

DOI: 10.20103/j.stxb.202408161941

张雨欣, 杜宜霖, 刘小茜, 马思克. 放牧活动对内蒙古草地生态系统的影响研究. 生态学报, 2025, 45(10): - .

Zhang Y X, Du Y L, Liu X Q, Ma S K. Impact of grazing activities on grassland ecosystems in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): - .

放牧活动对内蒙古草地生态系统的影响研究

张雨欣¹, 杜宜霖¹, 刘小茜^{1,*}, 马思克²

¹ 北京联合大学应用文理学院, 北京 100191

² 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500

摘要: 放牧活动是内蒙古自治区草地资源利用的重要方式, 合理确定放牧强度对增强草地生态系统的适应能力至关重要。然而, 不同放牧强度对草地生态系统的具体影响尚不明确, 尤其是植被群落结构和土壤特性等方面的差异性和敏感性尚需深入研究。为此, 通过 Meta 分析整合了 66 篇已发表文献的 1006 条数据, 系统评估了不同放牧强度对草地生态系统中地上生物量、地下生物量、pH 值、土壤全氮和土壤有机碳的影响, 揭示了这些因素在不同放牧强度下的响应特征。此外, 研究采用结构方程模型, 探讨内蒙古生态系统关键指标与影响因子的交互机制, 并利用累积放牧强度指数 (LGDI) 揭示草地退化趋势。结果表明: (1) 放牧显著降低了地上生物量和土壤有机碳, 分别比禁牧草地下降 47.5% 和 12.1%。其中, 轻度放牧影响不显著, 中度和重度放牧分别使地上生物量下降 45.7% 和 81.6%, 重度放牧使土壤有机碳下降 19%。(2) 放牧对草地生态系统的影响因草地类型而异, 草甸草原受影响最显著, 其次为典型草原、荒漠草原。(3) 结构方程模型分析表明, 放牧强度对生物量和土壤性质具有显著负向影响, 影响系数分别为 -0.487 和 -0.193。年均降水量对草地类型和土壤性质影响系数分别为 -0.464 和 -0.803, 而年均温对草地类型和土壤性质影响系数为 0.404 和 -0.407。(4) 进一步分析放牧强度和年限对草地生态系统的综合影响, 累积放牧强度指数达到约 4 时, 草地生态系统的演化趋势出现转变, 即低强度下放牧 16—20 年、中强度放牧 8—10 年及高强度放牧 4—5 年左右, 草地生态系统可能从因子退化转变为类型退化, 是进行生态保护和修复的关键时期。本研究通过定量分析放牧强度及其累积效应, 明确了草地生态系统在不同放牧强度下的响应特征和退化阈值, 为识别草地退化的关键节点、揭示退化路径以及制定草原保护和恢复措施提供了科学依据。

关键词: 草地退化; 草地生态系统; 放牧强度; Meta 分析; 土壤理化性质

Impact of grazing activities on grassland ecosystems in Inner Mongolia

ZHANG Yuxin¹, DU Yilin¹, LIU Xiaoqian^{1,*}, MA Sike²

¹ College of Applied Arts and Sciences, Beijing Union University, Beijing 100191, China

² Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China

Abstract: Grazing is a key method for utilizing grassland resources in the Inner Mongolia Autonomous Region, and establishing suitable grazing intensity is essential for improving the resilience of grassland ecosystems. However, the precise effects of varying grazing intensities on grassland ecosystems are not fully understood, particularly concerning the variability and sensitivity of vegetation community structures and soil properties, necessitating further detailed investigation. Thus, this research performed a meta-analysis, synthesizing 1006 data points from 66 published studies, to comprehensively evaluate the impacts of various grazing intensities on above-ground biomass (AGB), below-ground biomass (BGB), pH, soil total nitrogen (TN), and soil organic carbon (SOC) in grassland ecosystems. The analysis revealed the response characteristics of these factors under varying grazing intensities. Furthermore, the study developed a structural equation model (SEM) to

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42271112); 北京市教委教育科学一般项目 (KM202011417008); 中国国家留学基金 (202308110126)。

收稿日期: 2024-08-16; **网络出版日期:** 2025-00-00

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

investigate the interaction mechanisms between key ecological indicators and influencing factors within the Inner Mongolia ecosystem and utilized the long-term grazing duration and intensity (LGDI) to clarify the trend of grassland degradation. The findings indicated: (1) Grazing substantially decreased AGB and SOC by 47.5% and 12.1%, respectively, relative to ungrazed grasslands. Light grazing had no significant impact, while moderate and heavy grazing reduced AGB by 45.7% and 81.6%, respectively, and heavy grazing reduced SOC by 19%. (2) The effects of grazing on grassland ecosystems varied by grassland type, with meadow steppes being the most affected, followed by typical steppes and desert steppes. (3) SEM analysis revealed that grazing intensity exerted a significant negative influence on biomass and soil properties, with impact coefficients of -0.487 and -0.193 , respectively. Mean annual precipitation had impact coefficients of -0.464 on grassland type and -0.803 on soil properties, while mean annual temperature had impact coefficients of 0.404 on grassland type and -0.407 on soil properties. (4) Further analysis of the combined effects of grazing intensity and duration on grassland ecosystems showed that when the cumulative grazing intensity index reached around 4, the grassland ecosystem's evolutionary trend shifted. This result suggests that after 16—20 years of low-intensity grazing, 8—10 years of moderate-intensity grazing, or 4—5 years of high-intensity grazing, grassland ecosystems may shift from factor-level degradation to type-level degradation, indicating a critical period for ecological protection and restoration. By quantitatively analyzing grazing intensity and its cumulative effects, this study clarifies the response characteristics and degradation thresholds of grassland ecosystems under varying intensities. The findings provide a scientific basis for identifying critical points of grassland degradation, revealing degradation pathways, and formulating grassland protection and restoration measures.

Key Words: grassland degradation; grassland ecosystem; grazing intensity; meta-analysis; soil physicochemical properties

草地覆盖面积占中国国土面积的 41%^[1],是中国最大的生态系统和主要的畜牧业生产基地,对维持生态安全和区域可持续发展至关重要^[2]。草地在涵养水源、调节气候、水土保持等方面具有重要作用,保护内蒙古草地是巩固北方地区绿色生态安全屏障的有效途径^[3]。内蒙古草地占中国草地总面积的 25%以上,生态脆弱程度较高,具有潜在退化风险^[4]。作为沙漠化防治和水源涵养的重点区域,内蒙古草地对国家生态安全至关重要^[5]。然而,城市化导致的水资源短缺和土地不合理利用加之气候变暖问题,进一步加剧了内蒙古草地生态系统退化的风险^[6],过度放牧尤为威胁区域生态系统的稳定性^[7-9]。

放牧对草地生态系统的影响最为显著^[10],主要体现在生态系统结构和功能的变化^[11],包括植被生物量减少、土壤结构退化和生物多样性下降^[12-13]。例如,有学者通过实验发现地下生物量随放牧强度增大而持续减少^[14];还有研究指出,随着放牧强度的增加,生物量呈现出先增后降的单峰性变化^[15]。由此可见,放牧强度对草地生态系统的影响存在时空差异性,并非简单线性相关^[12],需综合考量不同的放牧强度、草地类型及其交互影响,进行系统性的综合研究以更全面地理解草地生态系统的变化^[16]。

