

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.005

引用格式:鞠克升,周金露,王青,等.水肥管理对紫花苜蓿种子生产的影响及多光谱机器学习模型构建[J].草地学报,2026,34(9):3185-3196

JU Ke-sheng, ZHOU Jin-lu, WANG Qing, et al. Effects of Water and Fertilizer Management on Seed Production of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) and Construction of Multispectral Machine Learning Models[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3185-3196

水肥管理对紫花苜蓿种子生产的影响及多光谱机器学习模型构建

鞠克升¹,周金露²,王青²,贺晓帆²,陈盈燕²,聂嘉欣²,刘芳茜²,
李昱宏²,赵琨²,贾善刚^{2*}

(1. 酒泉市农产品质量安全监督管理站酒泉市种业发展中心,甘肃酒泉 735000;

2. 中国农业大学草业科学与技术学院,北京 100193)

摘要:豆科牧草紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)种子产量与品质受水肥管理影响显著。本研究旨在探讨水肥梯度处理对紫花苜蓿种子产量及内容物含量的影响,试验设计了不同灌溉($600\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, $900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, $1200\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)和磷肥($100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)组合处理方案,测定了种子产量、产量组分、可溶性蛋白质和淀粉含量等指标,获取种子19个波段的多光谱信息,构建了nCDA-CNN模型,评估多光谱图像技术在水肥处理种子检测中的应用潜力。结果表明,适量水肥施用显著提高了种子产量、蛋白和淀粉含量($P<0.05$)。其中灌水量 $600\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、施磷量 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理的种子产量最高($885.44\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),较对照增产 $287.96\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;灌水量 $600\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、施磷量 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理的种子可溶性蛋白和淀粉含量较高。通径分析显示,每荚果种子数对种子产量影响较大。种子多光谱图像分析发现,nCDA-CNN模型能够准确预测水肥处理的紫花苜蓿种子,识别准确率达到95%,这为紫花苜蓿种子生产高通量无损检测提供了可能。优化水肥管理可显著提升紫花苜蓿种子生产效益,多光谱图像技术结合深度学习模型在草种业质量检测与可持续发展中具有重要应用前景。

关键词:水肥管理;紫花苜蓿;种子产量;多光谱检测

中图分类号:S541.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3185-12

Effects of Water and Fertilizer Management on Seed Production of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) and Construction of Multispectral Machine Learning Models

JU Ke-sheng¹, ZHOU Jin-lu², WANG Qing², HE Xiao-fan², CHEN Ying-yan², NIE Jia-xin²,
LIU Fang-qian², LI Yu-hong², ZHAO Kun², JIA Shan-gang^{2*}

(1. Jiuquan City Agricultural Products Quality Safety Supervision and Management Station, Jiuquan City Seed Industry Development Center, Jiuquan, Gansu Province 735000, China; 2. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The seed yield and quality of the leguminous forage alfalfa (*Medicago sativa* L.) are significantly influenced by water and fertilizer management. This study aimed to investigate the effects of different water and phosphorus fertilizer treatments on seed yield and seed quality of alfalfa. The experiment was designed to combine treatments with different irrigation levels (600 , 900 , and $1200\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$) and phosphorus fertilizer rates (100 , 200 , and $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$). Seed yield, yield components, soluble protein content, and starch content were measured. Additionally, multispectral information of 19 bands was acquired, and an nCDA-CNN model was constructed to evaluate the potential of multispectral image technology for seed detection under different

收稿日期:2026-05-06;修回日期:2026-07-01

基金项目:“国家重点研发计划”(2022YFD1300804);山东省自然科学基金(ZR2024MC066)资助

作者简介:鞠克升(1971-),男,汉族,天津人,高级畜牧师,主要从事农产品质量安全和牧草种子推广示范研究,E-mail: 349176563@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: shangang.jia@cau.edu.cn

water and fertilizer treatments. The results showed that the appropriate water and phosphorus fertilizer application significantly increased seed yield, protein content, and starch content ($P < 0.05$). Among all treatments, the combination of $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ irrigation and $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ phosphorus fertilizer achieved the highest seed yield ($885.44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), representing an increase of $287.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ compared to the control. Higher soluble protein and starch contents of seeds were observed under the treatment with $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ irrigation and $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ phosphorus fertilizer. Path analysis indicated that the number of seeds per pod had a greater influence on seed yield. Multispectral image analysis revealed that the nCDA-CNN model accurately predicted alfalfa seeds subjected to different water and fertilizer treatments, with a recognition accuracy of 95%. This provides a high-throughput, non-destructive detection method for alfalfa seed production. Optimized water and fertilizer management can significantly enhance alfalfa seed production. Multispectral image technology combined with deep learning models holds important application prospects for quality detection and sustainable development in the grass seed industry.

Key words: Water and fertilizer Management; Alfalfa; Seed yield; Multispectral detection

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.), 是一种多年生豆科牧草, 具有高产、高营养价值、适应性强的特性, 被誉为“牧草之王”^[1-2], 被广泛应用于畜牧业、绿肥、生态恢复等领域, 具有重要的经济和生态价值^[3]。紫花苜蓿原产于地中海沿岸, 是世界上广泛栽培的牧草之一, 其根系发达, 可深入地下 2~4 m, 使其具有良好的抗旱性^[4], 还因其固氮能力和土壤改良作用, 成为提升土壤肥力和支持可持续农业发展的重要植物^[5]。水分和肥料的供给是影响紫花苜蓿种子产量和品质的关键因素之一^[6], 合理的水肥管理可以提高紫花苜蓿种子产量、营养品质, 并优化土壤健康, 从而实现可持续农业生产^[7]。水分是紫花苜蓿生长发育的基本要素, 水分供给直接影响植株的花芽分化、授粉受精及荚果发育, 水分不足会导致落花落荚, 显著降低种子数量和质量^[8]。相关研究发现, 适宜的水肥对比对紫花苜蓿种子产量有重要影响, 且灌水显著影响小花数、花序数、结荚数等指标^[9]。另一研究指出, 地下滴灌深度 10 cm 较地表滴灌增产 48%, 分枝期与开花期灌溉可显著提高种子产量及灌溉水利用效率^[10]。大豆相关研究表明^[11], 水肥组合对大豆种子产量存在显著交互作用, 无干旱时高氮抑制花荚数、株高及产量; 干旱胁迫下高氮则增强多数性状, 其中百粒重与产量相关性最高。因此通过合理的水分管理, 尤其是干旱季节的适时灌溉, 能够增强紫花苜蓿抗旱性, 提高其干旱条件下种子产量和生存能力^[12]。

施磷对紫花苜蓿种子产量具有显著调控作用, 适宜施磷量可有效提高种子荚果数、结荚率和种子产量^[13]。施磷通过促进紫花苜蓿花芽分化以提高种子产量, 同时增强种子抗旱、抗寒性能^[14]。在甘肃酒泉干旱盐碱的地理条件下, 施磷可使紫花苜蓿种子增产率达 51.38%~59.63%, 其增产效应远高于氮肥和钾肥, 缺磷处理的相对产量仅为 62.64%, 为三者中最

低^[15], 说明磷是干旱盐碱地区紫花苜蓿种子产量的主要限制因子, 且氮、磷互作能进一步提高种子产量^[16]。种子产量组分方面, 磷肥施用可显著增加紫花苜蓿单株有效分枝数、单株花序数、单株荚果数及千粒重^[17], 其中以磷肥 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (P_2O_5) 处理时各产量组分达最大值, 增产效果最为明显^[18]。磷肥还能提高紫花苜蓿光合作用效率和光合产物的转化速率, 为种子灌浆提供充足的光合产物支撑^[19]。因此, 施用合适水平的磷肥可以提高紫花苜蓿的耐旱性和抗逆性, 有助于提高其种子的生长质量和产量。

种子是农业生产的基础, 其质量直接影响到作物的产量和品质。传统的种子检测方法包括物理检测、化学检测及生物检测等, 但这些方法通常耗时、费力且受人为因素影响较大^[20]。现代种子检测更倾向于快速、无损及高效的方法, 以满足大规模农业生产的需要^[21]。近年来, 多光谱成像 (Multispectral imaging, MSI) 技术已成为一种快速、无破坏性的检测方法, 广泛应用于种子无损检测^[22]。该技术与多元分析相结合, 可高效检测紫花苜蓿种子活力、鉴定品种并评估种子内物质含量, 展现出良好应用潜力^[20, 23]。卷积神经网络在牧草种子图像识别中的应用也印证了该技术路线的可行性^[21]。但该技术在水肥管理下的紫花苜蓿种子检测中, 研究尚不充分。

