

DOI:10.11686/cyxb2025039

http://cyxb.magtech.com.cn

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. 草业学报, 2026, 35(1): 53—64.

YU Hong-qian, MA Xue-peng, ZENG Han-guo, *et al.* Effects of the amount and timing of subsurface drip irrigation on alfalfa seed production. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(1): 53—64.

地下滴灌时期和水量对紫花苜蓿种子生产的影响

俞鸿千^{1,2}, 马雪鹏¹, 曾翰国³, 单晓艳¹, 李曼莉³, 王占军^{1,2*}

(1. 宁夏农林科学院林业与草地生态研究所, 宁夏银川 750001; 2. 宁夏防沙治沙与水土保持重点实验室, 宁夏银川 750001; 3. 中国农业大学草业科学与技术学院, 草业科学北京市重点实验室, 北京 100193)

摘要: 灌溉是提高紫花苜蓿种子产量的重要管理手段, 为了明确滴灌时期和水量对紫花苜蓿种子产量组分和实际产量的影响, 探讨水分影响种子产量形成的机制, 以‘甘农4号’紫花苜蓿为材料, 2021—2022年开展田间精细化灌水试验, 设置灌水时期(现蕾期、盛花期、现蕾期+盛花期)和灌水量($225, 450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)两个因素, 测定土壤水分含量、种子产量因子和产量, 并分析它们之间的相关性。结果表明: 1) 灌水时期是影响种子产量的主因素, 灌水量可影响种子数/小荚; 2) 现蕾期灌水与花序数/生殖枝呈显著正相关, 现蕾期+盛花期灌水与种子产量呈显著正相关; 3) 20~40 cm 土层土壤水分含量、收获期土壤水分含量、花序数/生殖枝、小花数/花序和荚果数/花序对种子产量的影响具有直接效应。因此, 适宜宁夏中部干旱半干旱区的地下滴灌方案为现蕾期灌水 $225 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 盛花期灌水 $225 \sim 450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 配合冬灌 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

关键词: 滴灌; 灌水时期; 灌水量; 紫花苜蓿; 种子产量; 产量组分

Effects of the amount and timing of subsurface drip irrigation on alfalfa seed production

YU Hong-qian^{1,2}, MA Xue-peng¹, ZENG Han-guo³, SHAN Xiao-yan¹, LI Man-li³, WANG Zhan-jun^{1,2*}

1. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750001, China; 2. Key Laboratory of Desertification Control and Soil and Water Conservation of Ningxia, Yinchuan 750001, China; 3. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Key Laboratory of Pratacultural Science, Beijing Municipality, Beijing 100193, China

Abstract: Irrigation is an important management method to improve alfalfa (*Medicago sativa*) seed yield. In this study, we aimed to elucidate the impact of the timing and volume of drip irrigation on the yield components and actual yield of alfalfa seeds, and to investigate the mechanisms by which water influences seed yield formation. A field irrigation experiment was conducted from 2021 to 2022 using the alfalfa variety ‘Gannong No. 4’. The experiment included two factors: irrigation timing (budding stage, full flowering stage, and a combination of budding stage+full flowering stage) and irrigation volume (225 and $450 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$). Measurements of soil water content, seed yield components, and seed yield were obtained, and the correlations among these variables were analyzed. The findings indicated that: 1) The timing of irrigation was the primary factor influencing seed yield, while the irrigation volume affected the number of seeds per pod. 2) Significant positive correlations were detected between irrigation at

收稿日期: 2025-02-13; 改回日期: 2025-04-15

基金项目: 国家牧草产业技术体系盐池综合试验站(CARS-34), 宁夏自治区重点研发项目(2020BBF03015), 宁夏农林科学院科技平台建设提升项目(NKYP-22-06), 宁夏农牧交错带温性草原生态系统定位观测研究站和宁夏青年拔尖人才培养工程资助。

作者简介: 俞鸿千(1990—), 女, 宁夏银川人, 硕士。E-mail: nxyuhq@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: nxwzhj@163.com

the budding stage and the number of inflorescences per stem, and between irrigation at both the budding and full flowering stages and the overall seed yield. 3) The seed yield was directly influenced by several factors, including the soil water content within the 20–40 cm soil layer, the soil water content at the harvest stage, the number of inflorescences per stem, the number of flowers per inflorescence, and the number of pods per inflorescence. These results indicate that the optimal underground drip irrigation strategy for the arid and semi-arid regions of central Ningxia involves applying water at $225 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ during the budding stage, $225\text{--}450 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ during the full flowering stage, and $450 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ during the winter stage.

