

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.027

引用格式:许紫莹,刘梦鸽,石娟,等.免耕补播对退化草地植被-土壤-畜牧系统的协同调控效应[J].草地学报,2026,34(2):653—662

XU Zi-ying, LIU Meng-ge, SHI Juan, et al. Synergistic Regulation Effects of No-till Reseeding on the Vegetation-Soil-Livestock System in Degraded Grasslands[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):653—662

免耕补播对退化草地植被-土壤-畜牧系统的 协同调控效应

许紫莹¹, 刘梦鸽¹, 石娟¹, 冯恣萱¹, 杨霞², 李红美², 郭晓静², 杨军卫²,
范亚东³, 张英俊¹, 荆晶莹^{1*}

(1. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193; 2. 榆林市榆阳区草原工作站, 陕西 榆林 719000;
3. 北京德邦大为科技股份有限公司, 北京 100176)

摘要:草地退化是全球生态环境面临的主要挑战之一,尤其在中国西北干旱半干旱地区,退化草地严重影响生态系统功能与畜牧业发展。本研究在陕西榆阳地区开展了四年的野外试验,系统评估了免耕补播修复结合集约化放牧技术对退化草地生产力、植被群落结构、土壤理化性质及肉羊品质的影响。结果表明:补播显著提高了草地的生产力,特别是豆科植物的生物量占比增加,促进了土壤氮素积累和植被营养品质提升。此外,主成分分析(Principal component analysis, PCA)结果显示,补播改变了植物群落结构,使其包含更多高营养品种的物种。补播的草地进行放牧影响了肉羊的氨基酸含量,改善了肉质风味。整体而言,补播技术对退化草地的恢复及畜牧业的可持续发展具有重要意义,可为干旱半干旱地区草地管理提供科学依据。

关键词:退化草地;补播;生产力;土壤养分;牧草品质

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0653-10

Synergistic Regulation Effects of No-till Reseeding on the Vegetation-Soil-Livestock System in Degraded Grasslands

XU Zi-ying¹, LIU Meng-ge¹, SHI Juan¹, FENG Zi-xuan¹, YANG Xia², LI Hong-mei², GUO Xiao-jing²,
YANG Jun-wei², FAN Ya-dong³, ZHANG Ying-jun¹, JING Jing-ying^{1*}

(1. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Grassland Workstation, Yuyang District, Yulin City, Yulin, Shaanxi Province 719000, China; 3. Beijing Debon Dawei Technology Co., LTD, Beijing 100176, China)

Abstract: Grassland degradation is one of the major global ecological challenges, especially in the arid and semi-arid areas of northwest China, where degraded grassland seriously affects the ecosystem functions and the development of animal husbandry. In this study, a four-year field experiment was conducted in Yuyang District, Shaanxi Province, and systematically evaluated the effects of reseeded and modern intensive grazing techniques on degraded grassland productivity, vegetation community structure, soil physicochemical properties, and meat quality of sheep. The results showed that reseeded significantly enhanced grassland productivity, particularly by increasing the biomass proportion of legumes, which increased soil nitrogen content and improved vegetation nutritional quality. In addition, principal component analysis (PCA) revealed that reseeded restructured plant communities to include more plants with high nutritional value. Grazing on reseeded grassland increased amino acid content in sheep meat and enhanced its flavor. In general, reseeded technology plays a pivotal role in restoring degraded grassland and advancing sustainable development of animal husbandry, offering a scientific

收稿日期:2025-04-09;修回日期:2025-05-27

基金项目:国家自然科学基金重大项目(32192462)资助

作者简介:许紫莹(2001-),女,汉族,陕西韩城人,硕士研究生,主要从事草地生态与管理研究, E-mail: xvziying@163.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail: Jingying.jing@cau.edu.cn

foundation for grassland management in arid and semi-arid areas.

Key words: Degraded grassland; Reseeding; Productivity; Soil nutrients; Forage quality

草地生态系统是地球陆地生态系统的重要组成部分,不仅提供畜牧业生产所需的饲草资源,还具有维持生物多样性、调节水循环和碳储存等重要生态功能。然而,随着人类活动的加剧和气候变化的影响,草地退化问题在全球范围内不断加剧,尤其是在中国西北干旱半干旱地区,退化草地已严重威胁到区域生态环境和农业可持续发展。

目前,我国超过90%的草原面临不同程度退化,主要表现为植被覆盖度降低、土壤侵蚀加剧、养分含量下降及生产力退化等特征^[1],严重削弱了草地生态系统的服务功能,制约了草地可持续利用。如何恢复退化草地的生态功能,已经成为当前草地生态学研究的核心议题之一。在众多修复措施中,免耕补播作为一种低扰动、生态友好的修复技术,正受到越来越多的关注。该技术通过不破坏原有土壤结构和原生植被,在退化草地中直接播种适应性强、营养价值高的植物种类,从而在提高植被覆盖度和生物多样性的同时促进植物与土壤系统之间的良性反馈,改善土壤理化性质,增强养分循环效率,并进一步提升草地的初级生产力与生态稳定性^[2]。

相比传统翻耕补播方式,免耕补播能够有效降低人为干扰,减少水土流失,显著提高土壤有机质含量及土壤微生物活性,优化植物群落结构和功能,从而在恢复草地生态功能的同时,增强草地碳汇潜力与牧草养分积累能力^[3]。更为重要的是,免耕补播不仅是单一的植被恢复手段,更是连接植被恢复-土壤改良-畜牧增产三者之间的关键纽带。

近年来,研究表明牧草品质的提升对畜牧业具有显著影响。补播优质牧草,如豆科和禾本科植物的混播,不仅提高了牧草的粗蛋白含量和适口性,还改善了牲畜的肉质品质^[4]。例如,在退化苜蓿草地中补播苇状羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb.)和鸭茅(*Dactylis glomerata* L.)显著提高了干草产量和牧草品质,表现为粗蛋白和粗脂肪含量的增加,以及中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维的优化^[5]。此外,在盐碱化草地上补播耐盐碱的优质牧草野大麦,不仅提高了草地的生产力和植被盖度,还改善了牧草的营养价值,促进了牲畜的健康生长。因此,深入探讨免耕补播措施在退化草地植被-土壤-畜牧系统中的协同调控效应,对于提升草地多功能