对于草地生态系统的量化方法,当前已有众多实证研究,包括建立放牧实验平台^[17-18]、测量土壤理化性质^[13]和利用遥感数据监测草地生态系统变化^[19-20]。然而,已有研究多限于特定样地,样本数量有限^[21],忽略了草地空间异质性对研究结果的影响。因此,亟需开展区域尺度上的整合研究,揭示共性演化机制和复杂反馈过程^[22]。目前,文献综合研究中,文献计量学虽适用于广泛主题^[23],但在参数化和量化分析上有所欠缺。相较而言,Meta 分析通过对文献中类似的独立研究结果进行定量评估^[24],适合整合多种案例数据,弥补实验样地少、数据不足的问题。该方法在湖泊、土壤、森林等生态系统变化的复杂性机制取得了显著成效。有研究利用 Meta 分析揭示了中国湖泊生态系统服务价值与地理特征的响应关系^[25],挖掘中国草地土壤生态系统对不同放牧强度的响应机制^[26],以及探究森林生态系统对生态修复的响应^[27]。这些研究都论证了 Meta 分析在集成已有研究成果方面进行深入分析的有效性^[28]。

为此,本研究以内蒙古自治区为案例区,基于 Meta 分析探讨不同放牧强度对草地植物生物量、土壤性质的影响,利用双因素方差分析探究放牧强度和草地类型对草地生态系统的影响及其交互作用,并基于结构方

程模型解析多因素对草地生态系统的作用机制,构建累积放牧强度指数分析草地生态系统演化趋势。研究旨在深入探讨草地生态系统核心生态因子对放牧行为的时空响应差异,以及放牧强度对草地生态系统的稳定性和敏感性的时间影响机制,从而为制定草地管理策略提供科学依据。

1 研究区域

内蒙古自治区以温带半干旱大陆性季风气候为主,年均气温 8°C ,最冷月份(1月)平均气温低至 -21.4°C ,最热月份(7月)平均温度为 19.0°C ,年均降雨量 $50\text{--}450\text{ mm}$,自东南向西北递减^[29-30]。内蒙古草地类型主要分为三类:典型草原、草甸草原和荒漠草原(图1)。典型草原属温带半干旱大陆性气候,年平均气温为 $0.2\text{--}2.8^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量在 $225\text{--}350\text{ mm}$ 左右,土壤为栗钙土;草甸草原属于温带半干旱气候,年平均气温在 $-2.4\text{--}2.2^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量为 $250\text{--}350\text{ mm}$,土壤为暗栗钙土。荒漠草原属于温带干旱半干旱气候,年平均气温为 $2\text{--}5^{\circ}\text{C}$,年均降雨量在 $150\text{--}200\text{ mm}$ 之间^[31],土壤为淡栗钙土。

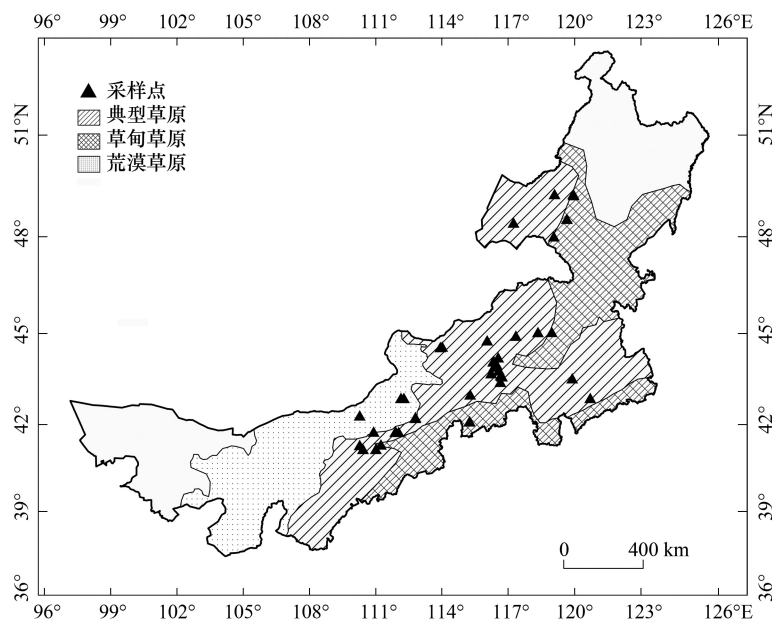


图1 Meta分析中研究样点分布图

Fig.1 Distribution map of study sites in meta-analysis

2 材料与方法

2.1 文献选取和数据库建立

在中国知网(CNKI)、Web of science 数据库中,检索2000年—2023年有关内蒙古地区放牧活动对生态系统影响的中英文文献,检索关键词为(生态系统 or 草地)and(放牧活动 or 放牧 or 放牧强度)and(土壤特性 or 植被特征)and 内蒙古地区,英文检索公式为 $\text{TS} = (\text{grazing OR grazing intensity OR grazing duration OR fencing}) \text{ AND } (\text{ecosystem functioning OR grassland ecosystem}) \text{ AND } (\text{China OR Inner Mongolia grassland OR Northwest China})$ 。

对检索到的文献,按照以下标准进行文献遴选和数据整理:(1)研究地点需为内蒙古地区;(2)研究报道包含实验组和对照组,即应至少一个禁牧对照组和一个放牧处理组;(3)实验样点中具有明确的气温、地形、降雨量等背景信息,或者可根据地理坐标进行查询;(4)可直接从文字或者间接从图、表提取相关参数数值、标准差及样本量等信息;(5)研究结果相互独立;(6)试验的重复次数 ≥ 3 。

基于以上要求,研究共遴选出文献66篇。其中,包含典型草原的文献有28篇,包含草甸草原的文献共有

15 篇,包含荒漠草原的文献共 23 篇。放牧强度的划分整体上符合四类划分方法^[25],即禁牧、轻度放牧、中度放牧和重度放牧。此外,为详尽讨论在不同强度放牧条件下的变化,基于数据充足性和适用性,不同放牧强度下的样本量均需超过 20。最终,选择了地上生物量(AGB)、地下生物量(BGB)、pH、土壤全氮(TN)和土壤有机碳(SOC)5 个关键生态参数,以及经纬度、年平均降水量、月均温、放牧年限、放牧强度、草地类型等环境信息作为变量和环境因子,将所有收集到的样点信息按照草地类型分类绘制成为样点位置图 1。

2.2 研究方法

2.2.1 Meta 分析

Meta 分析通过整合不同研究的结果,可以揭示问题与相关变量之间的明确联系,将研究区域轻度放牧、中度放牧和重度放牧后的数据与禁牧的相关数据的比值作为对照值^[32],为了便于统计,取 X_t 与 X_c 之比的自然对数作为效应值。

$$R = \ln \frac{X_t}{X_c} = \ln X_t - \ln X_c \quad (1)$$

式中, X_t 、 X_c 为放牧的平均值和禁牧组的平均值。

单个因子的权重:

$$w_i^* = 1/(v_i + \tau^2) \quad (2)$$

式中, v_i 和 τ^2 分别为各指标响应量和观测次数的方差。

累积效应值:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k w_i^* y_i}{\sum_{i=1}^k w_i^*} \quad (3)$$

