

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第6期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.06.013

论文标题： 复合措施对祁连山温性草地植物群落特征及牧草营养品质的影响

作　　者： 雷 军，权金鹏，闫春鸣，等

收稿日期： 2025-08-02

引文格式： 雷军,权金鹏,闫春鸣,等.复合措施对祁连山温性草地植物群落特征及牧草营养品质的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(6):130-139.

LEI J, QUAN J P, YAN C M, et al. The effects of combined measures on the characteristics of plant communities and the nutritional quality of forage in the temperate grasslands of the Qilian mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):130-139.

相关论文推荐

Recommended articles

不同牧草间作模式对油茶林土壤真菌群落结构的影响

Effects of different herbage intercropping patterns on the soil fungal community structure in *Camellia oleifera* forest

色季拉山森林和草地土壤有机碳分子结构特征

Soil organic carbon molecular structures of the alpine forest and grassland in Sejila mountain

祁连山不同坡向草地蒸散量及其影响因子的分析

Study on grassland evapotranspiration at different slope orientation and its impact factors in Qilian mountains

武功山退化草甸不同植被恢复措施生长效果及适应性研究

Growth effects and adaptabilities of different vegetation restoration measures of degraded meadow in Wugong mountain

武功山山地草甸不同海拔高度土壤机械组成与养分特性关系

Relationship between soil mechanical composition and nutrient characteristics at different altitudes in mountain meadow of Wugong mountain

武功山草甸植被小群落土壤活性有机碳与土壤养分的典型相关分析

Canonical correlation analysis between soil active organic carbon and soil nutrient in different vegetation small communities of Wugong mountain alpine meadow

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.06.013 http: //qks.csuft.edu.cn

复合措施对祁连山温性草地植物群落特征及牧草营养品质的影响

雷 军[1]，权金鹏[1]，闫春鸣[1]，赵玉红[1]，权雅茹[2]，成彩霞[1]，刘明龙[1]，
苗毓鑫[1]，兰晓东[1]，王 军[3]，于伟华[1]

（1. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院，甘肃 张掖 734000；2. 张掖市生态环境局甘州分局，甘肃 张掖 734000；
3. 肃南裕固族自治县草原工作站甘肃，肃南 734400）

摘 要：【目的】祁连山退化天然草地生态系统的恢复提质，离不开复合措施的有力支撑。本研究旨在提高祁连山草地生产力和牧草品质，为生态恢复提供技术参考。【方法】采用草种组合补播、草种组合补播＋复合肥＋虫害防治的草地改良复合措施，研究其对草地生态系统物种多样性、草地生产力和牧草营养价值的影响。【结果】1）祁连山北麓温性草地植物群落在采取复合措施后，物种组成较对照草地有显著的提高；植被平均高度、草产量较对照都有显著提高，分别提高了 20.9% 和 56.8%；2）采用“草地早熟禾＋垂穗披碱草＋东农 1 号紫花苜蓿”加“细茎冰草”或“无芒雀麦”复合措施后，群落 Shannon-Wiener 多样性指数较对照有显著提高；“草地早熟禾＋垂穗披碱草”加“东农 1 号紫花苜蓿＋细茎冰草”或“老芒麦＋无芒雀麦”再加施氮磷钾复合肥和烟碱苦参碱防虫复合措施后，Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数显著增加；试验区群落的 Simpson 生态优势度指数与 Simpson 多样性指数较对照均无显著差异；3）采用“草地早熟禾＋垂穗披碱草”加“东农 1 号紫花苜蓿＋老芒麦”或“东农 1 号紫花苜蓿＋细茎冰草”或“细茎冰草＋甘引 1 号黑麦”3 种复合措施草地牧草粗蛋白较对照提高明显，分别提高了 30.2%、19.8% 和 32.7%；“草地早熟禾＋垂穗披碱草＋东农 1 号紫花苜蓿”加“甘引 1 号黑麦”或“老芒麦”或“细茎冰草”再加施氮磷钾复合肥和烟碱苦参碱防虫复合措施后，草地牧草粗蛋白含量相比对照显著提高，分别提高了 19.8%、47.7% 和 18.0%。【结论】“草地早熟禾＋垂穗披碱草＋东农 1 号紫花苜蓿＋细茎冰草”和该组合加施氮磷钾复合肥及烟碱苦参碱防虫复合措施表现最优，能够明显提升草地生产力与改善草地质量，极大地提升草地承载能力，为祁连山草地生态系统修复治理提供科学依据。

关键词：补播；施复合肥；防虫；群落特征；营养品质

中图分类号：S718.57 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)06-0130-10

The effects of combined measures on the characteristics of plant communities and the nutritional quality of forage in the temperate grasslands of the Qilian mountains

LEI Jun[1], QUAN Jinpeng[1], YAN Chunming[1], ZHAO Yuhong[1], QUAN Yaru[2], CHENG Caixia[1], LIU Minglong[1],
MIAO Yuxin[1], LAN Xiaodong[1], WANG Jun[3], YU Weihua[1]

（1. Academy of Water Resources Conservation Forest of Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye 734000, Gansu, China;
2. Ganzhou Branch of Zhangye Ecological Environment Bureau, Zhangye 734000, Gansu, China;
3. Sunan Yugur Autonomous County Grassland Work Station, Sunan 734400, Gansu, China)

Abstract:【Objective】The restoration and improvement of the degraded natural grassland ecosystem in the Qilian mountains rely heavily on the strong support of composite measures. This study aims to enhance grassland productivity and forage quality in the Qilian

收稿日期（Received）：2025-08-02 **修订日期**（Revised）：2025-11-23

基金项目：甘肃省省级生态文明建设重点研发专项（24YFFG002）；甘肃省自然科学基金项目（25JRRG028）；中央财政林草科技推广示范项目（甘（ 2023 ）ZYTG017 号）；张掖市市级科技计划项目（ZY2025KY05）。

第一作者：雷军（leijun0121@163.com），副研究员。 **通信作者：**权金鹏（jpquang@163.com），研究员，硕士研究生导师。

引文格式：雷军 , 权金鹏 , 闫春鸣 , 等 . 复合措施对祁连山温性草地植物群落特征及牧草营养品质的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2026,46(6):130-139.