Key words: drip irrigation; irrigation stage; irrigation volume; alfalfa; seed yield; yield components

高产优质的专业化种子生产技术是我国草牧业高质量发展的前提,2021年中央一号文件提出要解决种子的“卡脖子”问题,并将种业发展提升到国家战略安全的高度^[1]。目前,我国草种子对国外市场的依存度高达40%,且近年来呈不断上升趋势^[2]。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是传统优质牧草,具有分布广、产量高、适应性强、蛋白含量高和适口性好等特点,提高我国自育紫花苜蓿种子品质和产量,减少对国外种子的依赖,是促进草产业长期稳定发展、支撑畜牧业和奶产业发展的根本,也是保障我国食品安全和重要畜产品有效供给的必然选择。

国内紫花苜蓿种子专业化生产起步晚,常忽视种子发育对气候环境条件的特殊要求,种子田管理粗放、机械化程度低,有些则与牧草生产田兼用,导致种子产量低和质量差^[3]。灌溉是保障干旱半干旱区紫花苜蓿种子生产的重要因素^[4],不仅有利于植物缓解土壤水分胁迫维持生长^[5],还可以促进开花结实。但过量灌溉易使紫花苜蓿营养生长过旺、茎秆木质化程度降低,在结荚期易出现倒伏现象,导致收割困难、荚果发霉和脱落等问题;灌溉不足易使紫花苜蓿营养生长和种子发育受限,花粉数、花粉活力和结荚率降低,影响种子质量^[6]。我国紫花苜蓿种子田灌水研究集中在2000–2015年,多以研究区优势乡土品种为对象,研究漫灌方式下灌水时期和灌水量对种子产量和质量的影响,研究时间较短、相关研究较少^[2]。灌水时期相关研究针对冬灌期、苗期、孕蕾期、花期进行多次灌溉,如鲁英等^[7]在松嫩平原对‘公农1号’紫花苜蓿研究发现,在收割后至霜冻前和翌年孕蕾至初花期分别灌溉2次,灌水量为“需水量–降水量”,种子产量可达 $566.90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;孟季蒙等^[8]的研究发现,在苗期、现蕾期和结荚期田间相对持水量保持在65%~80%时,‘新牧1号’杂花苜蓿(*Medicago varia* ‘xinmu No. 1’)种子产量最高($909.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);李国良等^[9]在黑龙江对肇东苜蓿的研究发现,孕蕾期–初花期灌水种子产量最高($721.80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。灌水量以研究多次灌水的总量为主,如陈金炜等^[10]的研究表明,由现蕾期至盛花期每间隔10 d灌水(共灌水6次,每次灌水 $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$),总灌水量 $3600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时紫花苜蓿种子产量最高($832.51 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);王星等^[11]的研究发现,返青期至结荚期平均灌水4次,总灌水量为 $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 并搭配施氮磷钾肥,4年累计紫花苜蓿种子产量最高,为 $4848.77 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由于不同紫花苜蓿品种特性差异较大,种子产量与质量与田间管理方式、气候特点的关系密切^[1],目前仍无统一的灌水范式。

宁夏是我国适宜紫花苜蓿种子繁育产区之一^[12],宁夏平原不仅雨热同季、土地平整、适宜大型农业机械作业,紫花苜蓿种子田主要位于宁夏中部具有引(扬)黄灌溉和库井灌溉条件的干旱半干旱区。但灌水时间和灌水量受水利政策管理影响较大,开闸放水时期多以玉米(*Zea mays*)等主要农作物需水期为主,难以保证在一段时期内多次定量灌水。另外,“维持土壤相对含水量”的灌溉方法对种植者的专业要求较高,在紫花苜蓿种子实际生产管理中,以漫灌和大型喷灌为主的灌溉方式难以精准实现。综上,灌水时期和灌水量对紫花苜蓿种子产量影响的研究结果差异较大,表现出较强的区域依赖性,暂无法直接指导宁夏地区紫花苜蓿种子生产。因此,本研究以宁夏中部灌区紫花苜蓿种子生产为背景,采用地下滴灌的方式在不同灌水时期单次灌溉不同水量,探究其对紫花苜蓿种子产量因子和产量的影响和关系,提出易于操作的灌溉方案,为当地紫花苜蓿种子田灌水模式的确立提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地点

