均重量直径)、土壤养分 (有机碳、全磷和全钾含量) 和功能 (团聚体、水分和养分、微生物碳氮等) 得到显著改善。封育后生态系统结构和功能的恢复存在阶段性特征: 短期封育实现可实现植被结构和多样性的恢复, 但生态功能和过程 (植被地上地下生物量、净初级生产力、土壤水分养分和土壤呼吸) 的全面恢复需要长期封育管理。封育后生态系统恢复效应依赖于封育年限、降雨、温度调控, 存在多重环境调控阈值且阈值前后特定生态属性恢复的轨迹存在显著差异。

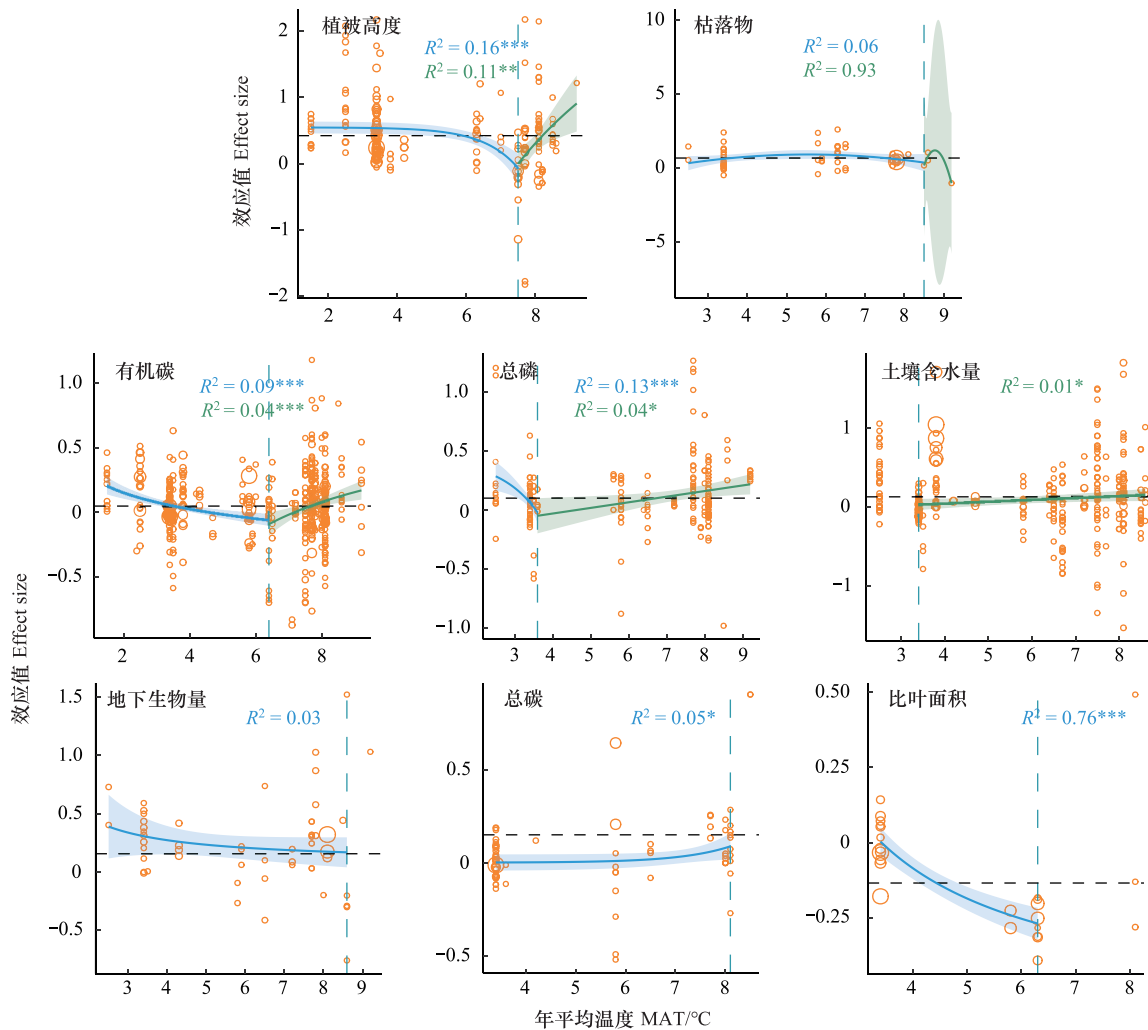


图 6 封育恢复效应的温度阈值及变化轨迹

Fig.6 The temperature threshold and changing trajectory of the enclosure restoration effect

