

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.029

引用格式:张浩,董天宇,郭定新,等.灌溉和免耕补播修复榆阳区退化草原效果评价[J].草地学报,2026,34(7):2677—2687
ZHANG Hao, DONG Tian-yu, GUO Ding-xin, et al. Evaluation of the Effects of Irrigation and No-till Reseeding on Restoring Degraded Grassland in Yuyang District[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2677—2687

灌溉和免耕补播修复榆阳区退化草原效果评价

张浩¹, 董天宇¹, 郭定新¹, 杨高文², 张利平³, 任波³, 杨军卫³, 霍延卫³,
刘丹⁴, 郭凯威⁴, 张英俊^{2*}

(1. 河南牧业经济学院动物科技学院/河南省草畜工程技术研究中心, 河南 郑州 450046;
2. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193; 3. 榆林市榆阳区草原工作站, 陕西 榆林 719000;
4. 德邦大为(芜湖)农机有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要:本研究以陕西省榆阳区退化草原为研究对象,采用灌溉及在灌溉的基础上免耕补播紫花苜蓿(*Medicago sativa*, 仅补播当年灌溉)修复退化草原,通过调查围栏封育、灌溉、补播当年和补播第四年草地植被特征,评估以上措施对退化草原植被恢复的影响,以期为该地区退化草原的修复提供科学依据。结果表明:(1)灌溉、补播当年和补播第四年草地生物量和植物多样性显著高于围栏封育草地,但仅实施灌溉导致一年生禾草和杂类草比例显著增加、多年生禾草比例显著降低,对草地生态系统稳定性造成潜在威胁;(2)与灌溉相比,补播当年草地豆科牧草比例显著提高、一年生禾草比例显著降低,优化了群落结构;(3)补播第四年草地生物量高达5321 kg·hm⁻²,是围栏封育和灌溉的5.58和2.63倍,紫花苜蓿生物量占比达67.78%,不仅维持了植物多样性还表现出较高的生产潜力。综上,紫花苜蓿可在该地退化草原中长期维持并提高草原生产力,免耕补播紫花苜蓿(仅补播当年灌溉)可作为该地区退化草原修复的主要措施。

关键词:草原修复;围栏封育;灌溉;免耕补播;紫花苜蓿

中图分类号:S812.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2677-11

Evaluation of the Effects of Irrigation and No-till Reseeding on Restoring Degraded Grassland in Yuyang District

ZHANG Hao¹, DONG Tian-yu¹, GUO Ding-xin¹, YANG Gao-wen², ZHANG Li-ping³, REN Bo³,
YANG Jun-wei³, HUO Yan-wei³, LIU Dan⁴, GUO Kai-wei⁴, ZHANG Ying-jun^{2*}

(1. College of Animal Science and Technology, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Henan Engineering Research Center for Grassland and Livestock, Zhengzhou, Henan Province 450046, China; 2. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Yuyang District Grassland Station of Yulin City, Yulin, Shaanxi Province 719000, China;
4. Debont (Wuhu) Agricultural Machinery Co. Ltd, Wuhu, Anhui Province 241000, China)

Abstract: This study implemented no-till reseeded of alfalfa (*Medicago sativa*) with irrigation (applied only in the establishment year) to restore degraded grassland in Yuyang district, Shaanxi Province. By investigating vegetation characteristics of enclosure, irrigation, the first year and the fourth year of alfalfa reseeded grasslands, the effects of restoration measures were evaluated to provide technical supports for the restoration of degraded grasslands in this region. The results showed that: (1) irrigation, as well as the first year and the fourth year of reseeded, significantly increased vegetation biomass and plant diversity compared to enclosure alone, while irrigation alone significantly increased the dry weight proportion (DWP) of annual grass and forb in the vegetation and decreased that of perennial grass, posing a potential threat to grassland ecosystem stability;

收稿日期:2025-08-28;修回日期:2025-12-09

基金项目:河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(242102110021);河南牧业经济学院博士科研启动资金项目(2023HNUAHEDF010);国家自然科学基金青年科学基金项目(32401499);国家牧草产业技术体系(CARS-34)资助

作者简介:张浩(1991-),男,汉族,河南浚县人,博士,主要从事草地建植与利用的研究,E-mail:Zhanghaolyg2009@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:zhangyj@cau.edu.cn

(2) compared to irrigation alone, reseeded in the first year significantly increased the DWP of legume and decreased that of annual grass in the vegetation, indicating an optimized community structure; (3) as for reseeded in the fourth year, the community biomass reached $5321 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was 5.58 and 2.63 times that of the enclosure and irrigation, respectively, and there was 67.78% of the biomass contributed by the reseeded alfalfa, demonstrating high production potential while maintaining plant diversity. In conclusion, the reseeded alfalfa could be maintained in the improved grassland over the long term and reseeded alfalfa with irrigation (applied only in the establishment year) can be served as a primary measure for restoring the degraded grassland in this region.

Key words: Grassland restoration; Enclosure; Irrigation; No-till reseeded; *Medicago sativa*

草原生态系统约占陆地总面积的26%,是全球陆地生态系统的重要组成部分^[1],在物质生产、调节气候、涵养水源和维持生物多样性等方面具有重要的作用^[2]。我国草地面积2.6亿公顷^[3],近年来,受气候变化和过度利用的双重影响,约70%~90%的草原出现不同程度的退化^[4],严重削弱了草原生态系统的功能稳定性,制约了牧区经济社会可持续发展^[5]。因此,推进退化草原生态修复既是恢复草原生产力的关键路径,也是实现草牧业高质量发展和生态屏障建设的战略需求。

目前,全球退化草原的生态修复技术主要包括围栏封育、灌溉、浅耕翻、划破草皮、施肥等20余种技术,这些技术的适用范围、优势以及局限性各异,其修复效果也受生态环境、草原退化程度、草原类型等的不同而存在差异^[6]。以上常用的技术主要通过避免扰动或改善土壤水分、养分及通气状况等途径实现草原恢复。但对于因过度利用、土壤紧实度高或气候条件恶劣而导致的牧草无性繁殖或由土壤种子库驱动的植被更新过程严重受阻的退化草原,以上修复技术难以在短期内提升土壤地力和草原生产力^[7-8]。草原免耕补播技术通过将优质牧草重新引入退化草地,以增加优质牧草的种子库数量进而提高优质牧草比例,是加速退化草原修复的核心技术手段之一。尽管免耕补播技术在推广应用过程中常因环境条件恶劣、土壤紧实度高、原生植被竞争等因素导致补播幼苗存活率和越冬率较低,严重影响补播改良效果,但近年来随着“退化草原植被免耕补播修复理论”的创新^[9]和“退化草原原状覆播工艺”的突破,新型免耕补播技术可使种床湿度提高50%以上、出苗率和存活数提高50%~100%^[10],显著提高了退化草原修复效率,也使草原免耕补播技术受到越来越多的关注。