试验地位于宁夏盐池县四墩子自然村,属于典型中温带大陆性季风气候,为宁夏中部库井灌区,海拔 1425 m,年均气温 7.7 °C,年降水量 250~350 mm,主要集中在 6—9 月,年蒸发量 2500 mm 左右,无霜期 165 d,土壤类型主要为灰钙土、黄绵土和风沙土。2019—2022 年试验地平均温度和降水如图 1 所示。

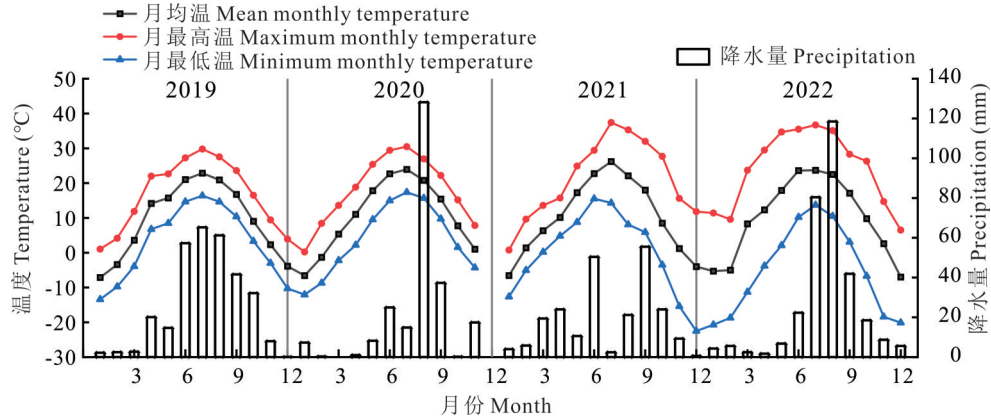


图 1 2019–2022 年月均温和降水量

Fig. 1 Mean monthly temperature and precipitation in 2019–2022

1.2 试验材料和设计

供试材料为‘甘农 4 号’紫花苜蓿,由甘肃农业大学草业学院曹致中等育成并供种。试验地于 2019 年 7 月建植,穴播行距 75 cm,株距 26 cm,播种深度 2 cm,每穴 5~8 粒种子,小区面积 4 m×5 m。试验地埋设地下滴灌带,滴灌带与苜蓿同行,埋深 15 cm,每个小区安装开关和水表,可以单独控制灌水量。试验地每年 9 月底进行放牧利用,清除二茬草,10 月底冬灌 450 m³·hm⁻²。2020 年以土壤相对含水量设置 4 个灌水梯度,于 6 月 9 日(初花期)进行灌水,但各处理间种子产量差异不显著,且田间灌水管理难度大,故调整试验方案。

试验于 2021—2022 年开展,设置灌水时期和灌水量 2 个因素,灌水时期(T)分别为现蕾期(T₁)、盛花期(T₂)、现蕾期+盛花期(T₃)共 3 个水平,每个灌水时期设置不同灌水量(V),分别为每次灌水 225 (V₁)和 450 m³·hm⁻² (V₂)共 2 个水平,每个处理 4 次重复,共计 24 个试验小区(空白小区为 2020 年的 CK 小区和 2 个漫灌试验小区,图 2),试验区紫花苜蓿生育期如表 1 所示。

1.3 测定方法

1.3.1 生育期记录 观测记录生育期,鉴别标准为 50% 的植株达到某一生育阶段即判为达到该生育期,分别记录返青期、分枝期、现蕾期、初花期(20% 开花)、盛花期(80% 开花)、结荚期(50% 结荚)、收获期(80% 以上荚果变深褐色)。

