

DOI: 10.20103/j.stxb.202207011879

侯东杰, 韩蓓蕾, 阿格尔, 韩胜男, 王忠武. 围封对不同退化程度荒漠草原植物群落和土壤的影响. 生态学报, 2023, 43(17): 7226-7236.

Hou D J, Han B L, A Geer, Han S N, Wang Z W. Effects of fencing on plant community and soil properties of temperate desert steppe along the different degradations. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(17): 7226-7236.

围封对不同退化程度荒漠草原植物群落和土壤的影响

侯东杰, 韩蓓蕾, 阿格尔, 韩胜男, 王忠武*

内蒙古农业大学, 草原与资源环境学院, 呼和浩特 010019

摘要: 围封是退化草原生态系统恢复的有效措施之一, 已在中国北方草原地区实施多年并取得良好的效果。由于不同退化草原生态系统具有完全不同的植被和土壤条件, 围封对不同退化草原植物群落和土壤的恢复是否具有一致的影响, 目前仍不清楚。对内蒙古地区轻度、中度和重度退化荒漠草原分别设置 6 年围封后, 对植物群落特征和土壤理化性质进行了调查和测定。研究发现, 围封显著提高了 3 种退化荒漠草原短花针茅 (*Stipa breviflora*) 和无芒隐子草 (*Cleistogenes songorica*) 种群以及群落的高度、盖度和地上生物量 ($P < 0.05$), 表明围封从多组织层次使退化草原植物群落得到有效的恢复。围封总体提高了轻度和中度退化荒漠草原植物多样性, 但降低重度退化荒漠草原的植物多样性。重度退化荒漠草原在围封后群落高度、盖度和地上生物量恢复效率显著高于轻度和中度退化的 ($P < 0.05$), 表明围封对重度退化荒漠草原植被恢复更加有效。除轻度退化外, 围封显著降低中度和重度退化荒漠草原土壤全碳、全氮、全磷、有效氮和速效磷含量 ($P < 0.05$), 但对 3 种退化荒漠草原的土壤水分含量无显著影响, 表明围封对不同退化荒漠草原土壤的影响具有滞后性。研究为荒漠草原围封成效评估提供理论指导和退化荒漠草原生态系统科学合理实施围封政策提供科学依据。

关键词: 荒漠草原; 围封; 土壤养分; 植物多样性

Effects of fencing on plant community and soil properties of temperate desert steppe along the different degradations

HOU Dongjie, HAN Beilei, A Geer, HAN Shengnan, WANG Zhongwu*

College of Grassland, Resource and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China

Abstract: Fencing is one of the effective techniques to restore degraded steppes, which has been applied in the steppes of north China for many years. Due to different vegetation and soil conditions in lightly, moderately, and heavily degraded steppes, it is still unclear whether fencing has a consistent effect on plant community and soil properties of the steppes along the different degradations. We conducted a six-year fencing experiment in lightly, moderately, and heavily degraded desert steppes in the Inner Mongolia, China and measured the plant community and soil properties in the growing season of 2021. The results showed that fencing significantly increased height, cover, and aboveground biomass at population (i.e., *Stipa breviflora* and *Cleistogenes songorica*) and community levels ($P < 0.05$), which drove the vegetation restoration of degraded desert steppe from multiple organization levels. Fencing generally increased plant diversity of the lightly and moderately degraded desert steppes but decreased that in the heavily degraded desert steppe. The recovering efficiency of community height, cover, and aboveground biomass in the heavily degraded desert steppe was significantly higher than those in the lightly and moderately degraded desert steppes ($P < 0.05$), indicating that fencing had more effective for vegetation restoration in the heavily degraded desert steppe. Moreover, except for the lightly degraded desert steppe, fencing

基金项目: 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划 (NJYT23086); 内蒙古重大科技专项 (2021ZD0044-03, ZDZX2018020); 内蒙古自治区科技成果转化项目 (2020CG0013)

收稿日期: 2022-07-01; 网络出版日期: 2023-04-28

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

significantly decreased soil total carbon, total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen, and available phosphorus concentrations of moderately and heavily degraded desert steppes ($P < 0.05$), but had no remarkable effect on soil moisture along the three degraded desert steppes. This result showed that fencing had lag effects on soil physical and chemical properties compared with plant community. Our study provides theoretical guidance for evaluating the effects of fencing on desert steppe and scientific basis for implementing fencing policies accurately in the degraded desert steppe ecosystems.

Key Words: desert steppe; fencing; soil nutrient; plant diversity

草原生态系统是重要的陆地生态系统之一,对保持水土、促进畜牧业发展和发展生态旅游等方面具有至关重要的作用^[1]。放牧是草原生态系统重要的管理措施,深刻影响生态系统结构与功能^[2]。有研究表明适度的放牧使草原生态系统物质流动和养分循环处于相对稳定状态^[3]。随着家畜数量的迅速增长以及全球气候变化的影响,过度放牧成为驱动草原生态系统退化的主导因素,并引起草原植物群落和土壤发生不同程度的退化^[2]。例如,过度放牧显著降低植物群落高度、盖度、地上生物量和物种多样性^[4-6],同时增加土壤容重并降低养分含量^[7]。植物群落特征和土壤性质的退化不仅降低了草原生态系统的服务与功能,同时还严重威胁区域生态安全。

自 2000 年以来,草原生态系统退化的问题逐渐得到政府和学者的关注,一系列修复措施逐步在退化草原中实验和实施,例如补播、划破草皮、施肥和围封等^[8]。围封作为一种常用的退化草原生态系统修复措施,具有高效率、低成本和易实施等优点^[9-10]。有研究表明退化草原围封后植物群落高度、盖度、地上生物量以及植物多样性显著提高^[11-12],同时土壤温度、容重、pH 显著降低,土壤含水量则显著提高^[13],土壤全碳、全氮、全磷、速效氮和速效磷等养分含量也有明显提高^[9,14]。植物群落数量特征的提高以及土壤通气性和透水性等理化性质的改善表明围封使得退化草原生态系统得到了有效的恢复。也有部分研究表明围封将对草原生态系统的恢复产生消极效应。例如,有研究指出草原生态系统围封后土壤养分含量无显著变化^[15]。还有研究表明退化草原生态系统围封后植物群落将发生“二次逆行演替”,主要表现为群落盖度、地上生物量以及物种多样性再次降低^[16-17]。这些不一致的研究结果意味着围封对退化草原植物群落以及土壤理化性质特征的影响仍具有争议性和不确定性。植被类型和围封年限的差异被认为是引起这种不确定性的主导因子。此外,草原生态系统经历不同强度放牧后,植物群落和土壤将处于完全不同的退化程度。例如,轻度退化草原植物群落和土壤需要较短的时间恢复,长期围封对其生态系统结构与功能产生消极效应。中度和重度退化草原植被和土壤的恢复则需要较长的时间,长期围封则对其植物群落和土壤产生积极效应。因此,草原生态系统的退化程度也是决定生态系统围封成效的关键因素,然而在当前研究中却常常被忽视。