本研究针对甘肃省酒泉紫花苜蓿种子生产, 设置不同水肥 (磷肥) 组合处理, 系统分析其对种子产量、可溶性蛋白含量、淀粉含量及种子形态特征的影响。结合实验室理化分析与多光谱仪器测量, 综合评估不同水肥管理策略对紫花苜蓿种子产量和品质的调控效果, 揭示水肥管理对种子产量与品质的影响机制, 旨在优化甘肃酒泉地区紫花苜蓿种子生产的栽培管理措施, 为紫花苜蓿种子生产提供科学、高效的种植方案。本研究不仅有助于提升紫花

苜蓿种子生产效率和经济效益,也为多光谱成像技术在牧草种子检测领域的推广应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验地位于甘肃省酒泉市肃州区营尔村的酒泉大业种业公司试验田(98.75°E, 39.59°N),海拔1338 m,属典型的温带大陆性气候,气候干燥、降水少、

蒸发强烈日照长、冬冷夏热温差大、秋凉春早多风沙,光热资源丰富,有效积温3000℃,农作物生育期(4—9月)日照时数2200 h左右,占全年日照时数的68%左右,日照百分率为68%~75%,多年平均气温7.3℃,作物活跃期的年均降水量为48.4 mm,占全年降水量的56.7%(图1a)。冬季雨雪稀少、降水量53 mm,占全年降水量的6.2%,年平均蒸发量为2148.8 mm,年平均相对湿度为46%。无霜期平均130 d,最长151 d,最短105 d。

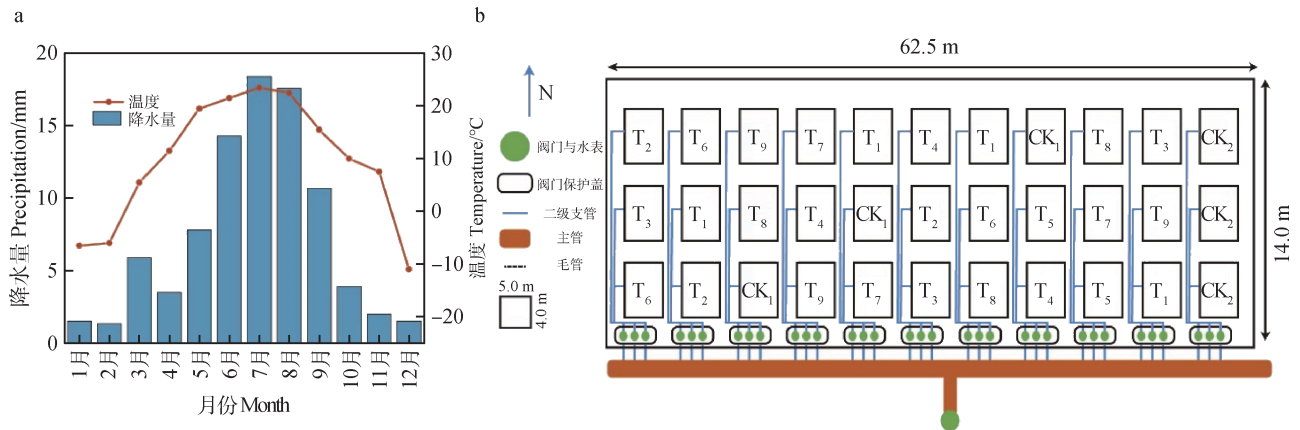


图1 试验期间甘肃酒泉试验图

Fig. 1 Experimental setup at the test site in Jiuquan, Gansu, during the trial.

注:(a)试验期间甘肃酒泉试验点各月降水量及平均温度图;(b)酒泉试验地小区布置。T₁: P₁W₁; T₂: P₁W₂; T₃: P₁W₃; T₄: P₂W₁; T₅: P₂W₂; T₆: P₂W₃; T₇: P₃W₁; T₈: P₃W₂; T₉: P₃W₃; CK₁: P₀W₀; CK₂: P₀W₄。其中,P₀, P₁, P₂, P₃分别代表施磷量0, 100, 200, 300 kg·hm⁻²; W₀, W₁, W₂, W₃分别代表灌水量0, 600, 900, 1200 m³·hm⁻², W₄代表大水漫灌

Note: (a) Monthly precipitation and mean temperature at the Jiuquan experimental site in Gansu during the trial period; (b) Plot layout of the Jiuquan experimental field. T₁: P₁W₁; T₂: P₁W₂; T₃: P₁W₃; T₄: P₂W₁; T₅: P₂W₂; T₆: P₂W₃; T₇: P₃W₁; T₈: P₃W₂; T₉: P₃W₃; CK₁: P₀W₀; CK₂: P₀W₄. P₀, P₁, P₂, and P₃ refer to phosphorus rates of 0, 100, 200, and 300 kg·hm⁻², respectively; W₀, W₁, W₂, and W₃ correspond to irrigation volumes of 0, 600, 900, and 1200 m³·hm⁻², respectively, with W₄ indicating flood irrigation

1.2 试验设计

试验供试紫花苜蓿品种为‘中苜1号’,由甘肃酒泉大业种业有限公司提供。播种量为10 kg·hm⁻²,行距均为60 cm,播种深度5~7 cm,于2024年5月10日播种,于2024年8月底收割处于成熟期的紫花苜蓿。根据试验田所在地区的土壤类型、气候条件和生产习惯,试验采用不完全随机区组设计,4个区组。小区面积为4 m×5 m。滴灌时间为分枝期,设三个梯度:600 m³·hm⁻²(W₁), 900 m³·hm⁻²(W₂), 1200 m³·hm⁻²(W₃),设3个磷肥施用量:100 kg·hm⁻²(P₁), 200 kg·hm⁻²(P₂), 300 kg·hm⁻²(P₃),并设2个对照处理(P₀W₀, P₀W₄),P₀W₀为不额外灌水、不施磷,P₀W₄为大水漫灌、不施磷。磷肥选用重过磷酸钙(P₂O₅含量为44%),整个试验包含11个处理组合,施肥方式为沟施,试验灌溉采用地下滴灌(图1b)。在紫花苜蓿的分枝期内进行灌溉与施肥处理,此后

不进行额外灌溉施肥,生长期中,采取常规措施去除杂草和杂物。其余田间管理保持一致,以保证结果可靠性。

1.3 试验测定方法

1.3.1 土壤营养含量测定 为防止异常土壤区块影响试验结果,播种前对试验地不同深度土壤肥力指标进行了测定(表1),结果表明各项指标均处于正常范围内。在每个试验小区内按照三点取样法随机选取3个采样点,使用不锈钢土钻垂直采集0~10 cm, 10~20 cm耕层土壤^[24]。各采样点的土样充分混合后,采用四分法缩分至1 kg,装入洁净自封袋中,标记编号、采样日期、处理信息后带回实验室风干研磨后备用。

土壤理化性质参照《土壤农化分析》^[25]测定,全氮采用硫酸钾-铁盐法(凯氏法)^[26],即土样加入硫

酸钾-硫酸铜混合催化剂和浓硫酸消解,凯氏定氮仪蒸馏,硼酸吸收,标准盐酸滴定;全磷采用硫酸氢铵-钼酸比色法(钼锑抗法),土样经硫酸-高氯酸消解,钼酸铵-抗坏血酸显色,在700 nm处比色测定;全钾采用酸提取-原子吸收光谱法,即用氢氟酸-高氯酸消解土样,原子吸收光谱仪(空气-乙炔火焰)测定;速效氮采用硫酸钾浸提法,土样用硫酸钾溶液振荡浸提,浸提液中铵态氮用靛酚蓝比色法测定,硝态氮用紫外分光光度法(220 nm和275 nm)测定,二者

加和得到速效氮;速效磷采用酸提-钼酸比色法,酸性土样用Bray-1浸提剂,中性或石灰性土样用Olsen浸提剂,振荡提取后钼蓝法显色,比色测定;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰原子吸收光谱法^[27],土样用1 mol·L⁻¹乙酸铵振荡浸提30 min,火焰原子吸收光谱仪测定;有机质采用重铬酸钾氧化-比色法(外加热法),在土样中加入重铬酸钾-硫酸溶液,油浴加热(约180℃)5 min,冷却后于600 nm处比色测定,换算为有机质含量。

表1 甘肃酒泉紫花苜蓿试验地土壤指标

Table 1 Soil indicators of the experimental site in Jiuquan

深度 Depth/ cm	pH	全氮 Total nitrogen/%	全磷 Total phosphorus/%	全钾 Total potassium/%	速效氮 Available nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (mg·kg ⁻¹)
0~10	7.94	0.096	0.08	1.70	53.0	19.1	137	15.00
10~20	7.93	0.059	0.07	1.78	45.2	17.3	157	8.96

