不同恢复措施在冀北坝上退化草场的应用效应

王淮亮[1], 刘凤婵[2], 邢晓光[1], 刘 斌[1], 李江华[3]
(1.河北省水资源研究与水利技术试验推广中心, 河北 石家庄 050061;
2.保定市水土保持试验站, 河北 保定 071052; 3.保定市城区水系管理服务中心, 河北 保定 071066)

摘 要: [目的]综合评价不同恢复治理措施在退化草场的应用效益,明确冀北坝上地区天然退化草场治理技术和应用条件,为坝上地区草场生态治理提供技术和应用经验,助力生态环境和乡村振兴协同发展。[方法]2022—2024年,选择沽源县白土窑乡新华村和九连城镇绿园村为试验样地,以围场、丰宁、张北、康保、尚义县5处自然草地为对照,设置切根+围封、施肥+围封、种草+围封、围封4种处理措施,分析不同措施的样地群落特征、地表特征、产草量及适口性等指标。[结果]①2 a年内,种草+围封可显著提高退化草地质量,且退化典型草原的效果优于退化草甸草原。应用种草+围封处理,退化典型草原和退化草甸草原年产草量干重分别增加54.25%和48.18%,适口性牧草干重年增长量分别为2.10%和1.20%;②退化典型草原施肥+围封和退化草甸草原施肥+围封处理的植被覆盖度分别增加1.20%和1.60%,地表裸露占比分别减少0.60%和0.80%;③切根+围封措施在一定程度上可提升植物群落多样性,但效果因地而异;④围封措施效果最差,但优于对照样地。[结论]相比自然恢复,人为干预短期内可显著改善植物群落特征和生产力,但对植物群落多样性的影响总体不显著。对于冀北坝上轻度退化典型草原,有生产需求的推荐恢复措施顺序为:围封+种草、围封+施肥、围封+切根;无生产需求的草地宜采用围封。对于有旅游价值需求的退化草甸草原,宜采取施肥+围封,可改善群落特征,提升景观效果。

关键词: 坝上地区; 退化草地; 恢复技术; 植物群落多样性; 地上生物量

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2025)06-0067-10 **中图分类号:** S812.8

文献参数: 王淮亮, 刘凤婵, 邢晓光, 等.不同恢复措施在冀北坝上退化草场的应用效应[J].水土保持通报, 2025, 45(6): 67-76. Wang Huailiang, Liu Fengchan, Xing Xiaoguang, et al. Application effects of different restoration measures on degraded grasslands in Bashang area of northern Hebei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 67-76.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.002 **CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.002**

Application effects of different restoration measures on degraded grasslands in Bashang area of northern Hebei Province

Wang Huailiang[1], Liu Fengchan[2], Xing Xiaoguang[1], Liu Bin[1], Li Jianghua[3]
(1.*Water Resources Research and Water Conservancy Technology Test and Extension Center of Hebei*, *Shijiazhuang*, *Hebei* 050061, *China*; 2.*Soil and Water Conservation Experimental Station of Baoding*, *Baoding*, *Hebei* 071052, *China*; 3.*Urban Water System Management Service Center of Baoding*, *Baoding*, *Hebei* 071066, *China*)

Abstract: [Objective] The application benefits of different restoration and management measures in degraded grasslands were comprehensively evaluated, and the technical and application conditions for the management of natural degraded grasslands in the Bashang area of northern Hebei Province were analyzed, in order to provide technical and application experience for the ecological management of grasslands in the Bashang area, and to support the coordinated development of the ecological environment and rural revitalization. [Methods] From 2022 to 2024, experimental plots were established in Xinhua village in Baituyao Township and Lvyuan Village in Jiuliancheng Town, Guyuan County, with five natural grasslands located in Weichang, Fengning, Zhangbei, Kangbao, and Shangyi counties as control plots. Several intervention measures were implemented, including enclosure + root cutting, enclosure + fertilization, enclosure + grass planting, and enclosure only. Indicators

收稿日期:2025-05-27 **修回日期:**2025-07-18 **采用日期:**2025-07-18
资助项目:河北省科技厅乡村振兴技术创新专项"冀北坝上地区退化草场生态修复技术研究"(22327507D)
第一作者:王淮亮(1984—),男(汉族),河北省安国市人,博士,正高级工程师.主要从事水土保持研究工作。Email:759490711@qq.com。
通信作者:邢晓光(1977—),男(汉族),河北省无极县人,硕士,正高级工程师.主要从事水土保持研究工作。Email:403770318@qq.com。

such as community characteristics, surface characteristics, grass yield, and palatability of each plot were systematically investigated and analyzed. [Results] ① Within two years, the quality of degraded grasslands was significantly improved by enclosure + grass planting measures, with greater effectiveness observed in degraded typical grasslands compared to degraded meadow grasslands. The annual dry weight of grass yield increased by 54.25% and 48.18% in the degraded typical grasslands and degraded meadow grasslands under this treatment, respectively, while the annual dry weight of palatable forage grass increased by 2.10% and 1.20%, respectively. ② Enclosure + fertilization measures effectively increased vegetation coverage and reduced the proportion of bare ground, with vegetation coverage increasing by 1.20% and 1.60% annually, and bare ground decreasing by 0.60% and 0.80% annually in degraded typical grasslands and degraded meadow grasslands under this treatment. ③ Enclosure + root cutting measures could improve the plant community diversity to some extent, but the effectiveness varied by location. ④ Enclosure only was the least effective among the four measures, but still performed better than the control plots. [Conclusion] Compared with natural restoration, human intervention can significantly improve the plant community characteristics and productivity in the short term, but the overall impact on community species diversity is not significant. For the slightly degraded typical grasslands in the Bashang area of northern Hebei with production demands, the recommended order of restoration measures is enclosure + grass planting, enclosure + fertilization, and enclosure + root cutting. For grasslands without production demands, the measure of enclosure only is recommended. For degraded meadow grasslands with tourism value, the enclosure + fertilization measure is recommended to improve the community characteristics and enhance the landscape aesthetics.

Keywords: Bashang area; degraded grassland; restoration techniques; plant community diversity; above-ground biomass

冀北坝上地区有着丰富的天然草场资源,发挥了京津冀北部的重要生态屏障功能。根据《2020年河北省草原保护建设规划(2021—2025)》,坝上地区草原面积2.40×10^5 hm^2,占河北省草原面积70%以上,退化草原面积50%,沙化面积达25%,生态问题依然严重[1]。中国科学院内蒙古草原生态系统定位站研究指出,中国北方不围封草地地上平均生物量121 g/m^2,长期围封羊草地上平均生物量188 g/m^2,远没有恢复到应有的生产力水平[2]。草场退化机理机制及其高效恢复措施一直是科学界及管理者广泛关注的焦点问题。国内外对退化草场研究较多。退化草场的改良多采用封禁等自然恢复和改良土壤、人工播种、保障灌溉等人工干预等方法[3-6]。学者普遍认为封禁、人工干预可加快草地恢复,短期内快速改良草地优势群体,促进草地土壤、植被、微生物、动物生态环境良性循环[7-11],但因地域水热条件、下垫面性质、人为干扰强度等差异,所采用的技术体系及研究结论并不完全一致,且目前国内针对退化草地生态恢复及改良的试验研究多集中在青海、甘肃、内蒙古、新疆等省(区)的高寒地带,自然条件差异较大的冀北坝上地区草地退化机理研究较多,但恢复治理应用研究较少。