点的大小表示权重,阴影区域表示平均值 95% 置信区间,竖虚线表示温度阈值,横虚线表示累积效应值; MAT: 年平均温度 Mean annual temperature

3.1 围栏封育显著促进生态系统结构和功能的恢复

长期围栏封育显著恢复了荒漠草原草地植被结构、多样性、生产力和枯落物量,并显著提升了土壤结构、养分和微生物活性;虽然退化草地生态系统整体恢复效果显著,但土壤速效养分和某些物理属性的恢复依然未达到显著水平(图 2)。由于土壤恢复是干旱半干旱区生态系统化恢复的重要标志,因此荒漠草原生态系统的全面恢复依然面临挑战。

长期围栏封育可以显著提升植被结构、多样性和生产力^[29–30],尤其是植被地上生物量、净初级生产力和枯落物累积量的显著提升(图 2),验证了围栏封育后地上植被结构和功能恢复具有普遍性^[30–31]。封育草地土壤恢复效果方面:土壤大团聚体、养分和微生物活性得到显著提升(图 2),支持了土壤质量的改善和恢复,这与以往关注封育对土壤质量影响的研究结果吻合^[32–33]。然而,长期封育并未显著恢复土壤速效养分(图 2),这与以往研究认为封育 10 年能显著提升荒漠草原土壤速效养分含量不同^[34],可能是因为荒漠草原降雨、土壤资源匮乏的本底限制了微生物活性,导致养分释放速率受到限制。

近自然封育恢复的目标是通过植被恢复带动土壤质量和功能的改善,这需要通过植被与土壤的互馈过程实现。长期围栏封育排除放牧压力,为地上植被恢复和演变提供了一个相对稳定环境^[35],植被恢复和枯落物

分解归还,可为土壤质量恢复提供重要的碳、氮等养分元素^[34],而植物根系分泌物及其与土壤微生物相互作用,在土壤团聚体及其稳定性形成方面发挥积极作用^[36],尤其是植物根系分泌物与土壤微生物协同,促使土壤容重下降、通气性和养分保持能力提升^[33]。这些土壤属性的变化又可为植物生长、群落多样性恢复等提供适宜的生境条件^[31]。上述植被与土壤互馈过程作为草地生态系统整体恢复的关键,在整个恢复过程中存在阶段性特征:封育初期植被恢复增加有机质输入,但土壤微生物分解效率较低限制了土壤养分循环效率;随着封育时间延长,土壤微生物活性的增强促使土壤养分供给能力显著提升,支持了植被多样性和生产力的持续提升恢复^[36]。

3.2 围栏封育生态系统恢复效应的环境依赖性

封育年限、降雨、气温、土壤和群落类型等的时空差异,决定了荒漠草原恢复特征及轨迹的复杂性。本研究发现围栏封育整体恢复效果主要受到封育年限、降雨、温度、群落类型的显著影响,并且存在显著的非线性环境阈值效应:短期0—5年封育对促进植被多样性和结构的显著恢复,长期封育11—15年的封育才能实现生态系统功能恢复。植被和土壤恢复存在显著的时间(4年和10年)、降雨(160 mm、250 mm和290 mm)和温度(3.5℃、6℃和8℃)阈值,阈值前后生态恢复效果和轨迹表现出显著差异。