性、实现生态恢复与畜牧业协调发展具有重要的理论与实践意义。

从60年代初开始我国补播工作逐渐起步,到近些年来天然草地补播改良技术逐年增多,通过补播措施来恢复退化草地的效果也逐年显著^[6]。但是目前针对补播措施对土壤和植物营养动态的长期影响研究仍较为有限,尤其是在半干旱地区退化草地生态系统中的效果与机制尚需深入探讨。本研究以陕西榆阳地区的典型退化草地为研究对象,通过持续四年的野外试验(2021—2024年),系统评估了补播措施对草地生态系统多维度的影响。研究内容包括土壤养分指标(如有机碳、全氮、速效磷、速效钾等)以及植物营养成分(如钾、可溶性糖、蛋白质、纤维和脂肪等)的动态变化。此外,研究还进一步分析了补播对草地生产力、植物群落功能群(如豆科、菊科及禾本科植物)组成以及草地生态系统在畜牧业中的利用价值(如对肉质品质的影响)等方面的影响。

本研究聚焦免耕补播技术体系的生态与生产协同效应,该体系包含补播建植期的养管理(如启动肥施用)及修复后草地的集约化牧养利用模式,旨在验证其在植被-土壤-畜牧系统中的集成调控潜力,为草地生态管理和退化草地恢复提供科学依据。研究结果为中国西北干旱半干旱地区的生态恢复实践以及草地的可持续利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

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°15'N, 109°11'E)。样地年平均温度8.6℃,最高温度38.4℃,最低温度-29℃,年均降水389.2 mm,海拔1050 m。试验地处黄土高原与毛乌素沙漠的交接地带,属典型的中温带半干旱大陆性季风气候,雨水稀少且分布不均,气候干燥,冬长夏短且日照充足。土壤类型主要为风沙土,且土壤沙粒含量高水分较少、流动性大,0~10 cm土层全氮含量0.06%、全钾含量2.3%、速效磷5.9 mg·kg⁻¹、土壤pH值为8.97。该地区植被类型属于暖温带典型草原区,受强风沙作用影响形成风沙草滩地貌,同时得益于丰富的地下水资源,具备良好的灌溉基

础。试验样地在修复前为重度退化草原,植被稀疏、植物多样性较低,以羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel)为优势种,主要伴生种有猪毛蒿(*Artemisia scoparia* Waldst. & Kit)、米口袋(*Geldestaedia verna* (Georgi) Boriss)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng)等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 根据国家标准《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标 GB19377—2003》^[7]的分级确定补播地草原退化的程度,选择陕西榆林市中重度退化草地为研究对象,试验地于2020年5月中旬进行补播,采用补播机械为9BM-3.0型免耕补播机,条播行距为20 cm,采用“倒T”型开沟器,开沟深度5 cm,覆土深度1~2 cm,补播当年休牧。试验采用单因素随机区组设计,补播草种为紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)‘龙牧806’(种子发芽率为90%)、无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss, 种子发芽率为85%)。处理1(Control)为未补播的对照试验地;处理2(Reseeding)为补播紫花苜蓿与无芒雀麦以行数比为1:1混合补播,播种量为15 kg·ha⁻¹;每个处理设置4个重复,每个重复3.3 ha。为了补播物种的建植,补播处理施用磷酸二铵(P₂O₅>46%),磷酸二铵施用量均为75 kg·ha⁻¹,其中氮含量为9.13 kg·ha⁻¹^[4]。本试验中补播处理施用磷酸二铵是免耕补播技术体系的必要环节,以保障种子萌发和幼苗存活。对照组未施肥反映自然退化状态,以对比技术体系整体效果。

为实现补播修复后牧草的合理利用,2023年8月10日,买入60只绒山羊,在免耕补播示范基地开展集约化牧养(MIG)模式示范和应用,在补播修复后的草地进行放牧,同时每天下午进行定量补饲玉米,绒山羊初始体重在13~33 kg,集约化牧养54天后,体重为17.4~37.5 kg,平均增重5.7 kg·羊⁻¹。同时,选取该地区舍饲山羊作为对照,日粮组成为玉米秸秆和精饲料(60:40),其中选用陕西华西牧业有限责任公司提供的肥育羊(牛)后期精饲料补充料作为舍饲用的精饲料。MIG模式设计为补播草地的配套畜牧管理,旨在验证补播修复草地结合集约化牧养(MIG)的技术链条总体效益,故MIG组采用标准化补饲(玉米),SS组代表区域典型舍饲(精饲料)模式。两组对比旨在验证技术体系整体对肉品质的提升效果。

1.2.2 野外取样和样品处理 调查取样主要分为植被调查和土壤调查。于2021—2024年,均在每年的八月下旬至各处理样地每个重复内随机选取5个样方,共选取20个0.5 m×0.5 m的样方,调查样方内植被组成、高度、盖度,用剪刀齐地剪去样方内所有植物并分物种装入牛皮纸袋内烘干处理后称重作为地上生物量,并将样方内观察到的物种划分为豆科(Leguminosae)、禾本科(Gramineae)、菊科(Compositae)和其他类(Others),随后将地上植物样品在75℃烘箱内烘至恒重,称量草地主要功能群的地上生物量,用于分析补播对不同功能群的影响。根据所获取的数据,计算物种多样性指数^[8],具体方法如下:

$$\text{香农-维纳指数(Shannon-Wiener index)} = -\sum P_i \ln P_i$$

$$\text{辛普森指数(Simpson index)} = 1 - \sum P_i^2$$

$$\text{丰富度指数(Richness index)} = S$$

式中: P_i 为同一样方中*i*植物的相对生物量的算数平均数。 S 为同一样方中的物种数。

并通过各功能群生物量占总生物量的比例计算各功能群占比。

随后带回实验室进行粉碎,采用凯氏定氮法测定植物的全氮含量(Total nitrogen, TN)、钼锑抗比色法测定植物全磷含量(Total phosphorus, TP)、原子吸收-火焰光度法测定全钾含量(Total potassium, TK)、使用凯氏定氮仪测定植物粗蛋白含量(Crude protein, CP)、使用索氏提取仪测定植物粗脂肪含量(Ether extract, EE)、使用紫外分光光度计测定植物可溶性糖含量(Soluble sugar, SS)、使用全自动纤维测定仪测定植物中粗纤维含量(Crude fibre, CF)、中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)及酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)、粗灰分(Ash content, AC)^[9]。此外在每个样方内0~20 cm的土层取3个土样进行混合,共计20个样品,带回实验室进行土壤理化性质的测定,采用碳酸氢铵浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷(Rapidly available phosphorus, AP)、原子吸收-火焰光度法测定速效钾(Rapidly available potassium, AK)、重铬酸钾容量法测定有机碳(Soil organic carbon, SOC)、凯氏定氮法测定全氮(Total nitrogen, TN)、酸度计测定pH值、元素分析仪上机测定土壤全碳(Total carbon, TC)^[10]。此外,对集约化模式(MIG)牧养的肉羊11月10日进行屠宰,同时对绒山羊肉品质以及舍饲(SS)的老乡家山羊进行氨基酸的测定检测,每组送测3个重复的样本。

1.3 数据处理

本研究采用 Excel 2024 整理统计各小区测定值,并使用 SPSS 27.0.1 进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和双因素方差分析(Two-way ANOVA),分析补播、年份及其交互作用对草地生产力的影响,分析不同饲养模式对肉羊氨基酸组成的影响,并采用 Duncan 多重比较法对不同处理间的差异进行显著性检验。主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)采用 R 4.4.2 软件进行,利用 ggplot2 和 FactoMineR 等扩展包绘制 PCA 图,分析植被功能群的变化。

所有数据均以均值 $\pm$ 标准误 (Mean $\pm$ SE) 表示。

2 结果与分析

2.1 补播对天然退化草地地上生物量的影响

补播对草地地上生物量的影响在不同年份表现出显著差异。随着补播植物的建植,2021—2024 年草地总地上生物量逐年显著提升 ($P < 0.01$, 图 1a),同时年份与补播对于退化草地地上生物量的影响具有显著的交互作用 ($P < 0.01$),表明补播措施对草地生物量提升的效果在不同年份之间存在差异。主成分分析结果进一步揭示了不同年份下各功能群的变化趋势(图 1b),结果显示 2021 年和 2024 年的数据在主成分空间中有明显的分布差异;此外豆科和禾本科植物对主成分 1 的贡献较大,而菊科对主成分 2 的贡献较大。

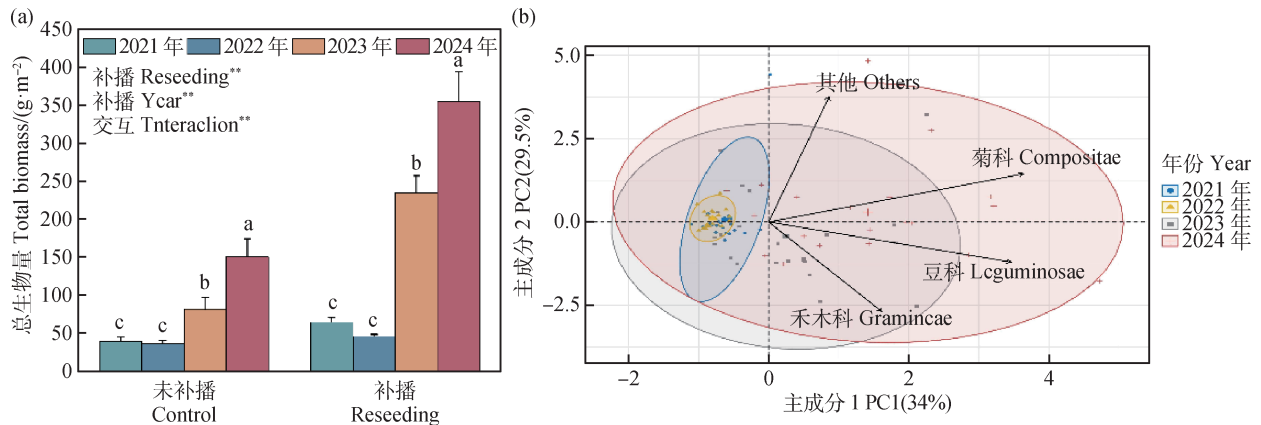


图1 补播处理对草地生物量的影响及年际间差异

Fig. 1 Effects of reseeding on grassland biomass and principal interannual variations

注:(a)补播对总生物量影响的年际动态;(b)补播处理对各年份功能群影响的主成分分析;不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$);*表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$,下同

Note: (a) Interannual dynamics of the effects of reseeding on total biomass; (b) Principal component analysis of the effects of reseeding treatment on functional groups in each year; Different lowercase letters indicate significant differences between treatments; * means $P < 0.05$; ** means $P < 0.01$, the same as below

如图2所示,与未补播对照相比,补播处理中豆科植物在各观测年份均表现出持续的生长优势。2021年,补播后豆科和禾本科植物的占比相比于未补播均有所上升,其中豆科的上升幅度更大,达到41%,而菊科和杂类草的占比则有所下降,分别下降了14%和20%。2022年,豆科植物的占比在补播中继续上升,增加了48%;2023年,补播后豆科和禾本科植物的占比均大幅增加,分别增加了24%和14%,其中禾本科在补播后的占比达到了57%,而菊科和杂类草在补播后的占比均降低。到2024年,补播后仅豆科占比明显增加,增加了59%,占比高达72%,表现出明显的生长优势,补播后占比最少的杂

类草仅占总群落的2%。表明,补播措施显著促进了豆科植物的生长,使其在各年份的占比中均呈现出明显的上升趋势,而禾本科植物在2023年也表现出了显著的增长,但在随后的年份中占比有所下降。相比之下,菊科和杂类草的占比在补播后普遍呈现下降趋势。PCA分析也进一步证实补播处理与未补播处理在植物群落结构上存在显著差异(如图3)。

