

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.035

引用格式:杨禾雨,郝俊峰,王志军,等.地表水与地下水灌溉对紫花苜蓿水分利用效率及生产特性的影响[J].草地学报,2026,34(3):1128—1136

YANG He-yu, HAO Jun-feng, WANG Zhi-jun, et al. Effects of Surface Water and Groundwater Irrigation on Water Use Efficiency and Production Characteristics of Alfalfa[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):1128—1136

地表水与地下水灌溉对紫花苜蓿水分利用效率及生产特性的影响

杨禾雨¹, 郝俊峰¹, 王志军¹, 贾玉山¹, 范美超², 格根图^{1*}

(1. 内蒙古农业大学草业学院/农业农村部饲草栽培、加工与高效利用重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010019;

2. 巴彦淖尔市畜牧业服务中心, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要:本研究以紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)为试验材料,通过田间控制试验,采用随机区组设计,开展了灌溉水温(地表水与地下水)和灌溉量(65%~75%田间持水量,55%~65%田间持水量,45%~55%田间持水量)的变化对产量、品质及灌溉水利用效率影响的研究。分析了干草产量、灌溉水利用效率以及粗蛋白、灰分、酸性洗涤纤维含量、相对饲喂价值等指标,确定了紫花苜蓿高产、高品质、高水效的灌溉方式,以期优化苜蓿灌溉管理和高效生产提供理论依据和实践指导。主要研究结果如下:地表水较地下水灌溉显著提高了干草产量(17.36%~21.72%)、粗蛋白含量(4.98%~7.07%)、粗灰分含量(0.47%~1.25%)及相对饲喂价值(3.61~5.53),降低了酸性洗涤纤维含量(1.06%~2.98%)和中性洗涤纤维含量(1.97%~4.42%);轻度干旱胁迫下粗蛋白(20.33%)、粗灰分(8.22%)、酸性洗涤纤维(22.48%)、中性洗涤纤维(39.96%)和相对饲喂价值(168.75)达最优值。重度干旱胁迫下地表水处理灌溉水利用效率最高(2.73 kg·m⁻³)。地下水与重度干旱胁迫协同抑制根系生理活性,加剧产量和品质下降并降低水分利用效率。

关键词:灌溉水温;灌溉量;干草产量;灌溉水利用效率;苜蓿营养品质

中图分类号:S816

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-1128-09

Effects of Surface Water and Groundwater Irrigation on Water Use Efficiency and Production Characteristics of Alfalfa

YANG He-yu¹, HAO Jun-feng¹, WANG Zhi-jun¹, JIA Yu-shan¹, FAN Mei-chao², GE Gen-tu^{1*}

(1. Key Laboratory of Forage Cultivation, Processing and Efficient Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China; 2. Bayannur Animal Husbandry Service Center, Bayannur, Inner Mongolia 015000, China)

Abstract: In this study, alfalfa (*Medicago sativa* L.) was used as the experimental material. Through field control experiments and randomized block design, the effects of irrigation water temperature (surface water and groundwater) and irrigation amount (65%-75% field capacity, 55%-65% field capacity, 45%-55% field capacity) on yield, quality and irrigation water use efficiency of alfalfa were studied. Hay yield, irrigation water use efficiency, crude protein, ash, acid detergent fiber content and relative feeding value of alfalfa were analyzed, and the irrigation methods with high yield, high quality and high water efficiency of alfalfa were determined, in order to provide theoretical basis and practical guidance for optimizing irrigation management and efficient production of alfalfa. The main results are as follows, compared with groundwater irrigation, surface water irrigation significantly increased hay yield (17.36%-21.72%), crude protein content (4.98%-7.07%),

收稿日期:2025-04-18;修回日期:2025-05-14

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系;国家草业技术创新中心(筹)重大创新平台建设专项——优质饲草生产与草产品加工关键技术研发及示范(CCPTZX2023B07)资助

作者简介:杨禾雨(1998-),男,蒙古族,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要从事牧草加工与利用方向研究, E-mail:1175922282@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:gegentu@163.com

crude ash content (0.47%-1.25%) and relative feeding value (3.61%-5.53%), and decreased acid detergent fiber content (1.06%-2.98%) and neutral detergent fiber content (1.97%-4.42%). Under mild drought stress, crude protein (20.33%), crude ash (8.22%), acid detergent fiber (22.48%), neutral detergent fiber (39.96%) and relative feeding value (168.75) reached the optimal value. The irrigation water use efficiency of surface water treatment was the highest ($2.73 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) under severe drought stress. Groundwater and severe drought stress synergistically inhibited root physiological activity, aggravated the decrease of yield and quality, and reduced water use efficiency.

Key words: Irrigation water temperature; Irrigation amount; Hay yield; Irrigation water use efficiency; Nutritional quality of alfalfa

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)具有高蛋白、高消化率和适口性好等特点,作为重要的饲料作物被广泛应用于畜牧业和生态恢复领域^[1]。我国苜蓿在干旱地区产量较低,粗蛋白含量普遍低于国际水平^[2]。地下水作为呼和浩特地区农田灌溉的主要水源之一,根据气象部门的数据,地下水温具有显著的季节性特征:春季浅层地下水温约8℃,夏季12℃~15℃,深层地下水温稳定在10℃~12℃。灌溉水温的变化会直接反映到土壤温度上,从而对苜蓿的产量和品质产生影响。灌溉水温过低会降低水中溶解氧含量,影响作物根系对土壤水分和矿物营养元素的吸收利用,影响作物茎叶、枝节的正常生长^[3]。已有研究表明:土壤温度过低会导致棉花(*Gossypium hirsutum* L.)根系活力降低,抑制根系对养分及水分的吸收,导致棉花品质下降^[4];低温会抑制水稻(*Oryza sativa* L.)对氮素的吸收,导致减产^[5];薛鹤等研究发现,对根区土壤进行增温能够促进黄瓜(*Cucumis sativus* L.)生长,提高氮肥利用效率,增加产量^[6];夏镇卿等研究表明,适宜的土壤温度能够促进玉米(*Zea mays* L.)根系发育,提高光合速率,增加产量^[7]。而在紫花苜蓿中,关于灌溉水温的研究相对空白。