LEI J, QUAN J P, YAN C M, et al. The effects of combined measures on the characteristics of plant communities and the nutritional quality of forage in the temperate grasslands of the Qilian mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):130-139.

mountains, providing technical references for ecological restoration.【Method】Compound measures for grassland improvement, including grass seed combination reseeding, reseeding with grass seed mixtures + compound fertilizer + pest control, were adopted to investigate their effects on species diversity, grassland productivity, and forage nutritional value in the grassland ecosystem.【Result】1) After adopting composite measures, the species composition of the temperate grassland plant community in the northern foothills of the Qilian mountains significantly improved compared to the control grassland; the average vegetation height and grass yield also significantly increased by 20.9% and 56.8%, respectively. 2) After adopting the combined measures of "*Poa pratensis* + *Elymus nutans* + Dongnong 1 alfalfa" plus "*Agropyron cristatum*" or "*Bromus inermis*", the Shannon-Wiener diversity index of the community significantly increased compared to the control. The combined measures of "*Poa pratensis* + *Elymus nutans*" plus "Dongnong 1 alfalfa + *Agropyron cristatum*" or "*Elymus sibiricus* + *Bromus inermis*" followed by the application of nitrogen, phosphorus, potassium compound fertilizer and nicotine-matrine insect control measures significantly increased the Pielou evenness index and Margalef richness index. The Simpson ecological dominance index and Simpson diversity index of the community in the experimental area showed no significant difference compared to the control; 3) After adopting the combined measures of "*Poa pratensis* + *Elymus nutans*" plus "Dongnong 1 alfalfa + *Elymus sibiricus*" or "Dongnong 1 alfalfa + *Agropyron cristatum*" or "*Agropyron cristatum* + Ganyin 1 rye", the crude protein content of the grassland forage significantly increased compared to the control, by 30.2%, 19.8% and 32.7%, respectively. After adopting the combined measures of "*Poa pratensis* + *Elymus nutans* + Dongnong 1 alfalfa" plus "Ganyin 1 rye" or "*Elymus sibiricus*" or "*Agropyron cristatum*" followed by the application of nitrogen, phosphorus, potassium compound fertilizer and nicotine-matrine insect control measures, the crude protein content of the grassland forage significantly increased compared to the control, by 19.8%, 47.7% and 18.0%, respectively.【Conclusion】The combination of "Kentucky bluegrass + *Elymus nutans* + Dongnong No.1 alfalfa + *Agropyron cristatum*" and the application of nitrogen, phosphorus, and potassium compound fertilizer and nicotine-matrine insect control measures performed optimally, significantly enhancing grassland productivity and improving grassland quality, greatly increasing grassland carrying capacity, and providing a scientific basis for the restoration and management of the Qilian mountain grassland ecosystem.

Keywords: reseeding; applying compound fertilizer; pest control; community characteristics; nutritional quality

草地生态系统作为陆地生态系统的主体类型之一，是人类生存和生产的重要环境，在陆地生态系统碳循环过程中起着关键性作用，对维持陆地生态系统、地球生物圈的稳定和平衡具有重要意义[1-2]。近年来，因人为干扰、过度放牧、大气CO_2浓度升高等因素以及生物和非生物环境的改变，引起了草地生态系统的显著变化[3]。目前中国约有90%的天然草地处于不同程度的退化状态，其中严重退化草地占60%以上[4]。越来越多的研究发现，草地退化导致草地生态系统物种多样性和基于功能性状的功能多样性减少，使草地生态系统的功能改变，从而影响其稳定和发展[5-7]。祁连山地区位于青藏高原东北缘，是我国西北地区重要的生态安全屏障[8]。温性草原作为祁连山地区最重要的草原植被类型之一，由于高海拔、低温、低压及强紫外线等环境特点，其生态系统极为敏感且脆弱[9]。近几十年来，在诸多人为和自然因素的共同影响下，祁连山草地发生了严重退化，植物及土壤质量衰退，生产力、经济潜力及服务功能减弱，恢复功能降低[10]。因此，研究祁连山退化草地生态修复治理措施对草地生物多样性、草地承载力和草地质量的影响，有利于祁连山草地生态系统的可持续发展。

补播是退化天然草地最主要的生态恢复措施之一，在草地管理中受到了国内外的高度重视[11]。补播是在不破坏或少破坏原有草地植被的情况下，通过植入适合当地环境条件、饲用价值高的牧草品种，以改善草地植被组成和架构，达到提高草地产量与品质的目的。目前，我国通过补播改良的草地面积约占改良草地面积的2/3[12]。研究表明，补播后草地的植物种类、植被高度、盖度及群落物种多样性均呈现不同程度的增加，草地品质及产草量大幅度提高[13-15]。补播可改善草地植物群落结构，增强优良牧草的竞争优势，抑制部分劣质、有毒草生长，能提高可利用草产量和质量，草地植被群落稳定性进一步增强[16]。但也存在一些问题，补播物种与原有植物生态位重叠明显，易抑制乡土物种生长，降低群落稳定性[17]。且退化草地土壤紧实、水分匮乏、杂草竞争强烈及鼠虫危害等，导致补播种子萌发率和幼苗成活率普遍偏低，难以实现自然正向演替[18]。学者研究表明，环境改变或人为扰动对群落生产力有重要作用[19]，施肥是调节草地牧草产量的关键因子[20]。诸多研究表明，施肥明显改变了植物的繁殖分配策略，使个体高大、能快速吸收营养的物种获得竞争优势，低矮物种处于劣势，易被淘汰出群落，这是选择效应作用的结果[21]。施肥正响应降低了物种的生态位重叠，减少了物种间的环境竞争，促进了物种共存，使牧草产量增加[22]。崔阁英等[23]在退化天然草地补播鸭茅*Dactylis glomerata*+多年生黑麦草*Loloum perenne*+多花黑麦草*Lolium multiflorum*+白三叶*Trifolium repens*，发现补播能提高植被盖度、高度、密度和鲜产草量，

降低杂草类比例；李梦瑶等[24]补播东非狼尾草 *Pennisetum clandestinum*+ 鸭茅 + 多年生黑麦草 + 白三叶进行天然草地改良，发现补播能提高牧草产量、优质牧草禾本科和豆科所占比例；张明均等[25]在贵州牧草种籽繁殖场的天然草地进行扁穗雀麦 *Bromus catharticus*+ 多年生黑麦草 + 鸭茅 + 紫花苜蓿 *Medicago sativa*+ 白三叶补播改良，发现补播可改善天然草地植被的草质和覆盖度，提高鲜草产量；孙波等[26]采用施肥 + 打孔 + 补播、施肥 + 绵羊宿营 + 补播、施肥 + 切根 + 补播 3 种复合措施使草地的物种丰富度、产草量（鲜）和豆科牧草比例均显著提高，杂类牧草比例极显著降低。以上改良措施都起到了良好的效果，而针对祁连山草地采取复合措施对退化天然草地进行改良恢复的研究尚未见报道。

草地牧草营养价值主要通过牧草的粗蛋白、粗纤维和粗脂肪等关键指标的含量水平来衡量[27]。在牧草营养价值的研究中，由于各种牧草种类和生育期不一致，导致其综合营养价值呈现不同的规律。研究表明，不同草地类型牧草营养成分差异较大，不同季节草场的牧草营养价值不同[28-30]。因此，牧草的营养与植被类型紧密相关，但草地在人为干扰的情况下，牧草营养成分存在何种差异以及草地植被群落多样性、结构稳定性及草地营养状况尚不清楚。本研究选择祁连山北麓温性草地为对象，通过人工补播不同草种组合，并加以施用氮磷钾复合肥和病虫害防治复合措施，研究其对草地生态系统物种多样性、草地生产力和牧草营养价值的影响，以期为祁连山退化草地人工修复、草地畜牧业高质量发展提供技术支撑。