1.3.2 紫花苜蓿物候期的观测 紫花苜蓿种子于2024年5月10日播种后,观察其在大田中的生长过程,包括分枝期、拔节期、现蕾期、开花期、结实期和成熟期,并记录其性状特征,于2024年8月底收割。主要的生育时期判定标准为:紫花苜蓿在春季条件适宜时开始萌发,从分蘖节产生侧枝的时期称为分蘖期;紫花苜蓿50%形成花苞时为现蕾期;随着花冠张开,雄蕊伸出,开始散布花粉,为紫花苜蓿开花期;由受精至种子完全成熟为结实期^[28]。

1.3.3 种子产量及产量组分的测定 选择健康且成熟的紫花苜蓿植株,在其生长季末期收集种子。收获时通过人工方式进行脱粒,将种子从荚果中分离出来,避免种子散失。种子在通风良好、阴凉地方干燥,以防止霉变和其它质量下降问题。干燥后,使用筛子等工具去除杂质,使用精确的天平测量干燥后的种子总重量。

每区组随机选取20株有代表性的单株,从中随机抽取25个花序,人工计数每个花序的发育成熟荚果数,剥开荚果计数每荚果种子数。所有数据汇总后计算平均值与标准差,通过方差分析(ANOVA)检验处理间差异显著性。

1.3.4 紫花苜蓿种子可溶性蛋白含量测定 采用BCA法测定蛋白含量^[29](微量法)。

1.3.5 紫花苜蓿种子淀粉含量测定 利用80%乙醇将样品可溶性糖与淀粉分开,进一步采用酸水解法将淀粉分解为葡萄糖,采用蒽酮比色法^[30]测定葡萄糖含量,并计算淀粉含量。

1.3.6 紫花苜蓿种子发芽率测定 将种子以10×

10摆放在发芽盒上,共有4次重复。参照《草种子检验规程发芽试验》GB/T 2930.4—2017进行操作,将培养箱温度设置为恒温20℃,模拟正常光照条件,发芽第10天测定发芽率。

种子发芽率=(末次计数时全部正常发芽粒数/供检种子数)×100%。

1.3.7 数据分析 利用多光谱成像仪器MSI VideometerLab4 (VideometerA/S, Herlev, Denmark)获取从紫外到近红外(365~970 nm)19个波段下的光谱数据,利用VideometerLab Software V3.22.0输出每粒种子的面积、长度、宽度、长宽比、颜色指标、饱和度和色调等14个形态指标信息。nCDA分析使用VideometerLab4软件的MSI Transformation Builder,将产量最高和产量最低小区的种子分别标记为红色和蓝色,输出所有紫花苜蓿种子的nCDA图像。使用Origin2021软件来绘制形态参数、光谱参数、发芽率、种子可溶性蛋白和淀粉含量的差异性图。使用IBM SPSS Statistics 26进行单因素方差分析(One-way ANOVA),多重比较采用最小显著差异法。使用R语言的heatmap函数来绘制特征参数相关性热图。利用Excel 2020对数据进行整理与归类,并通过DPS软件进行通径分析。

利用前期研发的nCDA-CNN模型,对经过nCDA转换后的单个紫花苜蓿种子图像进行机器学习识别与预测。该模型相关代码可在GitHub上开源获取(<https://github.com/CAUhxnCDA-CNN>)。

2 结果与分析

2.1 灌水施磷互作对紫花苜蓿种子产量和产量组分的影响

灌水量与施磷量对紫花苜蓿种子产量及其产量构成因子(每花序荚果数、每荚果种子数、种子重量)具有显著影响($P<0.05$)(表2)。在所有施磷处理中, P_2 处理表现最优,其每花序荚果数($14.98\pm$

0.88)、每荚果种子数(8.76 ± 0.81)及种子产量($835.89\pm56.35\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)均显著高于其他施磷处理(P_1,P_3)($P<0.05$),且三项指标均为各处理最高值;而 P_3 处理则在上述三项指标上均表现最低,显著低于 P_2 处理($P<0.05$)。相比之下,三个灌水处理(W_1,W_2,W_3)之间在种子产量及产量构成因子上无显著差异,表明在本试验条件下,灌水量变化未对紫花苜蓿种子产量形成产生显著调控作用。

表 2 灌水和施磷对紫花苜蓿种子产量及产量组分的影响

Table 2 Effects of irrigation and phosphorus application on seed yield and yield components of alfalfa

处理 Treatment	每花序荚果数 Pods per inflorescence	每荚果种子数 Seeds per pod	种子产量 Seed yield/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
W_1	$13.19\pm2.23^{\text{ab}}$	$8.24\pm1.15^{\text{ab}}$	$792.12\pm81.21^{\text{ab}}$
W_2	$13.04\pm2.04^{\text{ab}}$	$8.04\pm0.99^{\text{ab}}$	$789.58\pm62.36^{\text{ab}}$
W_3	$12.70\pm2.16^{\text{ab}}$	$7.60\pm0.68^{\text{ab}}$	$763.76\pm64.01^{\text{ab}}$
P_1	$12.86\pm1.05^{\text{ab}}$	$8.05\pm0.39^{\text{ab}}$	$790.86\pm34.55^{\text{b}}$
P_2	$14.98\pm0.88^{\text{a}}$	$8.76\pm0.81^{\text{a}}$	$835.89\pm56.35^{\text{a}}$
P_3	$11.10\pm0.91^{\text{b}}$	$7.07\pm0.36^{\text{b}}$	$718.71\pm21.63^{\text{b}}$

注:同一列中,不同字母表示处理之间存在显著性差异($P<0.05$)。下同

Note: In the same column, different letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same as below

灌水与施磷的互作效应对紫花苜蓿种子产量及其构成因子(每花序荚果数、每荚果种子数、种子产量)具有显著影响(表3)。与对照组(P_0W_0 , $597.48\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)相比,所有施肥与灌水组合均显著提高了种子产量,增幅在16.33%至48.20%之间。在每花序荚果数方面,处理组合 P_2W_1 的表现最优,达到15.76个,显著高于其他处理($P<0.05$)。对于每荚果种子数,施磷量(P)与灌水量(W)的互作表现出阶段性调控特征:当施磷量为 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,随灌水量从600

$\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}(W_1)$ 增加至 $900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}(W_2)$,每荚果种子数从7.67个(P_1W_1)上升至8.44个(P_1W_2);但当灌水量进一步增至 $1200\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}(W_3)$ 时,每荚果种子数回落至8.04个(P_1W_3),整体呈现“先升后降”的变化趋势。在种子产量方面,所有试验处理(含不同水磷组合及对照)相较于空白对照(P_0W_0 、 P_0W_4)均有不同程度的提升;其中, P_2W_1 处理的种子产量最高,达 $885.44\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,且显著高于其他处理($P<0.05$),是种子产量及产量组分表现最优的水磷组合。

表 3 灌水与施磷互作对紫花苜蓿种子产量及产量组分的影响

Table 3 Interactive effects of irrigation and phosphorus application on seed yield and yield components of alfalfa

处理 Treatment	每花序荚果数 Pods per inflorescence	每荚果种子数 Seeds per pod	种子产量 Seed yield/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
P_1W_1	$11.79\pm0.28^{\text{de}}$	$7.67\pm0.28^{\text{cde}}$	$753.50\pm60.32^{\text{abc}}$
P_1W_2	$12.90\pm0.47^{\text{cd}}$	$8.44\pm0.12^{\text{bc}}$	$797.42\pm31.58^{\text{ab}}$
P_1W_3	$13.88\pm0.63^{\text{bc}}$	$8.04\pm0.21^{\text{bcd}}$	$821.65\pm21.33^{\text{ab}}$
P_2W_1	$15.76\pm0.62^{\text{a}}$	$9.56\pm0.18^{\text{a}}$	$885.44\pm76.36^{\text{a}}$
P_2W_2	$15.16\pm0.41^{\text{ab}}$	$8.77\pm0.38^{\text{ab}}$	$847.64\pm56.07^{\text{ab}}$
P_2W_3	$14.02\pm0.83^{\text{bc}}$	$7.94\pm0.32^{\text{bcd}}$	$774.59\pm126.22^{\text{abc}}$
P_3W_1	$12.02\pm2.04^{\text{de}}$	$7.49\pm0.23^{\text{de}}$	$737.44\pm110.51^{\text{abc}}$
P_3W_2	$11.08\pm0.53^{\text{ef}}$	$6.91\pm1.40^{\text{ef}}$	$723.67\pm60.41^{\text{abc}}$
P_3W_3	$10.21\pm0.74^{\text{fg}}$	$6.82\pm0.30^{\text{ef}}$	$695.04\pm46.82^{\text{abc}}$
P_0W_0	$8.18\pm0.31^{\text{h}}$	$5.79\pm0.43^{\text{g}}$	$597.48\pm221.97^{\text{c}}$
P_0W_4	$9.12\pm1.15^{\text{gh}}$	$6.43\pm0.22^{\text{fg}}$	$663.07\pm97.22^{\text{bc}}$