式中, K 为该指标所对应的总的研究数据组数。

各响应变量的标准差为:

$$SE = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^K w_i^*}} \quad (4)$$

累积效应值的 95% 置信区间^[32]:

$$CL = \bar{y} \pm 1.96 \times SE \quad (5)$$

Meta 方法于 OpenMEE 软件中确定以 95% 作为置信区间范围。如果 95% 置信区间未跨越横坐标零点,则统计差异应视为显著;相反则表示统计差异不显著。

2.2.2 累积放牧强度指数

放牧行为的持续时间与放牧强度共同对草地生态系统产生累积影响^[8]。为综合考量放牧年限和放牧强度对草地生态系统的影响,研究提出累积放牧强度指数(LGDI)。其计算公式如下:

$$LGDI = Y \times GI$$

式中, Y 为放牧年限,指在四种放牧强度下的放牧持续年限,这一数据部分直接来源于论文中提供的放牧起始年份信息,其余部分通过论文发布时间与采样时间的差值进行推测得出。GI 为四种放牧强度,为区分累积放牧强度指数,在参考已有文献关于放牧强度权重设定的基础上经过多次调整和优化^[33],最终将禁牧、轻度放牧、中度放牧、重度放牧分别赋值为 0.25、0.5、0.75、1。

2.3 数据处理

本研究使用 OpenMEE 软件对数据进行 Meta 分析。使用 SPSS 软件进行双因素方差分析放牧强度和草地类型对 AGB、BGB、pH、TN 和 SOC 的交互影响,使用 Amos 进行结构方程模型的构建,探讨放牧强度、草地类型、环境因素与草地生态系统关键指标之间的关系,结果使用 ArcGIS 10.7 软件和 Origin 2021 软件进行图表绘制。

3 结果与分析

3.1 放牧对生态系统的影响

与禁牧草地比较可发现,放牧活动对 AGB、SOC 存在显著影响(图 2)。其中,AGB 在放牧后显著下降 47.5%(95% CI: -62.4%—-32.6%, $P < 0.05$),SOC 降低了 12.1%(95% CI: -23.5%—-0.7%, $P < 0.05$)。

3.1.1 不同放牧强度下生物量的变化特征

Meta 分析发现,不同的放牧强度对植被的生物量的影响存在显著差异(图 3)。随着放牧强度的增加,在中度放牧和重度放牧后,AGB 显著降低,分别降低了 45.7% 和 81.6%;BGB 在此阶段整体也呈现下降趋势($P > 0.05$),但趋势不明显,同等放牧强度下的 BGB 效应值明显低于相应的 AGB 效应值,这说明 BGB 的响应可能滞后于 AGB。

3.1.2 不同放牧强度下土壤特性的变化特征

图 4 显示出不同放牧强度下,土壤理化指标呈现出不同的特征。随着放牧强度的提升,pH 值的效应值呈现正值增长,表明在所有放牧行为下,土壤均面临 pH 值升高和潜在盐碱化的风险。TN、SOC 效应值均为负值,表明这些指标在放牧行为下减少。其中,重度放牧下 SOC 显著减少 19.0%,表明重度放牧对植被的破坏最为严重,导致土壤结构的退化和有机碳的流失,说明 SOC 对重度放牧最为敏感。

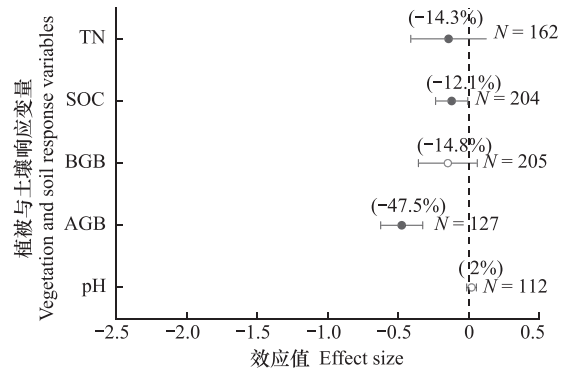


图 2 放牧对草地植被和土壤理化性质的影响

Fig.2 Impacts of grazing on grassland vegetation and soil physical and chemical properties

AGB:地上生物量;BGB:地下生物量;Ph:土壤 Ph;TN:全氮;SOC:土壤有机碳;横坐标为效应值的大小,纵坐标为各响应变量,图中右侧数字代表样本量的多少,误差线代表 95% 置信区间,影响显著用黑色实心表示,空心表示影响不显著,N 代表样本数量的多少

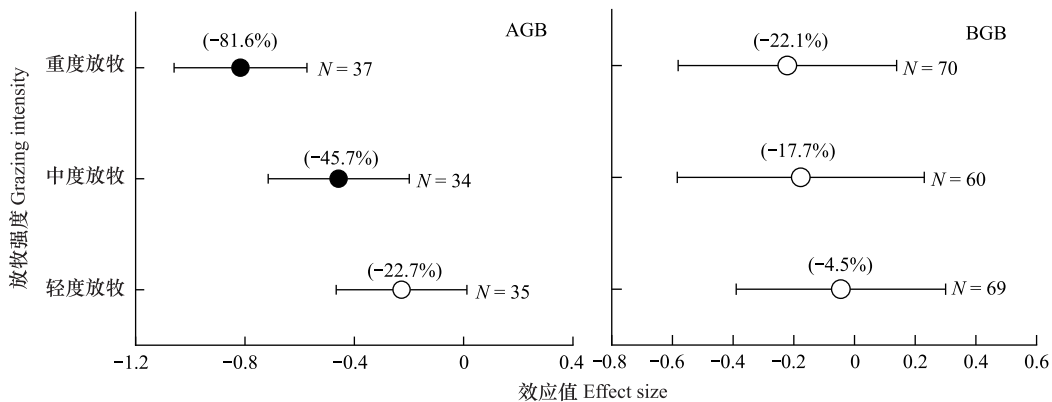


图 3 三种放牧强度对 AGB 和 BGB 的显著性分析

Fig.3 Significance analysis of AGB and BGB under three grazing intensities

3.2 不同草地类型和放牧强度对生态系统的影响

为了更深入地研究不同草地生态系统在不同放牧强度下的响应,研究选取内蒙古地区典型草原、草甸草原、荒漠草原三种草原为对象,采用双因素方差分析测试不同草原类型、不同放牧强度及它们的交互作用对 AGB、BGB、pH、TN 和 SOC 各指标的影响(表 1),同时采用邓肯法检验各草原类型不同放牧强度间各指标的差异。研究发现,不同的放牧强度和草地类型及交互作用对 AGB 均有显著影响,草地类型对 BGB、pH、TN、SOC($P < 0.001$)有显著影响。