区域大范围围封是早期退化草原修复治理过程中主要采用的方式^[18],部分区域长期围封也会引起草原资源的闲置与浪费,甚至影响植被更新和区域生物多样性^[19-21]。随着新时期草原可持续管理理念的提出,科学与优化围封政策是当前草原管理中急需解决的问题,也在当前研究中相对欠缺。针对不同退化程度草原精准实施围封政策也是科学合理进行草原管理的基础和未来草原可持续发展的工作重点。揭示围封对不同退化草原植物群落和土壤特征的影响是解决以上问题的关键。

内蒙古荒漠草原面积约为 $1.12 \times 10^5 \text{ km}^2$,是内蒙古中西部地区主要的草原类型,位于典型草原向荒漠的过渡带,也是中国北方地区的“生态脆弱带”^[22]。荒漠草原是内蒙古地区畜牧业重要的生产基地,长期的过度放牧已经引发内蒙古荒漠草原生态系统产生不同程度的退化^[23]。荒漠草原年际温差大、干旱、多风和降水波动大等自然特征严重影响大多数退化草原修复措施的实施,使得围封成为该地区少数可行的退化草原修复措施。如何进一步高效、精准实施围封政策也是目前内蒙古荒漠草原管理中面临的重要难题。因此,本研究以围封后的轻度、中度和重度荒漠草原为研究对象,探究围封对不同退化程度荒漠草原植物群落和土壤的影响,以为退化草原生态系统的科学合理恢复提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本实验依托于内蒙古农业大学野外实验平台(41°27'17"N, 111°53'46"E)。实验平台位于内蒙古乌兰察布市四子王旗境内,该地区气候类型为典型温带大陆性季风气候,全年多风,冬季寒冷干燥,夏季炎热干燥,雨热同期。研究区年均温 3.4℃,年均降水 280 mm 且集中在生长季(6—9月)内,土壤类型为淡棕钙土。该地区植被类型为温带荒漠草原,群落物种组成简单,生产力水平低。群落建群种为短花针茅(*Stipa breviflora*),其它物种主要包括:无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)和木地肤(*Kochia prostrata*)等。短花针茅和无芒隐子草对维持本地区荒漠草原群落结构与功能具有重要作用^[24]。

1.2 实验设计

2004 年在地形和植被条件一致的地带采用随机区组的方法设置 9 个放牧小区,每个放牧小区的面积为 4.4 hm²。实验处理依照当地实际放牧强度设置放牧强度,分别包括轻度放牧(0.91 羊单位 hm⁻²半年⁻¹),中度放牧(1.82 羊单位 hm⁻²半年⁻¹)和重度放牧(2.71 羊单位 hm⁻²半年⁻¹),各区组间彼此独立。放牧家畜选择为体重相似的 2 岁蒙古羯羊。放牧时间为每年 6 月初至 10 月末的每天 7 时到 18 时,其余时间将放牧家畜安置在圈舍内。经过 12 年的放牧处理,3 种放牧小区分别处于轻度退化(LD)、中度退化(MD)和重度退化(HD)^[24]。2016 年生长季开始前分别在各小区中心处选择 1 块 30 m × 30 m 的地段并使用网围栏进行围封处理,各实验小区内的围封区域在随后的时间内无任何干扰。到 2021 年为止,各实验小区围封区域共围封 6 年,植被和土壤得到了一定的恢复。

1.3 样品采集与测定

2021 年 8 月中旬(生长季高峰)对各实验小区和围封区域进行群落特征调查和土壤样品采集。以各放牧小区中围封区域的 4 条围栏中点为参照点,随后在围栏内外分别距离 5 m 的位置设置 1 个 1 m × 1 m 的样方(4 个样方/小区 × 3 个小区/处理 = 12 个样方/处理),以避免围栏的边缘效应。首先记录群落物种组成并对每个物种随机选择 3 株测量自然高度,随后使用耙子收集样方内枯落物并装入信封袋内,最后使用齐地面刈割法分物种计数和收获地上部分并装入信封袋内带回实验室。将植物样品和枯落物置于 65℃ 的烘箱内烘至恒重,随后称量其干重。

待植物群落特征调查完成后,使用直径 3 cm 的土钻对各实验小区中的每个样方中心处采集 0—10 cm 的土壤,随后混合均匀,装入自封袋带回实验室用于测定土壤养分。在各小区中的每个样方内靠近样方中心处使用体积为 100 cm³的土壤容重钻采集土壤样品并装入已称质量的铝盒中带回实验室,随后立即称量铝盒重量,再放置于 105℃ 的烘箱内烘干铝盒至恒重,最后测量铝盒重量,分别测量土壤含水量和土壤容重。

将用于测定土壤养分样品中的根系和砾石去除后,放置在阴凉通风的位置风干,取其中一部分通过 2 mm 的分样筛,另一部分则通过 0.15 mm 的分样筛。使用元素分析仪(vario EL III CHNOS Elemental Analyzer, Elementar Analysensysteme GmbH)测定土壤全碳和全氮含量;土壤样品消解后使用电感耦合等离子体发射光谱仪(iCAP 6300 ICP-OES Spectrometer, Thermo Scientific)测定土壤全磷含量;使用紫外分光光度计(UV-2550, UV-Visible Spectrophotometer, Shimadzu)和碱解扩散法分别测定土壤速效磷和有效氮含量。

