

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.030

引用格式:胡奕,于辉,管廷贤,等.灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿营养品质与经济效益的影响[J].草地学报,2026,34(5):1900—1909

HU Yi, YU Hui, GUAN Ting-xian, et al. Effects of Irrigation Amount and Biochar Application on Nutritional Quality and Economic Benefits of *Medicago sativa*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1900—1909

灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿营养品质与经济效益的影响

胡奕,于辉,管廷贤,刘兴义,杨合龙*,王文浩
(新疆农业大学草业学院,新疆乌鲁木齐830052)

摘要:本研究以紫花苜蓿(*Medicago sativa*)为研究对象,从营养品质与经济效益的角度出发,探究灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿实际生产效益的影响。本研究通过设置4个灌溉梯度(W_1 减量30%:450 mm、 W_2 减量15%:550 mm、 W_3 常规灌溉梯度:650 mm、 W_4 增量15%:750 mm)与2个生物质炭施用水平(C_0 :0 t·ha⁻¹, C_2 :20 t·ha⁻¹),测定不同灌溉与生物质炭施用梯度下紫花苜蓿营养品质与年干草产量,筛选能有效提高紫花苜蓿营养品质与经济效益的最佳灌溉量与生物质炭施用量。结果表明:生物质炭施用条件下,紫花苜蓿粗蛋白含量呈增长趋势,中性洗涤纤维较 C_0 处理显著下降,干物质采食率与相对饲喂价值均有显著提高。 W_2C_2 处理年产量较 W_2C_0 处理显著增加,且优于其他各处理,其年净利润为各处理最佳,为22 422.93 CNY·ha⁻¹,较 W_3C_0 提高2148.53 CNY·ha⁻¹。综合评估表明, W_2C_2 处理是实现紫花苜蓿产量、品质与经济效益协同提升的最优灌溉与生物质炭配施方案。

关键词:紫花苜蓿;生物质炭;灌溉量;营养品质;经济效益

中图分类号:S541.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1900-10

Effects of Irrigation Amount and Biochar Application on Nutritional Quality and Economic Benefits of *Medicago sativa*

HU Yi, YU Hui, GUAN Ting-xian, LIU Xing-yi, YANG He-long*, WANG Wen-hao
(College of Grassland Science Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: This study took *Medicago sativa* as the research object to explore the impacts of irrigation and biochar application on the actual production benefits of *Medicago sativa* from the perspective of nutritional quality and economic benefits. Four irrigation gradients (W_1 reduction of 30%: 450 mm, W_2 reduction of 15%: 550 mm, W_3 conventional irrigation gradient: 650 mm, W_4 increment of 15%: 750 mm) and two biochar application levels (C_0 : 0 t·ha⁻¹, C_2 : 20 t·ha⁻¹) were set to determine the nutrient quality and annual hay yield of *Medicago sativa* and screen the best irrigation amount and biochar application amount. The results showed that under the condition of biochar application, the crude protein content of *Medicago sativa* showed an increasing trend, the neutral detergent fiber was significantly lower than that under C_0 treatment, and the dry matter intake rate and relative feeding value were significantly improved. The annual yield in W_2C_2 treatment was significantly higher than that in W_2C_0 treatment, superior to other treatments, and the annual net profit was the best, 22 422.93 CNY·ha⁻¹, which was 2148.53 CNY·ha⁻¹ higher than W_3C_0 . Comprehensive evaluation showed that W_2C_2 treatment was the optimal irrigation and biochar application scheme to achieve the synergistic improvement of *Medicago sativa* yield, quality and economic benefits.

Key words: *Medicago sativa*; Biochar; Irrigation volume; Nutritional quality; Economic performance

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)为多年生豆科草本植物,凭借其出色的耐寒性、耐旱性以及土壤适

应性,在牧草种植与草地农业系统中占据着重要地位^[1]。紫花苜蓿不仅根系深广,能够有效固氮改良

收稿日期:2025-12-01;修回日期:2025-12-12

基金项目:2023年自治区重点实验室“土地利用方式对蒿类荒漠土壤有机碳稳定性影响研究”(2023D04083)资助

作者简介:胡奕(2001-),女,土家族,湖南慈利人,硕士研究生,主要从事农艺与种业研究,E-mail:1509670956@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail: yanghlcau@163.com

土壤,增强土壤肥力,而且作为高蛋白牧草,其营养价值丰富,被誉为“牧草之王”,对推动畜牧业生产效率和提升奶产品质量具有不可估量的价值^[2-3]。值得注意的是,随着全球可持续农业和食品安全意识的增强,对紫花苜蓿这类高品质牧草的需求急剧增加。新疆作为我国紫花苜蓿主产区之一^[4],年降水量仅100~300 mm^[5],远低于其优质高产所需的500~800 mm^[6],水资源短缺已成为制约该区域紫花苜蓿产业升级的核心瓶颈,如何实现节水与优质高产协同成为亟待解决的现实问题。

生物质炭(Biochar)作为一种重要的土壤改良剂,是以秸秆等农林废弃物为原料,在无氧或缺氧条件下高温热解或碳化制得的一种高孔隙度、高比表面积的情性生物质材料^[7]。各项研究表明,生物质炭能有效改善土壤肥力,促进作物生长^[8]。同时,生物质炭高孔隙度、高比表面积的特性使其能够吸附大量的气体和溶液,从而起到保水的作用^[9]。灌溉作为农业生产中的重要环节,对植物生产同样具有重要影响,不同灌溉量处理下的植物产量与品质存在较大的差异^[10]。目前在农业生产中常通过控制灌溉量的方法,以提高生产效率,缓解干旱地区水资源短缺问题^[11]。大量研究表明,灌溉对土壤理化性质以及植物生长、产量都有重要影响^[12-14]。尽管两者的单独应用研究较为丰富,但针对干旱半干旱区核心矛盾的协同应用研究仍存在明显不足,目前关于生物质炭与灌溉量耦合对紫花苜蓿营养品质及经济效益影响的系统研究仍较为缺乏,尤其在干旱半干旱地区的适用性尚待深入探讨。