1 试验区概况与方法

1.1 试验区概况

试验区位于祁连山北麓河西走廊中部，山丹军马场三场（101°03′21.2″E，38°14′18.1″N），海拔约 2 800 m，属大陆性半湿润草原气候，年平均气温 0.2 ℃，年平均无霜期 105 d，年平均生长期 100 d，年平均日照时间 2 823 h，年平均降水量 388 mm。试验区属于温性草原，以天然牧草为主，土壤质地为砂质，主要植被为草地早熟禾 *Poa pratensis*、垂穗披碱草 *Elymus nutans*、苔草 *Carex liparocarpos*、委陵菜 *Potentilla chinensis*、车前 *Plantago asiatica*、冷蒿 *Artemisia frigida*、针茅 *Stipa capillata* 和小叶柴胡 *Bupleurum tenue* 等，草原利用方式为冬季放牧，虫害中度危害，为轻度退化草原。

1.2 试验材料

1.2.1 补播草种

选择适应性强、耐盐碱、耐干旱的草种草地早熟禾、垂穗披碱草、老芒麦 *Elymus sibiricus*、细茎冰草 *Elymus trachycaulus*、无芒雀麦 *Bromus inermis* 和抗寒、高产、营养价值高的东农 1 号紫花苜蓿、甘引 1 号黑麦 *Secale cereale* 为补播草种。细茎冰草、老芒麦、垂穗披碱草、无芒雀麦、草地早熟禾种子均购自北京鼎鑫嘉禾生态工程科技有限公司；东农 1 号紫花苜蓿购自东北农业大学；甘引 1 号黑麦草购自甘肃普瑞拓农业科技有限公司，种子净度均在 95% 以上，发芽率＞ 90%，水分含量＜ 12%。

1.2.2 NPK 复合肥

NPK 复合肥购自甘肃旺达绿禾肥业有限责任公司，N、P、K 含量分别为 15%、15% 和 15%。

1.2.3 烟碱苦参碱

1.2% 烟碱苦参碱是内蒙古帅旗生物科技股份有限公司生产的植物源杀虫剂。

1.3 试验设计

本试验选择祁连山温性草原，采用多因素组合设计，共设置 12 个处理组与 1 个空白对照组（CK）。其中，牧草混播组合设计为 6 种搭配模式，基础组合以祁连山区长期应用草地补播改良适应性强的优良品种“草地早熟禾 + 垂穗披碱草”为核心，结合实践经验分别复配“东农 1 号 + 甘引 1 号”“东农 1 号 + 老芒麦”“东农 1 号 + 细茎冰草”“东农 1 号 + 无芒雀麦”“细茎冰草 + 甘引 1 号”“老芒麦 + 无芒雀麦”，形成 A1 ～ A6 组；根据近年退化草原修复改良实践优选出的适宜肥料与防虫药剂并设置“无添加”和“添加”2 个水平（具体试验组合及物种用量见表 1）。试验 A 区设 6 个试验小区，每个试验小区选择 4 个草种按照 1∶1∶1∶1 的比例混合播种；试验 B 区设 6 个试验小区，每个试验小区选择 4 个草种按照 1∶1∶1∶1 的比例混合播种，同时配合施用 NPK 复合肥和喷施 1.2% 烟碱苦参碱防虫来验证草地补播改良效果。试验 A 区和 B 区相隔 10 m，每个试验区内的试验小区相隔 5 m，试验区内环境条件一致。试验于 2023 年 6 月进行免耕补播，试验 A 区按照播种量混合均匀后撒播，B 区按照播种量和施肥量混合均匀后撒施草种和肥料，7 月初喷施 1.2% 烟碱苦参

碱防治草原虫害。在同一试验年，生境大致相同的地块设置重复，每个处理 3 个重复，共 36 个试验单元，每个试验单元 2 000 m^2。每个试验小区 5 m 外设置对照（CK），不进行补播、施肥、防治虫害，自然生长。免耕补播采用撒播方式，在集中雨季来临前进行，撒播后放牧羊群进行适度践踏，有效促进种子顺利萌发。试验区采用围栏封育，当年生长期内禁止放牧和相关人为活动。

表 1　试验组合及牧草播种量
Table 1　Experimental combination and forage seeding rate

代号 Code	试验组合 Combination of tests	牧草播种量 Grass seed sowing amount /(kg·hm^{-2})	氮磷钾复合肥 Nitrogen-phosphorus-potassium compound fertilizer /(kg·hm^{-2})	1.2% 烟碱苦参碱 1.2% nicotine matrine /(L·hm^{-2})
A1	草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 甘引 1 号			
A2	草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 老芒麦			
A3	草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 细茎冰草		0	0
A4	草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 无芒雀麦			
A5	草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 细茎冰草 + 甘引 1 号			
A6	草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 老芒麦 + 无芒雀麦			
B1	草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 甘引 1 号 + 氮磷钾复合肥 +1.2% 烟碱苦参碱	30（草种比例 1∶1∶1∶1）		
B2	草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 老芒麦 + 氮磷钾复合肥 +1.2% 烟碱苦参碱			
B3	草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 细茎冰草 + 氮磷钾复合肥 +1.2% 烟碱苦参碱			
B4	草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 无芒雀麦 + 氮磷钾复合肥 +1.2% 烟碱苦参碱		225	1.5
B5	草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 细茎冰草 + 甘引 1 号 + 氮磷钾复合肥 +1.2% 烟碱苦参碱			
B6	草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 老芒麦 + 无芒雀麦 + 氮磷钾复合肥 +1.2% 烟碱苦参碱			

1.4　样品采集及测定方法

2025 年 9 月中旬，在每个试验单元中，随机设置 3 个 1 m^2（1 m×1 m）的样方（用棉线分隔成 100 个 10 cm×10 cm 的小方格），采用针刺法测定盖度，使用样圆法测定频度 [31]，在 1 m^2 的样方中分别记录每个物种的个数作为物种多度，用钢卷尺测量每个物种的高度（至少测量 5 株取平均值，不足 5 株按实际株数测量）。将样方内 0.25 m^2 的所有植物齐地刈割，装入牛皮纸袋带回实验室，先 105 ℃杀青 20 min，然后在 65 ℃的烘箱中烘干 72 h 至恒质量后称取质量，记录各样方的地上生物量及干草质量。