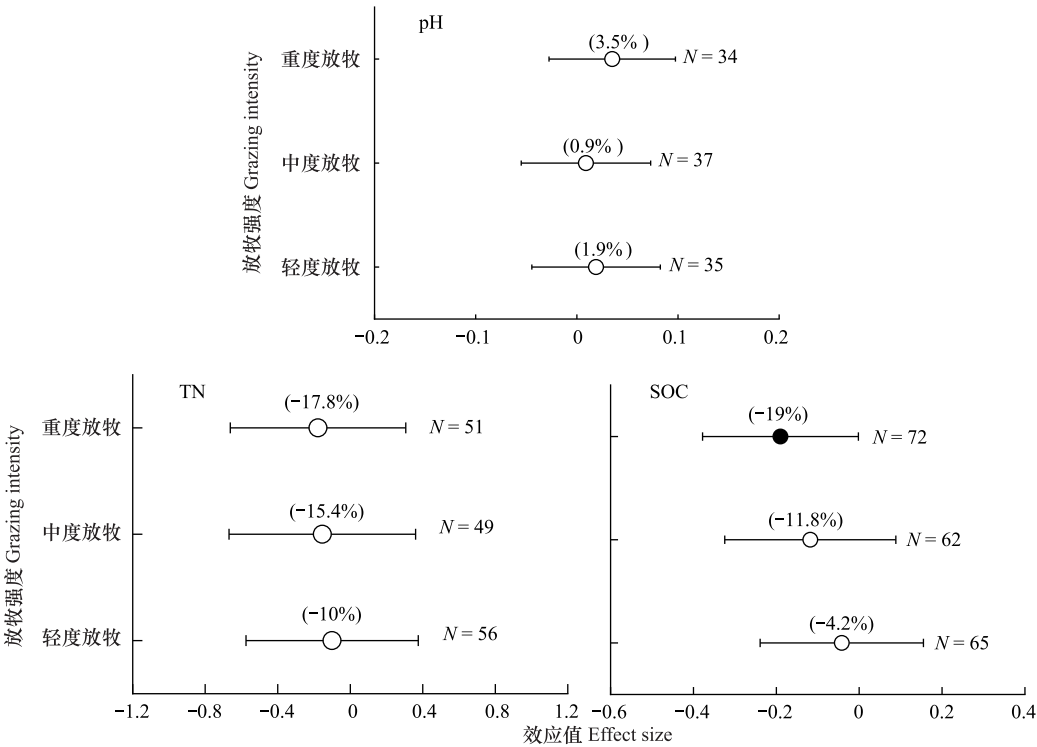


图 4 三种放牧强度对 pH、TN 和 SOC 的显著性分析
Fig.4 Significance analysis of pH, TN, and SOC under three grazing intensities

表 1 不同草地类型、不同放牧强度对生物量和土壤性质的双因素方差显著性分析

Table 1 Two-way ANOVA for the significance analysis of biomass and soil properties in different grassland types under different grazing intensities

影响因子 Impact factors	自由度 df	地上生物量 Aboveground biomass/ (g/m ²)	地下生物量 Belowground biomass/ (g/m ²)	土壤 pH Soil pH value	土壤全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	土壤有机碳 Soil organic carbon/ (g/kg)
草地类型 Grassland types	2	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000
放牧强度 Grazing intensities	3	0.041	0.564	0.497	0.979	0.226
双因子交互作用 Interaction	6	0.000	0.998	0.964	0.819	0.589

3.2.1 不同草地类型和放牧强度对生物量的影响

图 5 表明放牧强度和草地类型对 AGB 和 BGB 的影响具有显著差异($P<0.001$)。在禁牧和轻度放牧条件下,草甸草原的 AGB 受到的影响最大。中度放牧时,其 AGB 下降程度相当于典型草原和荒漠草原在轻度放牧时的生物量水平。BGB 受草地类型的显著影响($P<0.001$),在典型草原中度放牧后,BGB 达到了荒漠草原在轻度放牧时的水平。草甸草原在重度放牧下对 BGB 的影响最为显著。

3.2.2 不同草地类型和放牧强度对土壤性质的影响

如图 6,土壤 pH 受草地类型影响较大($P<0.01$),草甸草原的 pH 呈上升趋势,而典型草原和荒漠草原呈不稳定趋势。TN 受草地类型影响显著($P<0.001$),其中草甸草原和典型草原的 TN 受放牧影响显著,而荒漠草原在重度放牧下受影响最为显著($P<0.05$)。SOC 在不同草地类型下变化显著,在重度放牧下,三种类型的草原都受影响显著($P<0.001$)。草甸草原受放牧影响最为明显。

3.3 草地生态系统对放牧和气候因子的响应

放牧对草地生态系统的影响是多方面的,不同的放牧强度决定草地生态系统的发展方向,引起草地植被

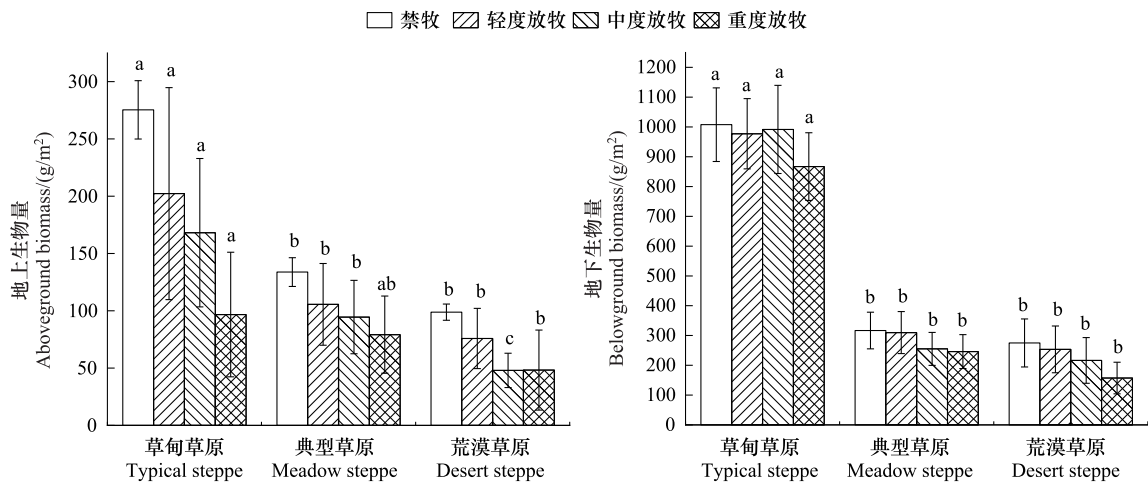


图5 不同类型草地不同放牧强度对 AGB 和 BGB 的影响

Fig.5 Effects of different grazing intensities on AGB and BGB in different types of grassland

图中数据为平均值 $\pm$ 标准误,不同字母表示放牧强度对不同草地类型下的影响存在显著差异($P < 0.05$),相同字母表示放牧强度对不同草地类型的影响差异不显著($P > 0.05$)