研究表明苜蓿在不同生长阶段都有较大的需水量,特别是在生长旺季(现蕾至初花期)耗水量约占全生育期的40%~50%^[8]。这使得苜蓿种植在水资源利用上面临较大的压力。特别是在呼和浩特地区,根据《呼和浩特市节水行动实施方案》,农业用水被纳入总量控制体系。苜蓿作为高耗水作物,面临更严格的用水配额。因此,如何平衡苜蓿的需水量与水源的供应能力成为影响苜蓿产业发展的重要问题^[9]。前人研究发现,苜蓿通过调整自身的形态和结构来适应不同的土壤水分条件,从而影响苜蓿品质^[10];寇丹等研究发现水分亏缺会导致苜蓿的茎叶比下降,粗蛋白含量提高,从而提高苜蓿品质^[11];霍海丽等通过试验发现灌溉量过大或过小

都会使苜蓿木质化程度提高,纤维含量增加,从而影响相对饲喂价值^[12]。

灌溉水温和灌溉量均是影响苜蓿综合性能的关键因素。前人的研究多是基于灌溉量这一单一因素,而灌溉量和灌溉水温的交互作用对苜蓿综合性能的影响尚不明确,尤其是关于灌溉水温的研究较少。因此,本研究拟通过对比分析不同灌溉水温和灌溉量及其交互作用对紫花苜蓿产量、品质以及灌溉水利用效率的影响,揭示灌溉水温和水分胁迫对紫花苜蓿的调控机制。结果可为种植紫花苜蓿选择最适宜的灌溉水温和灌溉量提供参考,为苜蓿种植业的高质量发展提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究的试验地位于内蒙古自治区呼和浩特市和林格尔县,40°20'N,111°49'E,阴山南麓,处于土默川平原的东北部地带,海拔在1050~1100 m之间。年均气温5.8℃左右,无霜期135~145天。年均降水量380~420 mm,70%的降水集中在6—8月。年蒸发量1900~2100 mm。土壤质地为砂壤土,pH值在7.8~8.3之间,有机质含量为12.3~15.6 g·kg⁻¹,全氮含量0.65~0.82 g·kg⁻¹,速效磷(Olsen-P)含量8.5~12.3 mg·kg⁻¹,速效钾(NH₄OAc-K)含量为135~168 mg·kg⁻¹,计划湿润层(0~60 cm)平均土壤容重为1.46 g·cm⁻³,田间持水量为0.231%。

1.2 试验设计

供试品种WL168HQ紫花苜蓿于2023年7月播种。采用随机区组设计,共设置18个小区,每个小区的面积为50 m²(5 m×10 m)。在播种方式上,选择的是条播,行距20 cm,播量15 kg·hm⁻²。播种之前施加氮磷钾复合肥作为底肥,施肥量为每小区1.8 kg。在生长过程中适时进行除杂。初花期进行

刈割,留茬高度控制在5 cm。灌溉方式采用的是微喷带喷灌,在输水管上接阀门和电子流量计,控制并记录灌溉量。

试验设置灌溉水温和灌溉量2个因素。灌溉水温设置2个水平,分别为地表水和地下水;灌溉量设置3个水平,分别为充分灌溉、轻度干旱胁迫、重度干旱胁迫。总共6个处理,分别为 W_1 (地表水充分灌溉), W_2 (地下水充分灌溉), W_3 (地表水轻度干旱胁迫), W_4 (地下水轻度干旱胁迫), W_5 (地表水重度干旱胁迫), W_6 (地下水重度干旱胁迫)。

地下水为试验基地内的井水;将井水抽出放置于露天水罐中,通过露天晾晒太阳辐射的方式,使地下水达到自然地表水的温度,作为模拟地表水。本试验选择加热地下水来模拟地表水,而未直接采用天然地表水灌溉,主要出于天然地表水和地下水不仅存在水温的差异,水质(水的矿物离子含量、悬浮物等)上也存在差异,直接对比可能引入干扰因素,不利于明确“水温”单一变量的作用。通过加热处理,我们使用同一水源(地下水)使其分别达到两种温度,在保证水质一致的前提下仅考察水温高低的影响,能够更加科学地控制变量。通过露天晾晒的方法模拟地表水温既保留了实际生产场景的真实性且成本较低,符合农业研究的实用性原则。查阅相关文献并借鉴当地苜蓿灌溉历史资料^[13],灌溉量基于田间持水量以及本地化需水规律,通过公式(1)计算。根据马彦麟的研究:紫花苜蓿全生育期充分灌溉应控制土壤含水量为田间持水量(FC)的65%~75%^[14];董国锋等建议调亏灌溉中充分灌溉为65%~70% FC^[15]。参考前人的研究经验,将充分灌溉量设定为田间持水量上限的65%~75%,既满足需水要求又避免过度灌溉导致木质化;轻度干旱胁迫定为充分灌溉的80%(55%~65% FC),重度干旱胁迫为充分灌溉的60%(45%~55% FC)。

$$m = 10\,000 \times \rho_{\pm} \times H(\beta_{\max} - \beta_{\min}) / \rho_{\text{水}} \quad (1)$$