本试验立足新疆等干旱半干旱地区水资源短缺的现实困境,以紫花苜蓿为研究对象,设置不同灌溉量与生物质炭施用量组合处理,对紫花苜蓿营养品质、产量及经济效益进行测定分析与计算,旨在明确生物质炭施用与灌溉量调控的协同效应,筛选能有效提高紫花苜蓿营养品质与经济效益的最佳灌溉量与生物质炭施用量组合,为该区域紫花苜蓿节水优质高产栽培提供科学依据与实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所种植的‘新牧4号’紫花苜蓿种子由新疆农业大学草业学院提供。施用的生物质炭从河南佳禾净水材料有限公司购买,原材料为玉米秸秆,炭烧温度从300~700℃升温制备而成,颗粒直径200目,氮含量1.61%,总碳含量70.2%。磷酸二铵

DAP总养分(N+P₂O₅)≥64.0%。

1.2 试验设计

研究区位于新疆博乐市草原生态修复乡土草种繁育联合示范基地(44°82′N,82°01′E,海拔621 m),土壤类型为灰钙土,气候类型为温带大陆性干旱气候,年均降水量208.5 mm,年均蒸发量1562.4 mm,年均温度8.7℃,全年无霜期平均为180 d。本试验采用完全随机区组设计,设置灌溉量和生物炭2个因素,共8个处理:W₁C₀,W₁C₂,W₂C₀,W₂C₂,W₃C₀,W₃C₂,W₄C₀,W₄C₂,每个处理设置5个重复,共计40个小区样地,小区面积3 m×4 m,间隔1 m。其中,年灌溉量依照干旱地区紫花苜蓿(‘新牧4号’)生产常规灌溉量^[15]等梯度增减设置4个水平,减量30%:W₁(450 mm)、减量15%:W₂(550 mm)、常规灌溉量:W₃(650 mm)、增量15%:W₄(750 mm)。生物质炭总量依照农作物常用施用量设置2个水平:C₀(0 t·ha⁻¹)、C₂(20 t·ha⁻¹),于播种前一次性施入。

2024年4月底划分试验小区,将生物质炭均匀撒在处理小区表面,翻耕(25 cm)平整,其他小区土壤耕作处理相同。随后进行覆膜垄沟播种,垄高25 cm,沟垄比为70:40 cm,用宽700 mm的白色薄膜覆盖沟,苜蓿采用穴播的播种方式,每条沟内种4行,行距15 cm,每小区播种量相同(18 kg·ha⁻¹)。试验采用滴灌方式进行灌溉,试验设计为每15天进行1次灌溉,但灌溉间隔天数随实际降水情况进行调整,一年共灌溉12次。

1.3 指标测定及方法

根据实际生产情况,在紫花苜蓿初花期进行刈割,2024年共刈割3茬,2025年共刈割5茬。每茬刈割后,在各小区随机取200 g鲜草样品,带回实验室置于烘箱中105℃杀青30 min后,80℃烘24 h至恒重后称重,计算干鲜比,样方取样结束后,按照紫花苜蓿刈割留茬高度(5 cm)刈割,称重,进行产量测定,记作现存鲜重产量,随后利用干鲜比计算干草产量。对每年第一茬各处理刈割后的200 g烘干样品进行粉碎处理,过1 mm筛后留样,用于测定以下指标:粗蛋白、粗灰分和中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维。

粗蛋白(Crude protein,CP)采用凯氏定氮仪测定;粗灰分(Coarse ash,ASH)采用燃烧法;中性洗涤纤维(Neutral detergent fibre,NDF)和酸性洗涤纤维(Acid detergent fibre,ADF)采用范式纤维分析法测定。

干物质消化率(DDM)=
88.9-0.799×牧草的酸性洗涤纤维含量;

干物质采食量(DMI)=

120/牧草的中性洗涤纤维含量;

相对饲用价值(RFV)=(DDM值×DMI值)/1.29;

经济效益=两年平均年产量×牧草单价-灌水价
格-(底肥+生物质炭价格)/10^[16]。

1.4 数据处理

采用Excel对营养品质和产量数据进行初步分析处理,SPSS 26数据统计软件对不同灌溉量与生物质炭添加下紫花苜蓿营养品质、产量等进行双因素方差分析,并进行Duncan多重比较。采用熵权-TOPSIS法对不同处理的营养品质与产量进行综合评价。通过信息熵计算各指标的客观权重,再通过逼近理想解排序法计算各处理与最优方案的相对接近度。利用Origin 2021绘制不同灌溉量与生物质炭施用处理下紫花苜蓿营养品质与产量情况

柱状图、灌溉量与生物质炭对紫花苜蓿营养品质与产量的相关性分析图,以及各处理营养品质与产量的熵权-TOPSIS法综合评价排序图。

2 结果与分析

2.1 灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿营养品质的影响

如图1a所示,2024年各处理间紫花苜蓿粗蛋白含量无显著性差异。由图1a、1b可知,在同一灌溉梯度下,C₂处理紫花苜蓿粗蛋白含量均较C₀增加,且在W₁灌溉梯度下,2025年紫花苜蓿C₂处理较C₀处理显著增加($P<0.05$,图1b)。在C₀处理下,紫花苜蓿粗蛋白含量随灌溉量增加而增加,在W₄处理达到峰值(图1a、1b);在C₂处理下,紫花苜蓿粗蛋白含量随灌溉量增加呈先增加后降低的趋势,在W₂处理达到峰值(图1a、1b)。