沽源县位于北方农牧交错带核心区域,全县草地面积8.47×10^4 hm^2,40%以上草地处于退化状态[1]。2016年河北沽源草地生态系统国家野外科学观测研究站在沽源县400 hm^{2}草地上分别推行了免耕补播、切根改良、压碱施肥等草地改良技术,效果显著,但以上改良措施并未在同一区域集中开展对比试验,其适用条件和相应的应用效益仍需进一步明确。本研究以试验和应用为目的,结合坝上地区乡村振兴发展需求,对退化草场恢复治理展开集中试验研究。研究区设在沽源县西部,草地多为轻度退化状态,以半封轮牧利用方式为主。针对草原站推行的4种常规有效技术及组合,包括围封及其与不同干预组合等措施,连续观测草地群落及草地质量恢复情况,综合评价不同恢复治理措施在退化典型草原和退化草甸草原的应用效益,以期明确冀北坝上地区天然退化草地治理技术和应用条件,为坝上地区草场生态治理提供技术和应用经验,进一步助力生态环境和乡村振兴协同发展。

1 研究区概况

试验于2022—2024年在河北省张家口市沽源县西部九连城镇绿园村和沽源县中部白土窑乡新华村,两地相距45 km。该区地处内蒙古高原东南缘,多为天然退化草地,栗钙土为主,草地类型为轻度退化典型草原、草甸草原,优势种以克氏针茅(*Stipa capillata*)、糙隐子草(*Cleistogenes serotina*)、羊草(*Leymus chinensis*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、碱蓬(*Artemisia anethifolia*)等为主,植被盖度5%~80%。该地为半干旱大陆性季风气候,气温年较差和日较差

较大,7月均温20℃,11月均温−17℃,年平均气温2.1℃;年降水量406.0 mm,全县分布不均。年平均蒸发量1 772.6 mm;年平均日照时数2 716.1 h;常年主导风向为西北风,冬夏风向更替明显,年平均风速3.0 m/s,3—5月平均风速3.5 m/s,年均大风日数40 d。

2 研究方法

2.1 样地选择

Ⅰ号试验样地位于沽源县九连城镇绿园村草场(41°31′17″N,115°06′14″E,海拔高度1 536 m),面积130 hm²,年平均降水量350.0 mm,年平均气温2.1℃;Ⅱ号试验样地位于沽源县白土窑乡新华村草场(41°39′04″N,115°24′49″E,海拔1 450 m),面积400 hm²,年平均降水量400.0 mm,年平均气温3.7℃。两试验样地均为开放草场,植被盖度20%～30%,平均高度在10 cm以内。在试验样地内分别布设围封、切根+围封、施肥+围封、种草+围封4种处理。每个处理重复3处(表1)。

表1 样地编号及处理前植被群落特征

Table 1 Plot numbers and vegetation community characteristics before treatment

样地编号	样地	植被类型	优势植物种	平均高度/cm	平均盖度/%
$Ⅰ_1$	沽源绿园—围封	退化典型草原	糙隐子草、克氏针茅、羊草、灰绿藜	5^{d}	20^{c}
$Ⅰ_2$	沽源绿园—切根+围封			7^{cd}	20^{c}
$Ⅰ_3$	沽源绿园—施肥+围封			7^{cd}	20^{c}
$Ⅰ_4$	沽源绿园—种草+围封			8^{c}	20^{c}
$Ⅱ_1$	沽源新华—围封	退化草甸草原	羊草、糙隐子草、米蒿、委陵菜、蒲公英、二色补血草	6^{d}	22^{b}
$Ⅱ_2$	沽源新华—切根+围封			7^{cd}	22^{b}
$Ⅱ_3$	沽源新华—施肥+围封			9^{bc}	22^{b}
$Ⅱ_4$	沽源新华—种草+围封			7^{cd}	22^{b}
Ⅲ	围场御道口(对照)		碱蓬、委陵菜、刺藜、早熟禾	9^{bc}	22^{b}
Ⅳ	丰宁大滩(对照)		糙隐子草、委陵菜、寸草、冷蒿	6^{d}	26^{a}
Ⅴ	康宝秦家营(对照)	退化典型草原	克氏针茅、羊草、糙隐子草	13^{a}	23^{b}
Ⅵ	张北郝家营(对照)		克氏针茅、羊草、灰绿藜	10^{b}	22^{b}
Ⅶ	尚义大青沟(对照)		糙隐子草、羊草、米蒿、阿尔泰狗娃花	10^{b}	23^{b}

注:同列不同字母表示不同样地间在$p<0.01$水平上差异显著。下同。

另设围场御道口(42°08′47″N,116°54′15″E,海拔1 100 m)、丰宁大滩(41°38′44″N,115°59′42″E,海拔1 480 m)、康保秦家营(41°55′12″N,114°31′28″E,海拔1 450 m)、张北郝家营(41°17′15″N,114°43′02″E,海拔1 400 m)、尚义大青沟(41°18′03″N,114°06′09″E,海拔1 300 m)5地未处理草地作为对照,5处对照样地年平均降水量分别为429.0,423.0,350.0,330.0,380.0 mm,年平均气温分别为3.3,7.3,2.1,3.2,3.6℃。

2.2 试验设计

每个样地大小为20 m×30 m。Ⅰ号、Ⅱ号试验样地分别设种草+围封、切根+围封、施肥+围封、围封4种处理,围场御道口等5处对照样地未采取处理措施。Ⅰ号、Ⅱ号试验样地内部,分别对比4种治理措施在退化典型草原和退化草甸草原应用效应(包括不同处理间差异和同处理间年度差异)。

Ⅰ号试验样地与对照样地Ⅴ,Ⅵ,Ⅶ均为退化典型草原,Ⅱ号试验样地与对照样地Ⅲ,Ⅳ均为退化草甸草原,分别对比各项措施的适用条件和应用效果。试验样地与对照样地年度变化对比人为干预与自然恢复的草地性能差异。

2022年7月开始围封试验。经调查,Ⅰ号、Ⅱ号样地优势种根系主要分布在20 cm内,切根处理内设置20 cm深度切根,切沟间距30 cm,于4月上旬实施,切根器具为拖拉机+斜柄式破土切根刀,人工镇压;种草处理选种紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)、斜茎黄芪(*Astragalus adsurgens*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)等4种牧草,于4月上旬混播,混播比例按种子重1∶1∶1∶1,播种量50 kg/hm²;施肥处理采用草场地表施用复合肥料($N\text{-}P_2O_5\text{-}K_2O$,12-8-20),施肥量为187.5 kg/hm²,雨前施肥。围封采用预制桩+铁丝网形式,围栏高2 m,网目规格15 cm×15 cm,除实施各类措施外,常年关闭。

2.3 测定指标

每年7月下旬至8月上旬,采用样方调查方法,每个处理内按S型设5个重复样点,调查样方规格

为1 m×1 m。在同一样方内按先后顺序调查植物群落特征、地表裸露占比、地上生物量、适口性比例、枯落物、植物群落多样性。

(1) 植物群落特征。记录每个样方内的植物种名称、多度、盖度、最高株高、最小株高,灌木测量记录冠幅。

(2) 地表裸露占比。在样方正上方约1.5 m高处拍摄整个样方,内业采用网格法查算样方内除植被覆盖、枯落物覆盖之外的土石质地表的面积,计算面积占比(5个样方中随机调查3个)。