如表1所示,补播对香农-维纳指数及辛普森指数均存在影响。到2023年,与未补播草地相比,补播草地的辛普森指数和物种丰富度均显著升高 ($P < 0.05$);到2024年补播处理后香农-维纳指数以及辛普森指数均显著高于未补播处理 ($P < 0.05$)。

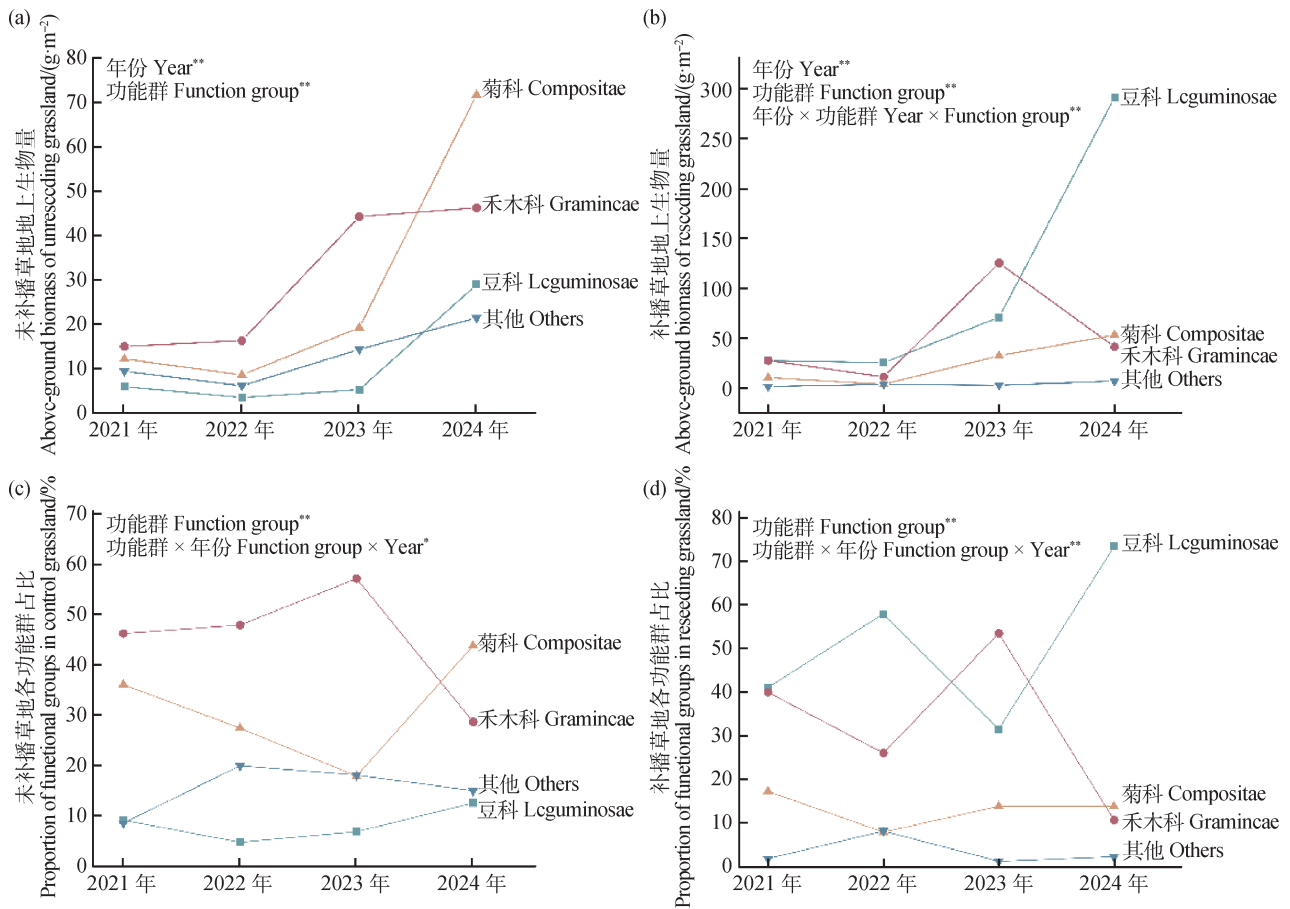


图2 补播处理对草地各功能群生物量及比例的影响

Fig. 2 Effects of reseeding treatment on biomass and proportion of each functional group in grassland

注:(a)、(b)补播与未补播处理对地上生物量影响的年际动态;(c)、(d)补播与未补播处理对各功能群占比影响的年际动态

Note: (a), (b) interannual dynamics of effects of reseeding and control treatments on aboveground biomass; (c), (d) Interannual dynamics of the effects of reseeding and control treatments on the proportion of each functional group

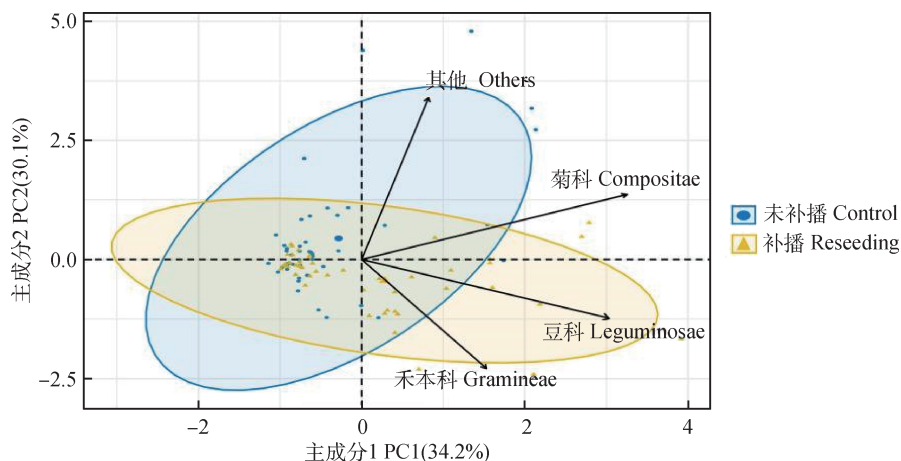


图3 补播与未补播处理植被功能群的主成分分析(PCA)