1.3.2 种子产量构成因子及种子产量测定 生殖枝数(枝·m⁻²):盛花期在每个小区随机取 10 穴,计算单位面积生殖枝数。

花序数/生殖枝:盛花期在每个小区随机标记生殖枝 20 枝(每个枝条相距较远,保证不在同一株上标记),统计主枝和各级分枝上开花的花序数。

小花数/花序:盛花期选取每个小区未标记的生殖枝,随机选取该生殖枝不同部位的花序 30 个,统计每个花序的小花数。

荚果数/花序:结荚期在每个小区随机选取植株不同部位的结荚花序 30 个,统计每个结荚花序的荚果数。

种子数/小荚:在种子收获时,每个小区在不同植株的不同部位随机摘取 30 个结荚花序,每个花序随机选取 1 个小荚果,统计每个小荚果内的种子数。



图2 2021年6月试验小区俯拍

Fig. 2 Overhead view of the experimental plot in June 2021

T_1 为现蕾期灌水; T_2 为盛花期灌水; T_3 为现蕾期+盛花期灌水。 V_1 为每次灌水 $225 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; V_2 为每次灌水 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。“-1、-2、-3、-4”分别为小区重复数。 T_1 is irrigation at the budding stage, T_2 is irrigation at the full flowering stage, T_3 is irrigation at both the budding stage and the full flowering stage, V_1 is $225 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ for each irrigation, V_2 is $450 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ for each irrigation. “-1, -2, -3, -4” are the number of plot repeats.

表1 2021–2022年紫花苜蓿种子田生育期

Table 1 Alfalfa seed field growth period in 2021–2022 (月–日 Month–day)

年份 Year	返青期 Regeneration stage	分枝期 Branching stage	现蕾期 Budding stage	初花期 Early flowering stage	盛花期 Full flowering stage	结荚期 Podding stage	收获期 Harvest stage
2021	04-07	05-07	05-26	06-05	06-14	07-09	07-31
2022	04-10	05-07	05-25	06-02	06-20	07-10	08-01

种子产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$): 当试验区80%的小荚变为黑褐色时, 每个小区选取长势均匀的条带, 收割1 m长样段, 晾晒、干燥后脱荚、清选装袋、称重, 计算平均种子产量。

1.3.3 土壤水分含量测定 土壤水分含量使用时域反射仪(time domain reflectometry, TDR; TRIME PICO-PH2, 德国)测量, 返青后, 每间隔7 d测量1次, 每20 cm一层。

1.4 数据分析

使用Excel 2019处理数据, 使用origin 2021绘图。使用R软件(version 4.2.2)进行统计分析, 表中数据均以“均值±标准误”表示, 使用Q-Q图检验方差正态性, Bartlett法检验方差齐性, 试验采用双因素方差分析, 检验灌水时期、灌水量、灌水时期×灌水量对种子产量因子和产量的影响, 使用Tukey法进行多重比较。灌水时期、灌水量与种子产量和产量因子的相关性分析为二元变量与连续变量的相关分析, 使用R软件lrm包(version 1.2-0),

将“现蕾期/盛花期/现蕾期+盛花期是否灌水”和“是否灌水 $225 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ”“是否灌水 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ”分别设为二元变量,产量因子和种子产量为连续变量,选择 Point-Biserial 法进行相关分析。使用 laven 包(version 0.6-16)进行结构方程模型(structural equation model, SEM)拟合,构建不同生育期(返青期、现蕾期、初花期、盛花期、结荚期、收获期)0~100 cm 土层土壤水分含量、不同土层(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 土层)土壤水分含量、种子产量因子(生殖枝数、花序数、小花数、荚果数、种子数)与种子产量的综合模型,所有数据进行标准化处理,拟合模型结果使用卡方值(χ^2 , $P > 0.05$),拟合指数(goodness of fit index, GFI, > 0.90)和相对拟合指数(comparative fit index, CFI, > 0.95)进行验证。

2 结果与分析

2.1 不同生育期土壤水分含量差异

2021—2022 年紫花苜蓿种子生育期内 0~100 cm 土壤水分含量,在不同生育期表现出显著差异(图 3)。2021 年,土壤水分含量变化主要出现在 0~20 cm 土层(图 3a)和 40~60 cm 土层(图 3c),0~20 cm 土层土壤含水量在初花期、盛花期和收获期均表现出极显著差异($P < 0.01$),40~60 cm 土层含水量在分枝期后均具有显著差异($P < 0.05$)。2022 年,0~100 cm 土层土壤水分在分枝期至初花期间均无显著差异,盛花期后土壤水分消耗加剧,0~60 cm 土壤水分差异显著(图 3f~h),现蕾期灌水显著提高盛花期 0~40 cm 土层土壤含水量;60~100 cm(图 3i, j)土壤水分含量在结荚期表现出极显著差异($P < 0.01$),除 T_3V_2 处理的总灌水量最大之外,其他处理的土壤水分含量无显著差异($P > 0.05$)。