(3) 地上生物量。采用裁纸刀片刈割方式,收集地上植物全株,将羊草及豆科植物单独封装,称取鲜重,用自封袋带回实验室,在65 ℃下托盘烘干至恒重,称取干重。适口性比例为羊草及豆科植物等可食性牧草的干重占比。

(4) 枯落物。地上全株植物取样完成后,收集地表层枯落物(过筛1 mm孔径),用自封袋带回实验室,烘干后称量干重。

(5) 植物群落分析。多度、盖度、频度以及相对多度、相对频度和重要值的计算参照宝音陶格涛[12]、宋永昌[13]的方法,植物群落多样性指标为

①Simpson优势度指数:

$$D=1-\sum(P_i\times P_i) \quad (1)$$

②Shannon-Wiener多样性指数:

$$H=-\sum(P_i\times \ln P_i) \quad (2)$$

③Pielou均匀度指数:

$$J_{sw}=H/\ln S \quad (3)$$

④Alatalo均匀度指数:

$$E_a=(1/D-1)/[\exp(H-1)] \quad (4)$$

⑤Margalef丰富度指数:

$$M=(S-1)/\ln N \quad (5)$$

式中:P_i为某处理下物种i的重要值,P_i=(相对高度+相对盖度+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;S为某处理下所有样方的物种总数;N为物种i所在各处理的所有物种的个体总数。

2.4 数据处理

数据的录入、存储、预处理、图件制作采用Excel10,处理间的单因素方差分析(one-way ANOVA)采用SPSS 18完成。

3 结果与分析

3.1 不同草地恢复措施对草地植被群落特征、地表特征及年际变化的影响

植被群落特征测定结果表明,不同处理对植物生长的影响存在显著差异(表2)。围封2 a后,两试验样地的植被平均高度、植被覆盖度、枯落物量均显示施肥+围封处理(Ⅰ$_3$,Ⅱ$_3$)显著高于同试验样地的其他处理,植被平均高度分别增长3.9 cm和6.1 cm,植被盖度分别增长1.2%和1.6%,枯落物量分别增长29.0 g/m^{2}和30.4 g/m^2;其次是种草+围封处理(Ⅰ$_4$,Ⅱ$_4$)。围封处理(Ⅰ$_1$,Ⅱ$_1$)的3项植被群落特征指标均显著低于种草+围封和施肥+围封处理,年际变化均呈现负增长。对照的年际变化表现不一。两试验样地的地表裸露占比总体减少;不同处理在增加地表覆被作用上显著大于对照样地,试验样地地表裸露占比平均减少0.7%,对照样地平均减少0.2%。

总体上,不同处理的植被群落特征指标值年际变化及增长幅度显著优于对照,同时,在短期围封条件下,施肥较种草更能有效提高群落内植物高度、覆盖度及枯落物量,且在退化草甸草原的应用效果优于退化典型草原;种草较其他处理更能有效增加地被覆盖,减少地表水土流失;切根处理对于提升群落特征有一定的作用。4种处理措施中,围封处理对于提升植物群落特征值效果最差。

3.2 不同草地恢复技术对植物群落多样性及年际变化的影响

不同处理植物群落多样性个别指数存在差异(图1,图2)。2023年施肥+围封处理(Ⅰ$_3$,Ⅱ$_3$)多样性指数在各自试验样地4种处理中均表现最差。2024年各处理间无明显规律。两处试验样地与对照样地的植物群落多样性表现不一(图3,图4)。轻度退化典型草原、草甸草原和对照各项指标差异没有明显规律。围封2 a后试验样地不同处理的物种数量由9种增加到了10种,对照样地物种数量由15种减少到11种。表明短期内人工干预措施对于丰富草地植物群落多样性的作用总体不显著。

3.3 不同草地恢复措施对草地牧草生产性能及年际变化的影响

相比对照样地,试验样地的产草量增长显著(图5,图6)。试验样地内种草+围封处理(Ⅰ$_4$,Ⅱ$_4$)的产草量显著高于其他处理,2024年Ⅰ$_4$和Ⅱ$_4$处理的鲜重分别达到4 625.1 kg/hm^{2}和4 505.5 kg/hm^2,干重分别达到1 882.1 kg/hm^{2}和1 667.7 kg/hm^2。除切根+围封处理(Ⅱ$_2$)外,各处理2024年生物量较

2023年均有所增长，其中种草＋围封处理（Ⅰ$_4$，Ⅱ$_4$）年际增长量最为显著，Ⅰ$_4$和Ⅱ$_4$产草量干重增长幅度最大，分别达到54.25％和48.18％；围封和切根＋围封处理增长幅度较小。

表2　2023—2024年冀北坝上退化草场不同样地草地群落特征

Table 2　Grassland community characteristics in different plots in Bashang area of northern Hebei Province（2023—2024）

样地编号	植被平均高度/cm			植被覆盖度/％			枯落物量/(g·m^{-2})			地表裸露占比/％		
	2023年	2024年	变化	2023年	2024年	变化	2023年	2024年	变化	2023年	2024年	变化
Ⅰ$_1$	6.0^{e}	5.4^{f}	－0.6	24.8^{de}	24.7^{cd}	－0.1	26.1^{ef}	24.8^{e}	－1.3	29.7^{a}	28.7^{bc}	－1.0
Ⅰ$_2$	9.1^{d}	10.0^{de}	0.9	31.5^{b}	31.9^{b}	0.4	79.2^{b}	91.1^{b}	11.9	26.9^{e}	26.4^{d}	－0.5
Ⅰ$_3$	13.3^{b}	17.2^{b}	3.9	33.9^{a}	35.1^{a}	1.2	82.9^{a}	111.9^{a}	29.0	27.1^{e}	26.5^{d}	－0.6
Ⅰ$_4$	10.0^{cd}	12.0^{cd}	2.0	31.1^{b}	31.8^{b}	0.7	55.5^{d}	69.4^{c}	13.9	26.6^{f}	25.5^{e}	－1.1
Ⅱ$_1$	9.9^{cd}	8.4^{e}	－1.5	22.1^{f}	22.0^{e}	－0.1	17.3^{f}	15.6^{e}	－1.7	29.3^{a}	29.4^{a}	0.1
Ⅱ$_2$	7.5^{de}	9.0^{de}	1.5	24.3^{e}	24.5^{de}	0.2	20.2^{f}	25.3^{e}	5.1	28.9^{bc}	28.7^{b}	－0.2
Ⅱ$_3$	15.2^{a}	21.3^{a}	6.1	34.0^{a}	35.6^{a}	1.6	67.6^{c}	98.0^{a}	30.4	27.6^{d}	26.8^{d}	－0.8
Ⅱ$_4$	14.3^{ab}	18.6^{b}	4.3	29.7^{c}	30.5^{b}	0.8	33.5^{e}	45.2^{d}	11.7	26.7^{e}	25.3^{e}	－1.4
Ⅲ	9.8^{cd}	10.7^{de}	0.9	22.8^{e}	22.9^{de}	0.1	26.6^{ef}	30.3^{de}	3.7	29.2^{b}	29.1^{ab}	－0.1
Ⅳ	6.3^{e}	6.9^{f}	0.6	26.4^{d}	26.6^{c}	0.2	27.5^{ef}	31.6^{de}	4.1	28.3^{c}	28.0^{c}	－0.3
Ⅴ	14.3^{ab}	14.1^{c}	－0.2	23.1^{e}	23.2^{de}	0.1	22.2^{f}	23.1^{e}	0.9	29.1^{b}	29.0^{ab}	－0.1
Ⅵ	11.5^{c}	10.9^{d}	－0.6	22.9^{e}	23.1^{de}	0.2	19.0^{f}	19.5^{e}	0.5	28.9^{bc}	28.8^{ab}	－0.1
Ⅶ	7.3^{e}	8.7^{de}	1.4	24.9^{de}	25.1^{cd}	0.2	15.9^{f}	19.9^{e}	4.0	28.7^{c}	28.5^{bc}	－0.2