采集的草样待烘干、粉碎后进行牧草营养测定。牧草粗蛋白质（Crude protein，CP）含量采用凯氏定氮法测定，中性洗涤纤维（Neutral detergent fiber，NDF）成分测定采用范氏（Van Soest）洗涤纤维法测定 [32]。粗纤维（Crude fiber，CF）成分的测定采用酸碱消煮法测定 [33]。

1.5　物种多样性计算

重要值 =（相对盖度 + 相对高度 + 相对频度）/3　（1）

Simpson 多样性指数

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (2)$$

Shannon-Wiener 多样性指数

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \quad \text{式中 } P_i = n_i / N \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数

$$E = \frac{\sum P_i \ln p_i}{\ln s} \quad (4)$$

Simpson 生态优势度指数

$$S = \sum n_i (n_i - 1) / N(N - 1) \quad (5)$$

Margalef 丰富度指数

$$F = (s - 1) / \ln N \quad (6)$$

式中：P_i 为种 i 的相对重要值（相对高度 + 相对盖度）；s 为种 i 所在样方的物种总数；n_i 为第 i 个种的个体数；N 为所有种的个体数。

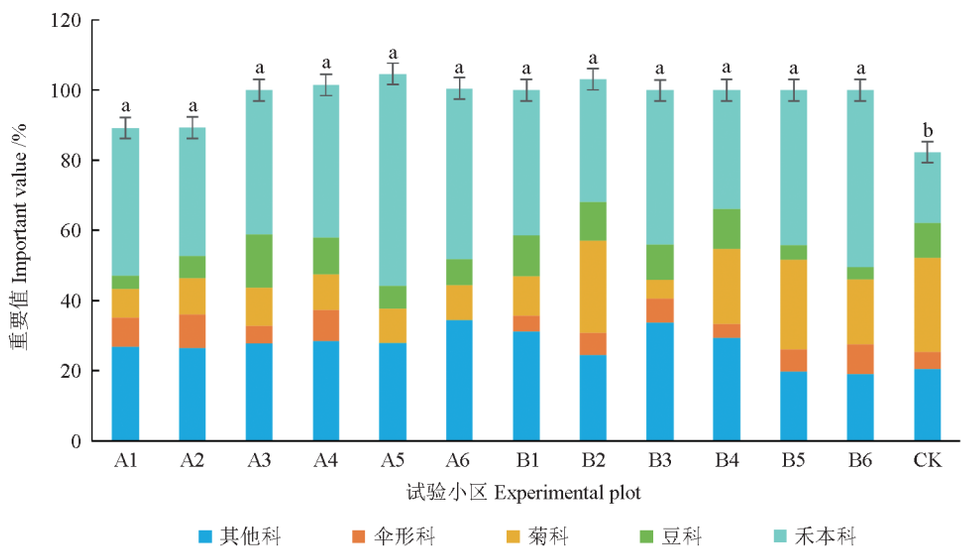
1.6　数据分析与处理

采用 Excel 2019 软件对数据进行均值、重要值和群落多样性指数等数据处理，并制作图表。运用 SPSS 26.0 统计软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA），并进行多重比较，结果用平均值 ± 标准差表示，$P < 0.05$ 表示试验组间差异显著性。

2　结果与分析

2.1　不同复合措施对植物群落组成的影响

在试验区内共出现 52 种植物，群落的优势植物为垂穗披碱草、草地早熟禾和苔草。采用不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫复合措施对祁连山草地原有植物物种数和物种组成产生了较大的影响（图 1）。A 区 6 个草种组合补播试验草地植物群落中禾本科的重要值为 47.18%，豆科的重要值为 8.29%，菊科的重要值为 9.95%，其他科的重要值为 36.74%；B 区 6 个草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫复合措施草地植物群落中禾本科的重要值为 41.41%，豆科的重要值为 8.92%，菊科的重要值为 18.06%，其他科的重要值为 32.39%。采取不同复合措施后，禾本科、豆科和其他科重要值较对照草地显著提高，菊科较对照有明显降低。试验样地的物种数（16 种）较对照样地（12 种）更多，主要以禾本科、豆科和菊科为主，而对照组的样地主要以禾本科和菊科为主。



不同字母表示不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫试验间差异显著（$P < 0.05$）。下同。
Different letters indicate significant differences among different grass species combinations, as well as between treatments of different grass species combinations combined with N-P-K compound fertilizer and nicotine-matrine for insect control ($P < 0.05$). The same below.

图 1　不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫复合措施主要科重要值

Fig. 1　Main family importance values of different grass species combinations, different grass species combinations + compound fertilizer containing nitrogen, phosphorus, and potassium + nicotine and matrine insect control combined measures

2.2　不同复合措施对植物高度及产草量的影响

不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫试验对草地植物平均高度和产草量都有显著的影响，植物平均高度较对照有显著提高（$P < 0.05$），提高了 20.9%。产草量在不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫试验草地较对照均显著增加（$P < 0.05$），增加了 56.8%。其中，不同草种组合 A3、A4 和 B3 试验产草量较对照增加最多，分别增加了 94.9%、92.1% 和 101.1%（图 2）。

2.3　不同复合措施对植物群落多样性的影响

采用不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫复合措施对群落的多样性方面均有一定的影响。由表 2 可以看出，不同草种组合 A3、A4、A6 群落 Shannon-Wiener 多样性指数较其他处理和对照显著提高（$P < 0.05$）；Pielou 均匀度指数 A3、A6 草种组合明显高于其他处理和对照，显著提升了物种分布的均匀性；Margalef 丰富度指数 B2、B3、B6 三种组合试验明显较高，物种丰富度显著增加；不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫试验区和对照区群落的 Simpson 生态优势度指数与 Simpson 多样性指数在所有处理间均无显著差异。虽然施肥和防虫措施使一些原有植物借助残留在土壤中的根系等无性繁殖器官得以恢复，但恢复时间较短，导致不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫复合措施和对照草地物种多样性、生态优势度均无显著变化。

2.4　不同复合措施对草地牧草营养品质影响

不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合

肥＋烟碱苦参碱防虫复合措施对草地牧草粗蛋白、粗纤维、中性洗涤纤维含量均有明显的影响（图3）。其中 6 种草种组合相比对照，牧草粗蛋白含量均有所提高，其中 A2、A3 和 A5 显著提高（$P < 0.05$），分别提高了 30.2%、19.8% 和 32.7%；采取不同草种组合＋氮磷钾复合肥＋烟碱苦参碱防虫复合措施后相比对照，牧草粗蛋白含量 B1、B2 和 B3 显著提高，分别提高了 19.8%、47.7% 和 18%（$P < 0.05$）；采取不同草种组合与不同草种组合＋氮磷钾复合肥＋烟碱苦参碱防虫试验之间相比牧草蛋白质含量无显著差异。牧草粗纤维含量试验 A3、A4、B1、B2 和 B3 较对照有显著降低（$P < 0.05$），分别降低了 9.4%、9.8%、12.1%、12.8% 和 11.4%；牧草中性洗涤纤维含量试验 A1、A3 和 B2 较对照有显著降低（$P < 0.05$），分别降低了 6.1%、17.5% 和 5.4%。