封育年限、降雨、气温和群落类型显著影响封育草地生态系统恢复效应,这与以往多项研究结论保持一致。例如,封育年限被普遍认为是影响植被和土壤恢复的主要因素,短期封育主要恢复植被结构和多样性,长期封育显著提升土壤功能^[31];降雨和气温作为主要气候变化因子,对干旱区植被和土壤功能恢复具有双重效应^[21,33];相对于单一草本群落类型,灌草复合群落更有利于植被多样性的恢复。然而,与部分研究认为土壤类型显著影响恢复效果的观点不同^[37],本研究发现不同土壤类型之间的恢复效果差异并未达到显著水平,这可能与荒漠草原荒漠化导致的土壤整体沙化基质特征有关。此外,有研究认为封育可以迅速提升土壤速效养分^[34],但本研究发现封育后土壤速效养分并未得到显著恢复(图3),这可能是因为荒漠草原降雨和土壤养分资源贫瘠,导致土壤微生物活性较低,植物枯落物分解效率受限。

长期围栏封育恢复效果存在关键环境阈值。封育4年左右可以实现植被地上生物量恢复,而地下生物量和土壤有机碳恢复远超4年(图4),这一结果与以往封育草地研究观点一致^[31-32]。然而,植被多样性在封育10年后出现下降趋势,这与以往认为长期封育可实现退化草地持续恢复的观点存在差异^[31],这可能与荒漠草原植被恢复群落均质化过程有关^[38]。降雨量210 mm左右显著提升土壤有机碳含量和微生物活性;当降雨超过250 mm左右,植被密度和生物量下降(图5),这与降雨增加可能限制植被稳定性的研究结论一致^[39]。温度6—8℃为植被光合和养分循环提供适宜环境条件(图6),这与以往荒漠草原研究结果相符合^[33];但当温度大于8℃,植被恢复代价是增加夏季土壤水分消耗^[40],进而不利于生态系统恢复的可持续性。上述生态系统恢复的非线性变化关系,与干旱区生态系统恢复随环境变化波动的复杂性密切相关。

关键环境阈值前后恢复轨迹存在显著差异。封育年限的维度上,短期封育植被的快速恢复,但地下生态系统恢复改善滞后(图4),长期封育后恢复效果停滞甚至出现反弹,这与以往荒漠草原生态恢复风险与挑战的观点一致,主要由于历史恢复实践超过了区域水分等资源的承载^[21]。降雨超过250 mm后,植被密度和生物量下降(图5),这一结果补充了降雨增加可能引发封育草地养分流失的研究观点^[39]。高温环境(>8℃)抑制了植被水分利用效率,而适宜温度(6—8℃)则可以提升土壤微生物活性(图6),这与以往研究提出的温度对微生物活性的调控作用一致^[33]。

上述阈值及阈值前后恢复轨迹差异的环境依赖性生态学机制,首先是短期封育(0—5年)通过排除干扰,为植物结构(高度、盖度和密度等)和功能(地上地下生物量、生产力等)的快速恢复提供“窗口”,有限资源条件下的这些植被恢复变化,主要是通过植物补偿生长、多样性恢复,增加了生态系统整体资源利用效率。例如,去除放牧干扰后,受家畜采食抑制的植物优势种得以扩张,植被整体光合作用显著增强,这为植物枯落物养分归还和释放提供来源^[34]。但是植被地下生物量、土壤有机碳等功能的改善,则需要更长的封育年限(11—15年)才能实现,这符合荒漠草原区通过植被恢复带动土壤恢复的一般逻辑。然而,长期封育后植物优

势种的扩张会加剧竞争排除,抑制伴生种或稀有种的建植,进而降低群落内部结构和组成的复杂性^[41]。此外,长期封育形成的地表枯落物和生物结皮,阻碍了种子库更新潜力,降低了群落整体多样性,长期稳定环境下土壤水分和养分保持功能,可能因土壤紧实度或植物根系分布模式的变化而受到抑制^[33]。因此,荒漠草原区资源稀薄的背景下,长期封育后可能需要引适度利用(如轻度放牧或轮牧),以实现群落多样性和稳定性的维持^[32,34]。