榆林市榆阳区地处黄土高原与毛乌素沙漠过渡地带,是我国生态环境极为脆弱的地区之一^[11]。全区草原面积达21.6万公顷,占国土总面积的

30.68%,不仅是陕北白绒山羊、秦川牛等地方特色草食家畜的重要饲草料地,更是区域生态安全的重要屏障^[12]。然而,在风蚀沙化与过度利用的双重影响下,该区草原普遍退化为植被稀疏、生产力低下的风沙草滩。尽管已实施大面积围栏封育进行生态修复,但受严酷自然条件的制约,风沙草滩的恢复进程依然缓慢。

前期在该区域风沙草滩采用“深开沟浅覆土”技术免耕补播紫花苜蓿(*Medicago sativa*)的实践中发现,雨前补播紫花苜蓿出苗后,常因地表干燥、风沙大导致播种沟易被风沙填埋,或因土壤干旱、紧实度高导致紫花苜蓿根系难以有效吸收水分和养分,引起“掉苗”现象,造成补播修复失败^[9-10]。因此,在地下水位浅、具备灌溉条件的风沙草滩上,补播当年进行灌溉是提高修复成功率的有效措施。此外,紫花苜蓿为深根系豆科牧草,主根入土深度达3~6 m甚至更深,有高效利用土壤深层水分的潜力,评估补播紫花苜蓿依靠深根系及自然降水在退化草原中长期维持的潜力,对该地区推动低成本、节水型的草原修复具有重要意义。

综上,本研究以榆阳区长期围栏封育的退化草原为研究对象,采用灌溉和免耕补播紫花苜蓿两种措施修复退化草原,通过调查长期围栏封育草地、灌溉草地、补播当年草地和补播第四年草地的植被数量特征和营养特征,评估以上措施修复退化草原的效果,并基于空间代替时间的设计,分析不同年限补播紫花苜蓿的种群特征及其是否能够长期在改良草地中维持,进而为该地区退化草原治理、生产力提升及免耕补播技术推广应用提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本试验地点位于陕西省榆林市榆阳区巴拉素镇

新庙滩村(38°16' N, 109°11' E, 海拔 1050 m), 为黄土高原与毛乌素沙漠过渡带, 属典型的中温带半干旱大陆性季风气候, 年均温 8.6℃, 年均降水量 400 mm (主要集中在 7—9 月), 无霜期 146 d, 月平均风速 4~5 m·s⁻¹, 最高风速可达 20~25 m·s⁻¹, 且主要集中在风沙活动强烈、降水稀少的春季。该地在植被地带性划分上属于暖温性典型草原地带, 因风沙活动形成风沙草滩, 地下水资源丰富且水位较浅, 有良好的灌溉条件。试验样地在修复前为长期围栏封育的重度退化草原, 以羊草(*Leymus chinensis*)为优势种, 主要伴生种有猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、米口袋(*Gueldenstaedtia verna*)、阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等; 土壤类型为风沙土, 0~20 cm 土层全氮含量 0.06%、全钾含量 2.33%、速效磷 5.88 mg·kg⁻¹、pH 为 8.97。

1.2 样地设置

如图 1 所示, 本研究的样地总面积为 720 m×360 m, 将整个样地分成 3 份; 样地 1 和样地 2 均为长 180 m、宽 360 m 的矩形, 于 2020 年 5 月中旬南北方向免耕补播紫花苜蓿, 补播与未补播条带相间排布; 样地 3 为边长 360 m 的正方形, 于 2023 年 5 月中旬架设半径 180 m 的指针式喷灌机(灌溉区域位于图 1 圆形虚线内), 同时南北方向免耕补播紫花苜蓿, 补播与未补播条带相间排布。2020 年与 2023 年补播作业方式相似, 均选用“中苜 3 号”紫花苜蓿(发芽率≥85%)作为补播草种、播种量 15 kg·hm⁻², 采用倒“T”型开沟器、以“深开沟浅覆土”的方式播种, 播种深度 5 cm、覆土厚度 1~2 cm、行距 40 cm。2023 年播种完毕后, 通过喷灌圈内布置的土壤含水量监测仪器监测土壤相对含水量, 当土壤相对含水量低于 60% 时指针式喷灌机启动工作, 当土壤水分达到饱和状态时指针式喷灌机停止工作, 以保证补播幼苗充足的水分供应。由此, 样地 1 和样地 2 中相间排布了未补播未灌溉的原生草地(CK, 南北方向白色条带)和补播第四年的草地(R₄, 南北方向灰色条带), 样地 3 中相间排布了灌溉草地(I, 南北方向白色条带)和补播当年草地(R₁, 南北方向灰色条带)。

本研究旨在评估特定管理实践下退化草原的修复效果, 基于现有基础设施(喷灌圈)及历史管理(补播年限)等因素设置样地。为了兼顾空间异质

性和代表性, 将整个研究样地沿南北方向平均分成 6 个大小相等的区域(区域之间由图 1 中东西方向的虚线分隔); 每个区域内均设置了本研究涉及的全部 4 个处理小区, 即 CK, I, R₁ 和 R₄。因此, 本研究共设置了 6 个空间重复, 每个处理有 6 个重复小区, 总计 24 个小区, 每个小区面积为 30 m×30 m。

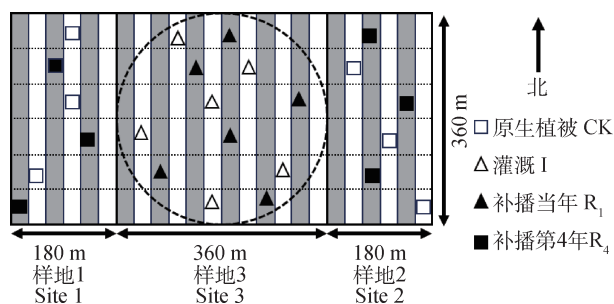


图 1 样地设置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the sample plots

注: 样地 1 和样地 2 中南北方向的灰色条带为 2020 年 5 月中旬补播区域, 白色条带为 2020 年末补播区域; 样地 3 中南北方向的灰色条带为 2023 年 5 月中旬补播区域, 白色条带为 2023 年末补播区域; 圆形虚线内为 2023 年指针式喷灌机灌溉的区域, 6 个空间重复之间由东西方向的虚线分隔; CK 代表未补播未灌溉的原生植被, I 代表 2023 年灌溉草地, R₁ 代表补播当年草地, R₄ 代表补播第四年草地。下同

Note: The gray strips oriented north-south in Site 1 and Site 2 represent the areas reseeded in mid-May 2020, the white strips in the same site represent the areas without reseeding in 2020; the gray strips oriented north-south in Site 3 represent the areas reseeded in mid-May 2023, the white strips in the same site represent the areas without reseeding in 2023; the area within the circular dashed line represents the region irrigated by the center-pivot irrigation system in 2023, and the six spatial replicates are separated by east-west oriented dashed lines; CK-native vegetation without reseeding and irrigating, I-irrigation in 2023, R₁-the first year of reseeding, R₄-the fourth year of reseeding. The same as below

1.3 取样及样品分析

2023 年 8 月下旬进行植被的监测与取样。分别在每个小区随机布置 1 个 0.5 m×0.5 m 的样方, 测定每个样方中植被的盖度、密度、高度和生物量。根据所获取的数据, 计算功能群干重比例、物种重要值和植物多样性等指标, 具体方法如下:

功能群干重比例: 将样方内的物种划分为多年生禾草(Perennial grass, PG)、一年生禾草(Annual grass, AG)、豆科草(Legume, L)和杂类草(Forb, F), 某功能群干重比例为该功能群内所有物种的相对生物量之和。

物种重要值: 物种的相对盖度、相对密度、相对

高度和相对生物量的算术平均数。

多样性指数:使用香农维纳指数(Shannon-wiener index, H)、丰富度指数(Richness index)和均匀度指数(Pielou index, E)表征植物多样性,计算公式如下:

$$H = -\sum P_i \ln P_i$$

$$E = (-\sum P_i \ln P_i) / \ln S$$

式中: P_i 为同一样方中 i 植物的重要值, S 为物种丰富度, 即样方中的物种数。

将收获的牧草烘干、粉碎过筛后测定其营养品质, 粗蛋白按照凯氏定氮法使用全自动凯氏定氮仪(K1160, 济南海能)测定, 中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维按照 Van Soest 方法使用全自动纤维分析仪(F2000, 济南海能)测定, 干物质消化率(D_{MD} , %)通过以下公式计算^[13]:

$$D_{MD} = 83.58 - 0.824 \times A + 0.4192 \times P$$

式中: A 为牧草酸性洗涤纤维含量, 单位%; P 为牧草粗蛋白含量, 单位%。

1.4 数据整理与分析

因本研究属植被调查性试验, 处理间未遵循唯一差异原则, 因此, 使用独立样本 T 检验(Independent

Samples T Test)分别比较原生植被、灌溉草地、补播当年草地和补播第四年草地的植被群落结构、植被组成、主要物种重要值、植物多样性和可提供牧草营养品质等指标在两处理间的差异; 使用独立样本 T 检验比较补播当年与补播第四年紫花苜蓿在数量特征和营养特征上的差异, 以上数据分析使用 SPSS 22.0。运用限制性冗余分析的方法(RDA)检验代表草地植被特征的指标对修复措施的响应方式, 该多元统计分析使用 CANOCO 4.5 完成。

2 结果与分析

2.1 植被群落结构

如图 2 所示, 补播第四年(R_4)草地的植被高度显著($P < 0.001$)高于原生植被(CK)、灌溉(I)和补播当年(R_1); 原生植被的盖度和密度均显著($P < 0.01$ 或 $P < 0.001$)低于灌溉、补播当年和补播第四年。补播第四年草地植被的生物量($5321 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)显著($P < 0.01$ 或 $P < 0.001$)高于灌溉($2020 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和补播当年($2210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 且三者均显著($P < 0.001$)高于原生植被($963 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

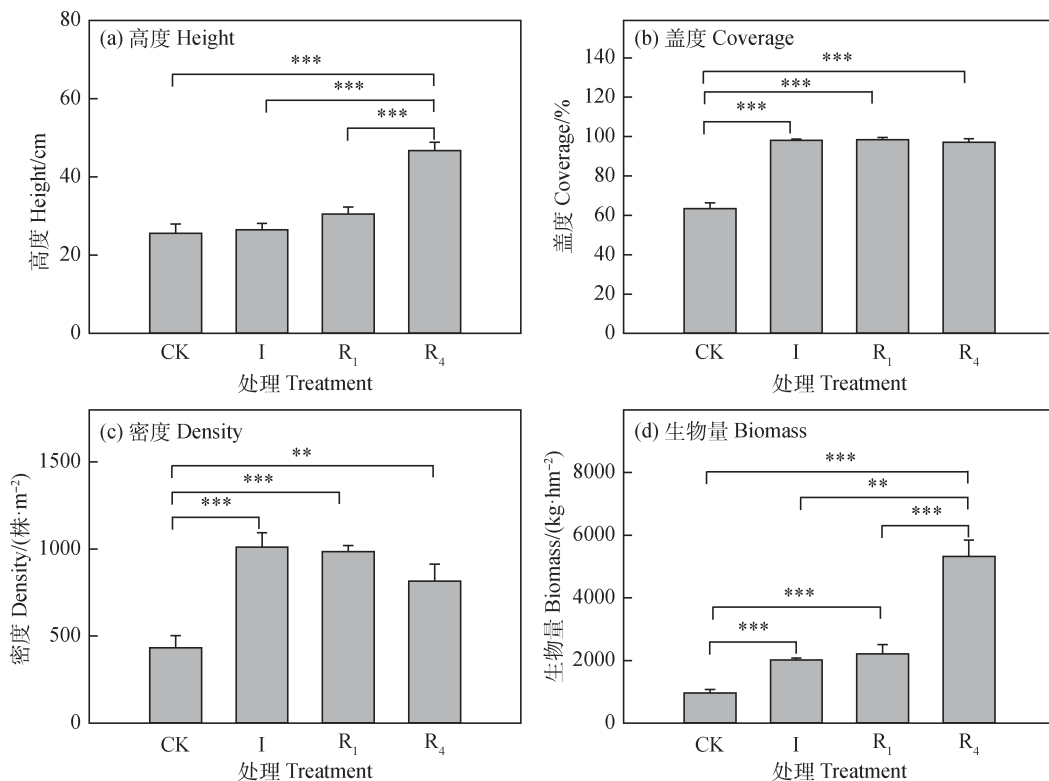


图2 不同草地修复措施对植被高度(a)、盖度(b)、密度(c)和生物量(d)的影响

Fig. 2 Effects of different grassland restorations on vegetation height (a), coverage (b), density (c) and biomass (d)

注:***和**分别表示在0.001和0.01水平上差异显著。下同

Note: *** and ** indicate significant difference at the 0.001 and 0.01 levels, respectively. The same as below

2.2 植被组成

如图3a所示,原生植被多年生禾草的干重比例显著($P<0.001$)高于灌溉、补播当年和补播第四年,补播当年草地多年生禾草的干重比例显著($P<0.05$)高于补播第四年。灌溉草地一年生禾草干重比例显著($P<0.01$ 或 $P<0.001$)高于原生植被、补播当年和补播第四年,补播当年和补播第四年草地一年生禾草干重比例显著($P<0.05$)高于原生植被。补播第四年草地豆科草干重比例达67.78%,显著($P<0.001$)高于原生植被、灌溉和补播当年,补播当年豆科草干重比例显著($P<0.01$)高于灌溉

和原生植被。灌溉和补播当年杂类草干重比例显著($P<0.05$)高于原生植被和补播第四年。

如图3b所示,原生植被多年生禾草生物量显著($P<0.01$)高于灌溉。灌溉草地一年生禾草生物量显著($P<0.01$ 或 $P<0.001$)高于原生植被和补播当年,补播当年草地一年生禾草生物量显著($P<0.01$)高于原生植被。补播第四年草地豆科草生物量显著($P<0.001$)高于原生植被、灌溉和补播当年,补播当年草地豆科草生物量显著($P<0.05$)高于原生植被和灌溉。灌溉和补播当年草地杂类草生物量显著($P<0.01$ 或 $P<0.05$)高于原生植被。