2.2 种子产量与产量组分的通径分析

通过通径分析,我们解析了紫花苜蓿产量组分对种子产量的影响机制(表4)。结果表明,“每荚果种子数”对“种子产量”的直接效应最强,高达0.721,且通过“每花序荚果数”产生的间接效应仅

为-0.001,最终总作用达到0.72,这表明其是决定种子产量的核心正向驱动因子。相比之下,“每花序荚果数”对“种子产量”的直接效应极小(-0.001),其主要通过“每荚果种子数”传递了显著的间接效应(0.591),从而表现出0.59的总促进作用。这说明

在产量构成中,每荚果种子数对最终产量的直接贡献最大,提高每荚果种子数是促进种子重量增加的

关键途径^[31];而花序荚果数则主要通过协同调节单荚种子数来间接发挥作用。

表 4 紫花苜蓿种子产量与产量组分的通径分析

Table 4 Path coefficient analysis of seed yield and yield components in alfalfa

指标 Indicator	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect			总作用 Total effect
		X ₁	X ₂	合计	
每花序荚果数 Pods per inflorescence	−0.001	0.000	0.591	0.591	0.590
每荚果种子数 Seeds per pod	0.721	−0.001	0.000	−0.001	0.720

注:种子重量(Y)、每花序荚果数(X₁)、每荚果种子数(X₂)

Note: Seed weight (Y), Pods per inflorescence (X₁), Seeds per pod (X₂)

2.3 水肥处理对种子多光谱数据的影响

通过多光谱数据分析,我们发现 19 个波段下不同水肥处理的紫花苜蓿种子表现出明显的区别(图 2)。随着波长的增加,不同处理下的紫花苜蓿种子的光谱反射率均呈上升趋势,而且产生了不同数值分布,显示出水肥处理对苜蓿种子种皮产生了影响。

我们提取了紫花苜蓿种子的形态与颜色特征参数,发现不同水肥处理对其有显著影响。在形态指标方面,P₂W₁处理的种子表面积(3.53 mm²)、长度(2.79 mm)、宽度(0.69 mm)及紧实度圆(0.69)均达到最高值,且显著优于其他处理($P<0.05$),表明该处理最有利于种子生长发育;而不施肥处理(P₀W₀、P₀W₄)的各项形态指标均处于最低水平(表 5)。颜色参数分析显示,P₂W₁处理的 L、A、B 及饱和度值均居首位,暗示种子颜色更鲜亮饱满;而 P₀系列处理的相关数值较低。综上所述,适宜的施磷与灌溉组合(P₂W₁)能有效改善种子外观品质,提升其商品性状。

我们进一步对水肥处理的紫花苜蓿种子进行了 nCDA 颜色空间转换,并基于 Python 的 Tensor-

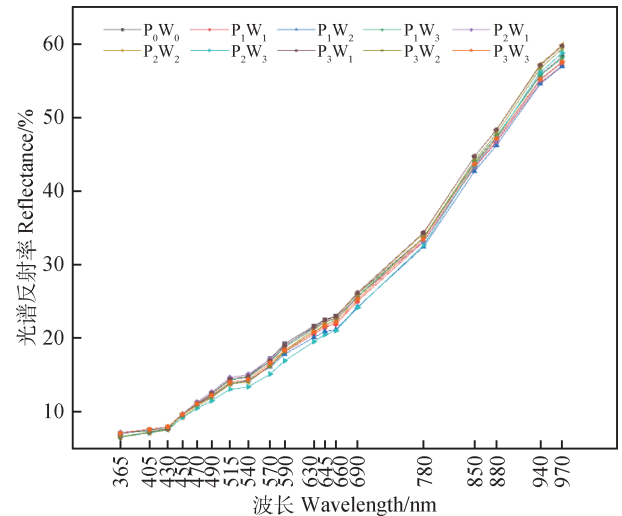


图 2 不同水肥处理下紫花苜蓿种子的光谱反射率

Fig. 2 Spectral reflectance of alfalfa seeds under different water and fertilizer treatments

Flow 平台构建 nCDA-CNN 模型开展图像识别研究。图 3 呈现了经 nCDA 转换后每粒种子的完整图像及模型识别结果。从图中可见,经 nCDA 转换的种子图像能清晰展现不同水肥处理下的颜色特征差异,模型对各粒种子的处理类别(水肥处理/未

表 5 不同水肥处理下紫花苜蓿种子形态特征参数和形态颜色参数

Table 5 Morphological characteristics and color parameters of alfalfa seeds under different water and fertilizer treatments

处理 Treatment	表面积 Surface area/mm ²	长度 Length/mm	宽度 Width/mm	紧实度圆 Compactness	颜色参数 L Lightness L	颜色参数 A Lightness A	颜色参数 B Lightness B	饱和度 Saturation
P ₀ W ₀	2.15±0.26 ^c	2.20±0.12 ^{bcd}	0.54±0.01 ^b	0.54±0.01 ^b	45.54±1.66 ^b	7.54±0.13 ^{de}	31.87±0.63 ^b	32.83±0.90 ^b
P ₀ W ₄	2.10±0.35 ^c	2.05±0.20 ^e	0.54±0.03 ^b	0.24±0.02 ^b	48.28±1.40 ^b	8.69±1.23 ^{bcd}	34.26±1.46 ^{ab}	35.32±1.71 ^{ab}
P ₁ W ₁	2.50±0.26 ^{bc}	2.17±0.10 ^{cde}	0.59±0.14 ^{ab}	0.59±0.14 ^{ab}	45.60±3.23 ^b	10.01±1.56 ^{abc}	29.94±8.80 ^b	31.92±8.08 ^b
P ₁ W ₂	2.89±0.06 ^b	2.45±0.10 ^b	0.58±0.05 ^{ab}	0.58±0.05 ^{ab}	46.09±1.94 ^b	7.72±2.68 ^{cde}	34.34±0.97 ^{ab}	35.33±1.00 ^{ab}
P ₁ W ₃	2.52±0.14 ^{bc}	2.35±0.12 ^{bcd}	0.58±0.02 ^{ab}	0.58±0.03 ^{ab}	50.26±1.80 ^{ab}	8.41±0.41 ^{bcd}	35.07±0.98 ^{ab}	35.93±0.90 ^{ab}
P ₂ W ₁	3.53±0.18 ^a	2.79±0.08 ^a	0.69±0.01 ^a	0.69±0.01 ^a	53.88±0.92 ^a	11.37±0.78 ^a	39.25±0.45 ^a	39.23±0.50 ^a
P ₂ W ₂	2.51±0.30 ^{bc}	2.12±0.11 ^{de}	0.60±0.08 ^{ab}	0.60±0.08 ^{ab}	47.64±2.73 ^b	10.21±0.25 ^{ab}	35.57±0.74 ^{ab}	36.98±0.63 ^{ab}
P ₂ W ₃	2.81±0.34 ^b	2.33±0.18 ^{bcd}	0.66±0.06 ^{ab}	0.66±0.06 ^{ab}	45.84±5.29 ^b	6.99±1.32 ^e	30.37±2.15 ^b	31.22±2.18 ^b
P ₃ W ₁	2.80±0.26 ^b	2.43±0.15 ^{bc}	0.57±0.05 ^{ab}	0.57±0.05 ^{ab}	46.79±3.27 ^b	8.93±0.63 ^{bcd}	31.56±4.70 ^b	32.80±4.48 ^b
P ₃ W ₂	2.68±0.05 ^b	2.19±0.06 ^{cde}	0.62±0.12 ^{ab}	0.62±0.12 ^{ab}	48.68±1.90 ^b	9.51±0.54 ^{abcd}	32.14±2.49 ^b	33.43±2.52 ^{ab}
P ₃ W ₃	2.71±0.22 ^b	2.31±0.21 ^{bcd}	0.62±0.09 ^{ab}	0.62±0.09 ^{ab}	47.84±3.16 ^b	10.03±1.68 ^{abc}	34.28±2.88 ^{ab}	35.79±2.36 ^{ab}

处理)预测标注明确。研究结果显示,nCDA-CNN模型对nCDA转换后的单粒种子图像识别效果优异,平均水肥处理识别和鉴定准确率达到95%。这表明nCDA颜色空间转换能有效突出种子因水肥处理产生的颜色特征差异,结合CNN模

型的深度学习能力,可精准区分不同水肥处理下的紫花苜蓿种子,为紫花苜蓿种子水肥处理的快速、准确鉴定提供了可靠的技术手段,也为作物表型分析中种子处理效应的精准识别提供了新思路。