其次是长期封育恢复效果的多重降雨阈值调控作用,体现了水分资源供需关系的动态变化。降雨量在 160 mm 以下时,较低的植被生产力和微生物活性,不足以为土壤的恢复提供充足的有机碳来源,导致生态系统恢复效应维持在较低水平。这与以往研究认为水分是荒漠草原区域生态恢复的主要因素的观点相同^[39,42]。随着降雨量超过 160 mm,适中的降雨条件改善了生态系统水分供应,显著提升了植被生物量、枯落物量和土壤微生物活性,表明生态系统资源供需关系在这一阶段趋于平衡,这与以往研究发现 200 mm 左右降雨量基本满足荒漠草原植被恢复和维持的观点保持一致。然而,降雨量超过 250 mm 区域,随降雨量增加植被地上生物量和密度呈下降趋势(图 5),这可能是这些区域历史上植被恢复通常存在超过资源承载现象,随着土壤水分资源的过渡消耗,植被当前存在稀疏化或死亡^[43],同时高降雨量可能导致根系活性下降^[22],这也可能导致植被恢复表现为抑制状态。在降雨量接近 290 mm 时,净初级生产力和土壤含水量达到峰值后趋于稳定(图 5),这可能与群落结构、组成和多样性变化有关,因为降雨增加会加剧植物中间竞争,通过竞争排除降低多样性,继而限制了植被生产力的恢复潜力^[41,43]。

最后是长期封育恢复效果的同样存在多重温度调控阈值,体现了热资源供需关系的动态变化。低温(< 3.5℃)对土壤功能恢复的限制性,可能主要通过抑制微生物活性和养分循环实现。因为较低温度会显著降低微生物的代谢速率,从而减缓枯落物分解和养分释放过程^[33]。随着温度升高到 3.5℃ 以上,土壤含水量和全磷含量显著提升(图 6),这表明温度增加可能通过提高微生物活性,激发地下土壤功能的恢复潜力。当气温升高至 3.5—6℃ 区间,植被比叶面积下降和土壤有机碳显著提升(图 6),这表明适中温度植被资源利用效率得到优化,同时可能实现地上和地下功能的协同恢复调控。当温度超过 8℃ 后,高温促进了植被高度的快速增长,但枯落物量和土壤有机碳的下降(图 6),可能与高温加速凋落物分解和碳流失有关^[44]。同时,高温可能增强了土壤蒸发速率,降低了水分的有效利用率,使地下功能恢复受到限制^[40]。此外,地下生物量未显著提升,可能表明地上快速生长的优先恢复对地下系统形成竞争压力。

3.3 围栏封育在荒漠草原生态系统恢复中的应用与挑战

本研究表明,围栏封育有效促进的荒漠草原过渡区生态系统结构和功能的恢复,但是植被、土壤要素的恢复先与生态过程或功能的恢复。短期封育的恢复目标制定,应注重地上生物量和物种多样性;长期封育恢复目标则应该关注地下生态系统、生态系统要素间相互关系的恢复^[45]。此外,封育草地恢复目标的制定,需要考虑气候、植被类型的初始条件^[45,46]。例如,降雨加好的气候区,植被恢复需要注意植被均质化的演变可能,这可能要求在通过人工抚育(补播、种子添加等)措施优化植被结构的恢复^[11];温度较高的气候分布区,通过耐旱、低密度、高覆盖度的措施,在维持一定植被盖度的同时,最大程度地减缓土壤水分蒸发,而在低温气候区域,应选择耐寒植物以增强植被恢复效果^[8]。