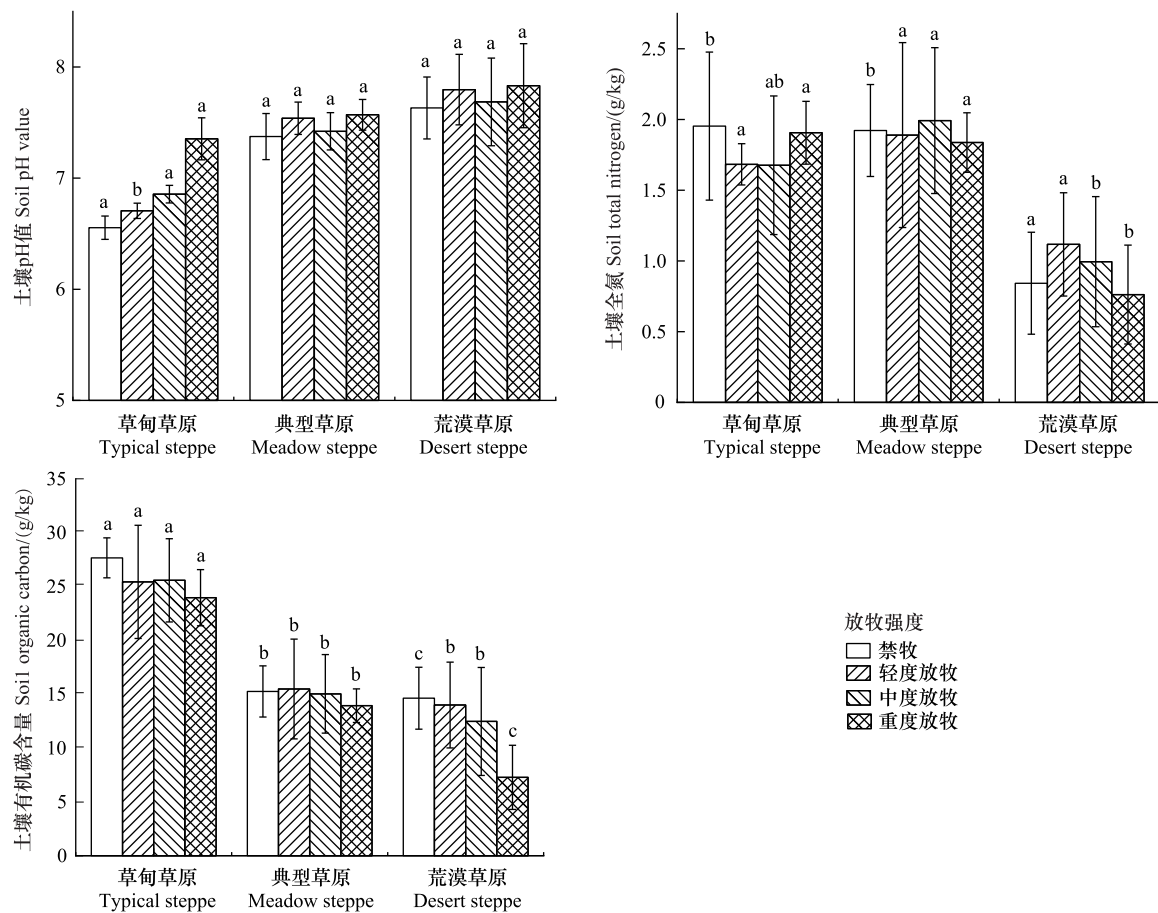


图6 不同类型草地不同放牧强度对 pH、TN 和 SOC 的影响

Fig.6 The effects of different grazing intensities on pH, TN, and SOC in different types of grasslands

发生演替,改变生态系统结构功能。为量化多种因素对草地生态系统的直接和间接影响,构建了结构方程模型以揭示这些因素之间的复杂关系(图7)。

基于结构方程模型,综合年均降水量和年均温度两个气候因子及生物量和土壤特性等数据,探究放牧活动和气候因子对草地生态系统的影响机制。通过分析气候、放牧对生物量和土壤特性的路径系数可发现,放牧强度均与草地生态系统呈负相关关系,对生物量的负向影响最大(-0.487),其次是土壤性质(-0.193)。年均降水量对草地类型和土壤性质的影响路径系数分别为 -0.464 和 -0.803 ,显示出明显的负相关性。年均温对土壤性质的影响路径系数为 -0.407 ,也呈显著负相关关系。

3.4 草地生态系统演化趋势分析

为综合考量放牧年限和放牧强度对草地生态系统的影响,本研究使用了累积放牧强度指数(LGDI),采用分段函数构建趋势线,观察 AGB、BGB、pH、TN 和 SOC 等参数的变化特征。结果指示,随着 LGDI 的增加,生态系统的演化在一定的阈值范围内出现突变,这些阈值点对于制定合理的放牧管理策略至关重要,可以避免过度放牧导致的生态系统退化。

结果显示,草地生态系统在 LGDI 为 4—5 附近加速退化(图 8),即在低强度下放牧 16—20 年、中强度放牧 8—10 年及高强度放牧 4—5 年左右,草地可能从植被覆盖度高的草甸草原退化为低覆盖度的典型草原或荒漠草原。这表明生态系统正处于临界状态,超过这个阈值可能导致进一步加速退化。

AGB 和 BGB 的变化指示在放牧活动前期,退化趋势明显,而后期则趋于平缓或相对稳定,可能是草地自身韧性增加或类型退化的结果。AGB 对放牧强度表现得最为敏感,随着放牧强度指数增加发生剧烈的降低趋势。pH 先增加后减少,在 LGDI 为 5 时趋势发生变化,预示早期放牧活动会导致土壤的碱化趋势较为明显,而后期则呈现盐化的趋势。TN 和 SOC 随 LGDI 增加一直呈下降趋势,与之前图 4 的结果形成对照,在 LGDI 高于 5 后下降速率发生变化,表现为后期退化减缓的特征。

研究表明草原生态系统在高强度放牧 5 年前后是生态保护和修复的关键时期。各生态因子的敏感度不同,往往先表现为 AGB、BGB 的减少,再反映在 pH、TN 等土壤性质上。识别和关注这些阈值点至关重要,应以 4—5 为参考阈值,限制放牧强度和年限,制定管理策略,并采取轮牧等措施,维持草地生态系统的稳定。

4 讨论

研究结果表明,放牧会显著影响植被生物量及土壤性质,进而对草地生态系统产生深刻的影响。由于内蒙古地区放牧的响应机制具有复杂性,在本节中,将尝试讨论草地生态系统对放牧的响应特征。

4.1 放牧对草地生态系统稳定性的影响

随着放牧强度的增加,草原退化现象显著加剧,加速了沙漠化和盐碱化进程。植物群落的生物量对放牧的响应最为明显,尤其是 AGB 和 BGB 的显著降低(图 3),可作为评估草地退化程度的重要指示指标^[34—35]。重度放牧导致 AGB 和 BGB 分别减少 81.6% 和 22.7% (图 3)。这一降低程度高于全国尺度的其他相关研究结果^[36],表明内蒙古自治区的草地生态系统对放牧活动更加敏感。重度放牧可能直接导致凋落物减少和植物群落结构单一化,破坏草原植被—土壤界面的稳定性,加剧草地土壤的结构和功能的退化^[37]。