式中: m —灌溉量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); $\rho_{\pm}$ —计划湿润层内的土壤干容重($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$); $\rho_{\text{水}}$ —水的容重($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$); H —土壤计划湿润层深度(m); $\beta_{\max}$ —土壤最大含水量(%); $\beta_{\min}$ —土壤最小含水率(灌前土壤含水率,%)。

1.3 检测指标和方法

灌溉水温:每次灌溉前用温度计测量井水和水罐中的水温,将多次测量的水温计算平均值作为灌溉水温度进行计算。

干草产量:每次刈割时,从每个小区的苜蓿鲜草中随机取1 kg样品,放入105℃的烘箱中进行杀青处理,随后,将杀青后的样品转移至65℃的烘箱中,持续烘干48小时直至样品达到恒重状态。烘干结束后,称量干草样品的重量,并根据鲜草与干草的比例,计算出该小区的干草产量。最后,将各小区的干草产量换算成每公顷的干草产量,以便进一步分析和比较不同处理的苜蓿干草产量。

营养品质:通过杜马斯燃烧法测定粗蛋白(Crude protein, CP),称取均匀粉碎样品于高温炉中燃烧,根据释放气体中的氮含量计算粗蛋白;通过纤维分析仪测定中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber, NDF)和酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber, ADF),将样品加入中性洗涤剂,100℃煮沸60 min后过滤残留物,洗涤、烘干称重,计算NDF含量。将NDF残留物转入酸性洗涤剂,100℃煮沸60 min后过滤、洗涤、烘干称重,计算ADF含量;通过烧灼残渣法测定粗灰分(Crude ash, Ash),称取干燥样品置于马弗炉中,550℃灼烧4~6 h至完全灰化,冷却后称重,计算灰分占比。相对饲喂价值(Relative feed value, RFV)通过ADF和NDF的含量根据以下公式进行计算:

$$\text{DMI} = \frac{120}{\text{NDF}} \quad (2)$$

$$\text{DDM} = 88.9 - 0.779 \times \text{ADF} \quad (3)$$

$$\text{RFV} = \frac{\text{ADF} \times \text{NDF}}{1.29} \quad (4)$$

式中:RFV为相对饲用价值;DMI为干物质摄入量,DDM为消化性干物质含量。

灌溉水利用效率(IWUE):

$$\text{IWUE}(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) = \frac{\text{干草产量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})}{\text{灌溉用水量}(\text{mm}) \times 10} \quad (5)$$

1.4 灌溉情况

各处理的具体灌溉情况详见表1。

表1 灌溉用水情况

Table 1 Irrigation water situation

处理 Treatment	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6
灌溉量	261	261	209	209	157	157
Irrigation norm/mm						
平均灌溉水温	18	9	18	9	18	9
Average irrigation water temperature/℃						

1.5 数据分析

数据采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 组间差异通过 Tukey 检验进行多重比较。所有数值均以平均值 $\pm$ 标准差 (Mean $\pm$ SD) 表示, 显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 灌溉水温和灌溉量对紫花苜蓿产量的影响

紫花苜蓿干草产量在不同灌溉处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。如表 2 所示, 灌溉量减少显著降低干草产量。干草产量在地表水充分灌溉下最高, 地下水重度干旱下最低。地表水处理中, W_3 ($5072.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 较 W_1 ($5753.33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 下降 11.83%, W_5 ($4291.01 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 较 W_1 下降 25.42%。地下水处理组呈现同样的趋势, W_4 ($4167.33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 较 W_2 ($4902.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 下降 14.99%, W_6 ($3451.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 较 W_2 下降 29.59%。

当灌溉量相同时, 地表水处理的干草产量普遍高于地下水处理。充分灌溉下 W_1 较 W_2 高 17.36%, 轻度干旱胁迫下 W_3 较 W_4 高 21.72%, 重度干旱胁迫下 W_5 较 W_6 高 24.32%。对比发现: 水温对干草产量的影响在重度干旱胁迫下最大; 在充分灌溉下最小, 表现为随着水分亏缺的加剧而增强。

表 2 不同灌溉处理下的紫花苜蓿干草产量

Table 2 Hay yield of alfalfa under different irrigation treatments

处理 Treatment	干草产量 Hay yield / ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
W_1	5753.33 ± 433.86^a
W_2	4902.42 ± 340.41^b
W_3	5072.67 ± 354.00^b
W_4	4017.33 ± 240.53^c
W_5	4291.01 ± 294.60^c
W_6	3451.67 ± 169.25^d

注: 同列不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$), the same as below

2.2 灌溉水温和灌溉量对紫花苜蓿质指标的影响

2.2.1 粗蛋白 紫花苜蓿粗蛋白含量在不同灌溉处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。如表 3 所示, 灌溉量的减少显著影响粗蛋白的含量, 整体呈现先升后降的非线性特征, 在地表水轻度干旱下最高, 地下水重度干旱下最低。地表水处理中, W_3 (20.33%)

较 W_1 (18.13%) 粗蛋白含量提升 12.13%, W_5 (16.36%) 较 W_3 降低 19.53%。地下水处理组呈现的趋势, W_4 (19.11%) 较 W_2 (17.27%) 提升 10.65%, W_6 (15.28%) 较 W_4 降低 20.04%, 结果表明适度的水分亏缺有利于提高粗蛋白含量。对比发现: 轻度干旱下, 粗蛋白含量的增幅表现为地表水灌溉大于地下水灌溉; 重度干旱下, 降幅表现为地下水灌溉大于地表水灌溉。