如图1c、1d所示,在同一灌溉梯度下,C₂处理紫花苜蓿粗灰分含量均较C₀增加,但无显著性差异。

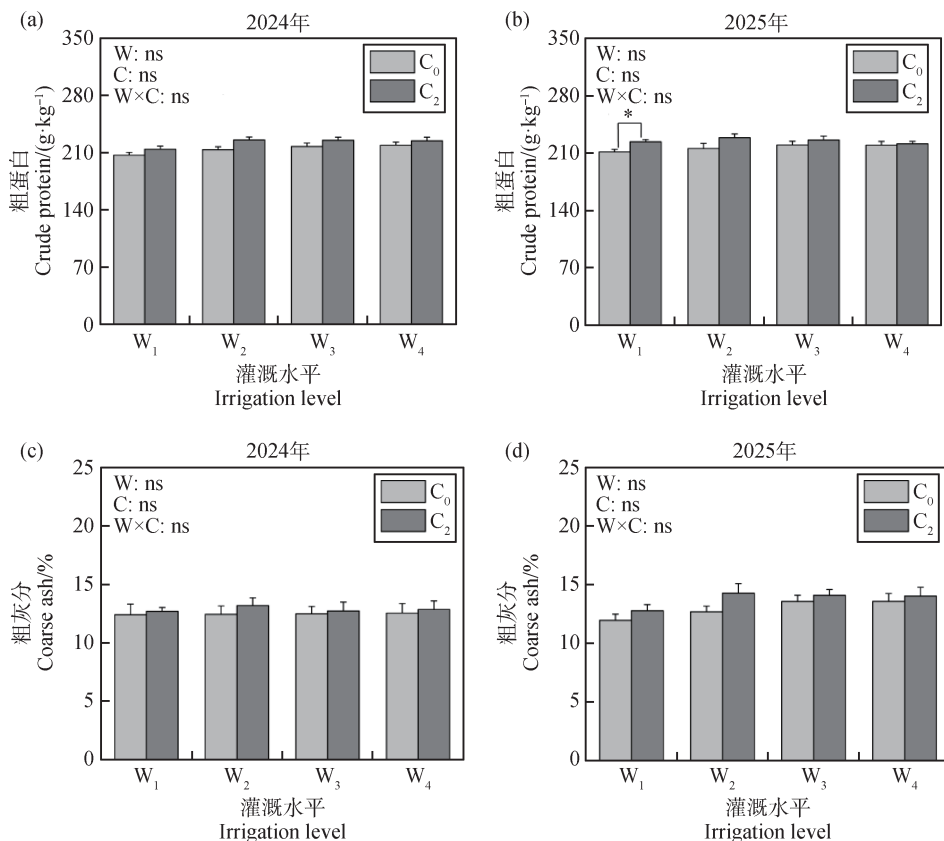


图1 灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿粗灰分、粗蛋白的影响

Fig. 1 Effects of irrigation amount and biochar application on crude ash and crude protein of *Medicago sativa*

注: W₁, 灌溉量 450 mm; W₂, 灌溉量 550 mm; W₃, 灌溉量 650 mm; W₄, 灌溉量 750 mm; C₀, 施入生物质炭 0 t·ha⁻¹; C₂, 施入生物质炭 20 t·ha⁻¹。同一颜色柱条上的字母代表该生物质炭处理下, 各灌溉水平间存在显著性差异($P<0.05$), *代表同一灌溉水平下, 生物质炭处理间存在显著性差异。*表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.01$, 下同

Note: W₁, irrigation amount 450 mm; W₂, irrigation amount 550 mm; W₃, irrigation amount 650 mm; W₄, irrigation amount 750 mm; C₀, biochar 0 t·ha⁻¹; C₂, biochar 20 t·ha⁻¹. The letters on the column bar of the same color represent that there are significant differences among different irrigation levels under the biochar treatment ($P<0.05$). * represents that there are significant differences among biochar treatments under the same irrigation level. * indicates $P<0.05$, ** indicates $P<0.01$, the same as below

如图 2a、2b 所示,在同一灌溉梯度下, C_2 处理紫花苜蓿中性洗涤纤维含量均较 C_0 降低,且 2024 年 W_2 灌溉梯度下紫花苜蓿 C_2 处理较 C_0 处理显著降低($P < 0.05$,图 2a),2025 年 W_1 、 W_2 、 W_3 灌溉梯度下紫花苜蓿 C_2 处理均较 C_0 处理显著降低($P < 0.05$,图 2b)。在 C_0 处理下,2025 年 W_4 灌溉梯度紫花苜蓿中性洗涤纤维

含量较 W_1 处理显著降低($P < 0.05$,图 2b)。

如图 2c、2d 所示,在同一灌溉梯度下, C_2 处理紫花苜蓿酸性洗涤纤维含量均较 C_0 降低,但 2024 年各处理间酸性洗涤纤维含量无显著性差异(图 2c)。在 C_0 处理下,2025 年 W_4 灌溉梯度紫花苜蓿酸性洗涤纤维含量较 W_1 处理显著降低($P < 0.05$,图 2d)。

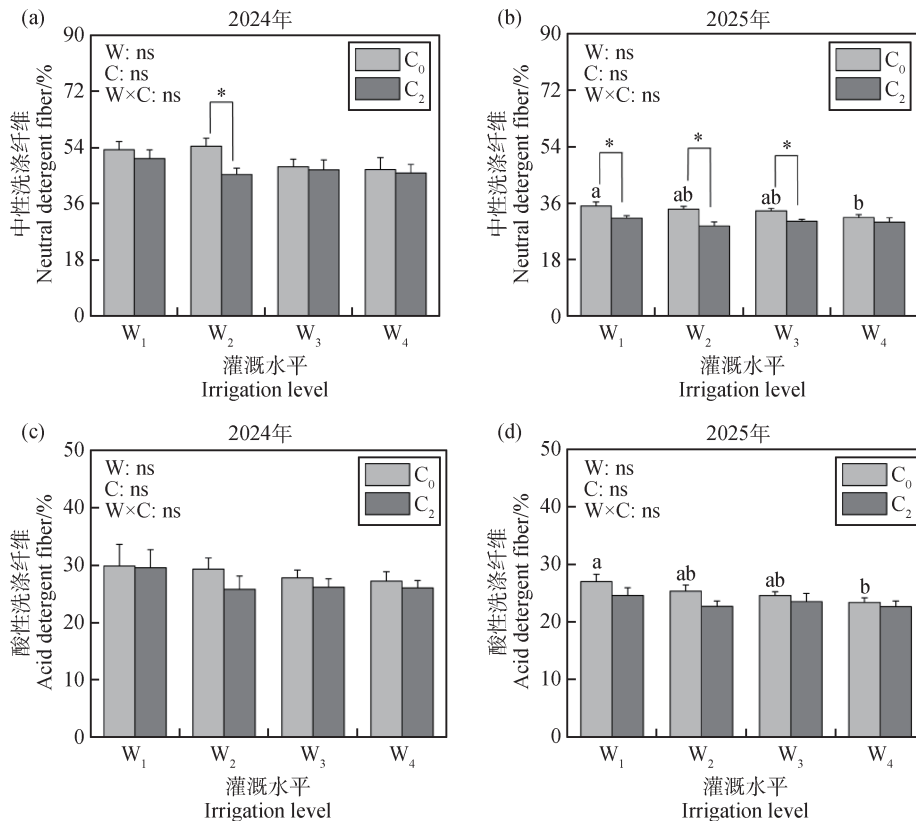


图2 灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维的影响

Fig. 2 Effects of irrigation amount and biochar application on neutral detergent fiber and acid detergent fiber of *Medicago sativa*