牲畜通过觅食和践踏改变土壤结构,减少土壤中的有机质^[38—39],加速植被的衰退进程,进而在一定程度

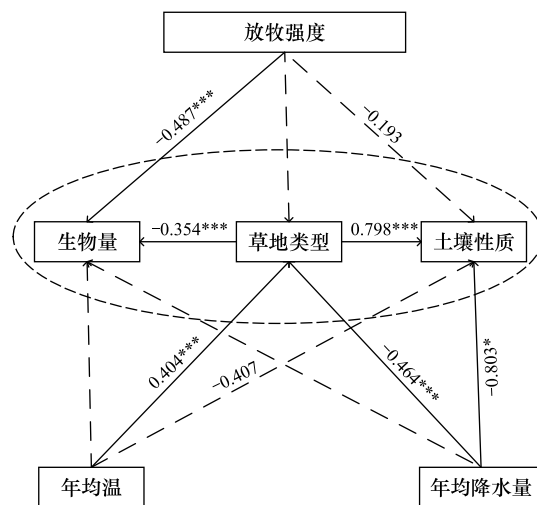


图 7 草地生态系统各因子的相互影响机制

Fig.7 Interaction mechanism of multiple factors in grassland ecosystems

实线表示影响显著,虚线表示影响不显著,* $P<0.05$,** $P<0.01$,*** $P<0.001$;线上的数值表示标准化路径系数,表示自变量对因变量影响的大小;数值正负表示相关关系的正负

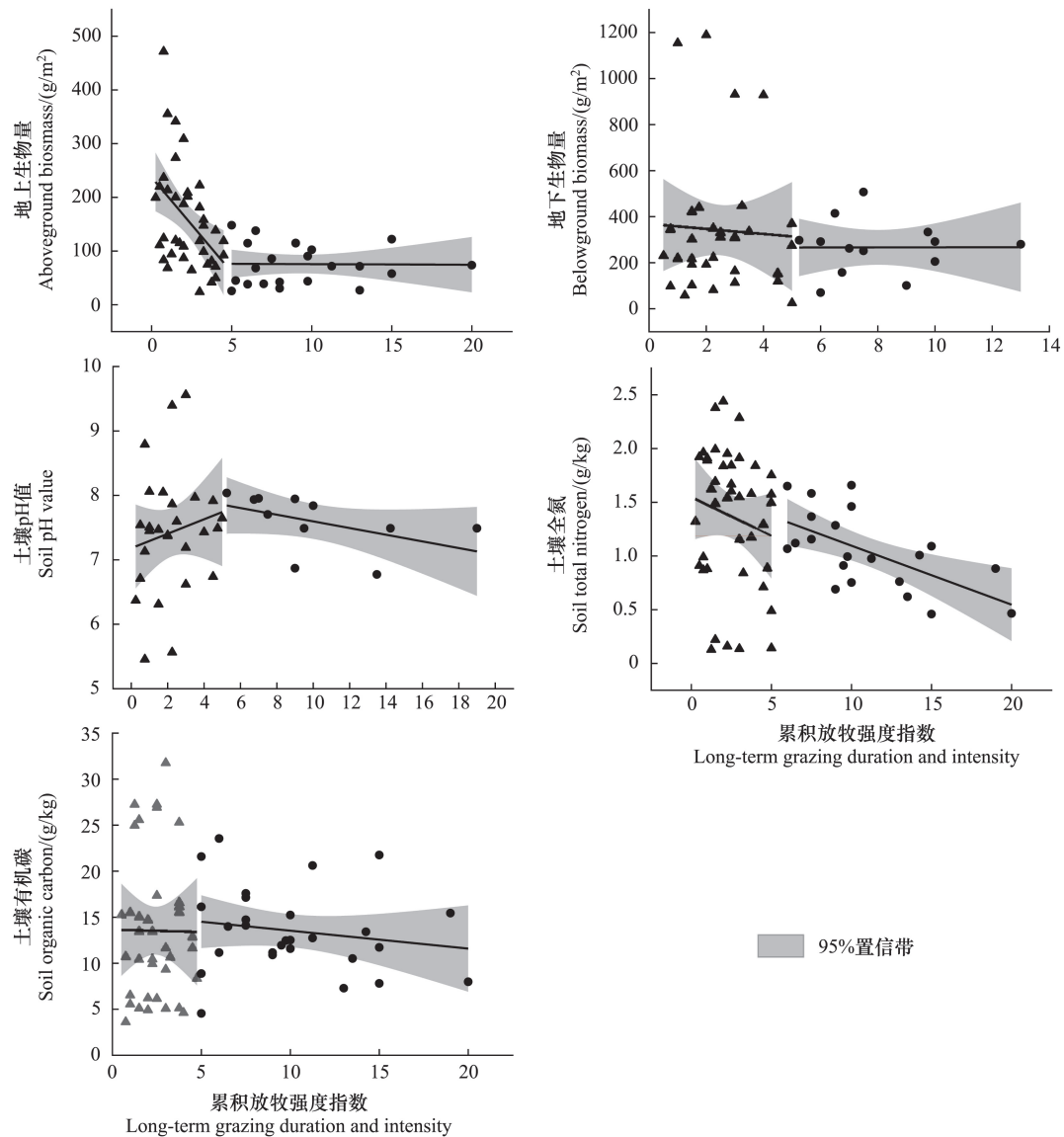


图8 累积放牧强度指数对草地生态系统中 AGB、BGB、pH、TN 和 SOC 的影响

Fig.8 Effects of comprehensive grazing pressure index on AGB, BGB, pH, TN, and SOC in grassland ecosystems

LGDI 表示 Long-term Grazing Duration and Intensity, 图中阴影表示 95%置信带

上加快草地退化^[40],对草地生态系统的土壤物理结构与化学性状产生了深远影响^[41]。放牧活动还可能导致土壤 pH 值增加,加重草地盐碱化。这是因为放牧牲畜的采食和践踏行为导致地表植被覆盖减少,草原土壤被压实^[42—43],增加了土壤水分的蒸发,加速了可溶性盐类在地表的积聚,导致 pH 值快速上升^[44]。同时,随着放牧强度的增加,SOC 显著下降(图4),导致草地生产力的降低^[45—46]。图8显示,AGB 的衰减速率显著,这可能是因为其对放牧变化的响应更迅速,相比之下,其他土壤参数需要更长的观测周期才能显现。

4.2 不同草地类型对放牧活动的敏感性分析

本研究中,不同类型的草地在放牧强度下表现出不同的敏感性,草甸草原在各个方面的响应较为明显,其中草甸草原的 AGB 受影响最为显著。不同草原类型的土壤养分和植物多样性等初始属性不同^[46],对不同放牧活动的响应特征也存在差异。其中,草甸草原对放牧强度的变化最为敏感,图5显示,草甸草原在中度放牧后的 AGB 可下降到典型草原轻度放牧和荒漠草原禁牧状态的水平。而典型草原的 BGB 受影响最显著,在中度放牧后,其 BGB 可降低到荒漠草原禁牧时的水平(图5)。这些响应特征的敏感性差异不仅影响草原生态

系统的结构和功能,还揭示了需要针对不同草原类型制定适应性放牧管理策略的必要性。

4.3 放牧对草地生态系统演化趋势分析

本研究发现 AGB 对放牧强度的敏感性显著,表明地上植被直接受到了放牧活动的强烈影响^[34]。pH 的先增后减及 TN 和 SOC 的持续下降,指示了植物生长受限和生态系统生产力的下降,研究揭示了放牧对草地生态系统土壤化学特性的复杂影响机制^[47-48]。