注：各样地编号的内容见表1。下同。

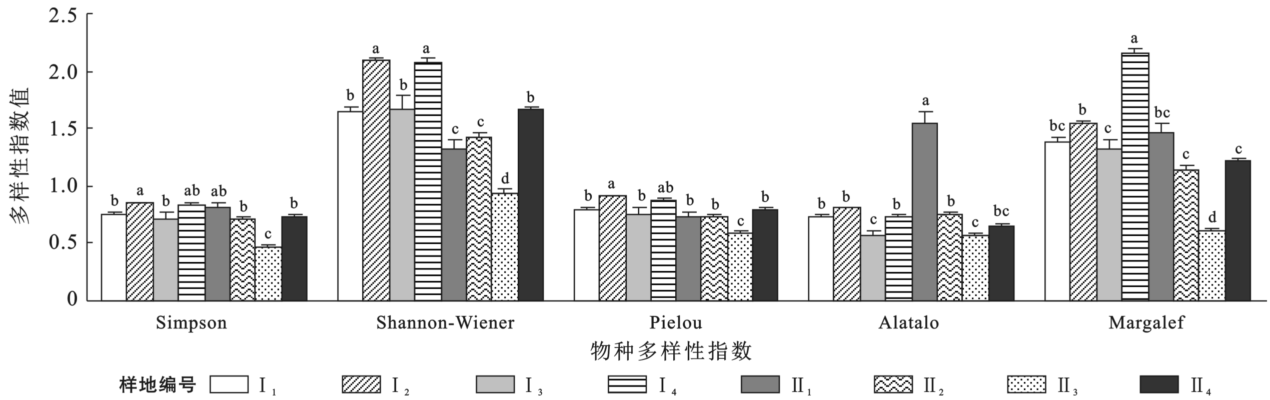

图1　2023年冀北坝上退化典型草原、退化草甸草原4种处理植物群落多样性

Fig.1　Plant community diversity under four treatments in degraded typical grasslands and degraded meadow grasslands in Bashang area of northern Hebei Province in 2023

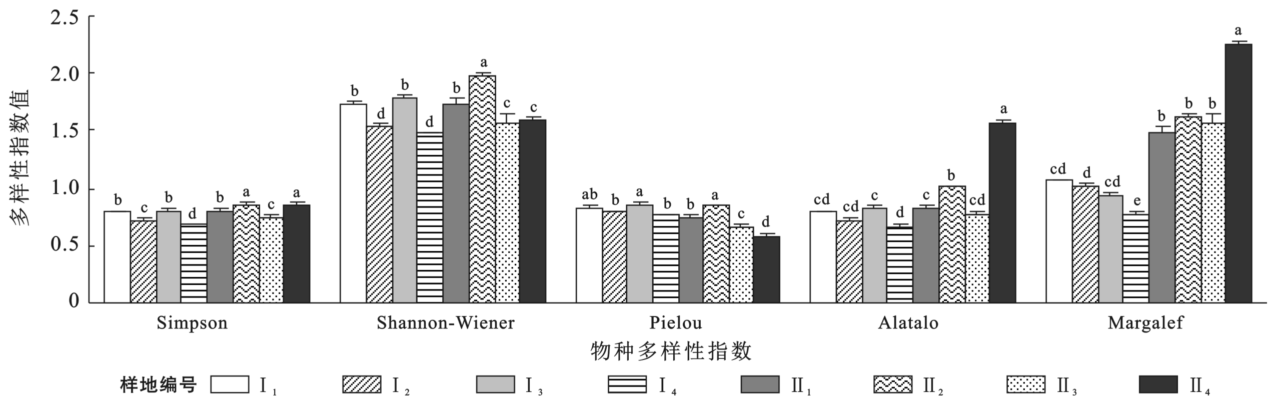

图2　2024年冀北坝上退化典型草原、退化草甸草原4种处理植物群落多样性

Fig.2　Plant community diversity under four treatments in degraded typical grasslands and degraded meadow grasslands in Bashang area of northern Hebei Province in 2024

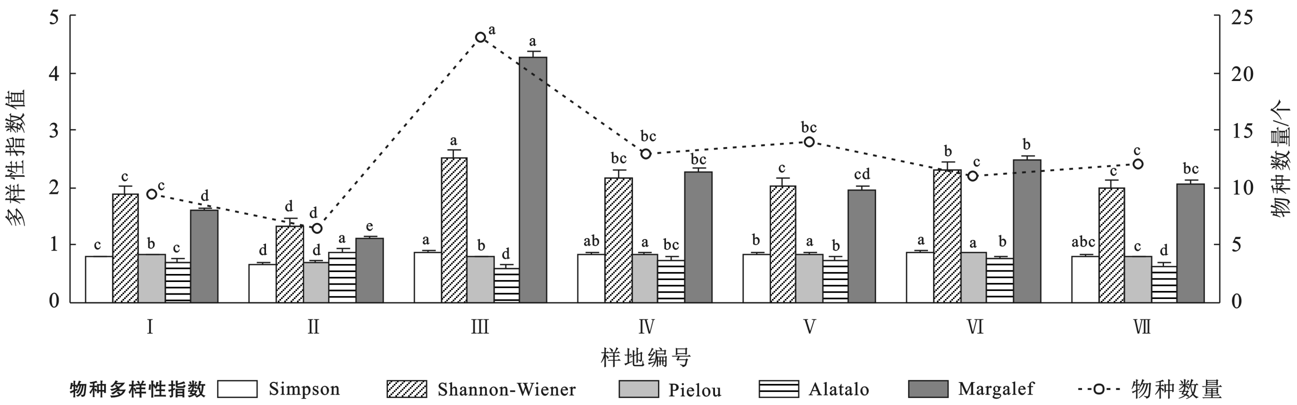

图3 2023年冀北坝上退化草场植物群落多样性

Fig.3 Plant community diversity of degraded grasslands in Bashang area of northern Hebei Province in 2023

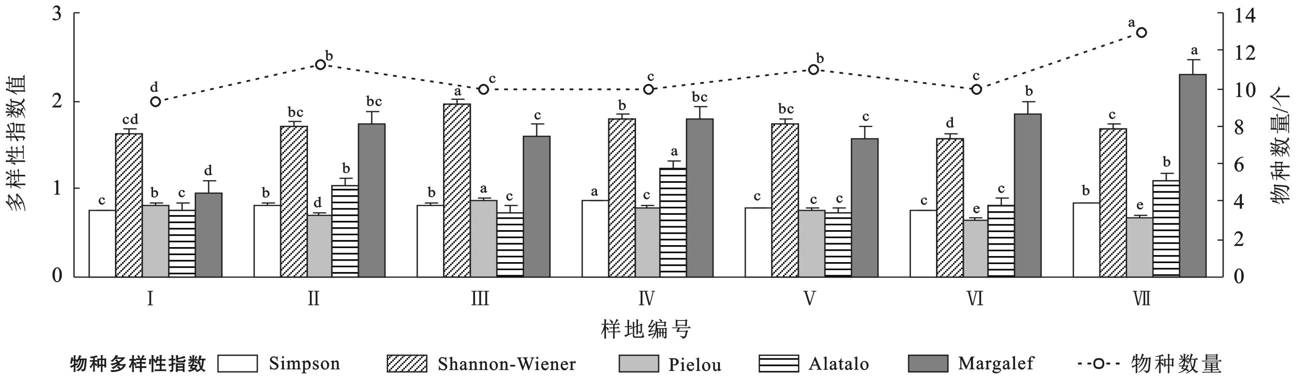

图4 2024年冀北坝上退化草场植物群落多样性

Fig.4 Plant community diversity of degraded grasslands in Bashang area of northern Hebei Province in 2024