2.2 不同灌水处理种子产量及产量因子的差异

2021 年灌水时期(T)和灌水量(V)对紫花苜蓿种子产量及产量因子的双因素方差分析结果(图 4)表明,灌水时期和灌水量对各处理的生殖枝数、花序数/生殖枝、荚果数/花序和种子数/小荚均无显著影响,分别为 107.75~139.25 个 $\cdot \text{m}^{-2}$ 、21.19~27.76、7.24~8.67 和 4.97~6.08。灌水时期和灌水量的交互作用($T \times V$)对小花数/花序有显著影响($P < 0.05$), T_3V_1 处理最大,为 27.26,显著高于 T_1V_2 、 T_2V_1 和 T_3V_2 处理。灌水时期是影响种子产量的主因素,而灌水量及其与灌水时期的交互作用对种子产量无显著影响。现蕾期+盛花期灌水(T_3)处理种子产量最高,为 801.90~841.50 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,并显著高于盛花期灌水(T_2)处理(498.15~599.40 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),但与现蕾期灌水(T_1)处理(608.40~647.25 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)差异不显著。

2022 年灌水时期和灌水量对紫花苜蓿种子产量及产量因子的影响分析结果(图 5)表明,灌水时期和灌水量对生殖枝数、花序数/生殖枝、小花数/花序、荚果数/花序均无显著影响,分别为 139.78~209.45 枝 $\cdot \text{m}^{-2}$ 、15.61~22.67、14.39~19.54、8.70~10.06。灌水量是影响种子数/小荚的主因素, V_2 处理(5.23~5.59)显著高于 V_1 处理(4.81~4.95)。灌水时期是影响种子产量的主因素,灌水时期及其交互作用对种子产量影响不显著。其中, T_3 处理的种子产量最高,为 1080.75~1174.50 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于 T_1 处理(700.80~742.80 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),与 T_2 处理(703.05~887.70 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)差异不显著。

2.3 灌水时期和灌水量与紫花苜蓿种子产量因子和产量的相关性分析

由灌水时期和灌水量与紫花苜蓿种子产量因子和产量的 Point-Biserial 相关分析结果(图 6)可知,灌水时期、灌水量与紫花苜蓿种子产量因子和产量均有正相关关系,其中现蕾期灌水(T_1)与花序数/生殖枝呈显著正相关关系;现蕾期+盛花期灌水(T_3)与花序数/生殖枝、荚果数/花序和种子产量呈显著正相关关系。灌水 $225 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理(V_1)与花序数/生殖枝有显著正相关关系,灌水 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理(V_2)与种子产量有显著正相关关系。

根据方差分析和相关性分析结果,以不同生育期土壤水分含量、不同土层全生育期土壤水分含量、紫花苜蓿种子产量因子为自变量,紫花苜蓿种子产量为因变量进行结构方程模型分析(图 7)。结果表明不同土层和生育时期土壤水分、种子产量因子与种子产量间存在复杂的交互作用,其中收获期土壤水分、花序数/生殖枝、小花数/