长期封育恢复也仍存在一些风险和挑战。首先,长期封育可能导致某些植物种群过度繁殖,形成单一优势种群,植被结构和组成简单化,不利于生态系统稳定性的维持,因此,需要定期从植被结构、组成的动态变化进行评估,制定优化调整抚育方案^[47]。其次,考虑荒漠草原过渡区气候、植被和土壤类型的异质性自然禀赋,灵活调整恢复措施。例如,降水好的沙化土壤生境,可以采取一年生或多年生杂草类群落构建,强化植被生产力恢复,弱化植被多样性恢复,带动土壤质量的逐步改善^[48]。此外,大面积围栏封育实施和维护成本不可忽略,可以通过考虑碳汇交易、生态旅游等新型生态经济,缓解长期封育维持成本和管理压力^[45,47]。最后,全球气候变化增加了恢复的不确定性^[49],需要进一步评估不同气候变化情景下,围栏封育生态系统恢复的潜力和限制因素,最大限度提高封育恢复的可持续性。

综上,相对于以往研究,本研究从区域草地生态系统的多个维度,首次量化了长期封育后的整体恢复效应,明确了生态系统结构和功能恢复的多重环境阈值及阈值前后恢复轨迹变化和差异,这些荒漠草原长期封育恢复的一般性特征及变化规律,丰富了该区域恢复生态学的理论基础,也为未来长期封育草地生态系统多功能的协同提升和可持续恢复与管理提供科学依据。但是由于整合分析数据限制,本研究目前无法从气候-植被-土壤互馈视角,深入揭示封育后退化草地生态系统恢复的途径和机理,特别是在阈值前后资源分配与功能权衡的动态过程中缺乏数据支撑。

4 结论

荒漠草原生态区,围栏近 20 多年以来,短期内(0—5 年),主要提升物种多样性和群落结构,而全面恢复生态系统功能需 11—15 年。气候条件(降水和温度)和植被类型显著影响封育效果,而土壤类型影响较小。恢复轨迹和效果存在显著的时间、降雨和温度多重阈值效应,需根据区域环境条件灵活调整封育策略,以实现最佳恢复效果。未来恢复重点在于平衡生态恢复与生产利用,分阶段实施封育措施,结合人工调控措施优化恢复效果。

参考文献(References):

- [1] Török P, Brudvig L A, Kollmann J, N Price J, Tóthmérész B. The present and future of grassland restoration. *Restoration Ecology*, 2021, 29(S1): e13378.
- [2] Yang W, Zhang D, Luo G. A novel framework for evaluating the effect of vegetation restoration via grazing exclusion by fencing: A case - study from the Qinghai-Tibet Plateau. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(14): 2619-2634.
- [3] Jiang D-m, Miao R, Toshio O, Zhou Q. Effects of fence enclosure on vegetation restoration and soil properties in Horqin sandy land. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(1): 40-46.
- [4] Zhang Y W, Zhang Y L, Huo T C, Wei B, Chen K L, Liu N, Zhang Y J, Liang J Y. Vegetation restoration constrained by nitrogen availability in temperate grasslands in northern China. *Journal of Plant Ecology*, 2023, 16(2): rtac087.
- [5] Cao J, Chen Y P, Jiang Y, Chen J S, Wu J H. Management of re-established artificial grasslands via grazing or fencing: Effects on plant and soil properties. *Grassland Research*, 2023, 2(1): 69-83.