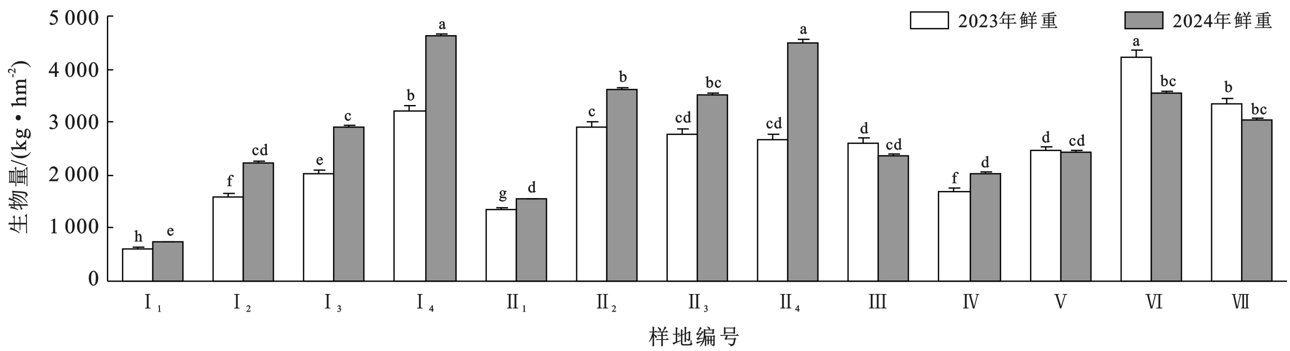

图5 2023及2024年冀北坝上退化草场不同处理及对照草地生产力(鲜重)

Fig.5 Grassland productivity under different treatments and controls (fresh weight) of degraded grasslands in Bashang area of northern Hebei Province of in 2023 and 2024

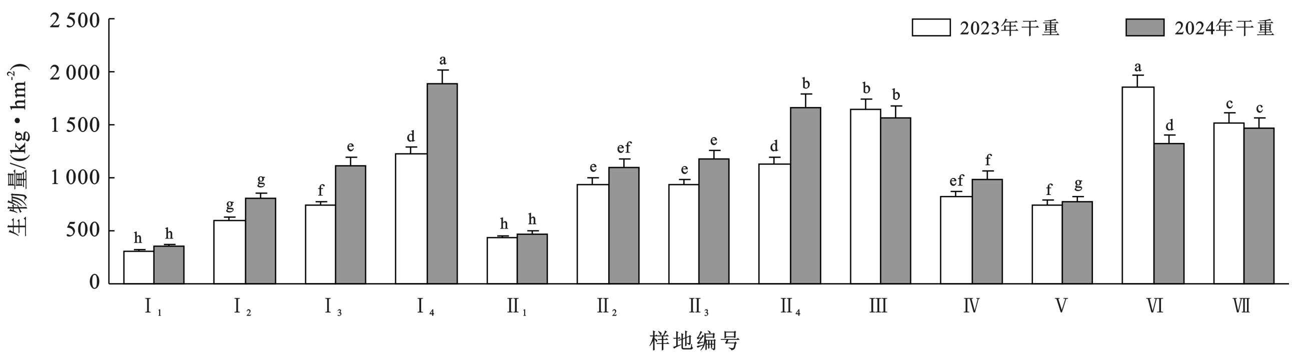

图6 2023及2024年冀北坝上退化草场不同处理及对照草地生产力(干重)

Fig.6 Grassland productivity under different treatments and controls (dry weight) of degraded grasslands in Bashang area of northern Hebei Province of in 2023 and 2024

对照样地中,除丰宁产草量湿重和干重分别增加了19.81%和20.73%外,其余4个对照样地产草量均表现出不同程度的降低,降幅为1.59%~28.92%。表明短期内,种草+围封措施对提升退化草地的生产力具有显著影响,且对退化典型草原的作用更为显著。

围封期间不同处理草地的适口性有所增加(图7)。各处理的豆科、禾本科等可食性牧草干重占比增加,增幅为0.9%~3.1%。绿园试验样地内切根+围封处理(Ⅰ$_2$)的增长最为显著,达到3.1%,新华试验样地内施肥+围封处理(Ⅱ$_3$)的增长最为显著,达到1.5%。对照样地适口性牧草比例普遍减少,减幅为0.6%~1.4%,其中御道口降幅最大,减少1.4%,应该与近两年雨水偏多,草甸草原中湿生碱生植物比禾本科和豆科植物更适生,其优势度增大有关。值得注意的是,毒性草及衰退型植物种比例在试验样地和对照样地均有不同程度降低,且试验样地降低幅度显著高于对照样地。

两试验样地毒性草及衰退型植物种比例平均减少9.2%,其中种草+围封处理(Ⅰ$_4$和Ⅱ$_4$)的降低最为显著,分别达到31.7%和26.8%,其次为切根+围封处理(Ⅰ$_2$和Ⅱ$_2$),分别达到15.4%和11.9%。对照样地毒性草及衰退型植物种比例平均减少3.3%,其中张北郝家营(Ⅵ)降低最为显著,达到8.5%。表明试验样地的牧草生产性能有所提高,试验样地和对照区整体草地质量均有所改善。2024年不同处理植被的重要值见表3。

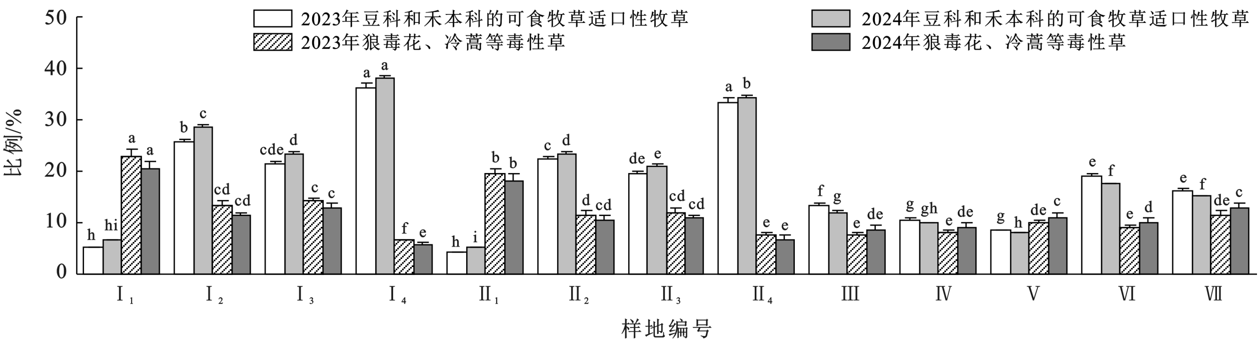

图7　冀北坝上退化草场不同处理及对照草地适口性

Fig. 7　Grassland palatability under different treatments and controls of degraded grasslands in Bashang area of northern Hebei Province