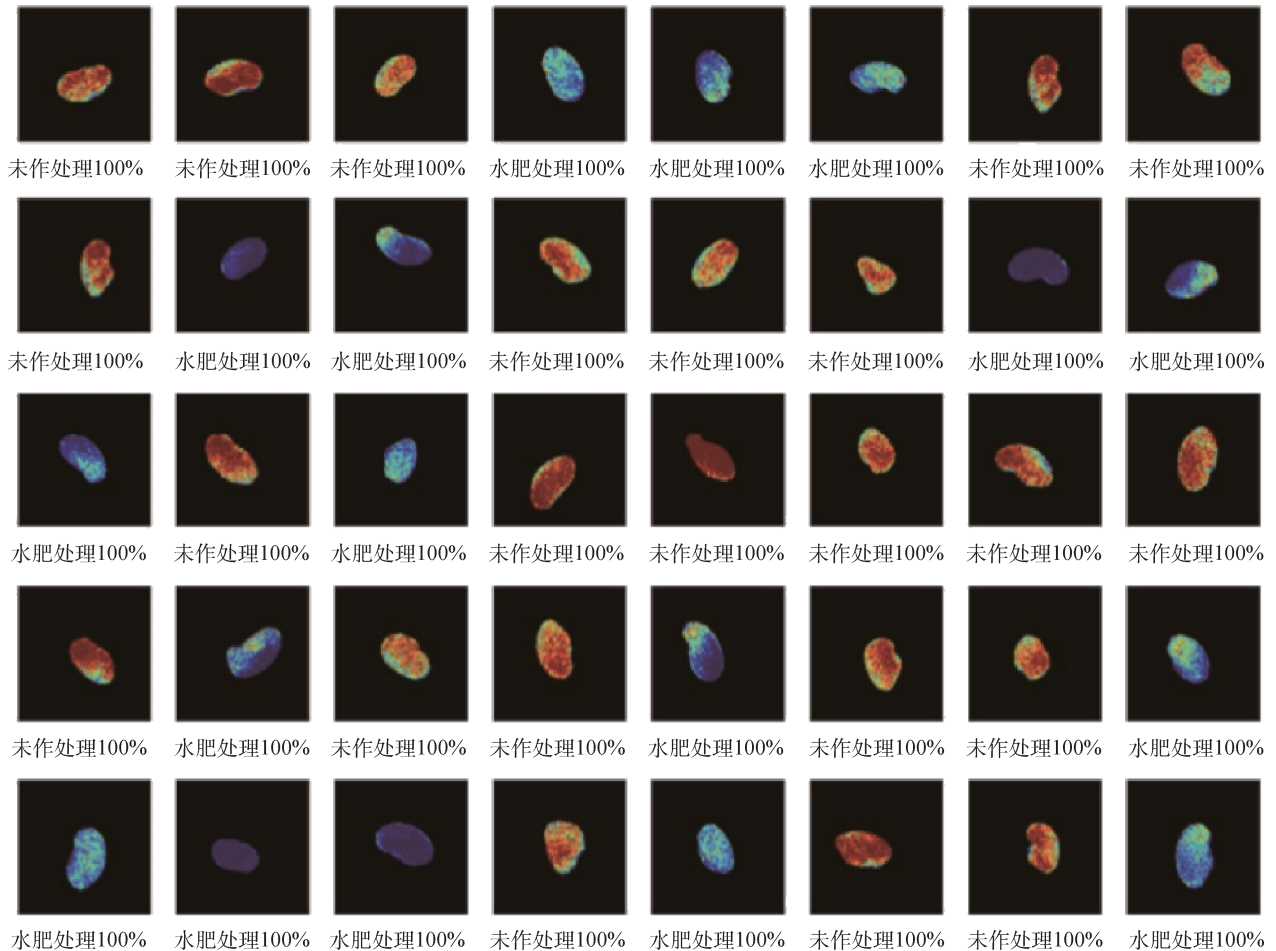


图3 运用nCDA-CNN模型预测水肥处理的紫花苜蓿种子

Fig. 3 Prediction of each alfalfa seed under water and fertilizer treatments based on nCDA-CNN

2.4 不同水肥梯度处理下的种子可溶性蛋白含量与淀粉含量变化

我们发现不同水肥处理对紫花苜蓿种子可溶性蛋白含量存在影响(图4)。在11种水肥组合中,施磷(P)与灌溉(W)均对可溶性蛋白含量有显著调控作用(图4a)。其中, P_1W_1 、 P_1W_2 、 P_1W_3 处理的可溶性蛋白含量均较高,显著高于施高磷的 P_3W_2 和 P_3W_3 处理;而 P_3W_1 、 P_3W_2 和 P_3W_3 等重磷处理的蛋白含量显著降至最低水平,说明过量施磷会抑制蛋白积累。在同一施磷水平下,不同灌溉梯度的效应各异:在 P_1 水平下,随着灌溉量的增加,种子可溶性蛋白含量增加,而 P_2 和 P_3 水平下 W_1 灌溉均表现为最优(图4b)。图4c则表明,在三个不同灌溉水平

下,施磷效应均显示出差异显著;CK对照下蛋白含量最低, P_1 施磷下蛋白含量呈上升趋势,但是中高施磷(P_2 和 P_3)反而降低了蛋白含量。综上,适宜的水肥组合(如 P_1W_1 或 P_1W_2)能显著提升紫花苜蓿种子的可溶性蛋白含量,而过量施磷和灌溉则会降低其营养品质。

我们测定了不同水肥处理下紫花苜蓿种子的淀粉含量,发现不同水肥处理对紫花苜蓿种子淀粉含量存在影响。结果显示,在11个处理中, P_1W_1 处理下的种子淀粉含量最高,显著高于其他处理 and 对照,这表明过量增加灌溉量或施磷量均不利于淀粉积累。在同一施磷水平下,适度灌溉(W_1)较其他两个处理显著提高了种子的淀粉含量(图5b)。图5c

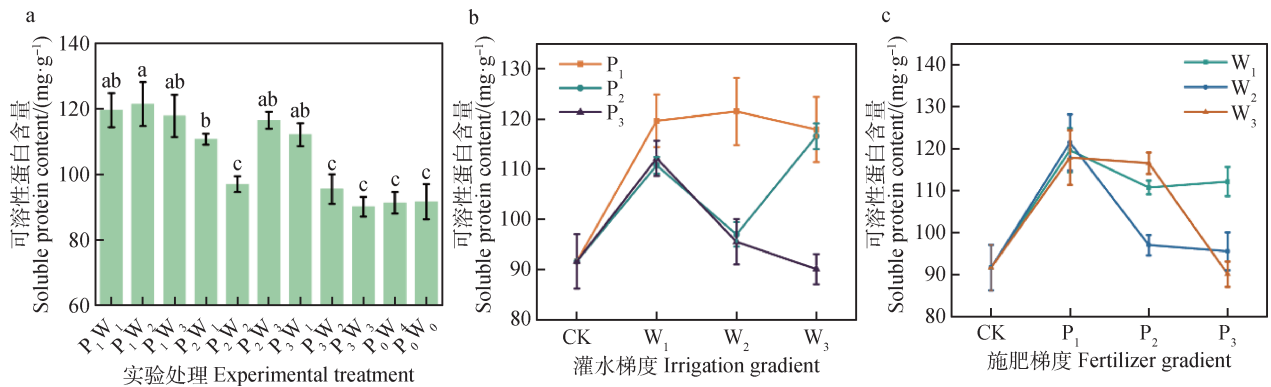


图4 不同水肥处理下紫花苜蓿种子的可溶性蛋白含量

Fig. 4 Soluble protein content of alfalfa seeds under different water and fertilizer treatments

注: a, 11个水肥处理下可溶性蛋白含量比较。b, 与对照相比, 三个灌溉水平(W_1 , W_2 和 W_3)在不同施磷水平(P_1 , P_2 和 P_3)下的可溶性蛋白含量。c, 与对照相比, 三个施磷水平在不同灌溉水平下的可溶性蛋白含量

Note: a, soluble protein content of alfalfa seeds under 11 treatments. b, soluble protein content of alfalfa seeds across the three irrigation treatments (W_1 , W_2 , and W_3) in the three groups of fertilizer treatments (P_1 , P_2 , and P_3). c, soluble protein content of alfalfa seeds across the three fertilizer treatments (P_1 , P_2 , and P_3) in the three groups of irrigation treatments (W_1 , W_2 , and W_3)

进一步显示, 在 W_1 灌溉下, P_1 施磷量获得最高淀粉含量; 而在 W_2 和 W_3 灌溉条件下, 提高磷肥施用量可促进种子淀粉含量增加。综合来看, 适度的水肥组