1.4 数据分析

不同实验处理下群落植物多样性使用以下公式进行计算^[25]:

$$\text{Shannon-Wiener 指数} \quad H = - \sum (P_i \times \ln P_i)$$

$$\text{Simpson 指数} \quad D = 1 - \sum (P_i \times P_i)$$

$$\text{Margalef 丰富度指数} \quad M = (S-1)/\ln N$$

$$\text{Pielou 均匀度指数} \quad J = H/\ln S$$

式中, S 为某处理下所有样方的物种总数。 P_i 为某处理下物种*i*的重要值, $P_i = (\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对地上生物量})/3$,其中相对高度为物种*i*的高度与某处理下所有物种的高度总和的比值;相对盖度为物种*i*的盖度与某处理下所有物种的盖度总和的比值;相对地上生物量为物种*i*的地上生物量与某处理下所有物种的地上生物量总和的比值。 N 为物种*i*所在各处理的所有物种的个体总数。

不同实验处理下土壤含水量和土壤容重使用以下公式进行计算:

$$\text{土壤含水量} = \frac{W_T - W_D}{W_D - W} \times 100\%$$

$$\text{土壤容重} = \frac{W_D - W}{100}$$

式中, W_T 表示装入土壤样品后的铝盒质量, W_D 表示铝盒烘干后的质量, W 表示空铝盒的质量。

使用植被恢复效率评价围封对不同退化荒漠草原植物群落恢复的效果,利用以下公式计算^[26]:

$$\text{植被恢复效率} = \frac{F_i - D_i}{D_i} \times 100\%$$

式中, F_i 表示围封后植物群落某数量特征, D_i 表示某退化程度下该植物群落数量特征。

对数据的正态性以及方差齐性检验后,使用配对样本 T 检验分析不同退化程度荒漠草原与其对应围封处理间种群和群落的高度、盖度、密度和地上生物量以及土壤理化性质间的差异。使用单因素方差分析比较围封对不同退化荒漠草原植被恢复效率间的差异,方差齐性时多重比较选择最小显著性差异(LSD)法,方差非齐性时选择 Duncan 法。数据使用平均值 ± 标准误表示。数据分析在 IBM SPSS 24.0 进行,图表绘制在 SigmaPlot 13.0 中进行。

2 结果

2.1 不同退化荒漠草原群落主要物种对围封的响应

不同退化荒漠草原短花针茅种群数量特征对围封具有积极响应。围封显著提高轻度、中度和重度退化荒漠草原下短花针茅的高度、盖度和地上生物量(图 1; $P < 0.05$)。除轻度退化外,中度和重度退化下短花针茅密度在围封后无显著变化。此外,与轻度退化相比,中度和重度退化下短花针茅数量特征对围封具有更敏感的响应。例如,轻度退化短花针茅围封后种群高度和地上生物量分别提高了 14.0% 和 21.3%,重度退化短花针茅围封后种群高度和地上生物量分别提高了 403.6% 和 1435.7%。

与短花针茅种群相比,不同退化荒漠草原下无芒隐子草种群数量特征对围封具有相对微弱的响应。围封显著提高轻度、中度和重度退化下无芒隐子草的种群高度(图 2; $P < 0.05$)。例如,围封提高了轻度退化无芒隐子草种群高度 35.9%,但提高重度退化无芒隐子草种群高度高达 458.3%。围封显著提高轻度和中度退化下无芒隐子草种群盖度,但对重度退化下无芒隐子草盖度无显著影响。围封显著降低无芒隐子草种群密度,但显著提高其地上生物量(图 2; $P < 0.05$)。例如,重度退化下无芒隐子草围封后地上生物量提高了 151.0%。

2.2 不同退化荒漠草原植物群落数量特征对围封的响应

不同退化荒漠草原在围封后植物群落得到了有效的恢复。群落高度、盖度和地上生物量对围封具有更敏感的反应。围封显著提高轻度、中度和重度退化草原植物群落高度、盖度和地上生物量(图 3; $P < 0.05$)。例如,围封显著提高 3 种退化草原群落高度和地上生物量分别高达 38.1%—462.9% 和 37.1%—631.9%。除中度退化外,围封显著提高轻度和重度退化草原群落密度。除轻度退化外,枯落物在中度和重度退化草原围封地表处显著累积,在重度退化草原中尤为明显(图 3; $P < 0.05$)。

围封提高了轻度和中度退化荒漠草原群落 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数,但降低了重度退化荒漠草原群落的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数(表 1)。围封提高了轻度和中度退化荒漠草原群落的 Margalef 丰富度指数,但对重度退化荒漠草原的无影响(表 1)。围封降低了轻度和重度退化荒漠草原群落

Pielou 均匀度指数,但提高了中度退化荒漠草原群落 Pielou 均匀度指数(表 1)。

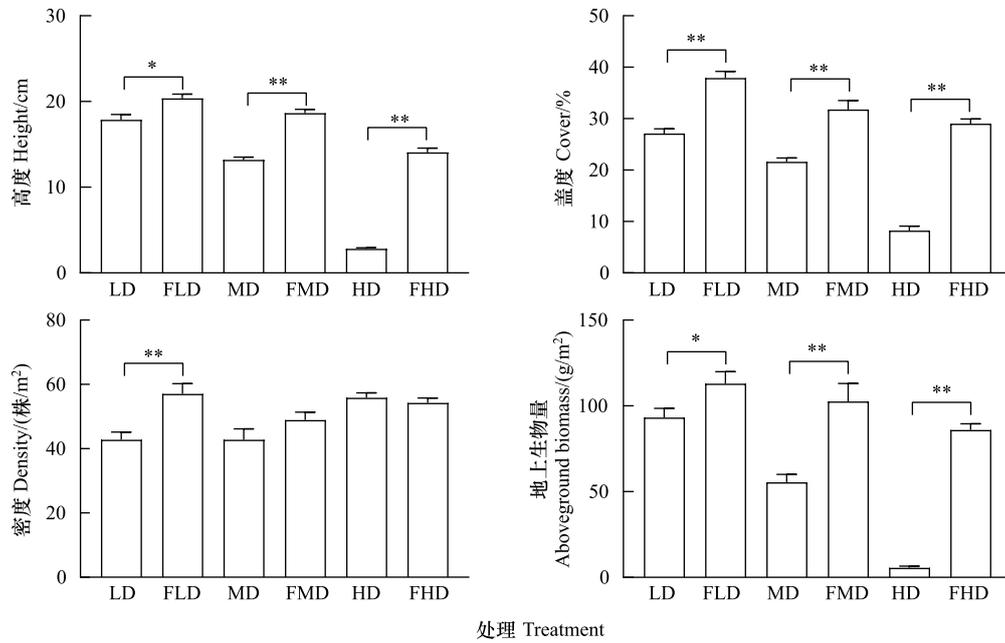


图 1 围封对不同退化程度荒漠草原短花针茅数量特征的影响

Fig.1 Effects of fencing on quantitative characteristics of *Stipa breviflora* in different degraded desert steppes

* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上两种处理间存在显著差异;LD:轻度退化;FLD:轻度退化围封;MD:中度退化;FMD:中度退化围封;HD:重度退化;FHD:重度退化围封

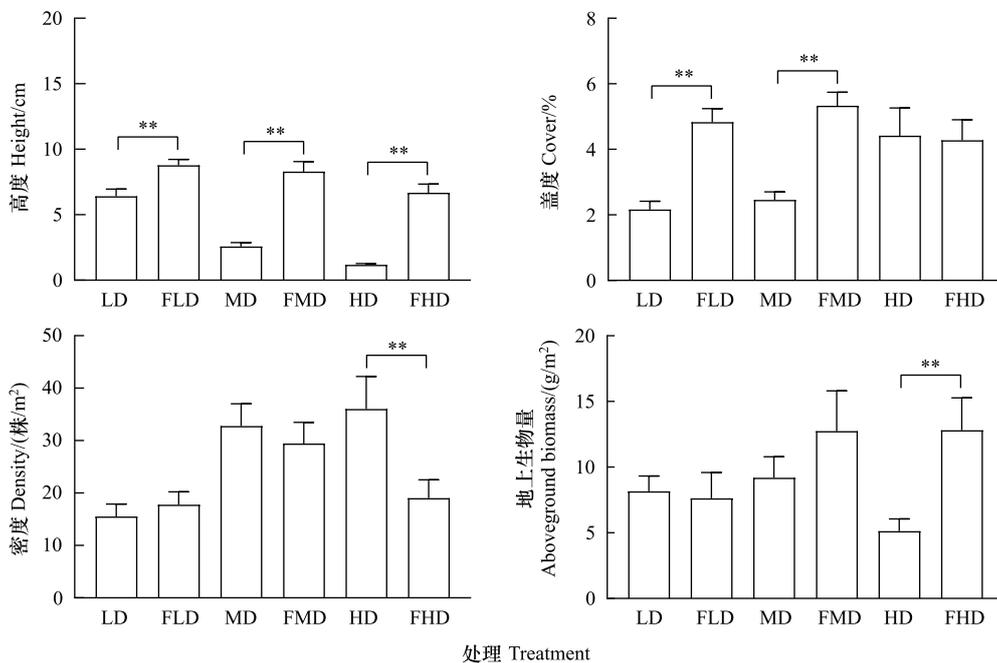


图 2 围封对不同退化荒漠草原无芒隐子草数量特征的影响

Fig.2 Effects of fencing on quantitative characteristics of *Cleistogenes songorica* in different degraded desert steppes

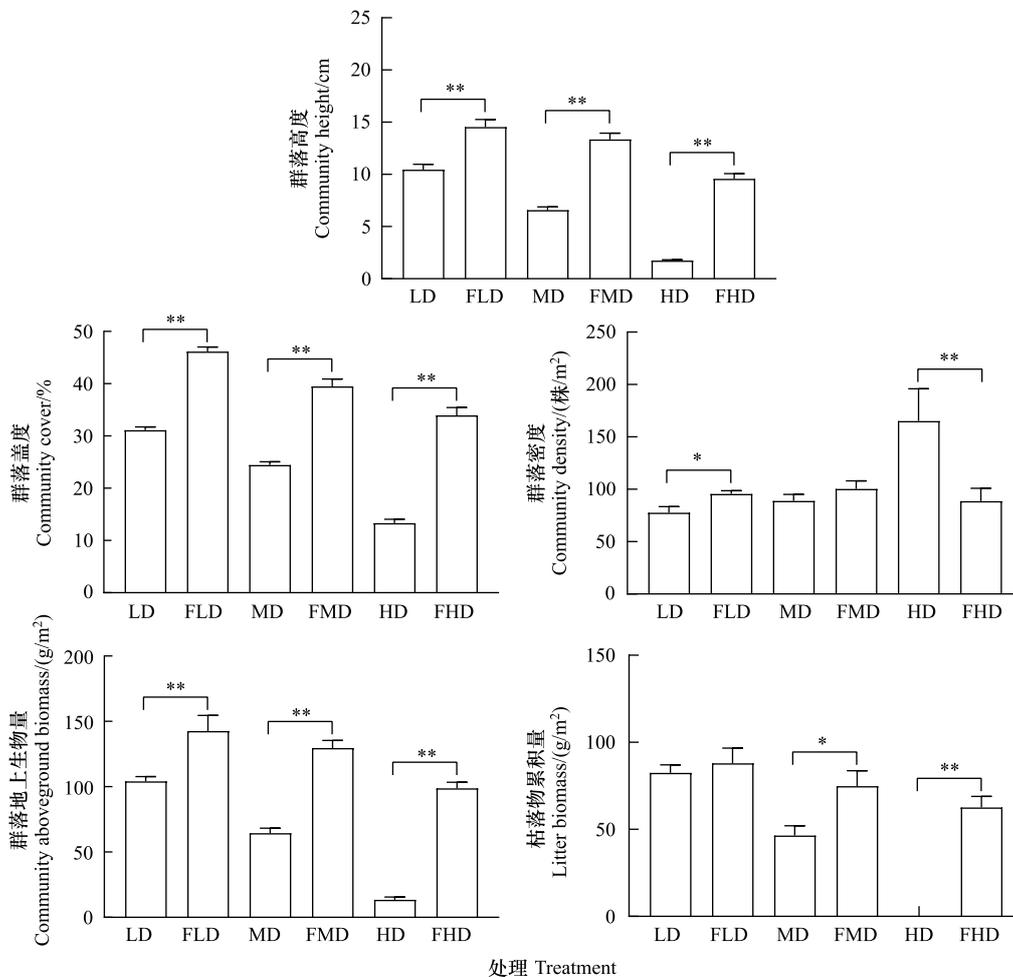


图3 围封对不同退化荒漠草原群落特征的影响

Fig.3 Effects of fencing on community characteristics in different degraded desert steppes

表1 围封对不同退化荒漠草原群落植物多样性的影响

Table 1 Effects of fencing on plant diversity in different degraded desert steppes