Fig. 3 Principal component analysis (PCA) of vegetation functional groups under reseeding and control

2.2 补播对草地植被营养品质的影响

补播措施在改善草地植被的营养品质方面发挥了重要作用(表2)。根据2023年补播植被样品测定结果显示,补播处理后植株的全磷、全钾、粗纤维含量

以及酸性洗涤纤维均显著高于未补播处理($P < 0.01$),且粗脂肪含量在补播处理下显著低于未补播处理($P < 0.05$)。到2024年,补播显著提高了植株的全磷、全钾含量、粗蛋白以及粗灰分含量($P < 0.01$)。

表 1 补播处理对香农-维纳指数、辛普森指数和物种丰富度的影响

Table 1 Effects of reseeding treatment on Shannon-Wiener index, Simpson index and Species richness

年份 Year	物种多样性指数 Species diversity index	未补播 Control	补播 Reseeding	P 值
2021 年	辛普森指数 Simpson index	0.55±0.06	0.65±0.02	0.097
	香农-维纳指数 Shannon-wiener index	0.98±0.10	1.15±0.04	0.124
	物种丰富度 Species richness	3.50±0.23	3.75±0.22	0.438
2022 年	辛普森指数 Simpson index	0.58±0.03	0.61±0.02	0.397
	香农-维纳指数 Shannon-wiener index	1.11±0.07	1.19±0.04	0.319
	物种丰富度 Species richness	5.00±0.39	5.70±0.30	0.175
2023 年	辛普森指数 Simpson index	0.54±0.05	0.68±0.17	0.024
	香农-维纳指数 Shannon-wiener index	1.07±0.11	1.29±0.07	0.118
	物种丰富度 Species richness	4.58±0.40	5.90±0.34	0.016
2024 年	辛普森指数 Simpson index	0.46±0.05	0.64±0.05	0.021
	香农-维纳指数 Shannon-wiener index	0.96±0.10	1.33±0.13	0.036
	物种丰富度 Species richness	6.30±0.63	6.50±0.56	0.816

注: $P<0.05$ 表示存在显著性差异; $P<0.01$ 表示存在极显著差异。下同
Note: $P<0.05$ indicates a significant difference; $P<0.01$ indicates an extremely significant difference. The same as below

表 2 补播处理对植物营养品质的影响

Table 2 Effects of reseeding treatment on plant nutrient quality

年份 Year	项目 Items	未补播 Control	补播 Reseeding	P 值
2023 年	全磷 TP/%	0.12±0.01	0.22±0.01	<0.001
	全钾 TK/%	1.54±0.06	1.82±0.05	<0.001
	可溶性糖 SS/(g·kg ⁻¹)	48.34±3.15	49.68±2.62	0.745
	粗蛋白 CP/%	14.61±1.46	17.11±0.30	0.125
	粗纤维 CF/%	26.45±0.99	30.62±0.53	<0.001
	粗脂肪 EE/%	4.08±0.26	3.33±0.16	0.022
	中性洗涤纤维 NDF/%	64.45±1.93	64.30±1.17	0.947
	酸性洗涤纤维 ADF/%	38.33±1.14	43.2±0.87	0.002
2024 年	全磷 TP/%	0.16±0.01	0.28±0.01	<0.001
	全钾 TK/%	1.70±0.10	2.10±0.09	0.009
	可溶性糖 SS/(g·kg ⁻¹)	60.91±4.34	40.74±1.44	0.001
	粗蛋白 CP/%	10.46±0.57	17.37±0.67	<0.001
	粗纤维 CF/%	37.19±1.22	34.01±2.51	0.269
	粗脂肪 EE/%	3.70±0.26	2.33±0.13	<0.001
	粗灰分 AC/%	6.22±0.53	9.09±0.73	0.005
	中性洗涤纤维 NDF/%	60.18±1.34	63.38±1.89	0.185
	酸性洗涤纤维 ADF/%	52.38±1.39	56.19±1.64	0.094

2.3 补播对土壤理化性质的影响

补播措施显著改善了土壤理化性质,特别是在全氮和有机碳的含量上(表 3)。研究结果表明,补播显著提升了土壤中有机碳、全氮的含量($P<0.01$);土壤中速效磷和全碳的含量存在明显的增加趋势,但与未补播处理相比,补播处理提升效果不显著;此外,土壤速效钾的含量以及土壤 pH 值在补播草地有所下降,且与未补播草地间存在显著性差异($P<0.05$,表 3)。

2.4 补播对肉羊品质的影响

补播优化草地植物的营养组成,结合集约化牧

表 3 补播处理对土壤理化性质的影响

Table 3 Effects of reseeding treatment on soil physical and chemical properties

项目 Items	未补播 Control	补播 Reseeding	P 值
全碳 TC/%	1.40±0.16	1.64±0.15	0.307
有机碳 SOC/%	0.48±0.03	0.65±0.04	<0.001
全氮 TN/%	0.06±0.00	0.07±0.00	0.004
速效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	5.88±2.54	8.55±1.23	0.290
速效钾 AK/(g·kg ⁻¹)	0.17±0.01	0.15±0.01	0.024
pH 值 pH value	8.97±0.06	8.78±0.04	0.005

养模式,提高了肉羊的生长性能和肉质品质。根据试验结果显示(表 4),肉羊的氨基酸(%)含量在不

同品种之间存在明显差异。在不同处理中,舍饲(SS)山羊的氨基酸总含量最高,为18.18%;其次集约化牧养模式下肉羊的氨基酸含量为17.74%。必需氨基酸色氨酸及非必需氨基酸胱氨酸、酪氨酸在集约化牧养模式下均显著高于SS处理组;而必需氨基酸中苯丙氨酸及非必需氨基酸脯氨酸、组氨酸的含量在MIG模式下显著低于SS处理组($P<0.01$)。