4　讨论

(1)围封是修复退化草地的有效措施之一,可显著改善草地群落特征[14-15]。人工辅助干预恢复是通过各种人为处理,改变群落组成或立地条件,促进草原生物群落构建过程,提升草原的生态系统功能及服务[16]。

本研究中短期围封条件下,施肥较种草更能有效提高群落植物高度、覆盖度及枯落物量,且在退化草甸草原中效果更为显著;种草较其他处理更能有效增加地上生物量及地被覆盖,减少地表水土流失;切根处理对于提升群落特征值有一定的作用,而围封处理对于提升植物群落特征值效果并不显著。这与王德利等[17]、秦燕等[18]、霍艳双等[19]、胡晓晴等[20]研究表明豆禾草种混播及施肥,可显著提高土壤肥力,提升植物盖度、平均株高、地上生物量,有效促进轻度退化草原恢复的结论一致。

目前对于草地恢复措施改善植物群落多样性的研究,普遍认为封育消除了外界环境的干扰,使得封育的退化草场植物种在一定时期内得以繁衍,物种数目、植物群落多样性逐渐增加,群落得以恢复[19]。但也有研究表明短期封育对植物群落多样性影响较小,多样性变化不大或基本稳定[21-23]。本研究与后者结论较为一致,围封2 a后,不同处理间植物群落多样性个别指数存在差异,总体差异不显著,试验样地和对照样地各项指标差异没有明显规律。如2023年退化典型草原种草+围封处理(Ⅰ$_4$)Shannon-Wiener多样性指数和Margalef丰富度指数表现较好(分别为2.08和2.15,显著大于其他处理),但在2024年却表现相反(分别为1.48和0.78,显著小于其他处理),表明短期内种草+围封措施对于丰富草地植物群落多样性的作用并不稳定,这可能与水热条件变化有关,应在后期对降雨量的年度和季节变异与措施效应的相关性做进一步探究。切根+围封措施对于提升草地植物群落多样性的作用滞后于种草+围封措施,没有人工干预的样地恢复较为稳定、缓慢。因此,如果没有生产需求,对于退化典型草原仅围封是最为经济有效的草地生态恢复措施,以促进自然恢复;对于退化草甸草原,如有景观需求,可采取施肥+围封措施,可有效提升群落特征,提升百花草甸景观效果。如经济条件允许可采用种草+围封、施肥+围封,以加快改善植物群落特征,快速覆盖地表。

表3　2024年冀北坝上退化草场不同处理植被重要值

Table 3　Vegetation importance values under different treatments in Bashang area of northern Hebei Province in 2024

植 被	不同处理和对照样地植被重要值												
	Ⅰ$_1$	Ⅰ$_2$	Ⅰ$_3$	Ⅰ$_4$	Ⅱ$_1$	Ⅱ$_2$	Ⅱ$_3$	Ⅱ$_4$	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
紫花苜蓿(*Medicago sativa*)				1.46				0.28			0.21		0.09
斜茎黄芪(*Astragalus adsurgens*)				0.10				0.28		0.12			0.08
无芒雀麦(*Bromus inermis*)				0.32				0.22			0.15		
披碱草(*Elymus dahuricus*)				/				0.16					
羊草(*Leymus chinensis*)	0.51	0.97	0.76	0.68	0.55	0.72	0.23	0.94		0.76		1.34	1.08
克氏针茅(*Stipa capillata*)	0.90	1.20	0.77		0.09		0.11			0.48		0.15	0.19
糙隐子草(*Cleistogenes serotina*)	0.84	0.23	0.61	0.22	0.17	0.17		0.07	0.76	0.54	0.15	0.16	
阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)							0.14	0.19					0.13
米口袋(*Gueldenstaedtia verna*)										0.08			
莓叶委陵菜(*Potentilla fragarioides*)									0.17	0.28			0.15
二裂委陵菜(*P. bifurca*)	0.30	0.19	0.18					0.08					
中华苦荬菜(*Ixeris chinensis*)								0.12		0.07			
狗尾草(*Setaria viridis*)										0.06	1.30		0.25
蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)					0.15			0.15		0.08		0.09	
草地风毛菊(*Saussurea amara*)	0.11	0.15	0.38		0.11		0.06						
小蓟(*Cirsium setosum*)					0.10	0.25	0.20						
地丁(*Corydalis bungeana*)	0.09												
胡枝子(*Lespedeza bicolor*)									0.13	0.16			0.18
无腺花旗杆(*Dontostemon eglandulosus*)									0.12				
芦苇(*Phragmites australis*)					0.22	0.42	0.45						
萹蓄(*Polygonum aviculare*)						0.22							
虫实(*Corispermum hyssopifolium*)				0.10									
碱蓬(*Artemisia anethifolia*)					1.15							0.19	
扁蓿豆(*Melilotoides ruthenica*)											0.10		
砂引草(*Messerschmidia sibirica*)									0.34				
灰绿藜(*Chenopodium album*)	0.12	0.12	0.06			0.39	0.07		0.12		0.32	0.50	
牻牛儿苗(*Erodium stephanianum*)											0.18		
茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)		0.15	0.12	0.13		0.45	1.40	0.12			0.20		0.07
二色补血草(*Limonium bicolor*)					0.19	0.15	0.18	0.11					
荠菜(*Capsella bursa-pastoris*)													0.11
紫羊茅(*Festuca rubra*)													0.32
苔草(*Carex tristachya*)									0.16				
菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)												0.09	
多茎委陵菜(*P. multicaulis*)												0.15	
珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)					0.26	0.13	0.07	0.06					
狼毒花(*Stellera chamaejasme*)											0.23		0.11
米蒿(*Artemisia dalai-lamae*)			0.12					0.14	0.16				0.24
车前(*Plantago asiatica*)												0.09	
腺独行菜(*Lepidium apetalum*)												0.10	
臭蒿(*Artemisia hedinii*)						0.09	0.09	0.08				0.14	
百里香(*Thymus mongolicus*)									0.15				
鹤虱(*Lappula myosotis*)											0.16		
冷蒿(*Artemisia frigida*)	0.12								0.89				

(2)本研究结果显示,种草+围封措施可显著提升草地产量,其次为施肥+围封措施;围封措施较为稳定,但较种草+围封、施肥+围封措施缓慢;切根+围封措施因环境等因素对草地产量的促进作用因地而异,具有不确定性。这说明短期内相对自然恢复,种草+围封、施肥+围封等正向人为干预措施可对退化草地的产草量起到显著的恢复和促进作用。围封期间不同处理草地的适口性有所增加,毒性草及衰退型植物种比例在试验样地和对照样地均有不同程度降低,且试验样地降低幅度显著高于对照样地。这与张小芳等[24]单播措施地上生物量和禾本科牧草占比显著增长的结论一致。这表明试验样地的牧草生产性能有所提高,而试验样地和对照区整体草地的质量有所改善,则进一步说明研究区草地进行性退化正在减弱,促进生态恢复、稳定草业发展基础的良性生态演替趋于加强。可见,围封措施是保障草