多样性指数 Plant diversity index	轻度退化 LD	轻度退化围封 FLD	中度退化 MD	中度退化围封 FMD	重度退化 HD	重度退化围封 FHD
Shannon-Wiener 指数	1.62	1.48	1.37	1.88	1.76	1.46
Simpson 指数	0.63	0.72	0.57	0.73	0.76	0.61
Margalef 丰富度指数	3.42	3.73	2.80	3.73	2.8	2.80
Pielou 均匀度指数	0.65	0.58	0.60	0.73	0.77	0.63

LD:轻度退化 Light degradation; FLD:轻度退化围封 Light degradation after fencing; MD:中度退化 Moderate degradation; FMD:中度退化围封 Moderate degradation after fencing; HD:重度退化 Heavy degradation; FHD:重度退化围封 Heavy degradation after fencing

2.3 围封对不同退化荒漠草原植物群落恢复的评价

围封对不同退化荒漠草原植物群落恢复具有相同的影响。除密度外,围封对3种退化荒漠草原植物群落高度、盖度和地上生物量的恢复均产生积极效应,其中对重度退化的植物群落恢复效率显著高于对轻度和中度退化的(图4; $P < 0.05$)。与轻度退化荒漠草原相比,围封对重度退化荒漠草原群落密度的恢复产生消极效应($P < 0.05$)。

2.4 不同退化荒漠草原土壤理化性质对围封的响应

围封对不同退化荒漠草原土壤物理性质具有微弱的影响。围封显著降低重度退化荒漠草原土壤容重

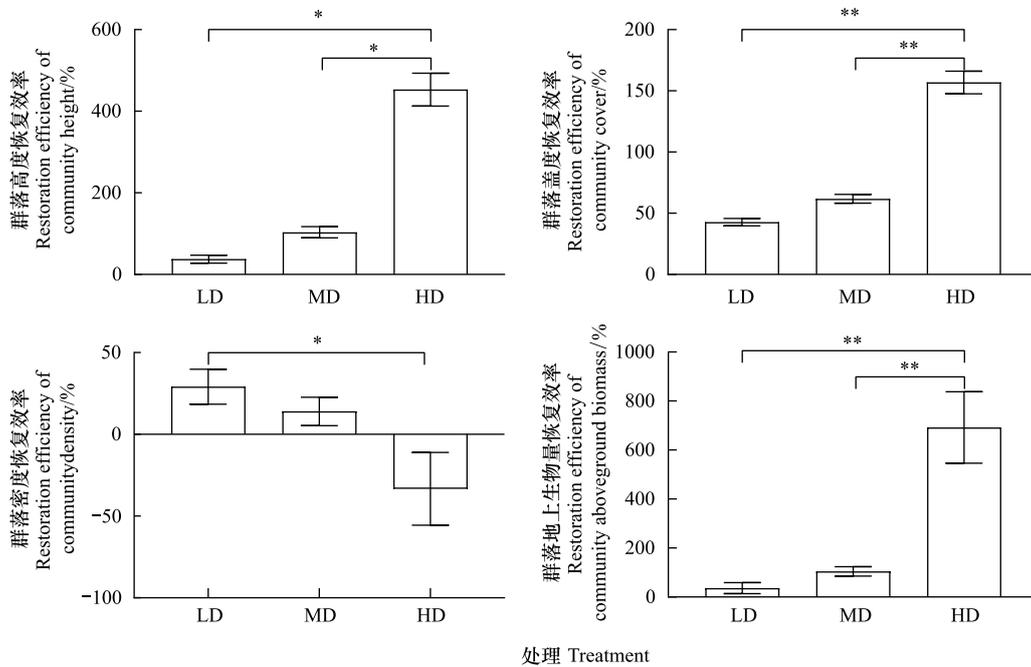


图4 不同退化程度荒漠草原植物群落恢复效率特征

Fig.4 Restoration efficiency of plant community in different degraded desert steppes

($P < 0.05$),但对轻度和中度退化荒漠草原土壤容重无显著影响(图5)。围封对3种不同退化荒漠草原土壤表层水分均无显著影响(图5)。

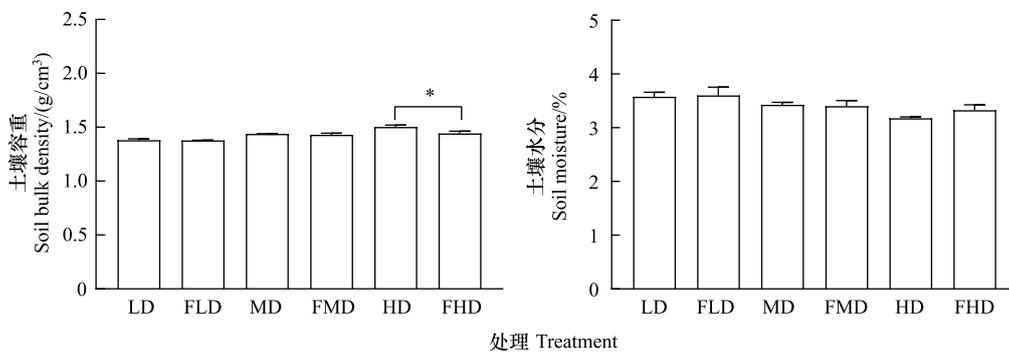


图5 围封对不同退化荒漠草原土壤物理性质的影响

Fig.5 Effects of fencing on soil physical properties in different degraded desert steppes

不同退化荒漠草原土壤养分对围封具有敏感的反应。除重度退化荒漠草原的土壤全碳含量和轻度退化下的土壤全氮含量外,围封显著降低中度和重度荒漠草原土壤全碳、全氮和全磷含量(图6; $P < 0.05$)。轻度退化荒漠草原土壤全碳、全氮和全磷含量对围封无一致的响应规律。与土壤全量养分相比,3种不同退化荒漠草原土壤速效养分对围封具有更敏感的反应。放牧显著降低中度和重度荒漠草原土壤速效磷和有效氮含量(图6; $P < 0.05$)。围封显著提高轻度退化荒漠草原土壤速效磷含量($P < 0.05$),但对其土壤有效氮含量无显著影响。