2.2 灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿干物质消化率、采食率的影响

由图 3a、3b 可知,在同一灌溉梯度下, C_2 处理紫花苜蓿干物质消化率均较 C_0 增加。2024 年各处理间干物质消化率无显著性差异(图 3a),在 C_0 处理下,2025 年 W_4 灌溉梯度紫花苜蓿干物质消化率较 W_1 显著增加($P < 0.05$,图 3b)。

由图 3c、3d 可知,在同一灌溉梯度下, C_2 处理紫花苜蓿干物质采食率均较 C_0 增加。在 W_1 灌溉梯度下,2025 年 C_2 处理紫花苜蓿干物质采食率较 C_0 显著增加($P < 0.05$,图 3d);在 W_2 灌溉梯度下,2024 年、2025 年 C_2 处理紫花苜蓿干物质采食率均较 C_0 显著增加($P < 0.05$,图 3a、3d);在 W_3 灌溉梯度下,2025 年 C_2 处理紫花苜蓿干物质采食率较 C_0 极显著增加($P < 0.01$,图 3d)。在 C_0 处理下,2025 年 W_4 灌溉梯

度紫花苜蓿干物质采食率较 W_1 显著增加($P < 0.05$,图 3d)。

2.3 灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿相对饲喂价值的影响

由图 4a、4b 可知,在同一灌溉梯度下, C_2 处理紫花苜蓿相对饲喂价值均较 C_0 增加。在 W_1 灌溉梯度下,2025 年 C_2 处理紫花苜蓿相对饲喂价值较 C_0 显著增加($P < 0.05$,图 4b);在 W_2 灌溉梯度下,2024 年、2025 年 C_2 处理紫花苜蓿相对饲喂价值均较 C_0 显著增加($P < 0.05$,图 4a、4b);在 W_3 灌溉梯度下,2025 年 C_2 处理紫花苜蓿相对饲喂价值较 C_0 显著增加($P < 0.05$,图 4b)。在 C_0 处理下,2025 年 W_4 灌溉梯度紫花苜蓿相对饲喂价值较 W_1 、 W_2 均显著增加($P < 0.05$,图 4b)。

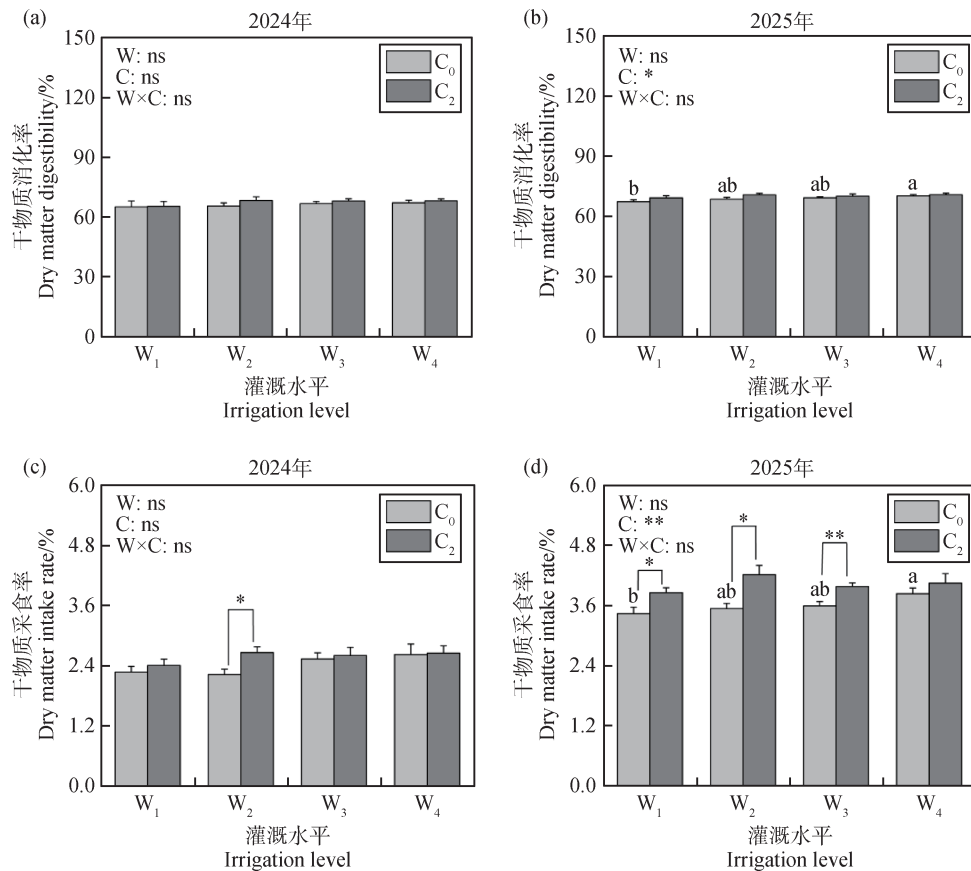


图3 灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿干物质消化率、采食量的影响

Fig. 3 Effects of irrigation and biochar application on dry matter digestibility and feed intake of *Medicago sativa*