地恢复的必要手段,而多维度的正向人为干预可在短期内产生一定生态效益和显著的经济效益。

郭美琪等[25]对内蒙古退化典型草原补播植物种和退化草地土壤进行相互驯化和反馈响应研究表明,以羊草为优势种的轻度退化草地选择播种苜蓿和无芒雀麦措施,可显著提升草地产量和适口性,快速修复退化草地,这与本研究结论一致,I_4(羊草、克氏针茅)和II_4(以碱蓬、羊草)处理在2024年产草量增长幅度、适口性等指标值均显著提高,I_4处理中苜蓿重要值最大,为1.46,II_4处理中羊草重要值最大,但苜蓿、斜茎黄芪、无芒雀麦、披碱草等占据了该处理近1/3的重要值(表3)。另外,已有研究表明补播和施肥措施在退化草甸的生态修复效果因样地坡向不同而存在差异[26-27],种草措施的效果受立地环境的影响[28-29],与本研究结论一致,I_4处理(退化典型草原)中4种种植植物长势显著优于II_4处理(退化草甸草原),原因可能是土壤水分或特定土壤水分条件下羊草群落组成对苜蓿生长有一定抑制作用,说明一定程度上立地条件是影响人工干预措施作用发挥的重要因素,这也解释了本研究中种草+围封措施在绿园、新华两试验样地对于提升植物群落多样性、产草量等指标值效果的差异性,需对水热条件与人工干预措施的应用效果进行研究。因此,从草场经济和发展需求出发,可对退化典型草原优先进行人工干预恢复治理,确需发展草地经济的草甸草原,种草措施可尝试沙草类等耐涝牧草品种。

5 结 论

(1) 退化典型草原种草+围封和退化草甸草原种草+围封处理干重分别增长54.25%和48.18%,其中豆科、禾本科干重年增幅分别为2.1%和1.2%,表明种草配合围封可显著提高退化草地地上生物量及适口性,且退化典型草原恢复效果优于退化草甸草原。

(2) 退化典型草原施肥+围封和退化草甸草原施肥+围封处理的样地植被均高年度增长量分别为3.9和6.1 cm,植被盖度年增长率分别为1.2%和1.6%,枯落物量分别年增长29.0 g/m^{2}和30.4 g/m^2,地表裸露占比年度分别减少0.6%和0.8%,表明施肥+围封措施可显著改善植物群落特征,减少地表裸露占比。切根+围封措施在一定程度上可提升植物群落多样性,但效果因地而异;仅采用围封措施在4种处理中效果最差,但优于对照。

(3) 对于冀北坝上地区的轻度退化典型草原,短期内有生产需求的恢复措施推荐顺序为:(种草+围封)>(施肥+围封)>(切根+围封)>围封,短期内无生产需求的恢复措施宜选择仅围封,以利于自然恢复。对于有旅游价值需求的退化草甸草原,采取施肥+围封措施,能够改善群落特征,提升景观效果。

参考文献(References)

[1] 杨越,杨依天,武智勇,等.冀北坝上地区农田防护林防风固沙效应研究[J].西北林学院学报,2020,35(4):167-172.
Yang Yue, Yang Yitian, Wu Zhiyong, et al. Studies on wind break and sand fixation effects of farmland shelterbelt in Bashang area of northern Hebei [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020,35(4):167-172.

[2] 潘庆民,薛建国,陶金,等.中国北方草原退化现状与恢复技术[J].科学通报,2018,63(17):1642-1650.
Pan Qingmin, Xue Jianguo, Tao Jin, et al. Current status of grassland degradation and measures for grassland restoration in northern China [J]. Chinese Science Bulletin, 2018,63(17):1642-1650.

[3] 黄彦宁,叶得明.西北农牧交错带土地利用变化及其生态环境效应研究:以甘肃环县为例[J].西北林学院学报,2024,39(5):195-201.
Huang Yanning, Ye Deming. Land use change and ecological environment effects in the northwest agro-pastoral belt: A case study of Huanxian County, Gansu Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024,39(5):195-201.

[4] 阳辉,廉诗启,曹建生,等.退化草原草场修复和恢复理论与技术研究进展[J].生态科学,2024,43(5):207-215.
Yang Hui, Lian Shiqi, Cao Jiansheng, et al. Review on theory and technology of restoration and recovery in degraded steppe [J]. Ecological Science, 2024,43(5):207-215.

[5] 汤鹏程,徐冰,郭克贞,等.西藏高寒牧区灌溉人工草地节水高产综合技术研究[J].南水北调与水利科技,2013,11(5):128-131.
Tang Pengcheng, Xu Bing, Guo Kezhen, et al. Relationship between leaf water potential of oat and meteorological factor in alpine pastoral areas of Tibet [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013,11(5):128-131.

[6] 单贵莲,薛世明,陈功,等.季节性围封对内蒙古典型草原植被恢复的影响[J].草地学报,2012,20(5):812-818.
Shan Guilian, Xue Shiming, Chen Gong, et al. Influence of seasonal exclosure on vegetation restoration in typical steppe, Inner Mongolia [J]. Acta Agrestia Sinica, 2012,20(5):812-818.

[7] 李慧,蒋平安,程路明,等.围栏对新疆山区草地植物群落多样性的影响[J].新疆农业大学学报,2005,28(3):40-43.
Li Hui, Jiang Ping'an, Cheng Luming, et al. Impacts of fencing on the plant community biodiversity of the typical mountainous lawn in Xinjiang [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2005,28(3):40-43.