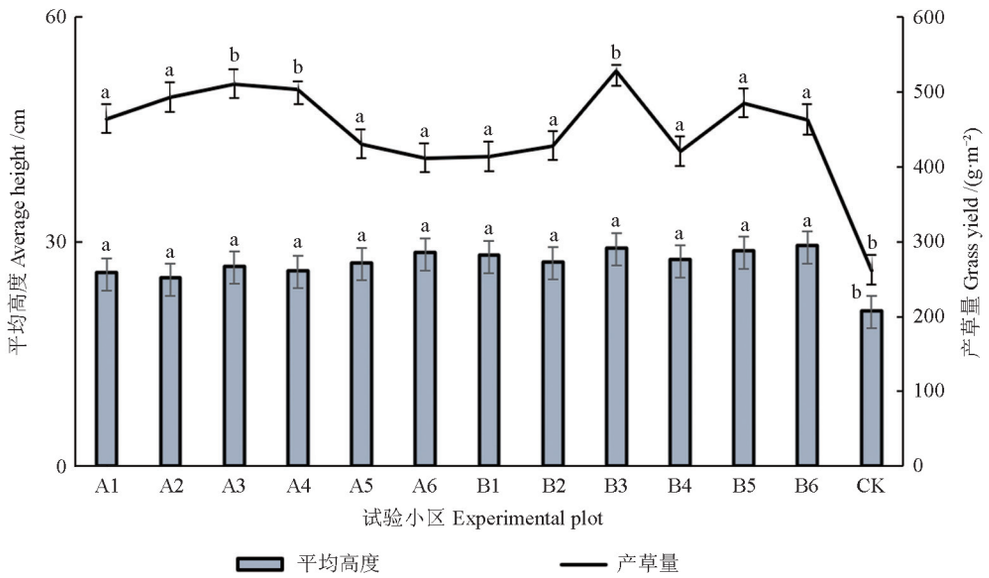


图 2　不同草种组合、不同草种组合＋氮磷钾复合肥＋烟碱苦参碱防虫草地植物平均高度及产草量

Fig. 2　Average height and grass yield of grassland plants with different combinations of grass species, different combinations of grass species+NPK compound fertilizer+nicotine matrine for insect control

表 2　不同草种组合、不同草种组合＋氮磷钾复合肥＋烟碱苦参碱防虫试验区物种多样性指数 †

Table 2　Species diversity index of different grass species combinations, different grass species combinations+NPK compound fertilizer+nicotine matrine pest control experimental area

处理 Treatment	Simpson 生态优势度指数（S）	Simpson 多样性指数（D）	Shannon-Wiener 多样性指数（H）	Pielou 均匀度指数（E）	Margalef 丰富度指数（F）
A1	0.077±0.02 a	0.923±0.06 a	1.487±0.14 a	0.580±0.04 a	2.931±0.63 a
A2	0.079±0.04 a	0.921±0.07 a	1.577±0.15 a	0.635±0.06 a	2.881±0.58 a
A3	0.097±0.05 a	0.903±0.06 a	2.012±0.33 b	0.784±0.05 b	2.919±0.62 a
A4	0.075±0.03 a	0.925±0.08 a	1.884±0.29 b	0.679±0.05 a	3.593±0.77 a
A5	0.081±0.04 a	0.919±0.05 a	1.676±0.19 a	0.604±0.06 a	3.433±0.75 a
A6	0.089±0.04 a	0.911±0.07 a	1.919±0.38 b	0.709±0.08 b	3.342±0.70 a
B1	0.070±0.03 a	0.930±0.11 a	1.557±0.16 a	0.550±0.03 a	3.672±0.81 a
B2	0.066±0.01 a	0.934±0.13 a	1.477±0.13 a	0.493±0.02 a	4.244±0.95 b
B3	0.078±0.02 a	0.922±0.10 a	1.511±0.15 a	0.533±0.02 a	4.041±0.92 b
B4	0.066±0.01 a	0.934±0.15 a	1.692±0.22 a	0.586±0.03 a	3.858±0.82 a
B5	0.065±0.02 a	0.935±0.19 a	1.599±0.19 a	0.534±0.04 a	4.233±0.98 b
B6	0.068±0.03 a	0.932±0.14 a	1.554±0.16 a	0.528±0.03 a	3.641±0.78 a
CK	0.067±0.02 a	0.933±0.12 a	1.488±0.11 a	0.599±0.04 a	2.496±0.60 a

† 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。
Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$).

3　讨　论

补播是退化草地植被恢复最有效的方法之一，通过补播可以改变草地生态系统的微环境和资源状况，从而改变物种间竞争格局，影响草地群落生产力，最直接的表现为地上植被生物量的变化[34]。

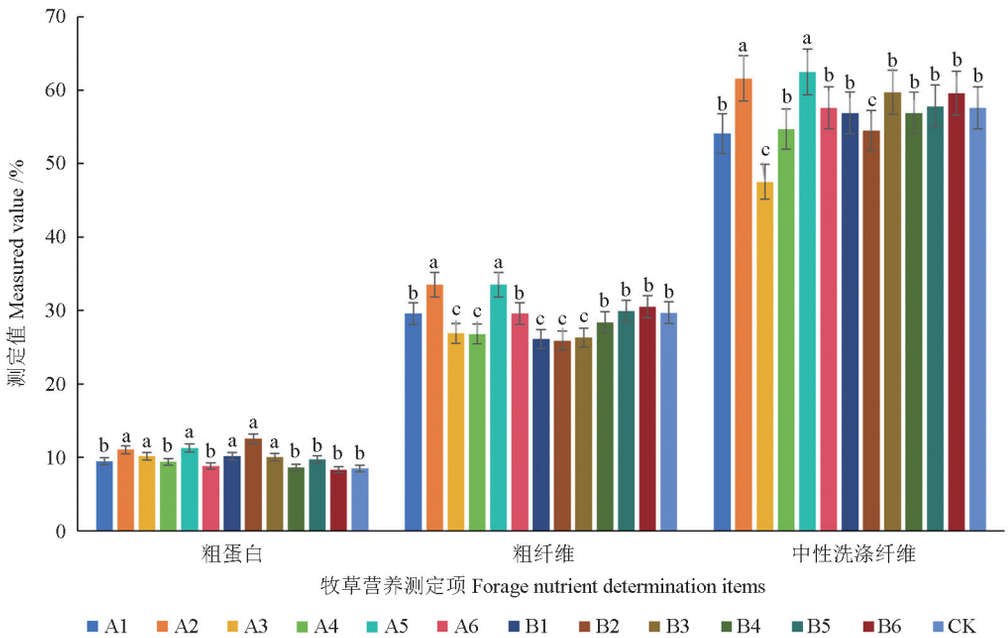


图 3　不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫草地牧草营养特征

Fig. 3　Nutritional characteristics of grass in different combinations of grass species, different combinations of grass species+NPK compound fertilizer+nicotine matrine insect proof grassland