当灌溉量相同时, 地表水处理的粗蛋白含量普遍高于地下水处理。 W_1 较 W_2 高 4.98%, W_3 较 W_4 高 6.38%, W_5 较 W_6 高 7.07%。对比发现: 水温对粗蛋白含量的影响在重度干旱下最大; 在轻度干旱下最小, 表现为随着水分亏缺加剧而增强。

2.2.2 酸性洗涤纤维 紫花苜蓿酸性洗涤纤维含量在不同灌溉处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。如表 3 所示, 灌溉量减少显著影响酸性洗涤纤维的含量, 整体呈先降低后升高的趋势, 在地表水轻度干旱下最低, 地下水重度干旱下最高。地表水处理中, W_3 (22.48%) 较 W_1 (24.73%) 降低 9.14%, W_5 (25.06%) 较 W_3 升高 11.52%; 地下水处理中 W_4 (23.14%) 较 W_2 (25.00%) 降低 7.44%, W_6 (25.84%) 较 W_4 升高 11.67%。结果表明, 适量的水分亏缺有利于降低酸性洗涤纤维含量。对比发现: 轻度干旱胁迫下, 酸性洗涤纤维含量的降幅表现为地表水灌溉大于地下水灌溉; 重度干旱胁迫下, 增幅表现为地表水灌溉小于地下水灌溉。

在同等灌溉量下, 地下水处理的酸性洗涤纤维含量普遍高于地表水处理。 W_1 较 W_2 低 1.06%, W_3 较 W_4 低 2.85%, W_5 较 W_6 低 2.98%。对比发现: 水温对酸性洗涤纤维含量的影响在重度干旱下最大, 在充分灌溉下最小, 表现为随着水分亏缺加剧而增强。

2.2.3 中性洗涤纤维 紫花苜蓿中性洗涤纤维含量在不同灌溉处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。如表 3 所示, 灌溉量减少显著影响中性洗涤纤维的含量, 整体呈先降低后升高的趋势, 在地表水轻度干旱下最低, 地下水重度干旱下最高。地表水处理中, W_3 (39.96%) 较 W_1 (42.26%) 降低 5.44%, W_5 (43.66%) 较 W_3 升高 10.95%; 地下水处理中 W_4 (41.06%) 较 W_2 (43.11%) 降低 4.76%, W_6 (45.68%) 较 W_4 升高 11.25%。结果表明, 适量的水分亏缺有利于降低中性洗涤纤维含量。对比发现: 轻度干旱胁迫下, 中性洗涤纤维含量的降幅表

现为地表水灌溉大于地下水灌溉;重度干旱胁迫下,增幅表现为地表水灌溉小于地下水灌溉。

在同等灌溉量下,地下水处理的中性洗涤纤维含量普遍高于地表水处理。 W_1 较 W_2 低1.97%, W_3 较 W_4 低2.68%, W_5 较 W_6 低4.42%。对比发现:水温对中性洗涤纤维含量的影响在重度干旱胁迫下最大,在充分灌溉下最小,随着水分亏缺的加剧而增强。

2.2.4 相对饲喂价值 方差分析表明,紫花苜蓿相对饲喂价值在不同灌溉处理间存在显著差异($P<0.05$)。如表3所示,灌溉量减少显著影响相对饲喂价值,整体呈先升高后降低的趋势,地表水轻度干旱下最高,地下水重度干旱下最低。地表水处理中 W_3 (168.75)较 W_1 (155.22)高8.72%, W_5 (147.81)较 W_3 低12.41%;地下水处理中 W_4 (160.59)较 W_2 (149.81)高7.20%, W_6 (143.49)较 W_4 低12.78%。适量的水分亏缺有利于提高紫花苜蓿的相对饲喂价值。对比发现:轻度干旱下,相对饲喂价值的增幅表现为地表水灌溉大于地下水灌溉;重度干旱下,相对饲喂价值的降幅表现为地表水灌溉小于地下水灌溉。

当灌溉量相同时,地表水处理的相对饲喂价值普遍高于地下水处理。 W_1 较 W_2 高3.61%, W_3 较 W_4 高5.08%, W_5 较 W_6 高5.53%。对比发现:水温对相对饲喂价值的影响在重度干旱下最大,在充分灌溉下最小,随着水分亏缺的加剧而增强。

2.2.5 粗灰分 紫花苜蓿粗灰分含量在不同灌溉处理间存在显著差异($P<0.05$)。如表3所示,灌溉量减少显著影响粗灰分含量,整体呈先升高后降低的趋势,地表水轻度干旱下最高,地下水重度干旱下最低。地表水处理中, W_3 (8.22%)较 W_1 (8.13%)高1.11%, W_5 (8.11%)较 W_3 下降1.34%;地下水处理中 W_4 (8.14%)较 W_2 (8.07%)高0.87%, W_6 (8.02%)较 W_4 下降1.47%,说明适量的水分亏缺有利于提高粗灰分含量。对比发现:轻度干旱下,粗灰分含量的增幅表现为地表水大于地下水;重度干旱下,降幅表现为地表水小于地下水。

当灌溉量相同时,地表水处理的粗灰分含量普遍高于地下水处理。 W_1 较 W_2 高0.47%, W_3 较 W_4 高0.98%, W_5 较 W_6 高1.25%。对比发现:水温对粗灰分含量的影响在重度干旱胁迫下最大,在充分灌溉下最小,随着水分亏缺加剧而增强。