合(特别是 P_1W_1)能有效促进紫花苜蓿种子淀粉的积累, 过高或过低的投入均会降低其贮藏物质含量。

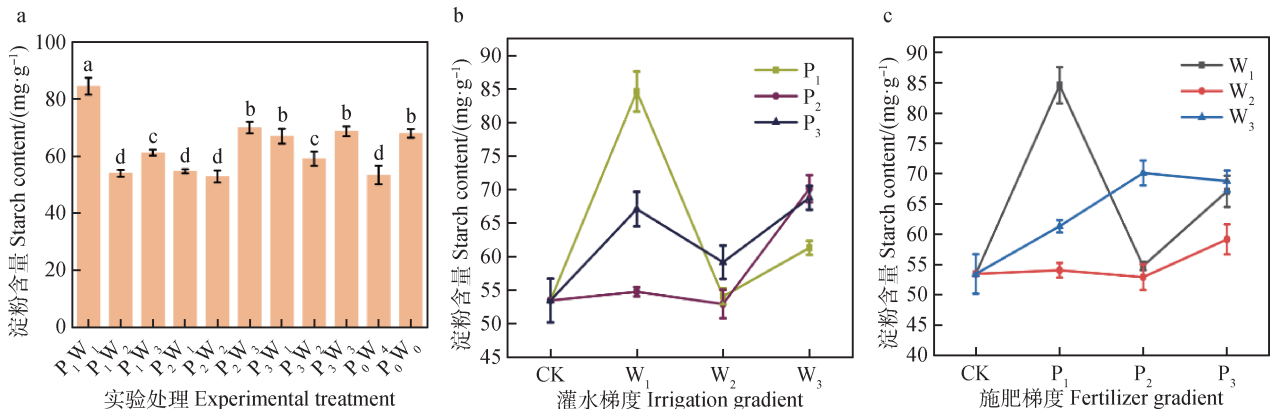


图5 不同水肥梯度处理下紫花苜蓿种子的淀粉含量

Fig. 5 Starch content of alfalfa seeds under different water and fertilizer treatments

注: a, 11个水肥处理下淀粉含量比较。b, 与对照相比, 三个灌溉水平(W_1 , W_2 和 W_3)在不同施磷水平(P_1 , P_2 和 P_3)下的淀粉含量。c, 与对照相比, 三个施磷水平在不同灌溉水平下的淀粉含量

Note: a, starch content of alfalfa seeds under 11 treatments. b, starch content of alfalfa seeds across the three irrigation treatments (W_1 , W_2 , and W_3) in the three groups of fertilizer treatments (P_1 , P_2 , and P_3). c, starch content of alfalfa seeds across the three fertilizer treatments (P_1 , P_2 , and P_3) in the three groups of irrigation treatments (W_1 , W_2 , and W_3)

3 讨论

3.1 水肥对紫花苜蓿种子产量及产量组分的影响

既往研究表明, 灌溉与施磷是调控紫花苜蓿种子产量的两大关键因素。灌水量影响种子数和种子荚数, 且现蕾期灌水与花序数和生殖枝呈显著正相关^[32], 灌溉方式同样影响水磷互作效果, 叶雨浓等^[33]研究发现, 地下滴灌条件下的紫花苜蓿生产性

能、水分利用效率和磷肥利用效率均显著高于漫灌和喷灌处理, 地下30 cm滴灌且施 P_2O_5 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 水磷耦合模式的综合表现最优。何玉龙等^[34]的研究指出, 氮磷配施显著提升苜蓿产量与品质, 磷素通过扩大叶面积间接降低纤维含量。单新河等^[35]认为, 在科尔沁沙地地区, 与施磷量 $81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $243 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 相比, $162 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是该地区苜蓿建植适宜施磷量。马广元等^[14]也指出, 在低、中土壤含

水率下,增加施磷量可提高紫花苜蓿的株高、茎粗、叶茎比、光合特性及灌溉水利用效率。在紫花苜蓿的种植管理中,适宜施磷可以促进种子产量提升,而磷肥用量过多或不足则可能导致产量下降,这与其他作物研究中磷肥促进生殖器官发育的作用相一致^[36-38]。

本研究显示灌溉和施磷对紫花苜蓿种子产量及产量组分的影响呈现出显著差异性,且二者互作作用进一步扩大其效果^[39]。值得注意的是,灌溉量对紫花苜蓿的产量组分影响较小,但其与施磷的互作作用明显。例如,在 P_2W_1 处理($100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施磷+ $600\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 灌溉)下,每花序荚果数、每荚果种子数和种子产量均达到了最高值,进一步增加灌水量($900\sim 1200\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)导致产量组分的变化趋势不一致,表明水分的过量供应可能引发次生代谢紊乱,抑制植物正常生殖生长^[40]。这些结果验证了水分和磷肥共同影响植物生长的协同效应,同时也揭示了灌溉与施肥比例的动态优化是提高种子产量的关键,为紫花苜蓿的精准农业管理提供了科学依据^[41]。

3.2 水肥提升紫花苜蓿种子多光谱特征的意义

本研究通过多光谱形态参数分析系统揭示了不同水肥处理对紫花苜蓿种子形态和颜色特征的影响,水肥处理的种子表面积、长度、宽度和紧实度相比对照有显著区别,这可能归因于适宜的水肥供应促进了紫花苜蓿种子的营养积累和细胞膨大,从而提升了种子质量^[41]。尤其是 P_2W_1 处理种子的颜色参数有明显差异,可能与种皮的光滑度和脂肪含量较高有关^[42],对苜蓿种子市场的商业价值提升也具有重要意义^[43]。此外,不同光谱参数的变化趋势为非破坏性光学检测技术评估种子质量,提供了数据支持^[21]。nCDA算法的多光谱分析进一步证实,经水肥处理的紫花苜蓿种子与未经处理的紫花苜蓿种子在光谱特性上的显著差异^[6]。基于卷积神经网络(CNN)模型的深入分析,能够准确区分水肥处理的紫花苜蓿种子和对照种子,表明nCDA-CNN算法在苜蓿种子生产和质量评估中的高效性和准确性^[44]。这一技术手段为非破坏性评估紫花苜蓿种子质量和批次提供了新方法,同时也为筛选高质量种子提供了技术支持^[45]。

3.3 水肥对紫花苜蓿种子可溶性蛋白和淀粉含量的影响

本研究发现,不同水肥处理对紫花苜蓿种子的

可溶性蛋白和淀粉含量产生显著影响。在灌水梯度的调控下,可溶性蛋白含量整体呈现先升高后降低的趋势。比如,在 W_2 灌水梯度下, P_1 处理的种子可溶性蛋白含量达到最高。这一现象可能与适宜的灌溉量促进种子的代谢活性及蛋白质的积累有关^[42],适宜的水肥组合为紫花苜蓿种子的生长和代谢提供了最优环境条件^[46]。适量灌水(W_2)能够改善根系的吸收功能和水分利用效率,促进氮素的吸收与转化,从而增加种子蛋白质含量。而灌溉量过高(W_3)可能导致土壤氧气供应不足,抑制氮的吸收效率,并增加氮素流失的风险,最终导致种子可溶性蛋白含量下降^[47]。同时,肥料梯度对可溶性蛋白的调控也表现出非线性关系, P_1 至 P_2 磷肥增施显著提高了可溶性蛋白的积累,但当施肥达到 P_3 时,可溶性蛋白含量开始下降。这表明适量施磷肥有助于种子的氮代谢,而过量施磷肥则可能引发营养失衡或代谢抑制,降低蛋白质合成效率^[41]。与 W_2P_1 的高可溶性蛋白含量相比, W_3P_3 灌溉和施磷肥更多,但是可溶性蛋白含量下降至最低水平,这进一步验证了适量水肥和水肥互作对植物代谢过程的重要影响^[48]。

与可溶性蛋白含量类似,淀粉含量也表现出显著的水肥梯度依赖性。在灌溉梯度方面, P_1 水平下 W_1 的淀粉含量显著高于 W_2 和 W_3 梯度,这与较低的水量促进碳水化合物的积累密切相关^[6]。适度灌溉(W_1)可能激活了紫花苜蓿种子内源激素(如脱落酸)的调控作用,从而增强了淀粉的合成和积累^[49]。随着灌水量的增加(W_2 和 W_3),种子淀粉含量呈现先下降后增加的趋势,这可能与高水分条件下光合作用效率降低以及糖类向淀粉的转化受抑制有关^[50]。在施肥梯度方面, W_1 水平下的 P_1 处理显著促进了淀粉积累,这表明适量磷肥提升了光合作用效率,促进了淀粉的合成^[51]。

4 结论

本研究明确了水分和磷肥对紫花苜蓿种子产量及质量的显著作用,并揭示了其互作效应的优化模式。在灌水量 $600\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 和施磷量 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理下,紫花苜蓿种子产量达到最高,且每花序荚果数、每荚果种子数及种子重量三项产量组分指标表现最佳。施磷量与灌水量的互作作用显著影响种子产量,其中 P_2W_1 处理的紫花苜蓿种子产量为