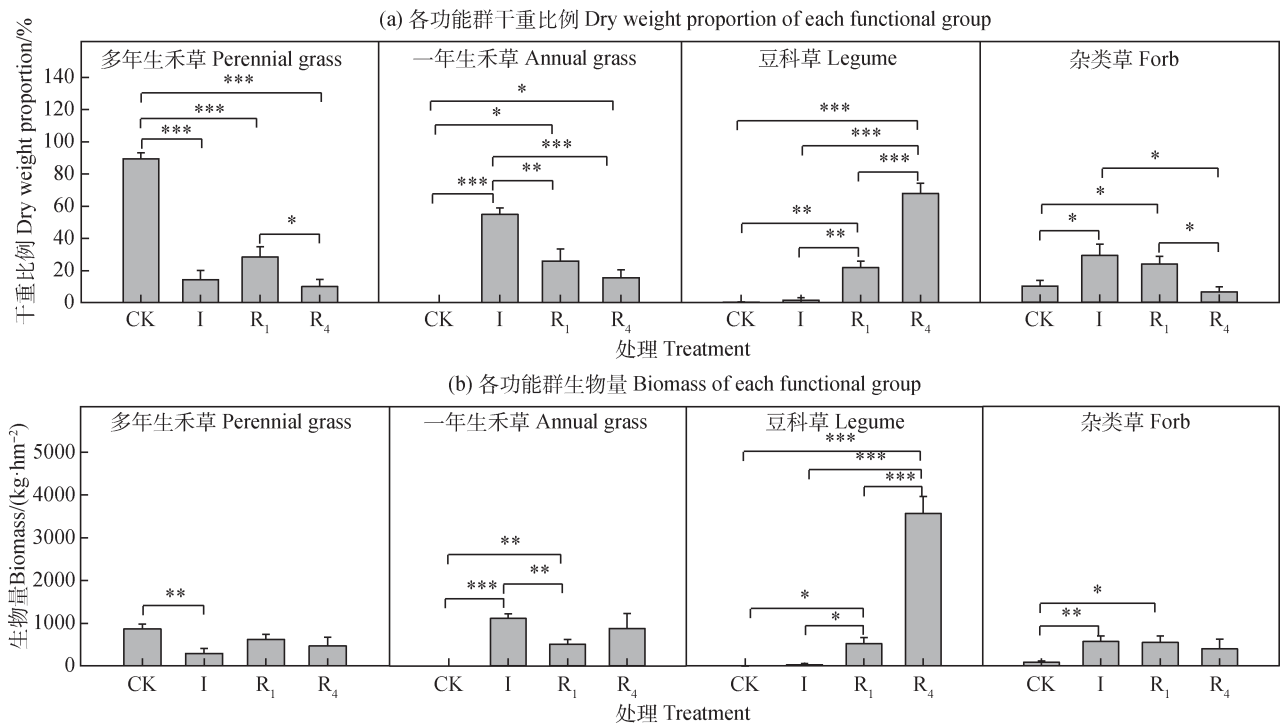


图3 不同草地修复措施对各功能群干重比例(a)和生物量(b)的影响

Fig. 3 Effects of different grassland restorations on dry weight proportion (a) and biomass (b) of each functional group

注:*表示在0.05水平上差异显著。下同

Note: * indicates significant difference at the 0.05 level. The same as below

2.3 主要物种重要值

如图4所示,原生植被羊草的重要值显著($P<0.001$)高于灌溉、补播当年和补播第四年。灌溉草地狗尾草的重要值显著($P<0.001$ 或 $P<0.01$)高于原生植被、补播当年和补播第四年,补播当年和补播第四年草地狗尾草的重要值显著($P<0.05$ 或 $P<0.01$)高于原生植被。灌溉和补播当年猪毛蒿的重要值显著($P<0.05$)高于补播第四年。灌溉和补播当年虎尾草的重要值显著($P<0.05$)高于原生植被。阿尔泰狗娃花和斜茎黄芪的重要值在处理

间没有显著差异。

2.4 植物多样性

如图5所示,灌溉、补播当年和补播第四年草地的香农-维纳多样性指数、物种丰富度和均匀度指数均显著($P<0.01$ 或 $P<0.001$)高于原生植被。此外,补播当年草地香农-维纳指数显著($P<0.01$)高于灌溉,补播当年草地均匀度指数显著($P<0.01$)高于补播第四年。