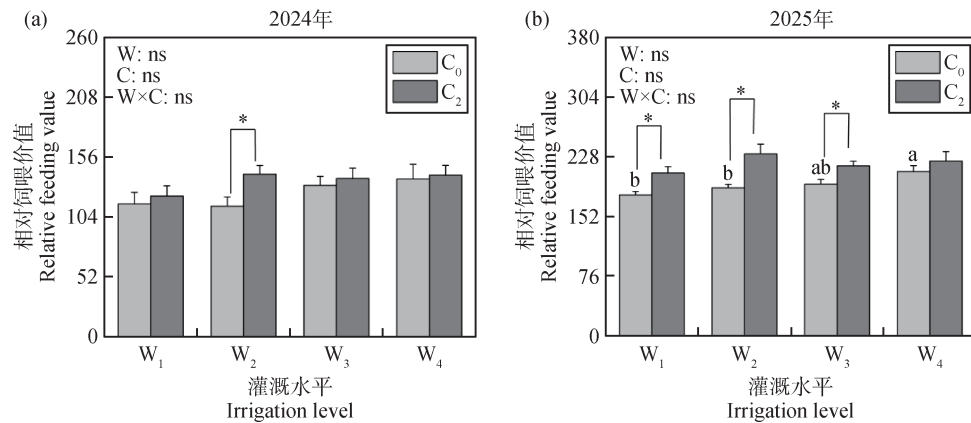


图4 灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿相对饲喂价值的影响

Fig. 4 Effects of irrigation amount and biochar application on relative feeding value of *Medicago sativa*

2.4 灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿年产量的影响

由图 5a 可知,在 W₁与 W₂灌溉梯度下,2024 年 C₂处理紫花苜蓿年产量较 C₀处理提高。2025 年紫花苜蓿年产量在同一灌溉梯度下,C₂处理均较 C₀处理提高,且在 W₂灌溉条件下,C₂处理较 C₀处理显著提高($P < 0.05$,图 5b)。在 C₀处理下,2025 年 W₄处理年产量最佳且显著高于 W₁处理($P < 0.05$,图 5b),在 C₂处理下,2025 年 W₂处理年产量最佳且显著高于 W₁处理($P < 0.05$,图 5b)。

2.5 灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿经济效益的影响

根据 2024、2025 年新疆地区的市场销售价格,计算紫花苜蓿两年平均干草产量,对本研究的经济效益进行初步评估。由表 1 可知,不同牧草各处理的经济收入为 16 198.26~22 422.93 CNY·ha⁻¹;其中 W₁C₂处理纯利润最低,为 16 198.26 CNY·ha⁻¹,W₂C₂纯利润处理最高,为 22 422.93 CNY·ha⁻¹。

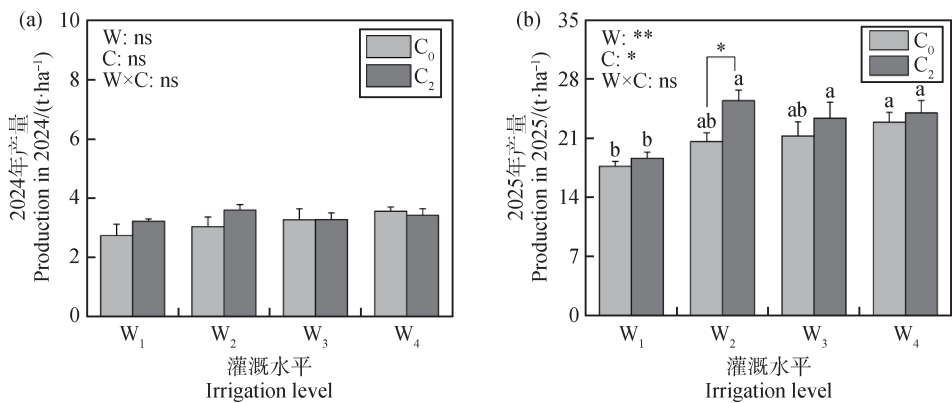


图 5 灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿年产量的影响

Fig. 5 Effects of irrigation and biochar application on annual yield of *Medicago sativa*

表 1 经济效益的初步评估

Table 1 Preliminary assessment of economic benefit

处理 Treatment	年平均产量 Annual average yield/(t·ha ⁻¹)	收益 Revenue/(CNY·ha ⁻¹)	纯利润 Net profit/(CNY·ha ⁻¹)
W ₁ C ₀	10.22	18 402.81	17 098.11
W ₂ C ₀	11.84	21 306.73	19 733.03
W ₃ C ₀	12.29	22 117.10	20 274.40
W ₄ C ₀	13.24	23 840.37	21 728.67
W ₁ C ₂	10.95	19 702.96	16 198.26
W ₂ C ₂	14.55	26 196.63	22 422.93
W ₃ C ₂	13.35	24 028.72	19 986.02
W ₄ C ₂	13.74	24 723.84	20 412.14

2.6 紫花苜蓿营养品质各指标之间的相关性分析

对 2025 年紫花苜蓿粗蛋白、粗灰分、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、干物质消化率、干物质采食率、相对饲喂价值、年产量等 8 个指标进行了相关性分析,由图 6 可知,紫花苜蓿粗灰分干物质消化率与灌溉量呈显著正相关($P<0.05$),年产量与灌溉量呈极显著正相关($P<0.01$),酸性洗涤纤维与灌溉量呈显著负相关($P<0.05$),说明灌溉对紫花苜蓿粗灰分、酸性洗涤纤维、干物质消化率以及年产量均有较大影响。干物质消化率、年产量与生物质炭呈显著正相关($P<0.05$),粗蛋白、干物质采食率、相对饲喂价值与生物质炭呈极显著正相关($P<0.01$),酸性洗涤纤维与生物质炭呈显著负相关($P<0.05$),中性洗涤纤维与生物质炭呈极显著负相关($P<0.01$),说明生物质炭对紫花苜蓿粗灰分、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、干物质消化率、干物质采食率、相对饲喂价值以及年产量均有较大影响。

2.7 不同处理下紫花苜蓿营养品质与产量指标的综合评价

通过对紫花苜蓿粗灰分、粗蛋白、中性洗涤纤

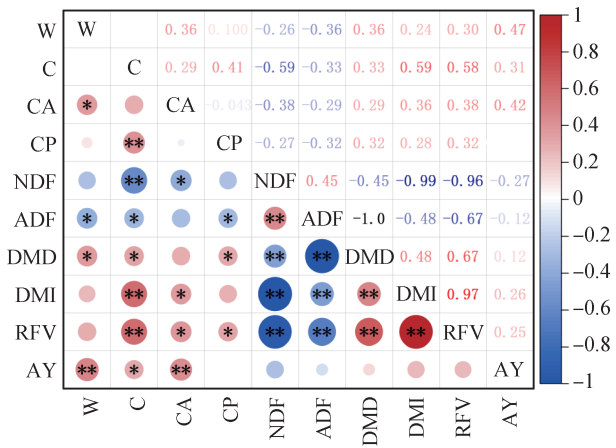


图 6 灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿营养品质与产量各指标之间的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between irrigation amount and biochar application and *Medicago sativa* nutritional quality and yield