此外,研究发现草地生态系统在 LGDI 为 4—5 附近加速退化,对应在低放牧强度下累计放牧时间为 16—20 年、中强度放牧 8—10 年及高强度放牧 4—5 年左右,草地可能从植被覆盖度高的草甸草原退化为低覆盖度的典型草原或荒漠草原,退化方式从因子退化转变为类型退化,指示了草地生态系统退化的关键时间阈值。当退化程度达到这一阈值时,单纯控制放牧强度已难以实现草地生态系统的自然修复功能,此时需要采取人工修复措施。建议采取分级响应策略:在 LGDI<4 时实施季节性轮牧和补播乡土草种^[49];在 LGDI 在 4—5 时采取建立隔离休牧区并施用有机肥改良土壤的措施^[50];在 LGDI>5 时则需实施围栏封育、人工草甸重建与植被恢复等系统性工程^[51]。

基于本研究的结果, LGDI 接近 4—5 这一阈值界定了草地生态系统退化的关键时期。同时,该指数可与遥感生态指数 (RSEI) 协同验证 LGDI 的空间适用性,更能实现退化风险预警与放牧策略的动态优化。

4.4 研究的局限性

总体而言,本研究揭示了草地生态系统对放牧强度和气候因子等多因素的响应,但对诸如气候变化^[52]和减牧策略的空间差异^[53]等因素尚未充分考量。未来,研究将补充相关的空间数据,以揭示放牧强度、放牧方式以及适应性对策对生态系统稳定性和多样性的综合影响机制。

5 结论

(1) 放牧显著降低 AGB、SOC,与禁牧草地相比,降幅分别为 47.5% 和 12.1%。在不同放牧强度下,AGB 和 SOC 的响应存在差异,轻度放牧影响不显著,而中度和重度放牧后,AGB 显著降低 45.7% 和 81.6%,重度放牧后 SOC 显著降低 19%。因此,合理控制放牧强度,避免过度放牧,是维护草原承载力、防止草地退化的重要措施。

(2) 不同草地类型和放牧强度对草地生态系统的影响不同。草甸草原对放牧的敏感性最强,尤其在禁牧和轻度放牧下表现突出,而中度和重度放牧对典型草原和荒漠草原的影响更为显著 ($P<0.05$)。表明草地生态管理应针对不同类型草地制定差异化放牧策略。

(3) 结构方程模型分析发现,放牧强度、草地类型以及气候因子等因素对所有草地生态系统演化均存在显著的综合影响。

(4) 通过 LGDI 分析发现,当指数在 4—5 时,即轻度放牧 16—20 年、中度放牧 8—10 年、重度放牧 4—5 年内可能导致草地类型发生退化,超过此阈值可能会加速生态系统的退化,特别是在高强度放牧的前后 5 年,这是草地生态保护和修复的关键时期。因此,建议将 LGDI 4—5 作为参考阈值,科学划定放牧强度阈值,合理控制放牧年限和强度,以防止草地进一步退化。

基于上述发现,草地生态管理中亟需综合考量草地类型和放牧强度对生态参数的影响机制,制定适应性强的科学恢复对策,为有效治理草地退化提供科学依据。

参考文献 (References):

- [1] 张成霞, 南志标. 放牧对草地土壤理化特性影响的研究进展. 草业学报, 2010, 19(4): 204-211.
- [2] Dong S K, Sherman R. Enhancing the resilience of coupled human and natural systems of alpine rangelands on the Qinghai-Tibetan Plateau. The Rangeland Journal, 2015, 37(1): i.
- [3] 袁沫汐, 文佐时, 何利杰, 李鑫鑫, 赵林. 中国温带草地物候对气候变化的响应及其对总初级生产力的贡献. 生态学报, 2024, 44(1): 354-376.

- [4] 姜亚东, 刘鑫, 郑颖, 郭威星, 赵天启. 内蒙古草地资源退化现状及生态修复探索. 草原与草业, 2023, 35(1): 57-61.
- [5] 习近平在参加内蒙古代表团审议时强调 完整准确全面贯彻新发展理念铸牢中华民族共同体意识. 内蒙古宣传思想工作, 2021(2): 12-13.
- [6] 超宝, 赵媛媛, 武海岩, 李媛, 苏宁. 2000—2020 年蒙古高原生态系统服务及其对气候因子的响应. 干旱区地理, 2024, 47(9): 1577-1586.
- [7] Wang L, Delgado-Baquerizo M, Wang D L, Isbell F, Liu J, Feng C, Liu J S, Zhong Z W, Zhu H, Yuan X, Chang Q, Liu C. Diversifying livestock promotes multidiversity and multifunctionality in managed grasslands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(13): 6187-6192.
- [8] 马梅, 张圣微, 魏宝成. 锡林郭勒草原近 30 年草地退化的变化特征及其驱动因素分析. 中国草地学报, 2017, 39(4): 86-93.
- [9] 詹天宇, 孙建, 张振超, 刘某承. 基于 meta 分析的放牧压力对内蒙古高原草地生态系统的影响. 中国生态农业学报: 中英文, 2020, 28(12): 1847-1858.
- [10] Xu H W, You C M, Tan B, Xu L, Liu Y, Wang M G, Xu Z F, Sardans J, Peñuelas J. Effects of livestock grazing on the relationships between soil microbial community and soil carbon in grassland ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2023, 881: 163416.
- [11] 贾涛涛, 廖李容, 王杰, 刘国彬, 张超. 基于 Meta 分析的放牧对黄土高原草地生态系统的影响. 草地学报, 2022, 30(10): 2772-2781.
- [12] 张扬建, 朱军涛, 沈若楠, 王荔. 放牧对草地生态系统影响的研究进展. 植物生态学报, 2020, 44(5): 553-564.
- [13] 韩国栋, 焦树英, 毕力格图, 敖登高娃. 短花针茅草原不同载畜率对植物多样性和草地生产力的影响. 生态学报, 2007, 27(1): 182-188.
- [14] 陈佐忠, 汪诗平, 王艳芬. 内蒙古典型草原生态系统定位研究最新进展. 植物学通报, 2003, 20(4): 423-429.
- [15] Xiong D P, Shi P L, Zhang X Z, Zou C B. Effects of grazing exclusion on carbon sequestration and plant diversity in grasslands of China—a meta-analysis. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 647-655.
- [16] Yao Z Y, Shi L N, He Y C, Peng C J, Lin Z R, Hu M G, Yin N, Xu H K, Zhang D G, Shao X Q. Grazing intensity, duration, and grassland type determine the relationship between soil microbial diversity and ecosystem multifunctionality in Chinese grasslands: a meta-analysis. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110801.
- [17] Hao X H, Yang J J, Dong S K, Shen H, He F C, Zhi Y L, Kwaku E A, Tu D J, Dou S Y, Zhou X L, Yang Z R. Impacts of short-term grazing intensity on the plant diversity and ecosystem function of alpine steppe on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Plants*, 2022, 11(14): 1889.
- [18] Ren H Y, Eviner V T, Gui W Y, Wilson G W T, Cobb A B, Yang G W, Zhang Y J, Hu S J, Bai Y F. Livestock grazing regulates ecosystem multifunctionality in semi-arid grassland. *Functional Ecology*, 2018, 32(12): 2790-2800.
- [19] Ma Q Q, Chai L R, Hou F J, Chang S H, Ma Y S, Tsunekawa A, Cheng Y X. Quantifying grazing intensity using remote sensing in alpine meadows on Qinghai-Tibetan Plateau. *Sustainability*, 2019, 11(2): 417.
- [20] 王梦佳, 孙睿, 刘喆, 辛晓平, 刘刚, 张蕾, 乔晨. 基于遥感数据的呼伦贝尔草原放牧强度研究. 草业学报, 2017, 26(6): 28-36.
- [21] Qu T B, Du W C, Yuan X, Yang Z M, Liu D B, Wang D L, Yu L J. Impacts of grazing intensity and plant community composition on soil bacterial community diversity in a steppe grassland. *PLoS One*, 2016, 11(7): e0159680.
- [22] Van Syoc E, Albeke S E, Scasta J D, van Diepen L T A. Quantifying the immediate response of the soil microbial community to different grazing intensities on irrigated pastures. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 326: 107805.
- [23] 张振煜, 汤镇霖, 张朝晖, 张绪良. 基于 CiteSpace 的国家湿地公园研究文献计量学分析. 生态学报, 2023, 43(22): 9555-9563.
- [24] Shi L N, Lin Z R, Tang S M, Peng C J, Yao Z Y, Xiao Q, Zhou H K, Liu K S, Shao X Q. Interactive effects of warming and managements on carbon fluxes in grasslands: a global meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 340: 108178.
- [25] Reynaud A, Lanza D. A global meta-analysis of the value of ecosystem services provided by lakes. *Ecological Economics*, 2017, 137: 184-194.
- [26] Yang X, Zang J Y, Feng J L, Shen Y. High grazing intensity suppress soil microorganisms in grasslands in China: a meta-analysis. *Applied Soil Ecology*, 2022, 177: 104502.
- [27] Ren Y J, Lü Y H, Fu B J, Zhang K. Biodiversity and ecosystem functional enhancement by forest restoration: a meta-analysis in China. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(7): 2062-2073.
- [28] 曾纯静. 基于 Meta-analysis 研究黄土高原植被恢复对土壤生态化学计量特征的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [29] He N P, Han X G, Yu G R, Chen Q S. Divergent changes in plant community composition under 3-decade grazing exclusion in continental steppe. *PLoS One*, 2011, 6(11): e26506.
- [30] 王举凤, 何亮, 陆绍娟, 吕渡, 黄涛, 曹琦, 张晓萍, 刘宝元. 内蒙古不同类型草原光合植被覆盖度对降水变化的响应. 生态学报, 2020, 40(16): 5620-5629.
- [31] 徐林芳, 米媛婷, 柳兰洲, 温璐, 李永宏, 许继飞. 内蒙古不同类型草原土壤真菌群落结构及其影响因子的研究. 草地学报, 2023, 31(7): 1977-1987.
- [32] 巩杰, 王玉川, 谢余初, 赵彩霞. 基于 Meta-analysis 的中国干旱半干旱区土地利用变化的土壤碳氮效应研究. 安徽农业科学, 2011, 39