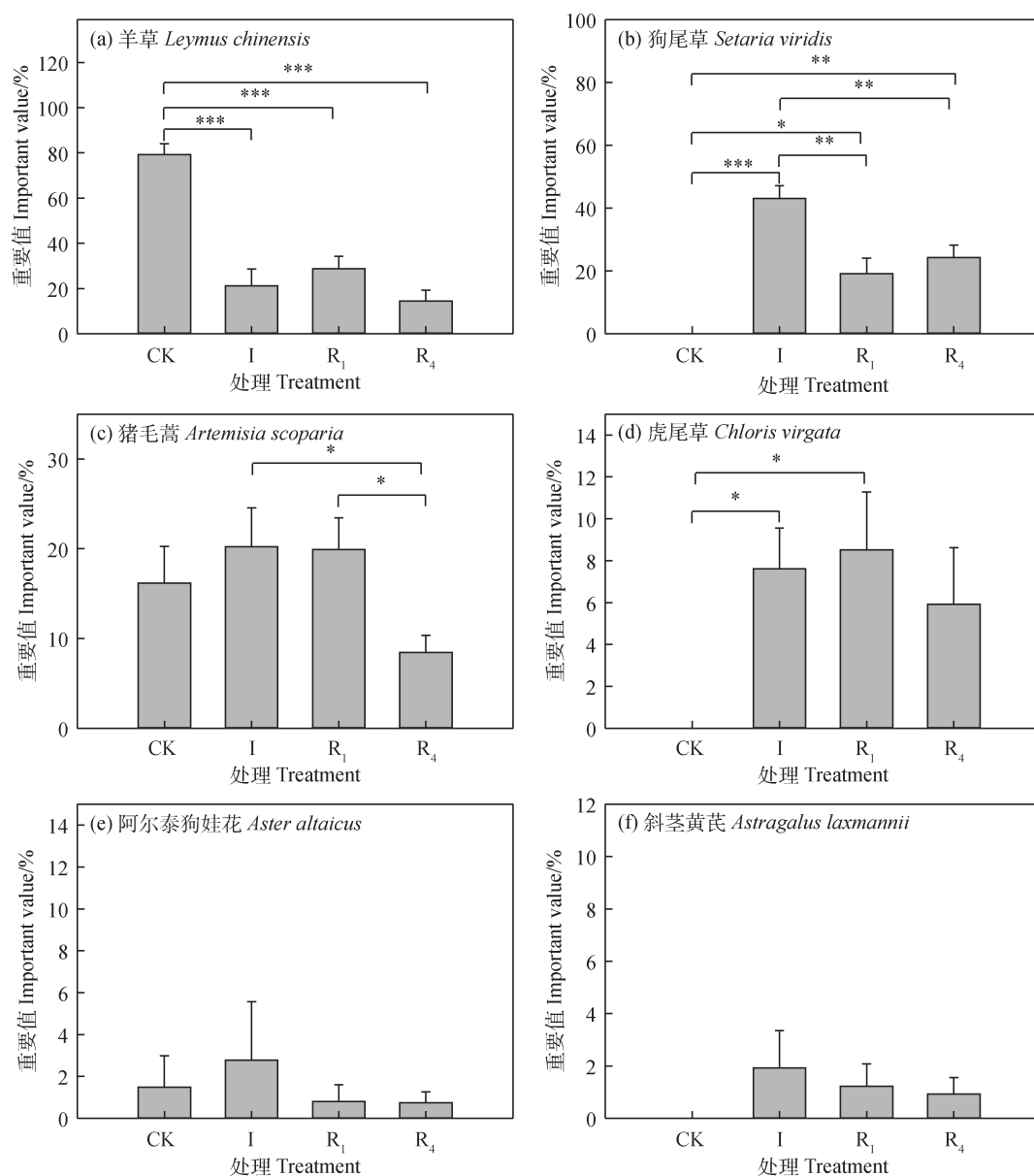


图 4 不同草地修复措施对主要物种重要值的影响

Fig. 4 Effects of different grassland restorations on important value of main species in the sward

2.5 可提供牧草营养品质

如图 6 所示,补播第四年草地可提供牧草的粗蛋白含量显著 ($P < 0.001$ 或 $P < 0.01$) 高于原生植被、灌溉和补播当年。原生植被和灌溉草地可提供牧草中性洗涤纤维含量显著 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$) 高于补播第四年草地。补播第四年草地可提供牧草酸性洗涤纤维含量显著 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$) 高于原生植被和补播当年。可提供牧草干物质消化率在处理间没有显著差异。

2.6 补播紫花苜蓿生长状况

如表 1 所示,补播第四年草地紫花苜蓿的盖度、高度、生物量和重要值显著 ($P < 0.001$ 或 $P < 0.01$) 高于补播当年,但紫花苜蓿的密度在两者间没有显著差异;补播第四年草地紫花苜蓿重要值达 44.9%,是补播当年的 2.17 倍。此外,补播第四年草地紫花苜蓿的粗蛋白含量和干物质消化率显著 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.001$) 低于补播当年,但中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量显著 ($P < 0.001$ 或 $P < 0.01$) 高于补播当年。

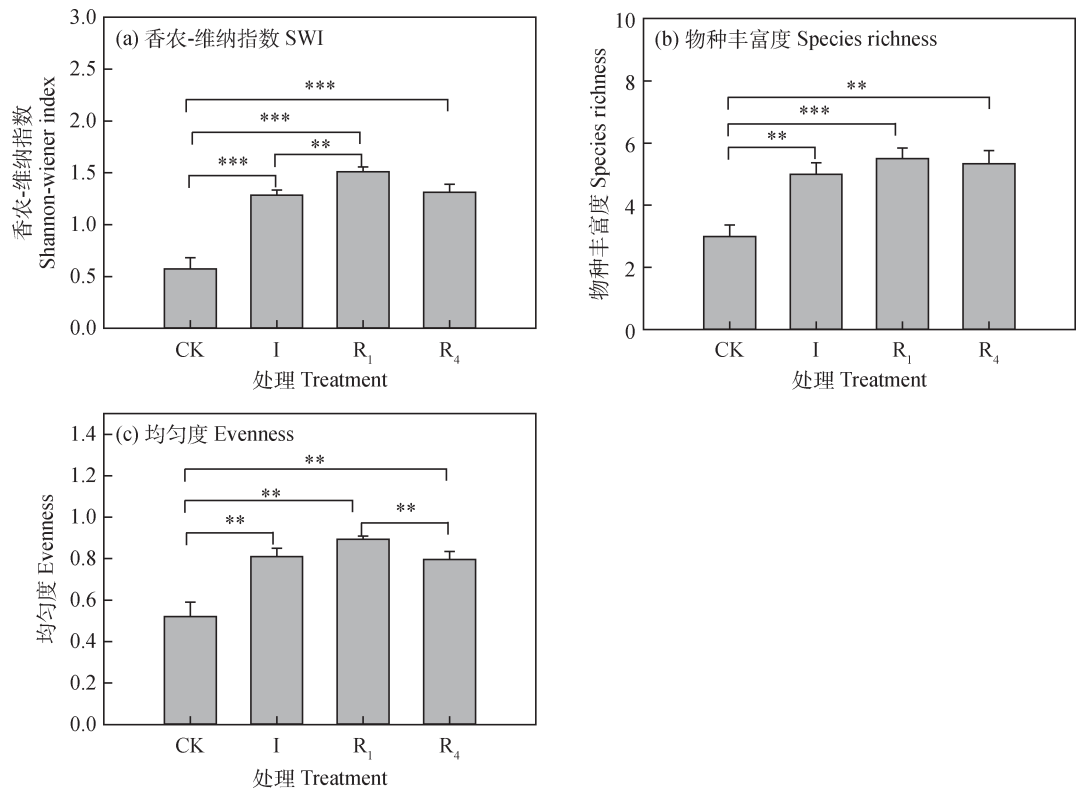


图 5 不同草地修复措施对香农-维纳指数(a),物种丰富度(b)和均匀度(c)的影响

Fig. 5 Effects of different grassland restorations on Shannon-wiener index (SWI, a), species richness (b) and evenness (c)