- [6] Mudrák O, Jongepierová I, Řehounková K, Prach K. Large-scale restoration of species-rich dry grasslands on arable land: Environmental filtering drives successful species establishment over a period of 10 years. *Journal of Applied Ecology*, 2023, 60(9): 1893-1903.
- [7] Tölgyesi C, Vadász C, Kun R, Csathó A I, Bátorfi Z, Hábenczyus A, Erdős L, Török P. Post-restoration grassland management overrides the effects of restoration methods in propagule-rich landscapes. *Ecological Applications*, 2022, 32(1): e02463.
- [8] Wu J S, Feng Y F, Zhang X Z, Wurst S, Tietjen B, Tarolli P, Song C Q. Grazing exclusion by fencing non-linearly restored the degraded alpine grasslands on the Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 2017, 7: 15202.
- [9] Cong S, Zhou D W, Li Q, Huang Y X. Effects of fencing on vegetation and soil nutrients of the temperate steppe grasslands in Inner Mongolia. *Agronomy*, 2021, 11(8): 1546.
- [10] Liu J K, Bian Z, Zhang K B, Ahmad B, Khan A. Effects of different fencing regimes on community structure of degraded desert grasslands on Mu Us desert, China. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(6): 3367-3377.
- [11] 黄绪梅. 荒漠草原植被特征对降水减少的响应[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [12] 张钦弟, 卫伟, 陈利顶, 杨磊. 黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局. *自然资源学报*, 2018, 33(8): 1351-1362.
- [13] Xu L J, Nie Y Y, Chen B R, Xin X P, Yang G X, Xu D W, Ye L M. Effects of fence enclosure on vegetation community characteristics and productivity of a degraded temperate meadow steppe in northern China. *Applied Sciences*, 2020, 10(8): 2952.
- [14] 刘建, 张克斌, 程中秋, 苏鹏飞, 王黎黎. 围栏封育对沙化草地植被及土壤特性的影响. *水土保持通报*, 2011, 31(4): 180-184.
- [15] 余轩, 王兴, 吴婷, 王启学, 马昀, 谢莉, 宋乃平. 荒漠草原植物多样性恢复与土壤生境的关系. *生态学报*, 2021, 41(21): 8516-8524.
- [16] 白永飞, 赵玉金, 王扬, 周楷玲. 中国北方草地生态系统服务评估和功能分区助力生态安全屏障建设. *中国科学院院刊*, 2020, 35(6): 675-689.
- [17] 朱趁趁, 龚吉蕊, 杨波, 张子荷, 王彪, 矢佳昱, 岳可欣, 张魏圆. 内蒙古荒漠草原防风固沙服务变化及其驱动力. *生态学报*, 2021, 41(11): 4606-4617.
- [18] 汪玺. 天然草原植被恢复与草地畜牧现代化技术. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2004.