表3 不同灌溉处理下的紫花苜蓿营养品质

Table 3 Nutritional quality of alfalfa under different irrigation treatments

处理 Treatment	粗蛋白 Crude protein/%	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber/%	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber/%	相对饲喂价值 Relative feed value	粗灰分 Crude ash/%
W_1	18.13±0.45 ^c	24.74±0.80 ^a	41.73±0.15 ^d	155.22±1.89 ^c	8.13±0.10 ^{ab}
W_2	17.27±0.43 ^d	25.00±0.85 ^a	43.11±0.17 ^c	149.81±1.99 ^d	8.07±0.10 ^{ab}
W_3	20.33±0.12 ^a	22.48±0.78 ^b	39.35±0.08 ^f	168.75±1.69 ^a	8.22±0.06 ^a
W_4	19.11±0.49 ^b	23.14±0.78 ^b	41.06±0.16 ^c	160.59±1.98 ^b	8.14±0.07 ^{ab}
W_5	16.36±0.31 ^e	25.07±0.88 ^a	43.66±0.15 ^b	147.81±1.91 ^d	8.09±0.05 ^{ab}
W_6	15.28±0.40 ^f	25.84±0.88 ^a	45.68±0.18 ^a	143.49±1.97 ^e	7.99±0.13 ^b

2.3 不同灌溉处理对紫花苜蓿灌溉水利用效率的影响

紫花苜蓿灌溉水利用效率在不同灌溉处理间存在显著差异($P<0.05$)。如表4所示,灌溉量减少显著影响灌溉水利用效率,整体随着水分亏缺的加剧而增大。重度干旱胁迫下灌溉水利用效率达到最高值。地表水处理中, W_3 (2.42 kg·m⁻³)较 W_1 (2.20 kg·m⁻³)高10.00%, W_5 (2.73 kg·m⁻³)较 W_1 高22.97%;地下水处理中 W_4 (1.92 kg·m⁻³)较 W_2 (1.87 kg·m⁻³)高2.67%, W_6 (2.19 kg·m⁻³)较 W_2 高17.11%,结果表明水分亏缺有利于提高紫花苜蓿灌溉水利用效率。对比发现:灌溉水利用效率变化幅度随着灌溉水温的下降而降低。

当灌溉量相同时,地表水处理的灌溉水利用效率普遍高于地下水处理。 W_1 较 W_2 高17.65%, W_3 较 W_4 高26.04%, W_5 较 W_6 高24.66%。对比发现:水温对灌溉水利用效率的影响强度在轻度干旱胁迫下最大,在充分灌溉下最小,表现为随着水分亏缺先增大,达到峰值后持续减小的趋势。

3 讨论

3.1 灌溉水温与灌溉量对紫花苜蓿产量的影响

本研究结果表明,相同灌溉量条件下,地表水处理的产量显著高于地下水处理,且随灌溉量减少,产量差异逐渐扩大。这一现象可能源于低温灌

表4 不同灌溉处理的灌溉水利用效率

Table 4 Irrigation water use efficiency of different irrigation treatments

处理 Treatment	灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency/(kg·m ⁻³)
W ₁	2.20±0.17 ^c
W ₂	1.87±0.13 ^c
W ₃	2.42±0.17 ^b
W ₄	1.92±0.11 ^d
W ₅	2.73±0.19 ^a
W ₆	2.19±0.11 ^c

溉水对土壤温度及根系生理活动的双重抑制。已有研究表明,低温灌溉会显著降低0~25 cm土层温度^[16],根系温度降低可直接抑制光合产物的运输与分配^[17]。冯玉龙等^[17]发现番茄根系温度从30℃降至15℃时,光合速率降低25%,且低温导致光合产物在叶片中滞留,阻碍生物量积累,与本研究结果相符。地下水处理还可能通过降低土壤酶活性(如蔗糖酶和磷酸酶)影响根系养分吸收,进一步加剧水分胁迫下的代谢失衡^[18]。

灌溉量的减少通过直接限制水分供应导致产量下降,且地下水处理的降幅更显著,这与寇丹等提出的“当灌溉量低于田间持水量60%时,干旱胁迫效应呈非线性加剧”的结论一致^[19]。重度干旱胁迫下水温效应放大可能与植物抗氧化系统的崩溃有关:韩刚等发现沙生灌木在重度干旱下SOD和CAT活性显著下降^[20],而低温灌溉可能进一步抑制酶活性,导致活性氧积累加速膜脂过氧化。这一机制在罗秋红的研究中也得到了佐证,其发现水稻孕穗期低温胁迫导致颖花ABA含量激增,且抗氧化系统在源-库间的动态平衡被破坏^[21]。此外,赵航等指出30℃灌溉水可提高枣树净光合速率和果实品质,而本研究中地表水处理可能通过维持较高土壤温度(相较于地下水)促进根系活力,从而缓解水分胁迫对光合作用的非气孔限制^[22]。

3.2 灌溉水温和灌溉量对紫花苜蓿品质的影响

紫花苜蓿粗蛋白与粗灰分含量对灌溉量及水温的响应呈现显著的交互效应。在相同灌溉量下,地表水处理的粗蛋白含量普遍高于地下水处理,且差异在重度干旱胁迫下最大。这一现象与Simo提出的水温通过影响植物根系氮素吸收能力与代谢酶活性,改变氮素同化效率相吻合^[23]。王亚平研究发现低温(6.15℃~13.35℃)环境下总氮去除率下降5%~10%,进一步佐证了低温灌溉对氮代谢的