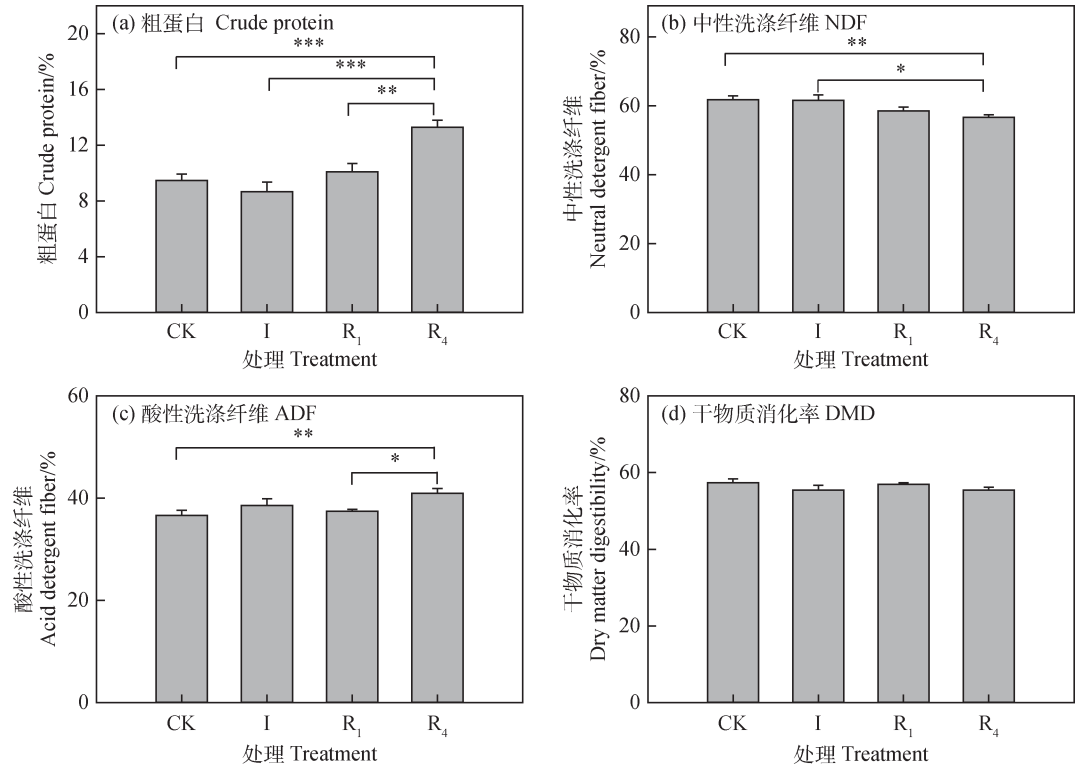


图 6 不同草地修复措施对可提供牧草粗蛋白含量(a),中性洗涤纤维含量(b),酸性洗涤纤维含量(c)和干物质消化率(d)的影响

Fig. 6 Effects of different grassland restorations on concentration of crude protein (a), neutral detergent fiber (NDF, b) and acid detergent fiber (ADF, c) and dry matter digestibility (DMD, d) of herbage that offered

表 1 补播当年和补播第四年紫花苜蓿数量特征和营养特征的比较

Table 1 The comparison of quantity and quality characteristics of *Medicago sativa* reseeded in the first year and the fourth year

指标 Index	补播当年 The first year of reseeded	补播第四年 The fourth year of reseeded	P 值 P-value
数量特征 Quantity characteristics			
盖度 Coverage/%	20.8±3.90	58.8±5.15	<0.001
高度 Height/cm	26.9±2.78	45.6±3.44	0.002
密度 Density/(株·m ⁻²)	240.7±62.51	204.7±30.38	0.620
生物量 Biomass/(g·m ⁻²)	51.7±14.52	354.4±40.58	<0.001
重要值 Important value/%	20.7±3.26	44.9±4.54	0.001
营养特征 Quality characteristics			
粗蛋白 Crude protein/%	16.6±0.75	14.1±0.37	0.013
中性洗涤纤维 NDF/%	47.9±0.64	53.8±1.36	0.003
酸性洗涤纤维 ADF/%	34.7±0.77	41.5±1.18	<0.001
干物质消化率 DMD/%	62.0±0.88	55.3±1.02	<0.001

2.7 草地植被特征对修复措施响应的多元分析

如图 7 所示,冗余分析(RDA)结果显示,前两个轴对植被特征各变量的解释度累计为 72.4% ($F=20.590$, $P=0.002$)。在 RDA1 轴上载荷 > |0.5| 的变量包括群落生物量,羊草、狗尾草、虎尾草

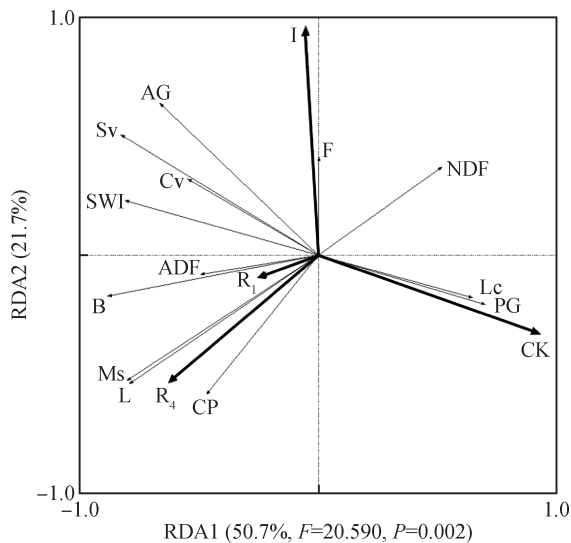


图 7 草地植被特征与修复措施的冗余分析排序

Figure 7 Redundancy analysis (RDA) ordination of vegetation community structure and restoration measures

注:Lc-羊草的重要值,Cv-虎尾草的重要值,Sv-狗尾草的重要值,Ms-紫花苜蓿的重要值,B-群落生物量,PG-多年生禾草干重比例,AG-一年生禾草干重比例,L-豆科草干重比例,F-杂类草干重比例,CP-粗蛋白含量,NDF-中性洗涤纤维含量,ADF-酸性洗涤纤维含量,SWI-香农-维纳指数

Note: Lc-important value (IV) of *Leymus chinensis*, Cv-IV of *Chloris virgata*, Sv-IV of *Setaria viridis*, Ms-IV of *Medicago sativa*, B-vegetation biomass, PG-dry weight proportion (DWP) of perennial grass, AG-DWP of annual grass, L-DWP of legume, F-DWP of forb, CP-concentration of crude protein, NDF-concentration of neutral detergent fiber, ADF-concentration of acid detergent fiber, SWI-shannon-wiener index

和紫花苜蓿的重要值,一年生禾草、多年生禾草和豆科草的干重比例,以及中性洗涤纤维含量和香农-维纳指数;在 RDA2 轴上载荷 > |0.5| 的变量包括狗尾草、紫花苜蓿的重要值,一年生禾草和豆科草的干重比例,以及粗蛋白含量。围栏封育草地和补播第四年草地分别分布在 RDA1 轴的左右两侧,补播第四年草地和灌溉草地分别分布在 RDA2 轴的上下两侧,说明补播第四年草地的植被特征分别与围栏封育草地和灌溉草地有明显差异。具体而言,围栏封育对多年生禾草的干重比例和羊草的重要值具有较大的正向效应,对香农-维纳指数具有较大的负向效应;灌溉对一年生禾草的干重比例及狗尾草的重要值具有较大的正向效应;补播第四年主要通过增加紫花苜蓿重要值进而提高了豆科草干重比例、群落水平生物量和可提供牧草粗蛋白含量。

3 讨论

风沙草滩生态环境恶劣、植物立地条件差,严重制约牧草生长,其中水分匮乏是限制补播牧草定植和生长的关键因素^[14]。在西北地区温性草原的研究表明,喷灌补水与免耕补播相结合可显著提升修复效果^[15]。因此,本研究在灌溉的基础上进行补播修复。从生产力角度而言,与长期围栏封育草地相比,灌溉及在灌溉基础上补播紫花苜蓿均在修复当年通过增加群落密度和盖度使生物量显著提高(图 2d);除了增加群落的密度和盖度,补播第四年草地还通过增加群落高度使生物量显著提高。从生态环境改善的角度而言,长期围栏后风沙草滩植被依旧稀疏、植被覆盖度仅 63.4%,而施用灌溉和补播措施后,修复当年植被盖度即可达 98% 以上