885.44 kg·hm⁻²,比最小值P₀W₀增产287.96 kg·hm⁻²。通径分析表明,每荚果种子数对种子重量的影响较为显著。利用多光谱图像对不同处理的种子形态特征进行分析,结果显示P₂W₁处理的种子面积、长度、宽度等形态指标显著不同于其他处理。同时,应用nCDA-CNN模型对种子进行识别,模型对水肥处理的预测准确率达95%,这为未来种子质量检测和筛选提供了重要工具。进一步研究表明,在适宜的灌溉量(W₁)和施肥量(P₁)条件下,紫花苜蓿种子表现出较高的可溶性蛋白含量和最高的淀粉含量,说明产量与品质的最佳水肥组合可能存在差异;而过量的水分和肥料则无法进一步提升种子品质。因此,在实际农业生产中应以目标为导向合理制定水肥管理策略:追求高产时采用灌水600 m³·hm⁻²、施磷200 kg·hm⁻²(P₂W₁);追求高可溶性蛋白含量时采用灌水900 m³·hm⁻²、施磷100 kg·hm⁻²(P₁W₂)组合。nCDA-CNN模型可精准识别水肥处理,为智慧农业提供技术支持。同时,产量组分间的权衡关系、不同生态环境下的优化策略以及分子机制的深入探索仍需进一步研究,从而为紫花苜蓿种子的高效生产和推广提供更全面的理论和实践支持。

参考文献

- [1] GUO Z G, LIU H X, WANG S M, et al. Biomass, persistence and drought resistance of nine lucerne varieties in the dry environment of West China[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2005, 45(1): 59-64
- [2] HUI J F, SUN Y L, WEI K Q, et al. Optimizing irrigation and fertilization management enhances alfalfa seed yield components through improved soil nutrient availability and leaf photosynthetic efficiency[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1655710
- [3] 陈超, 明炜, 莫本田, 等. 紫花苜蓿根系生长特性的品种比较[J]. 草业科学, 2014, 31(5): 949-955
CHEN C, MING W, MO B T, et al. The root characteristics of different alfalfa varieties[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(5): 949-955
- [4] LUO D, LIU W X, WANG Y R, et al. Development of a rapid one-step PCR protocol to distinguish between alfalfa (*Medicago sativa*) and sweet clover (*Melilotus spp.*) seeds[J]. Seed Science and Technology, 2014, 42(2): 237-246
- [5] 赵阳安, 芦光新, 邓晔, 等. 根瘤菌拌种对两种苜蓿生长及根际微生物多样性的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(2): 370-378
ZHAO Y A, LU G X, DENG Y, et al. Effect of *Rhizobium* seed dressing on growth of two alfalfa and rhizosphere microbial diversity[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(2): 370-378
- [6] LU Q, QI G P, YIN M H, et al. Alfalfa cultivation patterns in the Yellow River irrigation area on soil water and nitrogen use efficiency[J]. Agronomy, 2024, 14(4): 874
- [7] 向金城, 车爱霞. 牧草种植与饲草饲料加工技术[J]. 甘肃畜牧兽医, 2015(4): 8-9
XIANG J C, CHE A X. Forage planting and forage processing technology[J]. Gansu Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2015(4): 8-9
- [8] 韩亮亮, 毛培胜, 王新国, 等. 近红外光谱技术在燕麦种子活力测定中的应用研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(2): 86-90
HAN L L, MAO P S, WANG X G, et al. Study on vigour test of oat seeds with near infrared reflectance spectroscopy[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(2): 86-90
- [9] 王星, 黄薇, 余淑艳, 等. 宁夏地区地下滴灌水肥耦合对紫花苜蓿种子产量及构成因素的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(9): 76-85
WANG X, HUANG W, YU S Y, et al. Effect of water and fertilizer coupling on seed yield and composition of alfalfa grown with underground drip irrigation in Ningxia[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2022, 31(9): 76-85
- [10] JIA Z C, OU C M, SUN S J, et al. Optimizing drip irrigation managements to improve alfalfa seed yield in semiarid region[J]. Agricultural Water Management, 2024, 297: 108830
- [11] BASAL O, SZABÓ A. The combined effect of drought stress and nitrogen fertilization on soybean[J]. Agronomy, 2020, 10(3): 384
- [12] 蔡婷, 王静, 吴朝, 等. 水肥耦合对巴彦淖尔盐碱地紫花苜蓿产量、品质 and 经济效益的影响[J]. 中国草地学报, 2026, 48(1): 49-61
CAI T, WANG J, WU Z, et al. Effects of water-fertilizer coupling on yield, quality, and economic efficiency of alfalfa in saline-alkaline soils of Bayannur[J]. Chinese Journal of Grassland, 2026, 48(1): 49-61
- [13] 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
- [14] 马广元, 胡爱萍, 陈虎成, 等. 水磷调控对引大灌区紫花苜蓿光合特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(7): 26-33
MA G Y, HU A P, CHEN H C, et al. Effects of water and phosphorus regulation on photosynthesis and yield of alfalfa in the Yinda Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(7): 26-33
- [15] 朱建强, 路宏中, 马静, 等. 氮磷钾配施对酒泉市紫花苜蓿种子产量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2020, (5): 8-14
ZHU J Q, LU H Z, MA J, et al. Effects of N, P and K fertilizers on yield of alfalfa seed in Jiuquan city[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2020(5): 8-14

- [16] 俞鸿千,欧成明,王占军,等. 农艺措施对紫花苜蓿种子产量组分的影响[J]. 草地学报,2021,29(12):2853-2861
YU H Q, OU C M, WANG Z J, et al. Effects of agronomic measures on seed yield components of alfalfa[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(12): 2853-2861
- [17] ZHANG L X, JIANG Y B, YIN M H, et al. Optimizing phosphorus fertilization management is conducive to improving alfalfa yield and quality: a meta-analysis[J]. Agriculture, 2025, 15(8): 797
- [18] 李强,邢麟木,高原千惠,等. 不同磷肥处理对紫花苜蓿生长及种子产量的影响[J]. 新疆农业大学学报,2021,44(6):396-400
LI Q, XING L M, GAO Y, et al. Effects of phosphate fertilizer on growth and seed yield of alfalfa (*Medicago sativa*)[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2021, 44(6): 396-400
- [19] LING Y, YIN M H, KANG Y X, et al. Synergistic regulatory effects of water-nitrogen coupling on osmotic regulation, yield, and forage quality of alfalfa[J]. Plants, 2026, 15(2): 173
- [20] 王雪萌,何欣,张涵,等. 基于多光谱成像技术快速无损检测紫花苜蓿人工老化种子[J]. 草业学报,2022,31(7):197-208
WANG X M, HE X, ZHANG H, et al. Non-destructive identification of artificially aged alfalfa seeds using multispectral imaging analysis [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31 (7) : 197-208
- [21] 何欣,王雪萌,张涵,等. 基于卷积神经网络的牧草种子图像识别[J]. 草业科学,2022,39(11):2338-2349
HE X, WANG X M, ZHANG H, et al. Convolutional neural network-based image recognition of forage seeds[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(11): 2338-2349
- [22] 刘俊泽,贺英彩,马秀琴,等. 不同燕麦品种种子自然老化表型和多光谱变化特征[J]. 草地学报,2024,32(12):3688-3697
LIU J Z, HE Y C, MA X Q, et al. Characteristics of natural ageing phenotypes and multispectral changes in seeds of different oat varieties[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(12): 3688-3697
- [23] 倪浩然,王润,胡昊,等. 基于多光谱成像技术鉴别不同紫花苜蓿品种的种子[J]. 草地学报,2023,31(10):2985-2991
NI H R, WANG R, HU H, et al. Seed identification of alfalfa varieties based on multispectral imaging [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(10): 2985-2991
- [24] 李明贵,刘继华,庞海涛. 苜蓿生产指标测定与土壤养分丰缺分析[J]. 山东畜牧兽医,2014,35(2):66-68
LI M G, LIU J H, PANG H T. Determination of alfalfa production index and analysis of soil nutrient abundance and deficiency [J]. Shandong Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2014, 35(2): 66-68
- [25] 李忠意,杨剑虹,程永毅,等. “土壤农化分析”实验教学的改革与探索[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2019,44(1):144-149
LI Z Y, YANG J H, CHENG Y Y, et al. The reform and exploration on teaching of soil agrochemistry analysis experiment [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2019, 44(1): 144-149
- [26] 刘宗超,蔡兴,文田耀,等. 石墨消解仪-凯氏定氮法测定土壤中全氮量[J]. 化学分析计量,2022,31(12):55-58
LIU Z C, CAI X, WEN T Y, et al. Determination of total nitrogen in soil by graphite digester-Kjeldahl method [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2022, 31(12): 55-58
- [27] 杨小秋,汪健,王林,等. 火焰原子吸收光谱法测定植烟土壤中的速效钾[J]. 烟草科技,2012,45(10):65-67
YANG X Q, WANG J, WANG L, et al. Determination of available potassium in tobacco planting soil by flame atomic absorption spectrometry [J]. Tobacco Science & Technology, 2012, 45(10): 65-67
- [28] 鄢家俊,王强,张劲,等. 多叶型紫花苜蓿不同生育阶段多叶性状表达的观测分析[J]. 草学,2018(4):12-16
YAN J J, WANG Q, ZHANG J, et al. Observation and analysis on the multi-leaf trait expression of multifoliate alfalfa in different growing stage [J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2018(4): 12-16
- [29] 邹泽红. BCA法测定蜜蜂变应原中的蛋白含量[J]. 化学分析计量,2004,13(5):52-53
ZOU Z H. Determination of protein content in bee extract by bicinchoninic acid method [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2004, 13(5): 52-53
- [30] 彭玉魁,李菊英. NIRS法同时测定小麦种子水分、粗蛋白、赖氨酸和粗淀粉含量研究[J]. 西北农业学报,1996,5(3):31-34
PENG Y K, LI J Y. Comparative studies between NIRS and chemical analysis method on measuring moisture, crude protein, lysine and crude starch content of wheat grain [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 1996, 5(3): 31-34
- [31] LIATUKIENĖ A, SKUODIENĖ R, MURAŠKIENĖ M, et al. Impact of soil and climate on alfalfa growth and yield [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science, 2025, 75(1): 2577422
- [32] 俞鸿千,马雪鹏,曾翰国,等. 地下滴灌时期和水量对紫花苜蓿种子生产的影响[J]. 草业学报,2026,35(1):53-64
YU H Q, MA X P, ZENG H G, et al. Effects of the amount and timing of subsurface drip irrigation on alfalfa seed production [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(1): 53-64
- [33] 叶雨浓,余淑艳,王星,等. 灌溉方式与磷素对紫花苜蓿生产性能和营养品质的影响[J]. 草地学报,2024,32(5):1592-1600
YE Y N, YU S Y, WANG X, et al. Effect of irrigation methods and phosphorus on the production performance and nutritional quality of alfalfa [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(5): 1592-1600
- [34] 何玉龙,杨晓霞,张春平,等. 不同氮磷施量对河西走廊紫花苜蓿产量和品质的影响[J]. 草地学报,2025,33(5):1486-1496
HE Y L, YANG X X, ZHANG C P, et al. The impact of different nitrogen and phosphorus fertilizer applications on the yield and quality of *Medicago sativa* in the Hexi Corridor [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(5): 1486-1496
- [35] 单新河,张运龙,王显国,等. 磷肥施用量对紫花苜蓿建植当年生物量累积和磷素吸收规律的影响[J]. 中国草地学报,2024,46(8):63-71