注:W,灌溉量;C,生物质炭;CP,粗蛋白;CA,粗灰分;NDF,中性洗涤纤维;ADF,酸性洗涤纤维;DMD,干物质消化率;DMI,干物质采食率;RFV,相对饲喂价值;AY,年产量;*,**分别代表 $P<0.05$, $P<0.01$
Note: W, irrigation volume; C, biochar; CP, crude protein; CA, coarse ash; NDF, neutral detergent fiber; ADF, acid detergent fiber; DMD, dry matter digestibility; DMI, dry matter intake rate; RFV, relative feeding value; AY, annual yield; *, ** stands for $P<0.05$ and $P<0.01$ respectively

维、酸性洗涤纤维、干物质消化率、干物质采食率、相对饲喂价值进行熵值法计算权重、TOPSIS法计算评价对象与理想解/负理想解的欧氏距离得出的结果排序。由表2可知,紫花苜蓿相对饲喂价值占比权重系数较高。TOPSIS评价计算结果中,C表示评价对象与最优方案的接近程度,该值越大说明

越接近最优方案,由表3可知,不同处理下紫花苜蓿农艺性状的综合评价排序如下:

$$W_2C_2>W_4C_2>W_3C_2>W_4C_0>W_1C_2>W_3C_0>W_2C_0>W_1C_0。$$

由图7可知,各灌溉水平下,C₂处理综合评价均高于C₁处理,且W₂C₂处理综合评价最优。

表 2 熵值法计算权重结果汇总

Table 2 Summary of weight calculation results by entropy method

处理 Treatment	信息熵值e Information entropy e	信息效用值d Information utility value d	权重系数w Weight coefficient w/%
CA	0.9992	0.0008	9.14
CP	0.9999	0.0001	1.53
NDF	0.9990	0.0010	11.86
ADF	0.9992	0.0008	8.89
DMD	0.9999	0.0001	0.70
DMI	0.9989	0.0011	12.12
RFV	0.9984	0.0016	18.37
AY	0.9967	0.0033	37.38

注:CA,粗灰分;CP,粗蛋白;NDF,中性洗涤纤维;ADF,酸性洗涤纤维;DMD,干物质消化率;DMI,干物质采食率;RFV,相对饲喂价值;AY,年产量

Note: CA, coarse ash; CP, crude protein; NDF, neutral detergent fiber; ADF, acid detergent fiber; DMD, dry matter digestibility; DMI, dry matter intake rate; RFV, relative feeding value; AY, annual yield

表 3 TOPSIS评价计算结果

Table 3 TOPSIS evaluation calculation results

处理 Treatment	正理想解距离D+	负理想解距离D-	相对接近度C	排序结果
	Distance of positive ideal solution D+	Negative ideal solution distance D-	Relative proximity C	Sort results
W ₁ C ₀	10.081	0.850	0.078	8
W ₂ C ₀	8.191	2.105	0.204	7
W ₃ C ₀	7.269	2.953	0.289	6
W ₄ C ₀	4.315	5.826	0.574	4
W ₁ C ₂	5.174	5.206	0.502	5
W ₂ C ₂	0.848	10.081	0.922	1
W ₃ C ₂	2.991	7.167	0.706	3
W ₄ C ₂	1.920	8.307	0.812	2

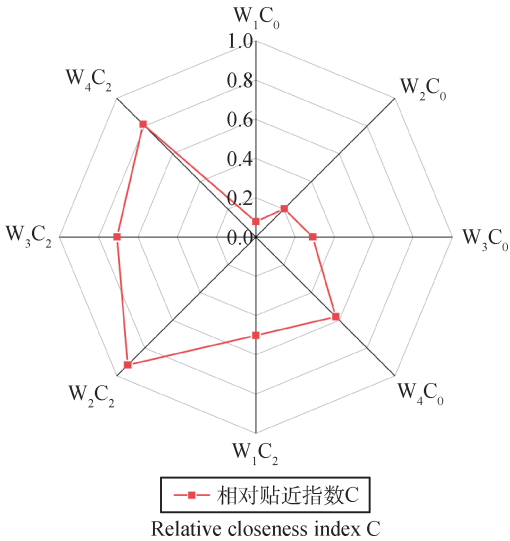


图 7 熵权-TOPSIS法综合评价排序图

Fig. 7 Entropy weight TOPSIS comprehensive evaluation ranking chart

3 讨论

3.1 灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿营养品质的影响

粗蛋白是评价牧草营养价值的核心指标,其积累受土壤氮素供应与植株代谢能力的共同调控^[17-18]。本研究发现,生物质炭施用(C₂)在低灌溉条件下(W₁)显著提高了粗蛋白含量(P<0.05),这与王小赟等^[19]的研究结论一致,这可能是由于生物质炭通过其多孔结构增强了土壤对铵态氮的吸附能力,减少氮素挥发与淋失,从而延长氮素有效供应期,为苜蓿蛋白质合成提供了稳定的氮源^[20-21]。在无生物质炭处理(C₀)中,粗蛋白随灌溉量增加持续上升至W₄达到峰值,表明水分充足促进了土壤氮素迁移与根系吸收^[22];而在C₂处理下,粗蛋白在W₂

灌溉水平达到峰值后下降,说明适量节水灌溉与生物质炭的协同效应优于高水投入,这为干旱区水炭协同管理提供了依据。

中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)与酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF)含量直接影响牧草适口性与家畜消化率^[23-24]。本研究中, C_2 处理显著降低了NDF与ADF含量,尤其在2025年 $W_1 \sim W_3$ 灌溉条件下差异显著($P < 0.05$),这可能是因为生物质炭通过改善土壤团聚结构、增强通气性与保水能力,促进苜蓿根系下扎与养分吸收,减少了细胞壁纤维类物质的积累^[25],该结果与王新^[26]的研究相符。同时, W_2C_2 处理纤维含量较其他各处理最低,进一步证实减量灌溉配施生物质炭在改善牧草纤维品质方面的积极作用。