补播对草地群落影响不同，这与草地类型和补播物种的特性有关 [35]。本研究中，应用适应性强的不同草种组合补播和不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫复合措施后草地植物群落结构发生了改变，物种种类增加，禾本科、豆科重要值增加，植被高度和产草量有显著提高，特别是采用复合措施草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 细茎冰草和该草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫后植被高度和产草量较对照区都有显著增加。这与张永超等 [13]、姬万忠等 [14]、杨增增等 [36] 的研究结果一致，主要原因是补播过程中通过人为撒播不同草种、施肥、虫害防治改变了植物原有的生存环境，群落原有的空间格局被打破，形成了新的生态位空间，使植被高度和产草量增加，植物群落数量特征发生显著变化 [37]。

物种多样性体现了自然条件与群落的相互关系，物种多样性与物种的丰富度和均匀度密切相关 [16]。本研究中，草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 细茎冰草、草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 老芒麦 + 无芒雀麦和该 2 种草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫下群落丰富度指数和均匀度指数较对照草地显著增加。这是因为补播不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫复合措施的实施改变了物种原有的生态位，也为一些一年生植物进入群落提供了机会，补充了营养，加之人工补种的新草种，从而使草地群落丰富度指数和均匀度指数提高 [38]。但是，不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫复合措施试验区和对照区群落的 Simpson 生态优势度指数与 Simpson 多样性指数均无显著变化，这与 Foster 等 [39] 的研究结果一致。本研究采用不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫复合措施后，牧草种类增加，生物量增大，种群结构改善，这与李本银等 [40] 研究施肥对退化草地牧草群落结构及生物量的影响结果基本一致。本研究中，通过不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫复合措施试验，2 年的恢复使一些原有植物借助残留在土壤中的根系等无性繁殖器官得以恢复，但恢复时间较短，导致不同草种组合、不同草种组合 + 氮磷钾复合肥 + 烟碱苦参碱防虫复合措施和对照草地物种多样性、生态优势度均差异不大，这与张永超等 [13] 的研究结果一致。

牧草营养价值是指维持牲畜生命和生产所需要的各种营养物质的成分，是多种营养价值的综合体现 [28]。牧草营养品质的高低主要由粗蛋白质和粗纤维含量决定 [41]，粗蛋白数值越高，表明牧草的营养价值越高，为动物提供氮源和合成动物蛋白的原料就越丰富，对动物的生长、发育和繁殖等生理过程越有利。粗纤维有助于维持动物胃肠道的正常生理功能，促进肠道蠕动，防止便秘。但数值过高，会降低牧草的消化率和适口性，会占据牲畜胃肠道空间，影响其他营养物质的消化吸收；数值过低，则可能意味着牧草的木质化程度

低，茎秆等结构发育不完善。本研究中，采用草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 细茎冰草 + 氮磷钾复合肥 +1.2% 烟碱苦参碱、草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 甘引 1 号 + 氮磷钾复合肥 +1.2% 烟碱苦参碱、草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 老芒麦 + 氮磷钾复合肥 +1.2% 烟碱苦参碱 3 种复合措施试验组粗蛋白含量较对照显著提高。这是因为高寒地区牧草生长季短，补播高蛋白豆科牧草紫花苜蓿，再加以施用氮磷钾复合肥和采取防虫措施，改善了牧草生长环境与生理代谢过程，促进了氨基酸和蛋白质的积累，使植物在有限的时间内完成生活史，进而增加牧草产量的同时，提高了牧草营养价值和粗蛋白含量，因此储备高含量的蛋白质，这与 Shi 等 [42] 的研究结果一致。本研究中粗纤维、中性洗涤纤维含量采用草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 细茎冰草和该草种组合 + 氮磷钾复合肥 +1.2% 烟碱苦参碱防虫复合措施试验后较对照显著降低，这可能与补播动物易消化吸收的紫花苜蓿，提高豆科牧草占比有关，也可能是补播改变了牧草的生长环境及竞争空间，抑制了原生草地中高纤维牧草的生长，导致群落中低纤维物种占比上升 [43]。

4　结　论

祁连山北麓温性草地植物群落在不同复合措施实施后，植物物种组成较对照草地有明显提高；牧草平均高度、产草量较对照都有显著提高。3 种复合措施均显著提升草地群落 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数。采用“草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 细茎冰草”和“草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号紫花苜蓿 + 细茎冰草”加施氮磷钾复合肥和烟碱苦参碱防虫复合措施后草地牧草粗蛋白含量相比对照显著提高，牧草粗纤维含量较对照显著降低。综上可知，采用复合措施“草地早熟禾 + 垂穗披碱草 + 东农 1 号 + 细茎冰草”和加施氮磷钾复合肥和烟碱苦参碱防虫试验的表现最优，对草地生态经济效益提升效果最显著。该复合措施能够显著影响草地生态质量，明显提升草地生产力与改善草地质量，极大地提升草地承载能力，这对祁连山草地生态修复改良具有重要的参考价值。

参考文献：

[1] 吴秀芝 , 阎欣 , 王波 , 等 . 荒漠草地沙漠化对土壤 - 微生物 - 胞外酶化学计量特征的影响 [J]. 植物生态学报 ,2018,42(10):1022-1032.
WU X Z, YAN X, WANG B, et al. Effects of desertification on the C∶N∶P stoichiometry of soil, microbes, and extracellular enzymes in a desert grassland[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2018,42(10):1022-1032.

[2] 李淼 , 邓正苗 , 谢永宏 , 等 . 长沙城市绿地森林与草地土壤呼吸及温度敏感性变化特征 [J]. 湖南林业科技 ,2024,51(4):1-9.
LI M, DENG Z M, XIE Y H, et al. Soil respiration and temperature sensitivity characteristics of forest and grassland in urban green space in Changsha City[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2024,51(4):1-9.

[3] 闫宝龙 , 吕世杰 , 王忠武 , 等 . 草地灌丛化成因及其对生态系统的影响研究进展 [J]. 中国草地学报 ,2019,41(2):95-101.
YAN B L, LYU S J, WANG Z W, et al. The advance of shrub encroachment in grassland and its impact on ecosystem[J]. Chinese Journal of Grassland,2019,41(2):95-101.