- (14): 8408-8411, 8419.
- [33] 张宇, 侯路路, 闫瑞瑞, 辛晓平. 放牧强度对草甸草原植物群落特征及营养品质的影响. 中国农业科学, 2020, 53(13): 2550-2561.
- [34] 王晓光, 乌云娜, 霍光伟, 宋彦涛, 张凤杰. 放牧对呼伦贝尔典型草原植物生物量分配及土壤养分含量的影响. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1230-1236.
- [35] 宋晓辉, 王悦骅, 王古文, 闫宝龙, 韩国栋, 王忠武. 不同放牧强度对短花针茅荒漠草原地上生物量和枯落物量的影响. 草原与草业, 2019, 31(2): 52-58.
- [36] Yu R P, Zhang W P, Fornara D, Li L. Contrasting responses of nitrogen: phosphorus stoichiometry in plants and soils under grazing: a global meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 2024, 58(5): 964-975.
- [37] 王悦骅, 靳宇曦, 王忠武, 韩国栋. 8 年围封对内蒙古荒漠草原植物和土壤的影响. 草地学报, 2021, 29(10): 2339-2345.
- [38] 李娜娜, 杨九艳, 贾喆亭, 闫瑞玲, 陈琪. 不同放牧方式对阿拉善左旗主要草场类型群落特征和土壤养分的影响. 草地学报, 2021, 29(5): 991-1003.
- [39] Gong X M, Wang Y J, Zhan T Y, Wang C X, Li C J, Liu Y X. Advances in meta-analysis of the effects of grazing on grassland ecosystems in China. *Agriculture*, 2023, 13(5): 1084.
- [40] 杜志勇, 丛楠. 植被与土壤特征对青藏高原不同程度退化草地的响应. 生态学报, 2024, 44(6): 2504-2516.
- [41] 刘玉祯, 赵新全, 董全民, 刘文亭, 杨晓霞, 俞旻, 张春平, 曹铨. 放牧对草地生态系统结构与功能影响的研究进展. 草地学报, 2023, 31(8): 2253-2262.
- [42] Greenwood K L, McKenzie B M. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2001, 41(8): 1231.
- [43] Teague W R. Forages and pastures symposium: cover crops in livestock production: whole-system approach: managing grazing to restore soil health and farm livelihoods. *Journal of Animal Science*, 2018, 96(4): 1519-1530.
- [44] 任强, 艾鹭, 胡健, 田黎明, 陈仕勇, 泽让东科. 不同强度牦牛放牧对青藏高原高寒草地土壤和植物生物量的影响. 生态学报, 2021, 41(17): 6862-6870.
- [45] 王向涛, 张世虎, 陈懂懂, 谈嫣蓉, 孙大帅, 杜国祯. 不同放牧强度下高寒草甸植被特征和土壤养分变化研究. 草地学报, 2010, 18(4): 510-516.
- [46] 杨阳, 韩国栋, 李元恒, 陈志芳, 王成杰. 内蒙古不同草原类型土壤呼吸对放牧强度及水热因子的响应. 草业学报, 2012, 21(6): 8-14.
- [47] 王梓晗, 侯东杰, 王忠武, 吕世杰, 王海明, 韩国栋, 王恬, 范博. 载畜率对短花针茅荒漠草原灌木及其邻近土壤养分含量的影响. 生态学报, 2024, 44(10): 4263-4276.
- [48] 陈涛, 武会会, 耿润哲. 放牧对中国天然草地土壤有机碳含量影响的 Meta 分析. 草地学报, 2024, 32(12): 3924-3931.
- [49] 阳辉, 廉诗启, 曹建生, 侯翔龙. 退化草原草场修复和恢复理论与技术研究进展. 生态科学, 2024, 43(05): 207-215.
- [50] 秦金萍, 刘颖, 马玉寿, 王彦龙, 李世雄. 返青期休牧对退化高寒草地植被特征及优势种光合生理的影响. 草地学报, 2021, 29(05): 1034-1042.
- [51] 周梦雪, 梁继业, 李郭, 杨赵平, 柴春强. 乌恰县退牧还草工程对草地植被恢复贡献评估. 中国草地学报, 2025, 47(01): 13-26.
- [52] 朱士华, 方霞, 杭鑫, 谢小萍, 孙良宵, 曹良中. 中亚草地植被指数 (NDVI) 对气候变化及人类活动的响应. 中国沙漠, 2022, 42(4): 229-241.
- [53] 李佳秀, 张青松, 杜子银. 减畜对草地植被生长和土壤特性的影响研究进展. 草地学报, 2022, 30(9): 2280-2290.