表 4 不同饲养模式下肌肉中氨基酸相对含量

Table 4 Relative contents of amino acids in muscle under different feeding patterns 单位: %

项目 Items	集约化牧养 MIG	舍饲 SS	P 值
干物质含量 Dry mater content	23.80±0.26	24.55±0.35	0.204
天冬氨酸 Aspartic acid	1.66±0.03	1.73±0.06	0.299
丝氨酸 Serine	0.70±0.01	0.75±0.03	0.097
谷氨酸 Glutamic acid	2.98±0.06	2.78±0.10	0.150
脯氨酸 Proline	0.67±0.01	1.35±0.10	<0.001
甘氨酸 Glycine	0.79±0.02	0.76±0.04	0.481
丙氨酸 Alanine	1.05±0.02	1.07±0.04	0.652
胱氨酸 Cystine	0.24±0.00	0.11±0.02	<0.001
精氨酸 Arginine	1.14±0.02	1.19±0.05	0.338
组氨酸 Histidine	0.55±0.01	0.66±0.00	0.001
酪氨酸 Tyrosine	0.71±0.01	0.65±0.00	0.033
亮氨酸 Leucine	1.51±0.02	1.52±0.05	0.943
苏氨酸 Threonine	0.82±0.01	0.87±0.03	0.189
缬氨酸 Valine	0.92±0.01	0.87±0.03	0.193
异亮氨酸 Isoleucine	0.85±0.01	0.83±0.03	0.362
苯丙氨酸 Phenylalanine	0.74±0.01	0.86±0.01	0.002
蛋氨酸 Methionine	0.49±0.01	0.51±0.01	0.414
赖氨酸 Lysine	1.67±0.03	1.70±0.06	0.685
色氨酸 Tryptophan	0.24±0.01	0.00±0.00	<0.001
氨基酸总量 Total AAs	17.74±0.30	18.18±0.63	0.525

3 讨论

3.1 补播提升草地生产力与优化群落结构

研究表明,补播显著提升了退化草地的地上生物量,且不同年份间存在显著的交互作用,表明其效果可能受补播植物建植进程的影响,尤其是豆科牧草在草地生长建植会对土壤养分有效性产生影响。这与Li等^[11]在青藏高原的研究一致,补播的目的是增加草地优良牧草的比例并提高产量,通过引入适应性强的植物有效提高了草地产出。本研究结果显示,豆科植物在补播后迅速建立优势地位,至2024年其群落占比达72%。杨增增等^[12]研究表明,补播植物可快速填补裸露地表,提高覆盖度与空间利用率,有助于群落结构演替。此外,补播显著优化了植物群落结构与功能组成^[12],PCA分析表

明豆科和禾本科对群落结构的主成分贡献较大,补播后群落演替向高营养、高生产方向发展。Tilman^[13]提出群落结构的优化可增强资源利用效率与系统稳定性,本研究亦观测到随着补播年限的增加物种多样性指数存在明显的上升趋势,说明补播对物种多样性与稳定性存在积累效应。阎子盟等^[14]及Elsaesser等^[15]也强调豆科植物的引入可提高固氮能力,恢复草地产能与群落功能,从而提升群落的物种多样性。将优良豆科和禾本科牧草混播,如紫花苜蓿和无芒雀麦,这些优良种通过扩大生态位,从而提高了群落质量与资源利用效率^[16]。Guo等^[16]指出豆科在补播草地中可作为“护卫种”起到哺育效应进而提高系统产量,本试验结果也观察到豆科与禾本科混播后整体生产力的提升。总体而言,本研究的结果表明通过补播优良牧草可以提高退化草地生产力,增加优质牧草所占比例。

3.2 补播改善草地植被营养品质

草地植被的营养品质直接关系到畜牧业生产效益,提升饲草营养价值是草地修复的重要目标之一。为提升农场粗饲料蛋白质含量,有研究者在德国南部农场补播豆科植物发现,豆科植物生长良好,可增加干物质产量,且能通过固氮作用替代氮肥施用,在氮贫瘠草地上为蛋白质合成提供氮素^[15]。本研究通过比较补播草地与未补播草地上混合草样的营养品质指标发现,补播处理后牧草的粗蛋白含量显著增加。粗蛋白含量是评价牧草营养价值的指标之一,与牧草品质呈现正相关关系^[17],因此补播豆科等优良牧草对天然草地牧草品质的提升有积极作用。补播豆科和禾本科植物能够有效提高牧草营养品质,主要是由于豆科牧草的固氮能力以及丰富的蛋白、极少的纤维含量^[6],牧草的粗蛋白含量越高,粗纤维含量越低表明牧草的营养价值越高。补播显著提高了植物全磷、全钾及粗蛋白含量,验证了Zhou等^[18]提出的豆科建群后土壤微生物和牧草营养改善的协同机制。同时,补播导致粗脂肪含量下降(尤其在2024年下降至2.33%),可能与高温胁迫、草种选择及生育期结构变化有关。已有研究指出,高温胁迫通过抑制植物光合作用与脂质代谢降低脂肪合成^[19]。姚喜喜等^[20]和王晓彤等^[21]均指出,气候和土壤条件对饲草营养成分有显著影响,尤其在干旱胁迫下,植物会增加纤维含量、降低脂肪含量以增强生存适应性。补播还引

起ADF显著上升,这可能反映植物抗逆结构组分增强,也提示饲草“营养与结构”的动态平衡需进一步研究。总之,补播在提升氮素积累与蛋白水平方面效果显著,但脂类等成分的变化受环境和植物特性共同影响^[21]。

3.3 补播显著改善土壤理化特性

土壤肥力恢复是草地生态系统功能提升的关键。本研究表明,补播显著提高了土壤有机碳与全氮含量,且速效磷和全碳也存在明显的上升趋势,反映出补播后植物残体输入与根际活动增强,激活了土壤养分循环。这与朱锟恒等^[22]及晏和飘等^[23]的结论一致,指出补播可通过凋落物积累、根系更新与微生物作用改善土壤有机质与结构。本研究采用豆科+禾本科混播策略,其中根瘤固氮是提高土壤氮素的主要机制之一^[24]。此外,补播增加了群落覆盖度与生物量,高密度植物根系活动促进下层养分的吸收与活化,有效提升土壤肥力^[25-26]。