3 讨论

3.1 围封对不同退化荒漠草原植物群落的影响

围封作为一种简单有效的退化草原修复措施,主要通过草原生态系统的自我更新能力,逐渐使植物种群

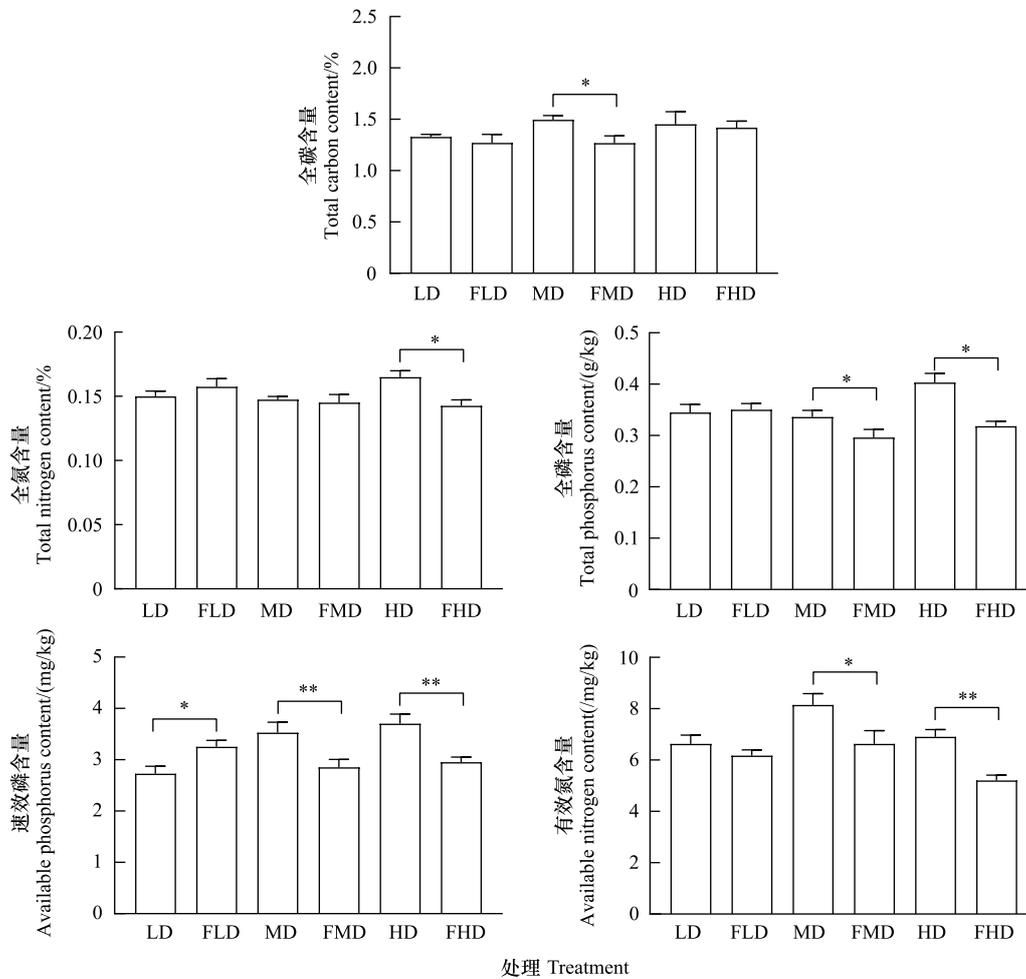


图 6 围封对不同退化荒漠草原土壤化学性质的影响

Fig.6 Effects of fencing on soil chemical properties in different degraded desert steppes

和群落得到恢复^[27]。围封后不同退化荒漠草原中短花针茅和无芒隐子草的高度、盖度和地上生物量显著提高(图 1 和 2), 与前人的研究结果相似^[24,28]。围封的实施主要消除了外界的人为干扰, 如放牧和刈割等, 减少了植物个体受到的损伤; 另一方面围封也提高了草原生态系统的自我更新能力, 使群落中的植物种群快速恢复, 最终引起群落优势物种种群数量特征的显著提高^[29]。然而, 本研究发现不同退化荒漠草原中短花针茅和无芒隐子草种群对围封却具有不一致的敏感性。与无芒隐子草相比, 围封对不同退化荒漠草原中短花针茅的数量特征(除密度外)具有更有效的恢复(图 1), 表明这两种植物种群虽然在放牧影响下的生长和繁殖均受到抑制作用, 但短花针茅具有更强的恢复能力和具有更强的适应性, 同时还表明短花针茅具有更高的适口性, 是该地区家畜喜食的牧草之一。这也从植物种群的角度揭示了退化荒漠草原恢复演替过程中植物种群数量的变化特征。

围封后退化荒漠草原植物种群数量特征的提高, 进一步影响植物群落数量特征。本研究发现围封后不同退化荒漠草原的数量特征以及枯落物累积量显著提高, 表明围封对不同退化程度荒漠草原生态系统的恢复具有积极效应, 前人的研究结果一致^[30-31]。轻度和中度退化荒漠草原围封后群落物种丰富度和均匀度整体升高(除轻度退化围封后的 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数外), 但重度退化荒漠草原群落的物种丰富度和均匀度则是降低, 表明围封对不同退化荒漠草原植物多样性具有不一致的影响^[31]。荒漠草原重度退化后群落中包含刺藜 (*Chenopodium aristatum*)、猪毛菜 (*Salsola collina*)、地锦 (*Euphorbia humifusa*) 和藜 (*C. album*) 等大量一年生先锋植物, 虽然提高了植物多样性, 但群落的结构与功能却处于不稳定状态。围封

后退化荒漠草原生态系统逐渐趋向正向演替,由于植物种间的竞争,这些先锋植物物种逐步从群落中消退,进而引起群落物种丰富度和均匀度的降低。这表明在荒漠草原中植物多样性的降低并非代表植物群落退化,也有可能是植物群落处于恢复的早期阶段。此外,重度退化荒漠草原围封后群落物种丰富度指数和均匀度指数也低于轻度和中度退化荒漠草原围封后的,表明随着围封时间的延长,重度退化荒漠草原中物种多样性将逐渐提高。群落伴生种的增加是引起这种生态过程的主导因素,同时这还表明退化草原生态系统围封后的群落稳定性逐步增强。本研究中值得注意的是,与轻度退化和中度退化相比,围封显著提高重度退化荒漠草原群落高度、盖度和地上生物量,其中地上生物量具有更敏感的反应(图4),表明围封对重度退化荒漠草原的植被恢复更加有效。这种效应也可能是围封对植物群落具有初步效应,即在围封初期植物群落具有更快的恢复速率,随着围封时间的延长,植被的恢复能力逐渐降低。荒漠草原年际间较大的降水波动、贫瘠的土壤养分和简单但具有生态适应强的物种组成,综合使其对外界干扰具有较强的抵抗力和恢复力^[22]。部分荒漠草原植物生存策略为机会主义者,在短暂的降水过程中快速吸收养分完成生活史。这也是引起重度退化荒漠草原在短期围封后植物群落快速恢复的主导因素。典型草原生态系统具有相对优越的自然环境、复杂的物种组成,哪种退化程度的生态系统植物群落在围封后恢复会更加有效?这也值得在未来通过设置平行实验进行深入探究。