本试验中, W_2C_2 处理干物质消化率(Dry matter digestibility, DMD)、采食率(Dry matter intake rate, DMI)与相对饲喂价值(Relative feeding value, RFV)达到各处理最佳,进一步验证了减量灌溉配施生物质炭的协同调控效果。DMD的提高本质是营养成分优化的直接体现, C_2 处理下粗蛋白升高、纤维降低的双重效应,显著提升消化效率,消化率的提高又进而促进家畜采食量增加^[27]。RFV作为综合评价牧草营养品质的核心指标(本研究权重达18.37%), C_2 处理下RFV在各灌溉梯度均优于 C_0 ,且在 $W_1 \sim W_3$ 条件下提升显著($P < 0.05$),在 W_2 达到峰值,说明生物质炭在提升苜蓿整体饲用价值方面具有稳定且积极的作用。这一结果与前文粗蛋白、纤维含量及消化特性的改善趋势一致,体现了水炭耦合通过多途径协同提升牧草营养品质的机制。

3.2 灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿经济效益的影响

本试验结果表明,生物质炭施用能显著提高紫花苜蓿产量。产量是决定种植效益的基础,本研究发现,2025年 C_2 处理在各灌溉水平下均实现增产,其中 W_2C_2 处理产量显著高于 C_0 ,这与朱进辉等^[28]的研究结果一致。生物质炭通过增强土壤持水保肥能力,缓解水分胁迫对苜蓿生长的抑制^[29],尤其在适度灌溉(W_2)条件下表现出最佳增产效果。在 C_0 处理中,产量随灌溉量增加而持续上升,表明水分是限制作物生产的主要因素^[30];而在 C_2 处理下, W_2 已成为产量峰值点,说明生物质炭的添加提升了水分利用效率,实现了“减水不减产”的协同效应。

从经济效益看, W_2C_2 处理的纯利润最高(22422.93 CNY·ha⁻¹),且较常规灌溉 W_3C_0 增收2148.53 CNY·ha⁻¹,其收益优势不仅源于产量的提升,也与饲草品质改善带来的潜在附加值有关。熵权-TOPSIS综合评价结果显示, W_2C_2 处理的相对接近度($C=0.922$)显著高于其他处理,进一步说明“适度灌溉+生物质炭”模式在提升苜蓿综合生产性能方面具有显著优势。

4 结论

研究发现,灌溉量与生物质炭施用对紫花苜蓿生产存在显著协同效应,生物质炭施用可通过提升水分利用效率,实现干旱半干旱区紫花苜蓿减灌提质增产的目标。其中灌溉量550 mm结合生物质炭20 t·ha⁻¹(W_2C_2)为最优组合模式,该模式既能显著提升紫花苜蓿干物质采食率、相对饲喂价值以及年产量,降低纤维组分,又能通过适度灌溉降低生产成本,使其年利润较常规灌溉量提高2148.53 CNY·ha⁻¹,符合干旱区农业“节水提质增效”的发展需求,有效解决了干旱半干旱区紫花苜蓿生产中节水与优质高产的矛盾。

参考文献

- [1] 王俊杰,云锦凤,吕世杰. 黄花苜蓿种质的优良特性与利用价值[J]. 内蒙古农业大学学报,2008(1):215-219
WANG J J, YUN J F, LÜ S J. Characteristics and utilization value on the germplasm of *Medicago falcata* [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2008(1):215-219
- [2] 曹立娟. 灌水与施肥对紫花苜蓿种子生产性能及土壤理化性质的影响[D]. 银川:宁夏大学,2023:21-27
CAO L J. Effects of irrigation and Fertilization on alfalfa seed production performance and soil physical and chemical properties [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023:21-27
- [3] 郑敏娜,梁秀芝,韩志顺,等. 不同磷素水平对紫花苜蓿磷累积动态和种子产量构成因子的影响[J]. 草地学报,2020,28(1):80-87
ZHENG M N, LIANG X Z, HAN Z S, et al. Effects of phosphorus Application levels on phosphorus accumulation and seed yield factors of Alfalfa (*Medicago sativa*) [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(1):80-87
- [4] 谢开云,何峰,李向林,等. 我国紫花苜蓿主产田土壤养分和植物养分调查分析[J]. 草业学报,2016,25(3):202-214
XIE K Y, HE F, LI X L, et al. Analysis of soil and plant nutrients in alfalfa fields in China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(3):202-214
- [5] 李廷栋,刘勇,王森,等. 中国大陆地貌特征及其成因探讨[J]. 地学前缘,2025,32(6):245-255