(图2b),植被密度增加了1倍以上(图2c),其防风固沙和水土保持功能得到显著改善^[8]。以上结果表明,该地区仅依靠围栏封育的自然恢复措施进程较为缓慢,有必要结合人工干预措施加速生态修复。

从生产力构成的角度而言,与围栏封育草地相比,灌溉主要通过促进一年生禾草(尤其是狗尾草)和杂类草的生长显著提高水平生物量(图3和图7),但多年生禾草(主要是羊草)的生物量显著降低。这一现象与一年生禾草仅靠种子繁殖的特性相关,水分的添加可激活土壤种子库促进植被的更新^[16-17],但对多年生禾草的促进作用有限^[18]。天然草原中的研究也发现,一、二年生草本植物作为典型的机会主义者,对水分变化极为敏感,当水分条件适当时迅速萌发生长^[19],在正常降雨和丰雨年份可成为群落的亚优势种甚至是优势种,对草地生态系统稳定性的维持产生不利影响。此外,一年生植物生长迅速,在生长季早期就进入生殖生长期、营养品质快速下降,影响放牧家畜采食,导致草地利用率下降。因此,仅实施灌溉修复促进了一年生禾草和杂类草的生长,对多年生禾草起到抑制作用,难以使植被有效恢复。

与单纯灌溉相比,在灌溉的基础上补播紫花苜蓿并未使地上生物量显著增加,说明尽管在有灌溉措施的情况下,紫花苜蓿在补播当年并未表现出显著的产量优势,这与前人在山地草甸和沙化草地的研究结果相似^[20-21]。此外,补播当年草地豆科牧草比例较单纯灌溉显著提高(达21.78%)、一年生禾草比例显著降低(降低至25.94%),且使多年生禾草比例提高了近1倍(图3a),说明紫花苜蓿在草地中的定植占据了部分生态位,对一年生禾草的生长起到了抑制作用,有利于优化群落结构;前人在我国北方温性草原的研究也表明,紫花苜蓿可以通过增加土壤养分有效性、提高土壤微生物活性等途径使优质牧草所占比例增加^[22-24]。以上结果表明,该地风沙草滩由优良牧草(尤其是多年生禾草)土壤种子库或无性繁殖驱动的植被更新过程严重受阻,在灌溉的基础上通过免耕补播将优质牧草重新引入退化草原是十分必要的。

多数研究发现,受退化草原环境条件恶劣、补播草种选择不当等不利因素的影响,补播草种在免耕环境下易受到原生植被的竞争排除作用,且随补播年限的增加,补播草种因生活力降低而逐年衰退,甚至从植被中消失,严重制约了免耕补播技术

的推广应用^[9,25]。但本研究中补播第四年草地群落生物量达5321 kg·hm⁻²,分别是长期围栏封育、灌溉和补播当年草地的5.58、2.63和2.41倍(图2d),且有67.78%的生物量由补播草种紫花苜蓿贡献(图3);冗余分析的结果也表明,补播第四年草地依赖较高的紫花苜蓿或豆科牧草比例与群落生物量显著正相关(图7)。同时,本研究中长期围栏封育草地植被稀疏、群落构成简单,物种丰富度仅为3种(图5b),而灌溉通过改善土壤水分状况促进了新物种(如狗尾草、虎尾草、斜茎黄芪等)的定植,显著提高植物多样性^[26]。尽管高比例豆科牧草可能通过改变资源分配模式(如光截获等)降低植物多样性^[27];本研究发现,紫花苜蓿在补播第四年草地中占有绝对优势,但其表征植物多样性的各项指标与灌溉和补播当年草地没有显著差异,且较长期围栏封育草地显著提高;表明在立地条件恶劣的风沙草滩,环境改善对物种共存的促进作用强于竞争抑制作用^[28]。以上结果表明,补播紫花苜蓿可在该地风沙草滩上长期维持并逐渐占据优势地位,在维持草地植物多样性的同时表现出了较高的生产潜力,可作为该地区生态修复的主要技术措施。

从补播紫花苜蓿种群特征的角度而言,补播第四年草地紫花苜蓿盖度、高度、生物量显著高于补播当年,但表征营养品质的各项指标均显著降低;在调查中发现补播当年和补播第四年紫花苜蓿分别处于分枝至现蕾期和盛花至结荚期,因此,产生以上差别的原因是两者生育时期的差异。此外,补播第四年草地紫花苜蓿在群落中占有绝对比例,群落水平可提供牧草粗蛋白含量显著高于其他处理,但其酸性洗涤纤维含量显著提高,干物质消化率与其他处理没有显著差异。以上结果表明,补播当年紫花苜蓿生长细弱缓慢、难以形成产量、利用价值有限,应以围栏封育为主;而补播第四年草地应在8月之前的初花期适时刈割,以充分利用当地水热和光照条件,进一步提高牧草产量和营养品质^[9]。

4 结论

通过灌溉及灌溉基础上的补播显著提高了草地的植物多样性和生产力,加速了风沙草滩的修复进程。但灌溉主要通过增加一年生禾草的生物量使群落水平生物量显著提高,对草地生态系统稳定性的维持构成潜在威胁,不利于草地的可持续利用。

在灌溉基础上补播紫花苜蓿当年有效优化了群落结构,显著增加豆科牧草比例;补播第四年草地群落生物量高达 $5321 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中紫花苜蓿贡献率达 67.78%,且植物多样性与灌溉和补播当年没有显著差异。因此,紫花苜蓿既能在补播草地中长期维持,又具备较高生产潜力,可作为该地区风沙草滩生态修复的主要技术措施。

本研究仅从草地植被的角度对灌溉和免耕补播的修复效果进行了评估,对土壤理化性质、碳固持等地力提升方面的改善有待进一步监测。同时,本研究是在灌溉的基础上进行的免耕补播修复,在无灌溉措施的情况下,需进一步从开沟播种工艺、保水材料使用等方面对免耕补播技术进行优化,以提升免耕补播技术应用的普适性。