[8] 刘凤婵,李红丽,董智,等.封育对退化草原植被恢复及

土壤理化性质影响的研究进展[J].中国水土保持科学,2012,10(5):116-122.
Liu Fengchan, Li Hongli, Dong Zhi, et al. Advances in research on enclosure effects on vegetation restoration and soil physicochemical property of degraded grassland [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(5):116-122.
[9] 孙宗玖,安沙舟,马金昌.围栏封育对草原植被及多样性的影响[J].干旱区研究,2007,24(5):669-674.
Sun Zongjiu, An Shazhou, Ma Jinchang. Effect of fencing on vegetation and diversity of steppe in the middle section of northern slope of the Tianshan Mountains, China [J]. Arid Zone Research, 2007,24(5):669-674.
[10] Ghorbani A, Dadjou F, Moameri M, et al. Effect of grazing exclusion on soil and vegetation characteristics in desert steppe rangelands: A case study from northwestern Iran [J]. Arid Land Research and Management, 2021,35(2):213-229.
[11] Liu Jiankang, Bian Zhen, Zhang Kebin, et al. Effects of different fencing regimes on community structure of degraded desert grasslands on Mu Us desert, China [J]. Ecology and Evolution, 2019,9(6):3367-3377.
[12] 宝音陶格涛.不同改良措施下退化羊草(*Leymus chinensis*)草原群落恢复演替规律研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古大学,2009.
The Study on dynamice succession of community in degaded steppe of *Leymus Chinensis* after different omprovement measures [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia University, 2009.
[13] 宋永昌.植被生态学[M].上海:华东师范大学出版社,2001.
Song Yongchang. Vegetation ecology [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2001.
[14] 王悦骅,靳宇曦,王忠武,等.8年围封对内蒙古荒漠草原植物和土壤的影响[J].草地学报,2021,29(10):2339-2345.
Wang Yuehua, Jin Yuxi, Wang Zhongwu, et al. Effects of eight years enclosure on plants and soil of desert steppe in Inner Mongolia [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021,29(10):2339-2345.
[15] 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[J].草业学报,2020,29(11):11-22.
Nie Yingying, Xu Lijun, Xin Xiaoping, et al. Effects of fence enclosure on the plant community composition and niche characteristics in a temperate meadow steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020,29(11):11-22.
[16] 李宇章,王亚妮,胡宜刚,等.不同植被恢复措施下高寒沙化草地植被与土壤变化特征[J].水土保持学报,2022,36(4):211-218.
Li Yuzhang, Wang Yani, Hu Yigang, et al. Characteristics of vegetation and soil under different restoration measures in alpine desertification grassland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(4):211-218.
[17] 王德利,梁存柱.退化草原的恢复状态:气候顶极或干扰顶极?[J].植物生态学报,2023,47(10):1464-1470.
Wang Deli, Liang Cunzhu. Restoration state of degraded grasslands: Climate climax or disturbance climax? [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(10):1464-1470.
[18] 秦燕,刘文辉,何峰,等.施肥与切根对退化羊草草原土壤理化性质和酶活性的影响[J].草业学报,2019,28(1):5-14.
Qin Yan, Liu Wenhui, He Feng, et al. Influence of fertilization and root cutting on soil physicochemical properties and enzyme activities in a degraded *Leymus chinensis* steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019,28(1):5-14.
[19] 霍艳双,春明,姜海光,等.退化草原改良措施研究[J].内蒙古林业调查设计,2024,47(4):93-95.
Huo Yanshuang, Chun Ming, Jiang Haiguang, et al. Restoration measures for degraded grasslands [J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2024, 47(4):93-95.
[20] 胡晓晴,王晓丽,刘和,等.不同恢复措施对高寒矿区植物群落与土壤养分的影响[J].草地学报,2025,33(4):1218-1227.
Hu Xiaoqing, Wang Xiaoli, Liu He, et al. Effects of different restoration measures on plant communities and soil nutrients in alpine mining areas [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025,33(4):1218-1227.
[21] 王宏生,宋梅玲,王玉琴,等.不同恢复措施对黄帚橐吾及毒害草型退化草地群落的影响[J].中国草地学报,2022,44(4):32-39.
Wang Hongsheng, Song Meiling, Wang Yuqin, et al. Effects of different restoration methods on *Ligularia virgaurea* and toxic weed dominated degraded grassland community [J]. Chinese Journal of Grassland, 2022,44(4):32-39.
[22] 杨鑫光,李志炜,王克宙,等.基于OCVOR优化模型的高寒受损煤矿区人工恢复效果评价研究[J].中国草地学报,2024,46(3):38-46.
Yang Xinguang, Li Zhiwei, Wang Kezhou, et al. Evaluation of artificial restoration effect in alpine damaged coal mining area based on OCVOR optimization model [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024,46(3):38-46.
[23] 陈晨旭,张力,赵巍,等.中国西部退化草地对不同类型恢复措施响应的Meta分析[J].草业科学,2023,40(12):3048-3061.
Chen Chenxu, Zhang Li, Zhao Wei, et al. The response of degraded grasslands to different types of restoration measures in western China: A Meta-analysis [J]. Pratacultural Science, 2023,40(12):3048-3061.

(下转第139页)

study of Fangjiagou debris flow, Zhangxian County [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 206-219.

[12] 潘梦宇,雷雨,顾海华,等.基于建筑易损性分析的泥石流风险评价[J].人民长江,2024,55(10):133-140.
Pan Mengyu, Lei Yu, Gu Haihua, et al. Risk assessment of debris flow based on building vulnerability analysis [J]. Yangtze River, 2024,55(10):133-140.

[13] 赵蔓,孙俊,朱恺悦.云南兰坪县啦井村泥石流模拟预测及风险评价[J].中国地质灾害与防治学报,2024,35(5):110-119.
Zhao Man, Sun Jun, Zhu Kaiyue. Simulation prediction and risk evaluation of debris flow in gullyprone ditches of Lajing village, Lanping County, Yunnan Province, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024,35(5):110-119.

[14] 黄勋,唐川,周伟.基于数值模拟的暴雨泥石流暴发频率计算模型[J].工程地质学报,2014,22(6):1271-1278.
Huang Xun, Tang Chuan, Zhou Wei. Numerical simulation of occurrence frequency estimation model for debris flows [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6):1271-1278.

[15] 方群生,唐川,王毅,等.汶川极震区泥石流动储量与总物源量计算方法研究[J].防灾减灾工程学报,2016,36(6):1008-1014.
Fang Qunsheng, Tang Chuan, Wang Yi, et al. A calculation method for predicting dynamic reserve and the total amount of material source of the debris flows in the Wenchuan meizoseismal area [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(6): 1008-1014.

[16] 中国地质灾害防治工程行业协会.泥石流灾害防治工程勘查规范:T/CAGHP 006—2018 [S].武汉:中国地质大学出版社,2018.
China Association of Geological Hazard Prevention Engineering. Specification of Geological Investigation for Debris Flow Stabilization: T/CAGHP 006—2018 [S]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.

[17] 廖立业,曾庆利,袁广祥.北京怀柔7·16暴雨泥石流发育特征与形成机理[J].工程地质学报,2021,29(3):807-816.
Liao Liye, Zeng Qingli, Yuan Guangxiang. Characteristics and mechanism of the rainstorm-induced debris flow on July 16 in Huairou, Beijing [J]. Journal of Engineering Geology, 2021,29(3):807-816.

[18] 唐得胜,唐川,朱静.汶川震区震后沟谷暴雨泥石流暴发的可能性分析[J].水电能源科学,2015,33(9):148-151.
Tang Desheng, Tang Chuan, Zhu Jing. Outbreak probability analysis of gully debris flow in Wenchuan earthquake zone [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(9):148-151.

[19] 梁鸿熙,尚敏,徐鑫.基于FLO-2D数值模拟的泥石流流动与堆积影响因素研究[J].工程地质学报,2016,24(2):228-234.
Liang Hongxi, Shang Min, Xu Xin. Research on the influencing factors of flow and deposition of debris flow based on the FLO-2D simulation[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(2): 228-234.

(上接第76页)

[24] 张小芳,张春平,杨增增,等.单播措施下三江源区高寒退化草地恢复效果评估[J].草地学报,2022,30(10):2834-2844.
Zhang Xiaofang, Zhang Chunping, Yang Zengzeng, et al. Evaluation of restoration effect in alpine degraded meadow under single sowing in the three rivers source regions [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022,30(10):2834-2844.

[25] 郭美琪,刘琳,荆晶莹,等.基于植物-土壤反馈原理的退化草原免耕补播修复物种选择研究[J].草业学报,2023,32(12):14-23.
Guo Meiqi, Liu Lin, Jing Jingying, et al. Species selection for no-tillage reseeding in grassland restoration based on plantsoil feedback [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(12):14-23.

[26] Zhou Hanzhang, Liu Huan, Jia Haiyan, et al. Effects of different sowing dates on plant height, leaf-stem ratio and dry-fresh ratio of forage sorghum in autumn idle fields [J]. Agricultural Science & Technology, 2018(2):57-66.

[27] 李希来,马昀峤,段成伟,等.施肥和补播对不同坡向斑块化退化高寒草甸生物量和物种多样性的影响[J].中国草地学报,2024,46(5):1-13.
Li Xilai, Ma Yunqiao, Duan Chengwei, et al. Effects of fertilization and reseeding on biomass and species diversity of patchy degraded alpine meadows with different slope directions [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024,46(5):1-13.

[28] Beer C, Ciais P, Reichstein M, et al. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009,23(2):2008GB003233.

[29] Keenan T F, Hollinger D Y, Bohrer G, et al. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise [J]. Nature, 2013, 499(7458):324-327.