负面影响^[24],从而影响了粗蛋白的含量。

粗蛋白含量在轻度干旱胁迫下达到峰值表现了水分胁迫的阈值效应,Lawlor提出适度水分亏缺降低胞间CO₂浓度(Ci),促进光合同化产物向氮代谢途径分配,同时激活渗透调节物质(如脯氨酸)的合成^[25],从而增加了粗蛋白的含量,与本研究相符。重度胁迫导致碳同化受限,ATP合成受阻,抑制Rubisco活性及RuBP再生,最终削弱氮吸收能力^[26],从而降低了粗蛋白含量。

地下水处理在重度干旱胁迫下灰分含量较地表水下降得更多,表明低温加剧了水分胁迫对矿质吸收的抑制,该现象可能与根系构型改变有关:戟林等研究发现低温灌溉降低土壤温度,限制细根分枝发育,影响了对Ca²⁺,Mg²⁺等离子体的吸收^[27]。樊卫国等在石灰性黄壤中的研究表明,低温显著降低柑橘根系对NH₄⁺的最大吸收速率(I_{max})和亲和力(Km),表明水温差异可能通过类似机制影响紫花苜蓿氮代谢^[28]。

灌溉水温与灌溉量的交互作用显著影响紫花苜蓿纤维组分及饲喂价值。在同等灌溉量下,地下水处理的ADF和NDF含量均高于地表水处理,这一现象可能与低温抑制木质素降解酶活性有关^[29]。有研究表明低温环境下木质素过氧化物酶(LiP)和锰过氧化物酶(MnP)的活性显著降低,导致木质素降解受阻^[30],这与本研究提出的“根系低温抑制木质素降解”假设一致。木质素单体生物合成基因(如PAL,C4H)在低温下的上调表达可能进一步加剧纤维积累,形成ADF和NDF的差异化分布^[31]。

灌溉量对纤维组分的影响呈现非线性特征,ADF和NDF均在轻度胁迫下达到最低值,这与水分胁迫对木质素合成的双重调控机制相关。有研究表明,轻度水分胁迫可能通过下调苯丙烷代谢途径中的关键基因(如C3'H,CCoAOMT),抑制木质素单体合成^[32],而重度胁迫则激活植物防御机制,促使细胞壁增厚和纤维积累;前人研究发现红砂在干旱胁迫下通过增加表皮细胞壁厚度和角质层厚度减少水分流失,类似的生理响应可能在紫花苜蓿中同样发生^[33]。

RFV的变化规律进一步印证了灌溉水量与温度的交互效应。地表水处理的RFV普遍高于地下水处理,且在轻度胁迫下达到峰值。有研究表明,适度水分亏缺可通过增强气孔调节能力^[34]和提高光合产物向可溶性糖类分配^[35],降低纤维组分占比,从而提升饲喂价值。

3.3 灌溉水温 and 灌溉量对灌溉水利用效率的影响

灌溉量和水温对紫花苜蓿灌溉水利用效率存在显著交互作用。在重度干旱胁迫下达到最高值,这与前人研究中灌溉量减少可提高水分利用效率的结论一致^[36]。有研究表明短期内(14分钟内)低温可刺激根系吸水速率,但长时间低温会抑制水通道蛋白活性并增加木质部ABA浓度,导致气孔导度下降^[37]。这与本试验中地下水处理的灌溉水利用效率低于地表水处理的现象相契合。低温灌溉水渗透后显著降低根区土壤温度,尤其在0~70 cm土层,温度较地表水处理可能降低3.17℃以上^[38],这会延缓根系代谢活动并降低水分吸收效率。研究显示,土壤温度低于20℃时,紫花苜蓿根系生长速率和水分传导能力显著受限^[38],而地表水通过维持较高根区温度,促进根系扩展和水分吸收,补偿了灌溉量减少的负面影响^[38]。

4 结论

本研究通过田间试验系统考察了紫花苜蓿在不同灌溉水温、灌溉量以及降雨条件下的响应特征,主要结论如下:

(1)灌溉水温显著影响苜蓿生长。与地下水灌溉相比,地表水灌溉的苜蓿干草产量平均提高22.65%,粗蛋白含量提高6.12%,粗灰分含量提高0.87%,酸性洗涤纤维含量降低2.29%,中性洗涤纤维含量降低3.02%。差异达到显著水平($P < 0.05$)。

(2)灌溉量决定产量水平并影响品质组成。充分灌溉处理干草产量最高,较胁迫处理提高27.89%;轻度胁迫品质最好,其中粗蛋白含量较充分灌溉和重度胁迫提高18.05%,相对饲喂价值提高11.18%。适度亏灌能够实现品质优化,但过度亏灌反而损害产量和品质。

(3)灌溉水利用效率随灌溉量减少而升高,在重度胁迫(地表水)下达到最大值。说明适度减少灌溉可提高单位水产出,过少或过多的灌溉都会降低利用效率。产量与灌溉水利用效率呈负相关关系,高产往往以牺牲部分灌溉水利用效率为代价。

紫花苜蓿推荐的灌溉策略如下:地表水灌溉结合适度亏水,实现高产、优质和节水的平衡。地下水灌溉在各水分处理下均不占优势,不利于苜蓿高产高效生产。研究不足在于未考虑土壤微生物动态及长期