参考文献

- [1] 唐海萍,陈蛟,房飞. 世界各国草地资源管理体制及其对我国的启示[J]. 国土资源情报,2014(10):9-17
TANG H P, CHEN J, FANG F. Grassland resource management system of main countries in the world and the enlightenments to our country [J]. Land and Resources Information, 2014(10):9-17
- [2] 陈佐忠,汪诗平. 中国典型草原生态系统[M]. 北京:科学出版社,2000:335
CHEN Z Z, WANG S P. Typical steppe ecosystem of China [M]. Beijing: Science Press, 2000:335
- [3] 国务院第三次全国国土调查领导小组办公室,自然资源部,国家统计局. 第三次全国国土调查主要数据公报[EB/OL]. <https://x.m.mnr.gov.cn/sj/sjfw/td19262/202108/t202108262678340.html>, 2021-08-25/2025-08-25
Office of the State Council Leading Group for the Third National Land Resource Survey, Ministry of Natural Resources, National Bureau of Statistics. Bulletin on the main data of the third national land survey [EB/OL]. <https://x.m.mnr.gov.cn/sj/sjfw/td19262/202108/t202108262678340.html>, 2021-08-25/2025-08-25
- [4] 黄麟,樊江文,杨智,等. 草原健康、退化与恢复一体化评估:概念与方法[J]. 科学通报,2024,69(15):2015-2024
HUANG L, FAN J W, YANG Z, et al. All-in-one assessment of grassland health, degradation, and restoration: The concepts and method [J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(15):2015-2024
- [5] KEMP D, HAN G, HOU F, et al. Sustainable management of Chinese grasslands-issues and knowledge[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2018, 5(1):9-23
- [6] 古琛,贾志清,杜波波,等. 中国退化草地生态修复措施综述与展望[J]. 生态环境学报,2022,31(7):1465-1475
GU C, JIA Z Q, DU B B, et al. Reviews and prospects of ecological restoration measures for degraded grasslands of China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 32(7):1465-1475
- [7] BOSSUYT B, HONNAY O. Can the seedbank be used for ecological restoration? An overview of seedbank characteristics in European communities [J]. Journal of Vegetation Science, 2008(19):875-884
- [8] 李以康,杜岩功,张正芝,等. 种子补播恢复退化草地研究进展[J]. 草地学报,2017,25(6):1171-1177
LI Y K, DU Y G, ZHANG Z Z, et al. Research progresses on seed reseeding to recover the degraded grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(6):1171-1177
- [9] 张英俊,周冀琼,杨高文,等. 退化草原植被免耕补播修复理论与实践[J]. 科学通报,2020,65(16):1546-1555
ZHANG Y J, ZHOU J Q, YANG G W, et al. Theory and application of no-tillage reseeding in degraded grasslands [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(16):1546-1555
- [10] 中国农业大学. 一种修复退化刈牧草地的原状覆播方法:中国, ZL 2024 1 0582026. 5[P]. 2025-12-12
China Agricultural University. A method for original-state over-seeding to rehabilitate degraded mowing-grazing grassland: China, ZL 2024 1 0582026. 5[P]. 2025-12-12
- [11] 边磊,张婷,庞同汇. 榆林市生态环境治理及其应用林草种类的变化——以榆阳区为例[J]. 陕西林业科技, 2022, 50(6):122-126, 131
BIAN L, ZHANG T, XI T H. The ecological environment governance in relation to the change of tree and grass applied in Yulin City—with Yuyang District as a case [J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2022, 50(6):122-126, 131
- [12] 陕西省林业局. 陕西榆阳:统筹推进草原生态修复 打造优质饲草供应区 [EB/OL]. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/cybhdt/532366.jhtml>, 2023-11-17/2025-08-25
Shaanxi Provincial Forestry Bureau. Yuyang, Shaanxi Province: Coordinated advancement of grassland ecological restoration to cultivate a high-quality forage supply zone [EB/OL]. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/cybhdt/532366.jhtml>, 2023-11-17/2025-08-25
- [13] 冯仰廉. 反刍动物营养学[M]. 北京:科学出版社,2004:163
FENG Y L. Ruminant Nutrition [M]. Beijing: Science Press, 2004:163
- [14] MARTIN L M, WILSEY B J. Assessing grassland restoration success: relative roles of seed additions and native ungulate activities [J]. Journal of Applied Ecology, 2006, 43(6):1098-1109
- [15] 冯兆林,秦丽萍,罗天旭,等. 不同修复措施对温性草原植被特征的影响[J]. 现代畜牧兽医, 2024(5):65-68
FENG T L, QIN L P, LUO T X, et al. Effects of different restoration measures on vegetation characteristics of the temperate steppe [J]. Modern Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2024(5):65-68
- [16] HARPOLE W S, POTTS D L, SUDING K N. Ecosystem responses to water and nitrogen amendment in a California grassland [J]. Global Change Biology, 2007, 13(11):2341-2348
- [17] 陈孟晨,张景光,刘立超,等. 生物土壤结皮对一年生植物影

- 响研究进展[J]. 中国沙漠, 2017, 37(3): 483-490
CHEN M C, ZHANG J G, LIU L C, et al. Advances and prospects for the effects of biological soil crusts on annual plants[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(3): 483-490
- [18] LÜ X T, LIU Z Y, HU Y Y, et al. Testing nitrogen and water co-limitation of primary productivity in a temperate steppe[J]. Plant and Soil, 2018, 432(1-2): 119-127
- [19] 张景光, 周海燕, 王新平, 等. 沙坡头地区一年生植物的生理生态特性研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 43-46
ZHANG J G, ZHOU H Y, WANG X P, et al. Physio-ecological characteristics of annual plants in Shapotou Region[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(4): 43-46
- [20] 王吉云, 孙宗玖, 安沙舟, 等. 补播对天然割草场植被恢复效果的初步研究[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(4): 690-695
WANG J Y, SUN Z J, AN S Z, et al. Primary studies on the resuming effect of reseeded on vegetational restoration of natural grassland[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2011, 48(4): 690-695
- [21] 郑华平, 陈子萱, 牛俊义, 等. 补播禾草对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(3): 28-33
ZHENG H P, CHEN Z X, NIU J Y, et al. Effects of interseeded on plant diversity and productivity in Maqu alpine desertified meadow[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(3): 28-33
- [22] 郭美琪, 郭童天, 徐民乐, 等. 补播苜蓿对退化草地植物群落结构和生产力的影响途径[J]. 草地学报, 2024, 32(1): 46-53
GUO M Q, GUO T T, XU M L, et al. Mechanism of reseeded alfalfa improving productivity and plant community structure of degraded grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(1): 46-53
- [23] 岳丽楠, 师尚礼, 祁娟, 等. 免耕补播对北方退化草地生产力及营养品质的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(11): 2583-2590
YUE L N, SHI S L, QI J, et al. Effects of no-tillage reseeded on productivity and nutritional quality of degraded grassland in Northern China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(11): 2583-2590
- [24] ZHOU J Q, ZHANG F G, HUO Y Q, et al. Following legume establishment, microbial and chemical associations facilitate improved productivity in degraded grasslands[J]. Plant and Soil, 2019, 443(1-2): 273-292
- [25] 贾慎修, 贾志海, 史德宽. 补播是改良退化草地的有效途径[J]. 草业科学, 1989(6): 8-10
JIA S X, JIA Z H, SHI D K. Reseeding is an effective approach for improving degraded grasslands[J]. Pratacultural Science, 1989(6): 8-10
- [26] OLFF H, RITCHIE M E, PRINS H H T. Global environmental controls of diversity in large herbivores[J]. Nature, 2002, 415(6874): 901-904
- [27] 周冀琼. 补播苜蓿对退化草地生产力和多样性的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2017: 47
ZHOU J Q. Effects of alfalfa reseeded on the productivity and diversity of degraded grassland[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017: 47
- [28] 阎子盟, 张玉娟, 潘利, 等. 天然草地补播豆科牧草的研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(29): 1-7
YAN Z M, ZHANG Y J, PAN L, et al. Research progress of reseeded forage legumes into natural grassland[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(29): 1-7

(责任编辑 付 宸)