3.2 围封对不同退化荒漠草原土壤的影响

土壤理化性质是评价草原生态系统结构与功能稳定的指标之一,围封对土壤理化性质也将产生直接或间接的影响^[32]。与土壤化学性质相比,不同退化荒漠草原的土壤物理性质对围封具有惰性响应。重度退化荒漠草原围封后土壤容重显著降低,轻度和中度退化的则无显著变化,表明土壤容重对适度的干扰具有一定抵抗性,支持了前人的研究结果^[24]。值得注意的是,不同退化荒漠草原围封后土壤水分无显著变化,与典型草原上的研究结果不同^[13]。典型草原围封后枯落物累积引起土壤水分显著升高,进而驱动群落微环境改变。这主要是由于枯落物通过物理遮挡作用,减少了土壤水分蒸发和降低了土壤温度^[33]。不同退化荒漠草原围封后地表枯落物虽然有部分累积,但其累积量($< 87.90 \text{ g/m}^2$)远远低于典型草原围封后的($300\text{—}400 \text{ g/m}^2$)^[13]。因此其对土壤水分的改善具有微弱的作用。此外,荒漠草原强烈的太阳辐射、稀少的降水和多风的天气也加剧了土壤水分的蒸发。这些原因共同导致不同退化荒漠草原围封后土壤水分无显著改善。

与土壤物理性质不同,土壤养分对围封具有敏感的反应。本研究中轻度退化荒漠草原围封后土壤养分含量无显著变化,中度和重度退化荒漠草原围封后土壤养分含量总体显著降低(除重度和中度退化荒漠草原围封后土壤全碳和全氮含量外),表明围封对不同退化荒漠草原土壤养分动态具有不一致的影响。有研究表明退化典型草原围封后土壤养分显著增加,与本研究结果相反^[30,34-35]。典型草原较高的地上生产力和相对充沛的降水为土壤微生物的活动提供了充足的底物和反应条件,有利于土壤养分循环,进而促进土壤养分累积,引起土壤养分累积^[34,36]。在荒漠草原中,相对较低的地上生产力和干旱的气候条件不利于土壤微生物活动和土壤养分循环过程,同时退化荒漠草原围封后在植物群落快速恢复的过程中将消耗大量的养分,其中在中度和重度下格外明显。这些因素导致了中度和重度退化荒漠草原围封后土壤养分含量降低。此外,本研究中不同退化草原围封后土壤速效养分含量对围封具有敏感性,表明土壤速效养分可以作为重要评价指标应用于未来草原围封成效评价中。

3.3 依据草原退化程度合理实施围封政策

退化草原围封成效评价是当前草原可持续管理中的研究热点,也是进一步科学制定围封政策的重要基础。综合比较不同退化荒漠草原围封后植物群落和土壤理化性质的变化特征,发现与轻度和中度退化相比,围封更适用于重度退化荒漠草原植被恢复。对于轻度和中度退化草原来说,围封政策的实施应该以短期为主,且在围封过程中可做适当的利用并要避免长期围封,进而造成草原资源的闲置与浪费^[31]。对于重度退化草原来说,应实施相对较长时间的围封且避免在恢复过程中利用草原资源。与此同时,也需要依照植被恢复状况对围封政策进行调整。本研究所得到的这些结果也为进一步科学精确制定围封政策提供了理论基础。

此外,群落高度、盖度和地上生物量对围封具有快速且敏感响应^[34]。因此,这些指标可作为衡量退化草原围封成效的主要指标。在未来草原监测与管理中可重点对这些生态指标进行观测。前人研究表明典型草原围封后土壤水分的提高作为驱动植物群落结构与功能改变的主导因素^[13]。本研究还发现与典型草原不同,退化荒漠草原围封后植物群落结构与功能虽然也发生改变,但土壤水分的提高并非是驱动围封荒漠草原生态系统服务与功能改变的因素。这些研究结果的差异也表明围封驱动不同草原生态系统结构与功能改变的内在机制是不同的,揭示其主导因素也可能是未来草原生态学研究的重点,也为草原生态系统的可持续管理提供理论基础。

4 结论

围封是简单有效的退化草原治理措施,也在退化荒漠草原植被恢复中取得了良好的成效。围封通过提高退化荒漠草原种群和群落的高度、盖度和地上生物量,使草原生态系统植被得到快速恢复,这些数量特征也是衡量围封草原植被恢复成效的有效指标。围封虽然降低重度退化荒漠草原植物多样性,但也是退化生态系统恢复演替初期的正常表现。围封后植被快速恢复消耗大量土壤养分,引起中度和重度退化荒漠草原土壤养分含量显著降低。通过植物群落数量特征和土壤养分含量的变化综合判断,围封对重度退化荒漠草原生态系统恢复更加有效。本研究可为荒漠草原进一步合理精准制定围封政策提供科学指导。

参考文献(References):