- [19] 闫峰, 吴波. 近 40a 毛乌素沙地荒漠化过程研究. 干旱区地理, 2013, 36(6): 987-996.
- [20] Li Q, Zhou D, Jin Y, Wang M, Song Y, Li G. Effects of fencing on vegetation and soil restoration in a degraded alkaline grassland in northeast China. 干旱区科学(英文版). 2014, 6(4): 478-487.
- [21] 杨新国, 刘春虹, 王磊, 陈林, 王兴, 曲文杰, 宋乃平. 荒漠草原生态恢复与重建: 人工植被推动下水分导的系统响应、生态阈值与互馈作用. 生态学报, 2023, 43(1): 95-104.
- [22] Shi J D, Luo D H, Weng H, Zeng X T, Lin L, Chu H T, Tong T J. Optimally estimating the sample standard deviation from the five-number summary. Research Synthesis Methods, 2020, 11(5): 641-654.
- [23] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [24] Lajeunesse M J. On the meta-analysis of response ratios for studies with correlated and multi-group designs. Ecology, 2011, 92(11): 2049-2055.
- [25] Rosenthal R. The file drawer problem and tolerance for null results. Psychological Bulletin, 1979, 86(3): 638-641.
- [26] Hoeve M, Stams G J J M, van der Put C E, Dubas J S, van der Laan P H, Gerris J R M. A meta-analysis of attachment to parents and delinquency. Journal of Abnormal Child Psychology, 2012, 40(5): 771-785.
- [27] 王方方. 全球尺度植被地上生物量的遥感回归模型及干旱阈值[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [28] Fong Y, Huang Y, Gilbert P B, Permar S R. Chngpt: threshold regression model estimation and inference. BMC Bioinformatics, 2017, 18(1): 454.
- [29] Zhao S L, Zhang T H, Yue P, Lv P, Hu Y, Medina-Roldán E, Zuo X A. Increased grazing intensities induce differentiation of the relationships between functional traits and aboveground plant biomass in shrub- and grass-dominated community in desert steppe. Ecological Research, 2021, 36(4): 590-602.
- [30] 吴婷, 宋乃平, 陈晓莹, 李敏岚, 陈娟. 围栏封育和放牧对盐池荒漠草原植物群落特征的影响. 草地学报, 2019, 27(3): 651-660.
- [31] 韩丛丛. 围栏年限对荒漠草原植物、土壤及微生物化学计量特征的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [32] 陆琪, 马红彬, 俞鸿千, 王丽, 沈艳, 许冬梅, 谢应忠. 轮牧方式对荒漠草原土壤团聚体及有机碳特征的影响. 应用生态学报, 2019, 30(9): 3028-3038.
- [33] 种碧莹, 金显玲, 徐海燕, 吴晓东, 周文婷, 梁冰妍, 甘子鹏, 张婷, 康国慧, 殊秋丽, 陈卓, 刘桂民. 长期增温和围栏封育对高寒草原土壤微生物残体碳积累的影响不显著. 冰川冻土, 2023, 45(4): 1391-1400.
- [34] 刘欢. 内蒙古草原围封效应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [35] Maestre F T, Eldridge D J, Soliveres S, Kéfi S, Delgado-Baquerizo M, Bowker M A, García-Palacios P, Gaitán J, Gallardo A, Lázaro R, Berdugo M. Structure and functioning of dryland ecosystems in a changing world. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2016, 47: 215-237.
- [36] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望. 土壤学报, 2023, 60(3): 627-643.
- [37] 余轩, 王兴, 吴婷, 宋乃平. 宁夏荒漠草原灰钙土和风沙土生境植物功能性状对围封的响应. 四川林业科技, 2022, 43(2): 63-70.
- [38] 唐庄生, 安慧, 邓蕾, 上官周平. 荒漠草原沙漠化植物群落及土壤物理变化. 生态学报, 2016, 36(4): 991-1000.
- [39] Song Y, Liu T J, Wang J, Lu Y J, Guo J Y, Dong Z, Wen Y H, Pei Z Y. The responses of three dominant species to increased rainfall under different grazing systems in a desert steppe. Hydrological Processes, 2022, 36(6).
- [40] 王德富. 毛乌素沙地植被恢复对土壤深剖面碳氮水分布的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- [41] Wang X, Yang X G, Wang L, Chen L, Song N P, Gu J L, Xue Y. A six-year grazing exclusion changed plant species diversity of a Stipa breviflora desert steppe community, northern China. PeerJ, 2018, 6: e4359.
- [42] 吕浩, 王兴, 宋乃平, 陈娟, 张艺斐, 吴旭东, 余殿, 杨新国, 王磊, 陈林. 荒漠草原 4 种典型草本植物群落土壤水分动态对极端干旱降水的响应. 水土保持学报. 2023, 37(6): 145-152.
- [43] 陈晓莹, 陈林, 杨新国, 李敏岚, 余殿, 宋乃平, 陈应龙. 荒漠草原不同功能群优势植物的水分利用特征. 应用生态学报, 2024, 35(8): 2119-2130.
- [44] 李学斌, 陈林, 吴秀玲, 宋乃平, 李昕. 荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物分解速率及影响因素. 生态学报, 2015, 35(12): 4105-4114.
- [45] Bai Y F, Han X G, Wu J G, Chen Z Z, Li L H. Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. Nature, 2004, 431(7005): 181-184.
- [46] Eldridge D J, Bowker M A, Maestre F T, Roger E, Reynolds J F, Whitford W G. Impacts of shrub encroachment on ecosystem structure and functioning: towards a global synthesis. Ecology Letters, 2011, 14(7): 709-722.
- [47] Knapp A K, Smith M D, Hobbie S E, Collins S L, Fahey T J, Hansen G J A, Landis D A, La Pierre K J, Melillo J M, Seastedt T R, Shaver G R, Webster J R. Past, present, and future roles of long-term experiments in the LTER network. BioScience, 2012, 62(4): 377-389.
- [48] 刘庆福. 毛乌素沙地沙漠化演变、飞播恢复评估及其对生态系统服务的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2020.
- [49] 韩芳. 气候变化对内蒙古荒漠草原生态系统的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2013.