轮作效应,未来需结合多环境因子及多茬次的田间规模化验证,进一步优化紫花苜蓿节水灌溉策略。

参考文献

- [1] 李刚. 紫花苜蓿研究进展[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(14): 71-75
LI G. Research progress of alfalfa [J]. Anhui Agronomy Bulletin, 2019, 25(14): 71-75
- [2] LÜ Y R, WANG J H, YIN M H, et al. Effects of planting and nitrogen application patterns on alfalfa yield, quality, water - nitrogen use efficiency, and economic benefits in the Yellow River irrigation region of Gansu Province, China [J]. Water, 2023, 15(2): 251
- [3] 于江海, 周和平. 农业灌溉水温研究[J]. 现代农业科技, 2008 (8): 123-125, 127
YU J H, ZHOU H P. Study on water temperature of agricultural irrigation [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2008(8): 123-125, 127
- [4] 吉恒莹, 李磐, 付彦博, 等. 不同滴灌水温在灰漠土中水热耦合模拟与验证[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(2): 319-327
JI H Y, LI P, FU Y B, et al. Simulation and validation of coupled water-heat transfer in the grey dessert soil in different water temperatures during surface drip irrigation [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2018, 55(2): 319-327
- [5] JIA Y, WANG J, QU Z, et al. Effects of low water temperature during reproductive growth on photosynthetic production and nitrogen accumulation in rice [J]. Field Crops Research, 2019, 242: 107587
- [6] 薛鹤, 段增强, 董金龙, 等. 根区温度对黄瓜生长、产量及氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2015, 47(5): 842-846
XUE H, DUAN Z Q, DONG J L, et al. Effects of root zone temperature on cucumber growth, yield and nitrogen use efficiency [J]. Soils, 2015, 47(5): 842-846
- [7] 夏镇卿, 路海东. 土壤温度对作物根区环境及玉米根冠生长的调控研究进展[J]. 玉米科学, 2020, 28(3): 99-104
XIA Z Q, LU H D. Research progress in regulation of soil temperature on crop root zone environment and maize root cap growth [J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(3): 99-104
- [8] 李孟蔚, 樊子茜, 赵永强, 等. 晋北紫花苜蓿需水量对气候变化的响应[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(S1): 135-139
LI M W, FAN Z A, ZHAO Y Q, et al. Response of alfalfa water requirement to climate change in northern Shanxi [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(S1): 135-139
- [9] 康绍忠, 霍再林, 李万红. 旱区农业高效用水及生态环境效应研究现状与展望[J]. 中国科学基金, 2016, 30(3): 208-212
KANG S Z, HUO Z L, LI W H. Research status and prospect of agricultural efficient water use and eco-environmental effects in arid areas [J]. China Science Foundation, 2016, 30(3): 208-212
- [10] 柳佳, 罗永忠, 陈国鹏. 土壤水分胁迫对新疆大叶苜蓿构件生

- 物量分配的影响[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 639-644
- LIU J, LUO Y Z, CHEN G P. Effects of soil moisture stress on biomass allocation of *Medicago sativa* cv. xinjiangdaye[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 639-644
- [11] 寇丹, 苏德荣, 吴迪, 等. 地下调亏滴灌对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 116-123
- KOU D, SU D R, WU D, et al. Effects of regulated deficit irrigation on water consumption, hay yield and quality of alfalfa under subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(2): 116-123
- [12] 霍海丽, 王琦, 张恩和, 等. 灌溉和施磷对紫花苜蓿干草产量及营养成分的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 117-121, 126
- HUO H L, WANG Q, ZHANG E H, et al. Effects of irrigation and phosphorus supply levels on hay yield and quality of alfalfa[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 117-121, 126
- [13] 孙海燕. 紫花苜蓿水分生产函数及优化灌溉制度的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008: 14-43
- SUN H Y. Study on water production function and optimal irrigation schedule of alfalfa[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008: 14-43
- [14] 马彦麟. 水分调控对荒漠灌区地下滴灌紫花苜蓿产量、品质及土壤环境的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018: 21-62
- MA Y L. Effects of water regulation on alfalfa yield, quality and soil environment under subsurface drip irrigation in desert irrigation area[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018: 21-62
- [15] 董国锋, 成自勇, 张自和, 等. 调亏灌溉对苜蓿水分利用效率和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 201-203
- DONG G F, CHENG Z Y, ZHANG Z H, et al. Effects of regulated deficit irrigation on water use efficiency and quality of alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(5): 201-203
- [16] 赵航, 梁智, 吴翠云, 等. 不同灌溉水温对骏枣光合特性及果实品质的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2020, 38(3): 318-324
- ZHAO H, LIANG Z, WU C Y, et al. Effects of different irrigation water temperatures on photosynthesis and fruit quality of jujube[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2020, 38(3): 318-324
- [17] 冯玉龙, 刘恩举, 崔臻祥. 根系温度对番茄的影响(Ⅱ)——根系温度对番茄光合作用和水分代谢的影响[J]. 植物研究, 1996, 16(2): 214-218
- FENG Y L, LIU E J, CUI Z X. Effects of root temperature on tomato (Ⅱ)—effects of root temperature on photosynthesis and water metabolism of tomato [J]. Bulletin of Botanical Research, 1996, 16(2): 214-218
- [18] 高钰, 雍少宁, 王俊峰. 增温对青藏高原高寒沼泽草甸不同时期土壤酶活性的影响[J]. 生态科学, 2023, 42(1): 1-10
- GAO Y, YONG S N, WANG J F. Effects of experimental warming on soil enzyme activities in different seasons of the alpine swamp meadow ecosystem on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Ecological Science, 2023, 42(1): 1-10
- [19] 寇丹. 西北旱区地下调亏滴灌对苜蓿(*Medicago sativa* L.)产量、品质及耗水量的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2014: 19-53
- KOU D. Effects of drip irrigation on yield, quality and water consumption of *Medicago sativa* L [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014: 19-53
- [20] 韩刚, 党青, 赵忠. 干旱胁迫下沙生灌木花棒的抗氧化保护响应研究[J]. 西北植物学报, 2008, 28(5): 1007-1013
- HAN G, DANG Q, ZHAO Z. Response of antioxidation protection system of *Hedysarum scoparium* to drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2008, 28(5): 1007-1013
- [21] 罗秋红, 吴俊, 柏斌, 等. 孕穗期低温灌溉对水稻剑叶和颖花生理特征的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(3): 111-118
- LUO Q H, WU J, BAI B, et al. Effects of low temperature irrigation at booting stage on physiological characteristics of sword leaves and spikelets in rice [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(3): 111-118
- [22] 付士磊, 周永斌, 何兴元, 等. 干旱胁迫对杨树光合生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2016-2019
- FU S L, ZHOU Y B, HE X Y, et al. Effects of drought stress on photosynthesis physiology of *Populus pseudo-simonii* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(11): 2016-2019
- [23] GODDEK S, ESPINAL C, DELAIDE B, et al. Navigating towards decoupled aquaponic systems: a system dynamics design approach[J]. Water, 2016, 8(7): 303
- [24] 王亚平. 金盆水库表层沉积物中营养盐的分布特征与迁移转化[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017: 15-54
- WANG Y P. Distribution characteristics, migration and transformation of nutrient salts in surface sediments of Jinpen Reservoir [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017: 15-54
- [25] LAWLOR D W, CORNIC G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants [J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(2): 275-294
- [26] LAWLOR D W, TEZARA W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes [J]. Annals of Botany, 2009, 103(4): 561-579
- [27] 戴林. 氮高效利用基因型水稻(*Oryza sativa*)氮素吸收分配特性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013: 21-90
- JI L. Nitrogen absorption and distribution characteristics of rice genotype (*Oryza sativa*) with high nitrogen utilization efficiency [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2013: 21-90
- [28] 樊卫国, 葛会敏. 不同形态及配比的氮肥对枳砧脐橙幼树生长及氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(13): 2666-2675
- FAN W G, GE H M. Effects of nitrogen fertilizer of different