[4] 白永飞 , 赵玉金 , 王扬 , 等 . 中国北方草地生态系统服务评估和功能区划助力生态安全屏障建设 [J]. 中国科学院院刊 , 2020,35(6):675-689.
BAI Y F, ZHAO Y J, WANG Y, et al. Assessment of ecosystem services and ecological regionalization of grasslands support establishment of ecological security barriers in northern China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2020,35(6):675-689.

[5] 李江文 . 长期不同载畜率下短花针茅荒漠草原植物功能性状与功能多样性的关系 [D]. 呼和浩特 : 内蒙古农业大学 ,2018.
LI J W. Relationships between plant functional traits and functional diversity in a *Stipa breviflora* desert steppe under long-term grazing with different stocking rates[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2018.

[6] 尚占环 , 董世魁 , 周华坤 , 等 . 退化草地生态恢复研究案例综合分析 : 年限、效果和方法 [J]. 生态学报 ,2017,37(24):8148-8160.
SHANG Z H, DONG S K, ZHOU H K, et al. Synthesis-review for research cases of grassland ecological restoration: years, effect and method[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(24):8148-8160.

[7] DIAZ S, CABIDO M. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes[J]. Trends in Ecology and Evolution,2001,16(11):646-655.

[8] 常博 , 刘贤德 , 王顺利 , 等 . 祁连山不同坡向草地蒸散量及其影响因子的分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2014,34(4):90-95.
CHANG B, LIU X D, WANG S L, et al. Study on grassland evapotranspiration at different slope orientation and its impact factors in Qilian mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2014,34(4):90-95.

[9] 陈宇鹏 , 何琦 , 杨永胜 , 等 . 不同放牧强度下祁连山南麓高寒草甸植物群落及土壤水分特征 [J]. 草业科学 ,2023,40(8):2000-2013.
CHEN Y P, HE Q, YANG Y S, et al. Plant community and soil

water characteristics under different grazing intensities of alpine meadow on southern slope of Qilian mountains[J]. Pratacultural Science,2023,40(8):2000-2013.

[10] 张骞 , 马丽 , 张中华 , 等 . 青藏高寒区退化草地生态恢复 : 退化现状、恢复措施、效应与展望 [J]. 生态学报 ,2019,39(20):7441-7451.
ZHANG Q, MA L, ZHANG Z H, et al. Ecological restoration of degraded grasslands in the Qinghai-Xizang alpine region: degradation status, restoration measures, effects and prospects[J]. Chinese Journal of Ecology,2019,39(20):7441-7451.

[11] 杨旭东 , 杨春 , 孟志兴 . 我国草原生态保护现状、存在问题及建议 [J]. 草业科学 ,2016,33(9):1901-1909.
YANG X D, YANG C, MENG Z X. The current situation, problems and suggestions of grassland ecological protection in China[J]. Pratacultural Science,2016,33(9):1901-1909.

[12] 罗冬 . 不同改良措施对短花针茅荒漠草原植被和土壤的影响 [D]. 呼和浩特 : 内蒙古农业大学 ,2016.
LUO D. Effects of different improved measures on vegetation and soil in the Stipa breviflora desert steppe[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2016.

[13] 张永超 , 牛得草 , 韩潼 , 等 . 补播对高寒草甸生产力和植物多样性的影响 [J]. 草业学报 ,2012,21(2):305-309.
ZHANG Y C, NIU D C, HAN T, et al. Effect of reseeding on productivity and plant diversity on alpine meadows[J]. Acta Prataculturae Sinica,2012,21(2):305-309.

[14] 姬万忠 , 王庆华 . 补播对天祝高寒退化草地植被和土壤理化性质的影响 [J]. 草业科学 ,2016,33(5):886-890.
JI W Z, WANG Q H. Effects of over-seeding on plant community and soil physical and chemical properties of degraded grassland in Tianzhu County[J]. Pratacultural Science,2016,33(5):886-890.

[15] 李志 , 袁颖丹 , 张学玲 , 等 . 武功山退化草甸不同植被恢复措施生长效果及适应性研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2018,38(2):90-96.
LI Z, YUAN Y D, ZHANG X L, et al. Growth effects and adaptabilities of different vegetation restoration measures of degraded meadow in Wugong mountain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2018,38(2):90-96.

[16] 孙树青 . 乌珠穆沁沙质退化草地人工补播调查研究 [D]. 呼和浩特 : 内蒙古农业大学 ,2011.
SUN S Q. The study of reseeding artificially on the sandy degraded grassland in Wuzhumuqin[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2011.

[17] 王洪义 , 常继方 , 王正文 . 退化草地恢复过程中群落物种多样性及生产力对氮磷养分的响应 [J]. 中国农业科学 ,2020,53(13):2604-2613.
WANG H Y, CHANG J F, WANG Z W. Responses of community species diversity and productivity to nitrogen and phosphorus addition during restoration of degraded grassland[J]. Scientia Agricultura Sinica,2020,53(13):2604-2613.

[18] 李海燕 , 杨允菲 . 松嫩平原水淹恢复演替过程中羊草无性系种群构件的年龄结构 [J]. 生态学报 ,2004,24(10):2171-2177.
LI H Y, YANG Y F. Age structures of modules on *Leymus chinensis* clonal populations in the process of restoration succession after the flooded meadow in the Songnen plains, China[J]. Acta Ecologica Sinica,2004,24(10):2171-2177

[19] KELEMEN A, TÖRÖK P, VALKÓ O, et al. Both facilitation and limiting similarity shape the species coexistence in dry alkali grasslands[J]. Ecological Complexity,2015,21:34-38.

[20] SCHAUB S, FINGER R, LEIBER F, et al. Plant diversity effects on forage quality, yield and revenues of semi-natural grasslands[J]. Nature Communications,2020,11:768.

[21] HE J S, WOLFE-BELLIN K S, SCHMID B, et al. Density may alter diversity-productivity relationships in experimental plant communities[J]. Basic and Applied Ecology,2005,6:505-517.

[22] 周娟娟 , 魏巍 . 施肥和刈割协同对藏北高原禾草混播群落动态和超产的影响 [J]. 草业学报 ,2023,32(10):28-39.
ZHOU J J, WEI W. Interactive effect of fertilization and cutting on community dynamics and transgressive overyielding effect of grass pasture in the northern Tibetan Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica,2023,32(10):28-39.

[23] 崔阁英 , 董明玉 , 唐兴成 , 等 . 云南省巧家县石漠化区不同治理措施下草地生产力动态监测研究 [J]. 草业与畜牧 ,2011(6):1-7.
CUI G Y, DONG M Y, TANG X C, et al. Study om dynamic monitoring of productivity of different grassland restoration measures of karst rocky desertification areas in Qiaojia County of Yunnan Province[J]. Prataculture and Animal Husbandry,2011(6):1-7.