本研究还发现土壤pH值显著下降,说明补播有助于提高弱碱性土壤中养分有效性^[27]。而速效钾含量略有下降,可能因补播植物生长旺盛,吸收增强所致,也可能受降水淋失等因素影响^[28]。土壤磷含量提升虽不显著,但可能与磷肥残效及凋落物分解有关^[28]。总的来说,补播通过植被恢复-土壤改良-根际活化的耦合机制,显著改善了土壤质量^[26],为草地生态功能恢复提供了物质基础。

3.4 补播与集约牧养协同提升肉羊品质

补播通过提升牧草品质为集约牧养奠定基础,而MIG模式通过优化草畜耦合进一步放大技术效益。因此,肉羊品质差异体现的是“补播修复+MIG管理”集成体系的优势,而非单一补播措施的独立效应。本研究表明,在MIG集约化牧养模式下,肉羊肌肉中胱氨酸、酪氨酸、色氨酸等关键氨基酸含量显著高于舍饲处理(SS),其中色氨酸含量仅在MIG中检测到(0.24%),说明草地饲草质量对肉质风味具有显著影响。伍悦等^[29]与张楠等^[30]指出,必需氨基酸含量是衡量肉类营养价值的重要指标。然而总氨基酸含量在两处理间无显著差异,这可能受到羊种遗传、饲养周期及草料摄入量等因素的干扰,符合任晓璞等^[31]在多浪羊饲养方式研究中的结论。补播草地中谷氨酸和甘氨酸等鲜味氨基酸水平上升,有助于提升羊肉的风味与可接受度^[32]。

此外,补播提高的草地产出与营养质量,结合集约牧养中牲畜粪尿返还,形成草-畜耦合反馈系统,进一步促进草地养分循环与植被生长^[33]。研究也表明,适度放牧与补饲结合可提升羊肉氨基酸与脂肪酸质量^[34],本研究验证了补播与集约放牧在生态-经济双效提升方面的实践可行性。

4 结论

本研究表明,免耕补播技术体系(含建植期施肥与修复后集约牧养)通过协同调控植被-土壤-畜牧系统,显著提升退化草地生态功能与畜牧业效益。首先,补播修复显著提升了草地地上生物量,改善了植物群落结构,优良豆科牧草比例增加,群落多样性在补播处理下也显著提高。其次,改善了植物营养品质,提升了植株中全磷、全钾、粗蛋白和灰分含量,增强了草地的营养价值。土壤方面,补播显著提高了土壤有机碳和全氮含量,改善了土壤理化性质。此外,在补播修复草地上进行集约化牧养模式,在提升草地生态功能的同时,显著改善了肉羊的氨基酸组成与肉质品质,体现了植被-土壤-畜牧系统之间的协同调控效应。综上,免耕补播不仅有助于退化草地的生态恢复,也为草地多功能利用和可持续畜牧业发展提供了依据。

参考文献

- [1] LIU J G, DIAMOND J. China's environment in a globalizing world[J]. *Nature*, 2005, 435(7046): 1179-1186
- [2] 吴晓强. 天然草场机械化补播改良模式研究[J]. *现代农业科技*, 2019(17): 229, 232
- [3] 张英俊, 杨高文, 刘楠, 等. 草原碳汇管理对策[J]. *草业学报*, 2013, 22(2): 290-299
- [4] 刘玉玲, 王德平, 张泓博, 等. 补播时间和补播草种对退化草甸草原植物群落的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(11): 3098-3105
- [5] 王斌, 杨彦军, 董秀, 等. 补播禾草对退化苜蓿草地生产性能及牧草品质的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(3): 618-624