- SHAN X H, ZHANG Y L, WANG X G, et al. Effect of phosphorus fertilizer application rate on biomass accumulation and phosphorus absorption of alfalfa in planting year [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(8): 63-71
- [36] IQBAL B, KONG F X, ULLAH I, et al. Phosphorus application improves the cotton yield by enhancing reproductive organ biomass and nutrient accumulation in two cotton cultivars with different phosphorus sensitivity [J]. Agronomy, 2020, 10(2): 153
- [37] LAIRA M D, DA S GRACIANO D, ANDRADE S A L, et al. Pre-anthesis phosphorus sprays boost reproductive development and seed yield in heat-stressed *Phaseolus vulgaris* L [J]. Plant Science, 2025, 359: 112611
- [38] 张燕, 刘文辉, 魏小星, 等. 开花期施磷对青海扁茎早熟禾种子产量及繁殖分配的影响 [J]. 中国草地学报, 2021, 43(2): 37-46
- ZHANG Y, LIU W H, WEI X X, et al. Effect of phosphorus addition on seed yield and reproductive allocation of *Poa pratensis* var. *anceps* Gaud. cv. Qinghai at flowering stage [J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(2): 37-46
- [39] 金涛, 刘伟, 刘长虹. 基于多光谱成像技术的牛肉干水分含量快速无损检测研究 [J]. 安徽农业科学, 2021, 49(2): 204-205, 220
- JIN T, LIU W, LIU C H. Research on rapid nondestructive detection of moisture content of beef jerky based on multispectral imaging technology [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(2): 204-205, 220
- [40] ZHAO X L, MAK-MENSAH E, ZHAO W C, et al. Optimized ridge-furrow technology with biochar amendment for alfalfa yield enhancement and soil erosion reduction based on a structural equation model on sloping land [J]. Agricultural Water Management, 2024, 298: 108866
- [41] 冯甘霖, 蒋朝, 刘彩凤, 等. 水磷互作对紫花苜蓿生产性能与磷肥农学效率的影响 [J]. 草业科学, 2023, 40(2): 448-459
- FENG G L, JIANG Z, LIU C F, et al. Interactive effects of irrigation volume and phosphorous application rate on yield and agronomic efficiency of applied phosphorous on alfalfa [J]. Pratacultural Science, 2023, 40(2): 448-459
- [42] 王彦华, 王成章, 郑爱荣, 等. 播种量和品种对紫花苜蓿干物质产量的影响 [J]. 家畜生态学报, 2017, 38(1): 60-65, 69
- WANG Y H, WANG C Z, ZHENG A R, et al. Effects of seedling rate and varieties on the dry matter yield of alfalfa [J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2017, 38(1): 60-65, 69
- [43] 刘忠国, 高凯, 黄佳媛, 等. 施磷水平对紫花苜蓿产量和品质的影响 [J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2023, 38(2): 157-163
- LIU Z G, GAO K, HUANG J Y, et al. Effects of phosphorus application level on yield and quality of alfalfa [J]. Journal of Inner Mongolia Minzu University (Natural Sciences Edition), 2023, 38(2): 157-163
- [44] 董宇宣, 王家荫, 孟状, 等. 不同氮肥对南疆地区苜蓿饲草产量与品质的影响 [J]. 饲料研究, 2024, 47(5): 89-93
- DONG Y X, WANG J Y, MENG Z, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on alfalfa forage yield and quality in southern Xinjiang [J]. Feed Research, 2024, 47(5): 89-93
- [45] JIA Z C, OU C M, SUN S J, et al. A novel approach using multispectral imaging for rapid development of seed pellet formulations to mitigate drought stress in alfalfa [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 108136
- [46] 马彦麟, 齐广平, 汪精海, 等. 西北荒漠灌区紫花苜蓿产量和营养品质对水肥调控的响应 [J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(6): 171-179, 186
- MA Y L, QI G P, WANG J H, et al. Effects of water and fertilizer regulation on yield and nutritional quality of alfalfa grown in irrigated area in northwest desert zone [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2018, 53(6): 171-179, 186
- [47] 杨开鑫, 赵建涛, 王旭哲, 等. 不同灌溉方式及施磷对紫花苜蓿产量、品质及水磷利用效率的影响 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(21): 130-138
- YANG K X, ZHAO J T, WANG X Z, et al. Effects of different irrigation methods and phosphorus application on alfalfa yield, quality and water and phosphorus use efficiency [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(21): 130-138
- [48] 李婕娜, 冯甘霖, 刘慧霞, 等. 灌水量和施磷量互作对紫花苜蓿水分利用效率的调控效应 [J]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20250724.1102.005>, 2025-07-24/2026-07-01
- LI J N, FENG G L, LIU H X, et al. The response of irrigation volume and phosphorus application amount to water use efficiency of alfalfa [J]. 1-17 <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20250724.1102.005>, 2025-07-24/2026-07-01
- [49] 魏孔钦, 张盈盈, 回金峰, 等. 菌磷配施对紫花苜蓿根系非结构碳水化合物及碳氮磷化学计量特征的影响 [J]. 草业学报, 2025, 34(5): 40-50
- WEI K Q, ZHANG Y Y, HUI J F, et al. Effect of phosphate-solubilizing bacteria and phosphorus on non-structural carbohydrate content and the carbon: nitrogen: phosphorus stoichiometry of alfalfa roots [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(5): 40-50
- [50] WANG Y D, ZHANG Q C, JU M X, et al. Alfalfa photosynthesis under partial root-zone drying: diurnal patterns and its non-stomatal limitations [J]. Plants, 2025, 14(11): 1573
- [51] WANG H, XIANG Y Z, ZHANG F C, et al. Responses of yield, quality and water-nitrogen use efficiency of greenhouse sweet pepper to different drip fertigation regimes in Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2022, 260: 107279