[24] 李梦瑶 , 赵一军 , 王文 , 等 . 喀斯特区改良与未改良草地植被和土壤特征研究 [J]. 云南农业大学学报 (自然科学),2021,36(1):106-113.
LI M Y, ZHAO Y J, WANG W, et al. Research on the vegetation and soil traits of improved and unimproved grasslands in karst region[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science),2021,36(1):106-113.

[25] 张明均 , 文克俭 , 熊先勤 . 天然草地改良技术研究 [J]. 草业与畜牧 ,2011(12):25-26.
ZHANG M J, WEN K J, XIONG X Q. Research on improvement technology of natural grasslands[J]. Grassland and Animal Husbandry,2011(12):25-26.

[26] 孙波 , 吴瑛 , 周大荣 , 等 . 复合改良措施对喀斯特山区退化天然草地土壤性质和植被特征的影响 [J]. 草业科学 ,2024,41(10):2263-2274.
SUN B, WU Y, ZHOU D R, et al. The impact of composite improvement measures on soil properties and vegetation characteristics of degraded natural grasslands in karst mountainous

areas[J]. Pratacultural Science,2024,41(10):2263-2274.

[27] 张凡凡 , 和海秀 , 于磊 , 等 . 新疆沙尔套山四季放牧草地主要牧草营养价值变化特征研究 [J]. 草业学报 ,2018,27(11):179-191.
ZHANG F F, HE H X, YU L, et al. Seasonal variation in nutritive value of twelve main forage plant species of grazed grassland in Shaertao mountain, Xinjiang[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018,27(11):179-191.

[28] 李静 , 刘建明 , 范天文 , 等 . 新疆不同草地类型天然牧草营养价值评定 [J]. 中国饲料 ,2021(13):92-97.
LI J, LIU J M, FAN T W, et al. Evaluation of nutritional value of natural herbage of different grassland types in Xinjiang[J]. China Feed,2021(13):92-97.

[29] 孙鹏飞 , 崔占鸿 , 刘书杰 , 等 . 三江源区不同季节放牧草场天然牧草营养价值评定及载畜量研究 [J]. 草业学报 ,2015,24(12):92-101.
SUN P F, CUI Z H, LIU S J, et al. Seasonal evaluation of nutrition and carrying capacity of grazing pastures in the Three-river Source region[J]. Acta Prataculturae Sinica,2015,24(12):92-101.

[30] 赵文 , 尹亚丽 , 李世雄 , 等 . 祁连山不同类型草地植被群落及牧草营养特征研究 [J]. 草地学报 ,2022,30(6):1328-1335.
ZHAO W, YIN Y L, LI S X, et al. Study on vegetation communities and forage nutrition characteristics of different types of grassland in Qilian mountains[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022,30(6):1328-1335.

[31] 贾希洋 , 马红彬 , 周瑶 , 等 . 不同生态恢复措施对宁夏黄土丘陵区典型草原植物群落特征的影响 [J]. 中国草地学报 , 2019,41(1):51-60.
JIA X Y, MA H B, ZHOU Y, et al. Effect of different ecological restoration measures on the characteristics of typical grassland plant communities in the loess hilly region of Ningxia[J]. Chinese Journal of Grassland,2019,41(1):51-60.

[32] 国家技术监督局 .GB/T 14924.9—2001. 实验动物配合饲料常规营养成分的测定 [S]. 北京 : 国家标准出版社 ,2002.
The State Bureau of Technical Supervision. GB/T14924.9-2001. The measures of conventional nutrients for experimental animal feeds[S]. Beijing: National Standards Press,2002.

[33] 王玉琴 , 宋梅玲 , 王宏生 , 等 . 添加氮素对退化高寒草地植被及营养品质的影响 [J]. 草地学报 ,2021,29(12):2742-2751.
WANG Y Q, SONG M L, WANG H S, et al. Effects of nitrogen addition on vegetation and forage nutritional quality of degraded alpine grassland[J]. Acta Agrestia Sinica,2021,29(12):2742-2751.

[34] 葛庆征 , 魏斌 , 张灵菲 , 等 . 草地恢复措施对高寒草甸植物群落的影响 [J]. 草业科学 ,2012,29(10):1517-1520.
GE Q Z, WEI B, ZHANG L F, et al. Influence of restoration measures on plant community in alpine meadow[J]. Pratacultural Science,2012,29(10):1517-1520.

[35] 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 reseeding on vegetational restoration of natural grassland[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2011,48(4):690-695.

[36] 杨增增 , 张春平 , 董全民 , 等 . 补播对中度退化高寒草地群落特征和多样性的影响 [J]. 草地学报 ,2018,26(5):1071-1077.
YANG Z Z, ZHANG C P, DONG Q M, et al. Effects of reseeding on plant community composition and diversity of moderately degraded alpine grassland in Qinghai-Xizang plateau[J]. Acta Agrestia Sinica,2018,26(5):1071-1077.

[37] 张伟 , 王万林 , 胡玉昆 , 等 . 新疆伊犁荒漠草原恢复措施下植物群落生态位特征分析 [J]. 中国生态农业学报 ,2011,19(2):358-362.
ZHANG W, WANG W L, HU Y K, et al. Characteristics of plant niche under different restoration measures in Ili desert grassland of Xinjiang Uygur autonomous region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2011,19(2):358-362.

[38] ROHBE K.Vacant niches and the possible operation of natural laws natural law in ecosytems[J]. Rivista di Biologia,2008,101:13-28.

[39] FOSTER B L,TILMAN D. Seed limitation and Markov chain[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press,2005.

[40] 李本银 , 汪金舫 , 赵世杰 , 等 . 施肥对退化草地土壤肥力、牧草群落结构及生物量的影响 [J]. 中国草地 ,2004,26(1):14-17,33.
LI B Y, WANG J F, ZHAO S J, et al. The influence of fertilizers on the soil fertility population structure and yield of herbages grown in degraded grassland[J]. Grassland of China,2004,26(1):14-17,33.

[41] 梁建勇 , 焦婷 , 吴建平 , 等 . 不同类型草地牧草消化率季节动态与营养品质的关系研究 [J]. 草业学报 ,2015,24(6):108-115.
LIANG J Y, JIAO T, WU J P, et al. The relationship between seasonal forage digestibility and forage nutritive value in different grazing pastures[J]. Acta Prataculturae Sinica,2015,24(6):108-115.

[42] SHI Y, MA Y L, MA W H, et al. Large scale patterns of forage yield and quality across Chinese grasslands[J]. Chinese Science Bulletin,2013,58(10):1187-1199.

[43] 权迪 , 王勇 , 张茜茜 , 等 . 禾本科芦苇属植物纤维的再生及性能测定 [J]. 植物研究 ,2016,36(4):620-626.
QUAN D, WANG Y, ZHANG Q Q, et al. Regeneration and performance measurement of plant fiber in grass family of phragmites[J]. Bulletin of Botanical Research,2016,36(4):620-626.

[本文编校：吴　彬]