- WANG B, YANG Y J, DONG X, et al. Effects of reseeded grass on production performance and forage quality of degraded alfalfa grassland[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(3):618-624
- [6] 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
- [7] 国家市场监督管理总局. 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标:GB 19377—2003[S]. 北京:中国标准出版社, 2004:1-12
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Parameters for degradation, sandification and salification of rangelands: GB 19377—2003[S]. Beijing:China Standards Press, 2004:1-12
- [8] MA W H, LI F Y, LIANG C Z, et al. The steppes demonstrate higher productivity but lower diversity in Inner Mongolia than Mongolia: driven by climate or land use?[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2024, 33(5):1827-1843
- [9] 王志军, 包健, 丁霞, 等. 品种和生育期对紫花苜蓿的生产性能、营养品质和矿物质元素的影响[J]. *饲料研究*, 2024, 47(10):105-112
- WANG Z J, BAO J, DING X, et al. Effect of variety and fertility period on production performance, nutritional quality, and mineral elements of alfalfa[J]. *Feed Research*, 2024, 47(10):105-112
- [10] 李润富, 牛海山, 孔倩, 等. 围栏封育对高寒草原植被-土壤养分含量的影响[J]. *草业科学*, 2021, 38(3):399-409
- LI R F, NIU H S, KONG Q, et al. Effects of enclosure on plant and soil nutrients in an alpine grassland[J]. *Pratacultural Science*, 2021, 38(3):399-409
- [11] LI W L, SHANG X J, YAN H P, et al. Impact of restoration measures on plant and soil characteristics in the degraded alpine grasslands of the Qinghai Tibetan Plateau: a meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 347:108394
- [12] 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 reseeded on plant community composition and diversity of moderately degraded alpine grassland in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(5):1071-1077
- [13] TILMAN D. Niche tradeoffs, neutrality, and community structure: a stochastic theory of resource competition, invasion, and community assembly[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30):10854-10861
- [14] 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
- [15] ELSAESSE M, ENGEL S, BREUNIG J, et al. Increasing protein yields from grassland by reseeded of legumes[J]. *Grassland Science in Europe*, 2014(19):880-883
- [16] GUO M Q, GUO T T, ZHOU J Q, et al. Restored legume acts as a "nurse" to facilitate plant compensatory growth and biomass production in mown grasslands [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2024, 44(6):60
- [17] 席冬梅, 陈勇, 彭洪清. 多花黑麦草不同生长期营养价值评定[J]. *草原与草坪*, 2005, 25(2):62-64
- XI D M, CHEN Y, PENG H Q. Evaluation of nutritional value of *Lolium multiflorum* in different growth stages[J]. *Grassland and Turf*, 2005, 25(2):62-64
- [18] 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):273-292
- [19] 江珊, 吴龙英, 赵宝生, 等. 植物耐受高温胁迫的分子机制研究进展[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(9):132-138
- JIANG S, WU L Y, ZHAO B S, et al. Molecular mechanism of heat stress tolerance in plants: a review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(9):132-138
- [20] 姚喜喜, 王立亚, 严振英, 等. 青藏高原典型草地牧草营养品质和消化率特征及其相关性[J]. *草地学报*, 2021, 29(S1):113-120
- YAO X X, WANG L Y, YAN Z Y, et al. Characteristics of forage nutritional quality and digestibility in different types of grassland in Qinghai Tibet Plateau and their correlation [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(S1):113-120
- [21] 王晓彤, 柳小妮, 唐俊伟, 等. 干旱环境下4种高原禾本科牧草产量及营养品质比较[J]. *草原与草坪*, 2022, 42(1):57-61, 68
- WANG X T, LIU X N, TANG J W, et al. Comparison of yield and nutritional quality of 4 graminaceous forages on plateau under arid environment[J]. *Grassland and Turf*, 2022, 42(1):57-61, 68
- [22] 朱锟恒, 段良霞, 李元辰, 等. 土壤团聚体有机碳研究进展[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(21):86-90
- ZHU K H, DUAN L X, LI Y C, et al. Research progress of organic carbon in soil aggregates[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(21):86-90
- [23] 晏和飘, 李文龙, 梁天刚, 等. 青藏高原退化高寒草地恢复对不同措施响应的Meta分析[J]. *草地学报*, 2021, 29(S1):190-198
- YAN H P, LI W L, LIANG T G, et al. Meta-analysis of the response of degraded alpine grassland restoration in Qinghai-Tibet Plateau to different measures[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(S1):190-198
- [24] 杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 等. 水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响:Meta分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(3):1542-1552
- YANG R Z, YANG S L, WENG X Z, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration and aggregate stability in water-eroded environment: a meta-analysis[J].

- Environmental Science, 2023, 44(3):1542-1552
- [25] HU L N, LI Q, YAN J H, et al. Vegetation restoration facilitates belowground microbial network complexity and recalcitrant soil organic carbon storage in southwest China karst region [J]. Science of the Total Environment, 2022, 820:153137
- [26] 包雨凡, 罗玉红, 李乐, 等. 基于 Meta 分析的补播对退化草原恢复的影响[J]. 中国农业资源与区划, 2025, 46(5):248-256
- BAO Y F, LUO Y H, LI L, et al. Effects of reseeding on degraded grassland: a meta-analysis [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2025, 46(5): 248-256
- [27] 季波, 何建龙, 杜建明, 等. 不同补播配置模式对宁夏荒漠草原土壤有机碳和全氮储量的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(3):60-66
- JI B, HE J L, DU J M, et al. Effects of different reseeding modes on soil organic carbon and nitrogen reserves in Ningxia desert steppe [J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(3): 60-66
- [28] 李永康, 许冬梅, 撒春宁, 等. 乡土物种对退化荒漠草原的改良效果研究[J]. 中国草地学报, 2022, 44(6):36-45
- LI Y K, XU D M, SA C N, et al. The study on the improvement effect of native species on degraded desert steppe [J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(6):36-45
- [29] 伍悦, 马娜娜, 韩丽娟, 等. 基于响应面法和气相色谱-离子迁移谱优化藏羊羊肝粉腥味去除工艺[J]. 现代食品科技, 2025, 41(8):215-226
- WU Y, MA N N, HAN L J, et al. Optimization of the removal process of fishy odor from tibetan sheep liver powder using response surface methodology and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8):215-226
- [30] 张楠, 朱子雄. 永昌蘑菇羊与甘南藏羊肉品质比较[J]. 食品工业科技, 2018, 39(6):82-85, 101
- ZHANG N, ZHU Z X. Comparison for the quality of mutton from Yongchang sheep fed mushroom stalk and Gannan Tibetan sheep [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(6):82-85, 101
- [31] 任晓镔, 王群霞, 任少东, 等. 不同饲养方式对多浪羊肉矿物质、氨基酸含量及风味的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(18):25-32
- REN X P, WANG Q X, REN S D, et al. Effects of different feeding systems on minerals, amino acids and flavor of Duolang sheep meat [J]. Food Research and Development, 2023, 44(18):25-32
- [32] 郭伟, 王文义, 崔凯, 等. 低蛋白饲料补充 4 种氨基酸对肉用羊增重与肉质中氨基酸含量及血清学的影响[J]. 中国饲料, 2021(3):16-23
- GUO W, WANG W Y, CUI K, et al. Effects of supplementation of amino acids in low-protein diets on weight gain, serum protein index and amino acid content in meat of fattening mutton sheep [J]. China Feed, 2021(3):16-23
- [33] 范博, 王占义, 刘鹏博, 等. 生物炭基肥和补播对荒漠草原植物群落和土壤养分的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(12):3775-3784
- FAN B, WANG Z Y, LIU P B, et al. Effects of biochar-based fertilizer application and reseeding on plant community and soil nutrients in desert steppe [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(12):3775-3784
- [34] 季晶, 杨欢, 徐民乐, 等. 不同放牧强度和补饲水平下呼伦贝尔羊肉中氨基酸和脂肪酸组成分析[J]. 草地学报, 2024, 32(7):2273-2282
- JI J, YANG H, XU M L, et al. Amino acid and fatty acid profile of Hulunbuir lambs under different grazing intensities and supplementary feeding levels [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(7):2273-2282

(责任编辑 刘婷婷)