- [1] 方精云, 耿晓庆, 赵霞, 沈海花, 胡会峰. 我国草地面积有多大? 科学通报, 2018, 63(17): 1731-1739.
- [2] 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.
- [3] He M, Zhou G Y, Yuan T F, Groenigen K J, Shao J J, Zhou X H. Grazing intensity significantly changes the C: N: P stoichiometry in grassland ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(2): 355-369.
- [4] Osem Y, Perevolotsky A, Kigel J. Grazing effect on diversity of annual plant communities in a semi-arid rangeland: interactions with small-scale spatial and temporal variation in primary productivity. *Journal of Ecology*, 2002, 90(6): 936-946.
- [5] Han G D, Hao X Y, Zhao M L, Wang M J, Ellert B H, Willms W, Wang M J. Effect of grazing intensity on carbon and nitrogen in soil and vegetation in a meadow steppe in Inner Mongolia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 125(1/2/3/4): 21-32.
- [6] Wan H W, Bai Y F, Hooper D U, Schönbach P, Gierus M, Schiborra A, Taube F. Selective grazing and seasonal precipitation play key roles in shaping plant community structure of semi-arid grasslands. *Landscape Ecology*, 2015, 30(9): 1767-1782.
- [7] 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.
- [8] 潘庆民, 薛建国, 陶金, 徐明月, 张文浩. 中国北方草原退化现状与恢复技术. 科学通报, 2018, 63(17): 1642-1650.
- [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 X, Ma Z W, Huang X T, Li L H. How does grazing exclusion influence plant productivity and community structure in alpine grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau? *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01066.
- [11] Ghorbani A, Dadjou F, Moameri M, Fekri A, Andalibi L, Biswas A, Mohammadi Moghadam S, Sharifi J. Effect of grazing exclusion on soil and vegetation characteristics in desert steppe rangelands: a case study from north-western Iran. *Arid Land Research and Management*, 2021, 35(2): 213-229.
- [12] 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.
- [13] Hou D J, He W M, Liu C C, Qiao X G, Guo K. Litter accumulation alters the abiotic environment and drives community successional changes in two fenced grasslands in Inner Mongolia. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(16): 9214-9224.
- [14] Li W, Liu Y Z, Wang J L, Shi S L, Cao W X. Six years of grazing exclusion is the optimum duration in the alpine meadow-steppe of the north-eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 2018, 8: 17269.
- [15] Yuan Z Q, Jiang X J. Vegetation and soil covariation, not grazing exclusion, control soil organic carbon and nitrogen in density fractions of alpine meadows in a Tibetan permafrost region. *CATENA*, 2021, 196: 104832.
- [16] 单贵莲, 薛世明, 陈功, 匡崇义, 刘钟龄, 初晓辉. 季节性围封对内蒙古典型草原植被恢复的影响. 草地学报, 2012, 20(5): 812-818.

- [17] Yao X X, Wu J P, Gong X Y, Lang X, Wang C L, Song S Z, Anum A A. Effects of long term fencing on biomass, coverage, density, biodiversity and nutritional values of vegetation community in an alpine meadow of the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Engineering*, 2019, 130: 80-93.
- [18] Jing Z, Cheng J, Chen A. Assessment of vegetative ecological characteristics and the succession process during three decades of grazing exclusion in a continental steppe grassland. *Ecological Engineering*, 2013, 57: 162-169.
- [19] Sun J, Liang E Y, Barrio I C, Chen J, Wang J N, Fu B J. Fences undermine biodiversity targets. *Science*, 2021, 374(6565): 269.
- [20] 黄国柱, 席亚丽, 赵传燕, 刘瑞雪, 杨建红, 李娜, 李伟斌. 围封对祁连山亚高山草地群落结构与生物量的影响. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2020, 56(6): 718-723.
- [21] 赵凌平, 谭世图, 白欣, 王占彬. 封育年限对云雾山典型草原植物繁殖与植被更新的影响. *草业学报*, 2017, 26(10): 1-9.
- [22] 赛胜宝. 内蒙古北部荒漠草原带的严重荒漠化及其治理. *干旱区资源与环境*, 2001, 15(4): 34-39.
- [23] Zhu G Y, Deng L, Zhang X B, Shanguan Z P. Effects of grazing exclusion on plant community and soil physicochemical properties in a desert steppe on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 372-381.
- [24] 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.
- [25] Gao Y, An Y, Qi B, L, Liu J, Yu H, Zhu Wang. Grazing exclusion mediates the trade-off between plant diversity and productivity in *Leymus chinensis* meadows along a chronosequence on the Songnen Plain, China. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107655.
- [26] Liu M, Zhang Z, Sun J, Li Y, Liu Y, Berihun M L, Xu M, Tsunekawa A, Chen Y. Restoration efficiency of short-term grazing exclusion is the highest at the stage shifting from light to moderate degradation at Zoige, Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106323.
- [27] Sun J, Liu M, Fu B J, Kemp D, Zhao W W, Liu G H, Han G D, Wilkes A, Lu X Y, Chen Y C, Cheng G W, Zhou T C, Hou G, Zhan T Y, Peng F, Shang H, Xu M, Shi P L, He Y T, Li M, Wang J N, Tsunekawa A, Zhou H K, Liu Y, Li Y R, Liu S L. Reconsidering the efficiency of grazing exclusion using fences on the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 2020, 65(16): 1405-1414.
- [28] 聂莹莹, 徐丽君, 辛晓平, 陈宝瑞, 张保辉. 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.
- [29] 闫玉春, 唐海萍, 辛晓平, 王旭. 围封对草地的影响研究进展. *生态学报*, 2009, 29(9): 5039-5046.
- [30] Bi X, Li B, Fu Q, Fan Y, Ma L X, Yang Z H, Nan B, Dai X H, Zhang X S. Effects of grazing exclusion on the grassland ecosystems of mountain meadows and temperate typical steppe in a mountain-basin system in Central Asia's arid regions, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 254-263.
- [31] 徐粒, 高琼, 王亚林. 围封6年对温带典型草原坡地物种多样性及其与地上生物量的关系的影响. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 398-405.
- [32] Du C J, Gao Y H. Grazing exclusion alters ecological stoichiometry of plant and soil in degraded alpine grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 308: 107256.
- [33] 侯东杰, 乔鲜果, 高趁光, 赵海卫, 赵利清, 郭柯. 内蒙古典型草原枯落物的生态水文效应. *草地学报*, 2018, 26(3): 559-565.
- [34] Cheng J M, Jing G H, Wei L, Jing Z B. Long-term grazing exclusion effects on vegetation characteristics, soil properties and bacterial communities in the semi-arid grasslands of China. *Ecological Engineering*, 2016, 97: 170-178.
- [35] Zeng Q C, Liu Y, Xiao L, Huang Y M. How fencing affects the soil quality and plant biomass in the grassland of the loess plateau. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(10): 1117.
- [36] Zeng Q C, An S S, Liu Y. Soil bacterial community response to vegetation succession after fencing in the grassland of China. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 2-10.