- LI T D, LIU Y, WANG M, et al. Discussion on geomorphic characteristics and formative causes of the Chinese mainland[J]. Earth Science Frontiers, 2025, 32(6): 245-255
- [6] 王琦, 张恩和, 龙瑞军, 等. 不同灌溉方式对紫花苜蓿生长性能及水分利用效率的影响[J]. 草业科学, 2006(9): 75-78
WANG Q, ZHANG E H, LONG R J, et al. Effects of different irrigation methods on the production and WUE of Alfalfa[J]. Pratacultural Science, 2006(9): 75-78
- [7] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 等. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. 土壤, 2011, 43(6): 857-861
XIE Z B, LIU Q, XU Y P, et al. Advances and perspectives of biochar research[J]. Soils, 2011, 43(6): 857-861
- [8] ABEDIN J, UNC A. Addition of biochar to acidic boreal podzolic soils enhances micronutrient availability and crop productivity[J]. Open Agriculture, 2020, 5(1): 188-201
- [9] 张世文, 刘文正, 李超, 等. 矿物改性生物质炭对土壤团聚体的影响研究进展[J]. 浙江农业科学, 2024, 65(12): 3053-3060
ZHANG S W, LIU W Z, LI C, et al. Research Progress on the effect of mineral modified biochar on soil aggregates[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Science, 2024, 65(12): 3053-3060
- [10] 於凝, 王林林, 李玲玲, 等. 水肥一体化减氮对陇中地区马铃薯产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(4): 70-78
YU N, WANG L L, LI L L, et al. Effects of integrated water and fertilizer nitrogen reduction on potato yield and water use efficiency in Longzhong region of Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(4): 70-78
- [11] 孙铁男. 调亏灌溉对科尔沁沙地紫花苜蓿生产性能和水分利用效率的影响[D]. 通辽: 内蒙古民族大学, 2025: 40-43
SUN T N. Effects of regulated deficit irrigation on production performance and water use efficiency of alfalfa in Horqin sandy land[D]. Tongliao: Inner Mongolia Minzu University, 2025: 40-43
- [12] 丁磊. 基于喀斯特地区水资源高效利用的节水灌溉技术初探[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2018: 55-56
DING L. Water-saving irrigation technology based on efficient utilization of water resources in karst areas[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2018: 55-56
- [13] 薛里, 张忠学, 齐智娟, 等. 节水灌溉下秸秆还田形式对黑土区稻田 N_2O 排放与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 280-289
XUE L, ZHANG Z X, QI Z J, et al. Effects of straw returning on N_2O emission and yield under water-saving irrigation in black soil paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 280-289
- [14] TANG Z N, JIAN Y H, ZHONG X Z, et al. The inhibitory effect of a water-saving irrigation regime on CH_4 emission in Mollisols under straw incorporation for 5 consecutive years[J]. Agricultural Water Management, 2023, 278: 108163
- [15] 徐晓宇. 基于Meta分析的不同灌溉量对作物产量、水分利用效率及品质的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021: 43
XU X Y. Effects of irrigation amounts on yield, water use efficiency and quality of several crops based on Meta analysis[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021: 43
- [16] 潘少彤. 含生物质炭土壤中底物矿化过程及其物理与生物学机理[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 33-41
PAN S T. Mineralization process of substrate in biochar-containing soil and associated physio-biological mechanisms[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 33-41
- [17] 赵建诚, 杨振亚, 王波, 等. 鸡粪有机肥配施生物炭提高雷竹林土壤肥力和竹笋产量品质[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(3): 458-469
ZHAO J C, YANG Z Y, WANG B, et al. Combined application of chicken manure and biochar improves soil fertility and bamboo shoot yield and quality of *Phyllostachys violascens* 'Prevernalis' forests[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025, 31(3): 458-469
- [18] 马媛媛. 基于多组学的旱作紫花苜蓿生物衰退机制解析及减缓措施研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2025: 143-147
MA Y Y. Multi-omic unravels drought-induced alfalfa decline and resilience solutions[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2025: 143-147
- [19] 王小赞, 王琦, 张登奎, 等. 生物炭-土壤结皮覆盖垄沟种植对土壤水肥、紫花苜蓿品质和产量的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(4): 1014-1026
WANG X Y, WANG Q, ZHANG D K, et al. Effects of ridge mulching biochar on soil moisture and fertilizer, quality and yield of alfalfa in ridge-furrow rainwater harvesting[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(4): 1014-1026
- [20] 张悦彤. 连作轮作条件下生物质炭对草甸碱土养分性状与氮相关微生物的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2024: 13-14
ZHANG Y T. Effects of biochar on nutrient traits and nitrogen-associated microorganisms in meadow alkali soil under continuous cropping and rotation[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2024: 13-14
- [21] 张晨阳, 孙力扬, 徐明岗, 等. 土壤微生物碳利用效率对农田管理措施响应的机制[J]. 土壤学报, 2025, 62(1): 177-188
ZHANG C Y, SUN L Y, XU M G, et al. Response mechanism of soil microbial carbon use efficiencies to cropland management measures[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(1): 177-188
- [22] 张蓬妍, 刘江舟, 王茂东, 等. 亏缺灌溉配施生物炭对关中原夏玉米产量和土壤 N_2O 排放的影响[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 686-696
ZHANG P Y, LIU J Z, WANG M D, et al. Effects of deficit irrigation combined with biochar on summer maize yield and soil N_2O emission in Guanzhong Plain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 686-696
- [23] 倪苗. 鄂尔多斯地区苜蓿品种评价与筛选[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019: 24-25
NI M. Evaluation and selection of alfalfa varieties in ordos area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019: 24-25
- [24] 毕盛楠, 侯伟峰, 德木其格, 等. 19个野生羊草种质资源农艺性状、产量及营养品质综合评价[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2025(10): 130-136, 142

- BIS N, HOU W F, DE M Q G, et al. Comprehensive evaluation of agronomic traits, yield and nutritional quality of 19 wild *Leymus chinensis* germplasm resources [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2025 (10): 130-136, 142
- [25] 刘耀臣, 王萍, 刘润进, 等. 丛枝菌根真菌和生物质炭对连作西瓜土壤肥力的影响[J]. 微生物学通报, 2020, 47(11): 3811-3821
- LIU Y C, WANG P, LIU R J, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and biochar on the fertility of continuous watermelon cropping soil [J]. Microbiology China, 2020, 47 (11): 3811-3821
- [26] 王新. 氮肥与生物质炭添加对人工草地土壤理化性质及牧草品质的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2025: 43-44
- WANG X. Effects of nitrogen fertilizer and biochar addition on soil physicochemical properties and forage quality in artificial grasslands [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2025: 43-44
- [27] 魏梓恒. 高丹草营养价值评价及其替代部分玉米青贮对肉牛饲喂效果研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2024: 18-20
- WEI Z H. Evaluation of nutritional value of Sorghum hybrid Sudangrass and its effect on feeding beef cattle by replacing part of whole corn silage [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2024: 18-20
- [28] 朱进辉, 赵武成, Erastus Mak-Mensah, 等. 生物炭施加垄沟集雨种植对水土流失及紫花苜蓿草产量的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(5): 1314-1326
- ZHU J H, ZHAO W C, ERASTUS M M, et al. Effects of biochar application and ridge-furrow rainwater harvesting on soil erosion control and alfalfa fodder yield increase [J]. Acta Agriculturae Sinica, 2024, 32(5): 1314-1326
- [29] HAO H, DANDAN L, ZHURONG W, et al. Assessment of the straw and biochar application on greenhouse gas emissions and yield in paddy fields under intermittent and controlled irrigation patterns [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2024, 359: 108745
- [30] WANG K, XU J, GUO H, et al. Reuse of straw in the form of hydrochar: Balancing the carbon budget and rice production under different irrigation management [J]. Waste Management, 2024, 189: 77-87

(责任编辑 刘婷婷)