- forms and ratios on the growth, nitrogen absorption and utilization of young navel orange trees grafted on *Poncirus trifoliata* [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(13):2666-2675
- [29] MARGESIN R, LUDWIKOWSKI T M, KUTZNER A, et al. Low-temperature biodegradation of lignin-derived aromatic model monomers by the cold-adapted yeast *Rhodospiridiobolus colostri* isolated from alpine forest soil[J]. *Microorganisms*, 2022, 10(3):515
- [30] ROMERO-OLIVARES A L, ALLISON S D, TRESEDER K K. Decomposition of recalcitrant carbon under experimental warming in boreal forest[J]. *Plos One*, 2017, 12(6):e0179674
- [31] ZHOU P L, LI Q Y, LIU G L, et al. Transcriptomic analysis of chilling-treated tobacco (*Nicotiana tabacum*) leaves reveals chilling-induced lignin biosynthetic pathways[J]. *Current Science*, 2019, 117(11):1885
- [32] NAKAHAMA K, URATA N, SHINYA T, et al. RNA-seq analysis of lignocellulose-related genes in hybrid *Eucalyptus* with contrasting wood basic density[J]. *BMC Plant Biology*, 2018, 18(1):156
- [33] 朱瑞清, 刘美玲, 李刚, 等. 2 种水分生境下红砂叶片功能性状的响应及适应机制[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(5):29-34
- ZHU R Q, LIU M L, LI G, et al. Responses of leaf functional traits of *Reaumuria soongorica* in two different desert habitats [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(5): 29-34
- [34] 薛崧, 汪沛洪, 许大全, 等. 水分胁迫对冬小麦 CO₂ 同化作用的影响[J]. *植物生理学报*, 1992, 18(1):1-7
- XUE S, WANG P H, XU D Q, et al. Effects of water stress on CO₂ assimilation of two winter wheat cultivars with different drought resistance[J]. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 1992, 18(1):1-7
- [35] 李阳, 齐曼·尤努斯, 祝燕. 水分胁迫对大果沙枣光合特性及生物量分配的影响[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(12):2493-2499
- LI Y, QIMAN Y N S, ZHU Y. Effects of water stress on photosynthetic characteristics and biomass partition of *Elaeagnus moorcroftii* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006(12):2493-2499
- [36] 李天琦, 赵力兴, 林志玲, 等. 灌溉量对科尔沁沙地紫花苜蓿产量和水分利用效率的影响[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(2):117-123
- LI T Q, ZHAO L X, LIN Z L, et al. Effects of irrigation amount on alfalfa yield and water use efficiency in horqin sandy land[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(2):117-123
- [37] 梁建生, 张建华, 曹显祖. 根系环境温度变化对根系吸水和叶片蒸腾的影响[J]. *植物学报*, 1998, 40(12):1152-1158
- LIANG J S, ZHANG S H, CAO X Z. Effect of changes of temperature around roots in relation to water uptake by roots and leaf transpiration [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(12):1152-1158
- [38] SU Y Y, GUO X H, LEI T, et al. Three-dimensional model of soil water and heat transfer in orchard root zone under water storage pit irrigation[J]. *Water*, 2022, 14(11):1813

(责任编辑 刘婷婷)