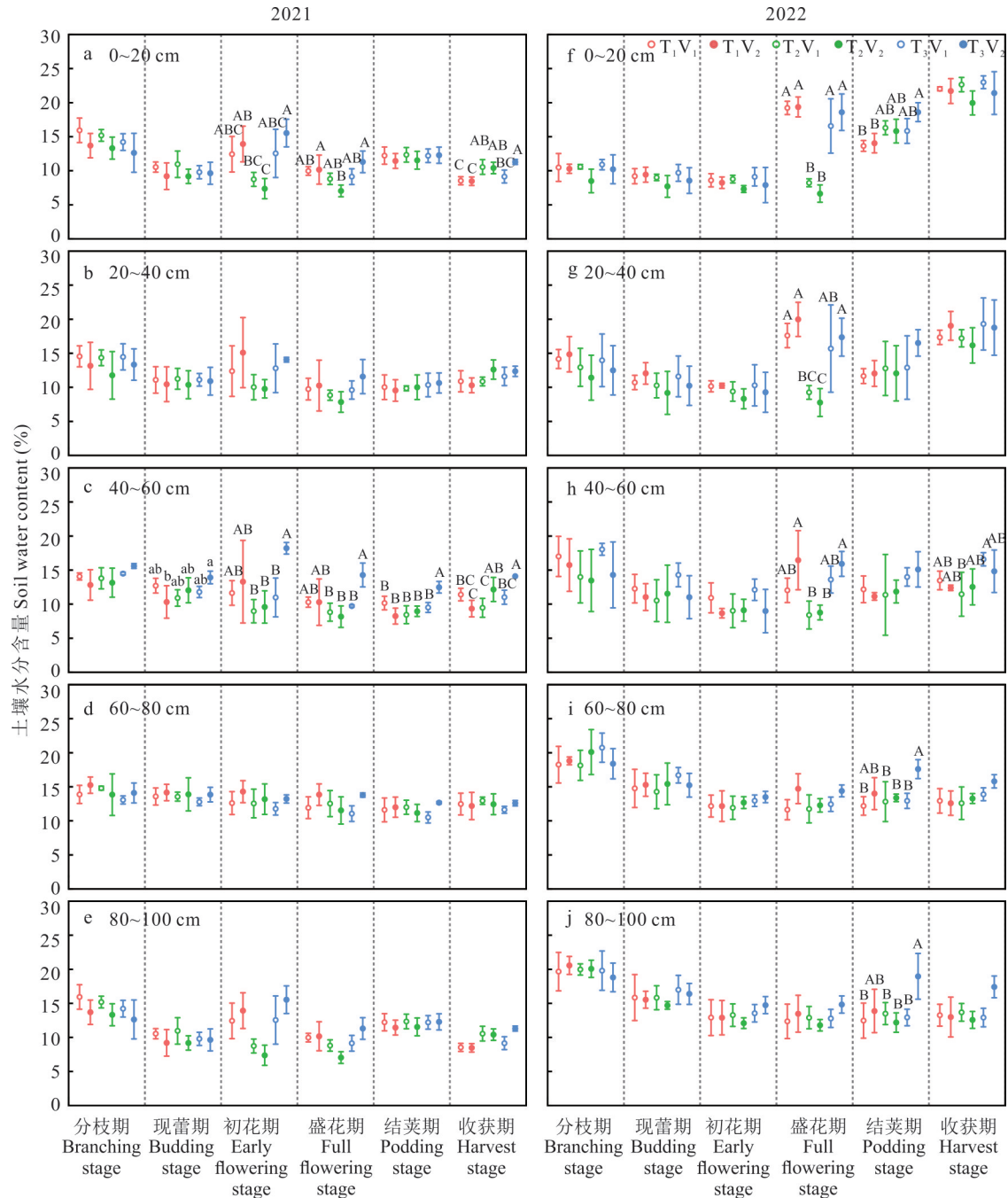


图3 2021-2022年土壤水分含量方差分析

Fig. 3 Analysis of variance of soil water content from 2021 to 2022

红色、绿色、蓝色分别为现蕾期(T₁)、盛花期(T₂)、现蕾期+盛花期(T₃)灌水;空心为每次灌水 225 m³·hm⁻² (V₁), 实心为每次灌水 450 m³·hm⁻² (V₂);下同。不同大写、小写字母分别表示相同生育期内各处理在 0.01 和 0.05 水平差异显著。Red is irrigation at the budding stage (T₁), green is irrigation at the full flowering stage (T₂), and blue is irrigation at both the budding stage and the full flowering stage (T₃). The hollow is 225 m³·ha⁻¹ for each irrigation (V₁), and the solid is 450 m³·ha⁻¹ for each irrigation (V₂). The same below. Different uppercase and lowercase letters indicated significant differences at the levels of 0.01 and 0.05 among different treatments during the same growth period, respectively.

花序和荚果数/花序对种子产量具有直接正向作用, 标准化路径系数大小依次为 0.896 > 0.439 > 0.353 > 0.327; 20~40 cm 土壤水分对种子产量产生直接的负向影响(-0.409)。

计算不同生育期土壤水分含量、不同土层全生育期土壤水分含量和种子产量因子 3 个类别对种子产量的直接效应、间接效应和总效应可以发现(图 8), 种子产量因子和生育期土壤水分是影响种子产量的主要效应, 总效

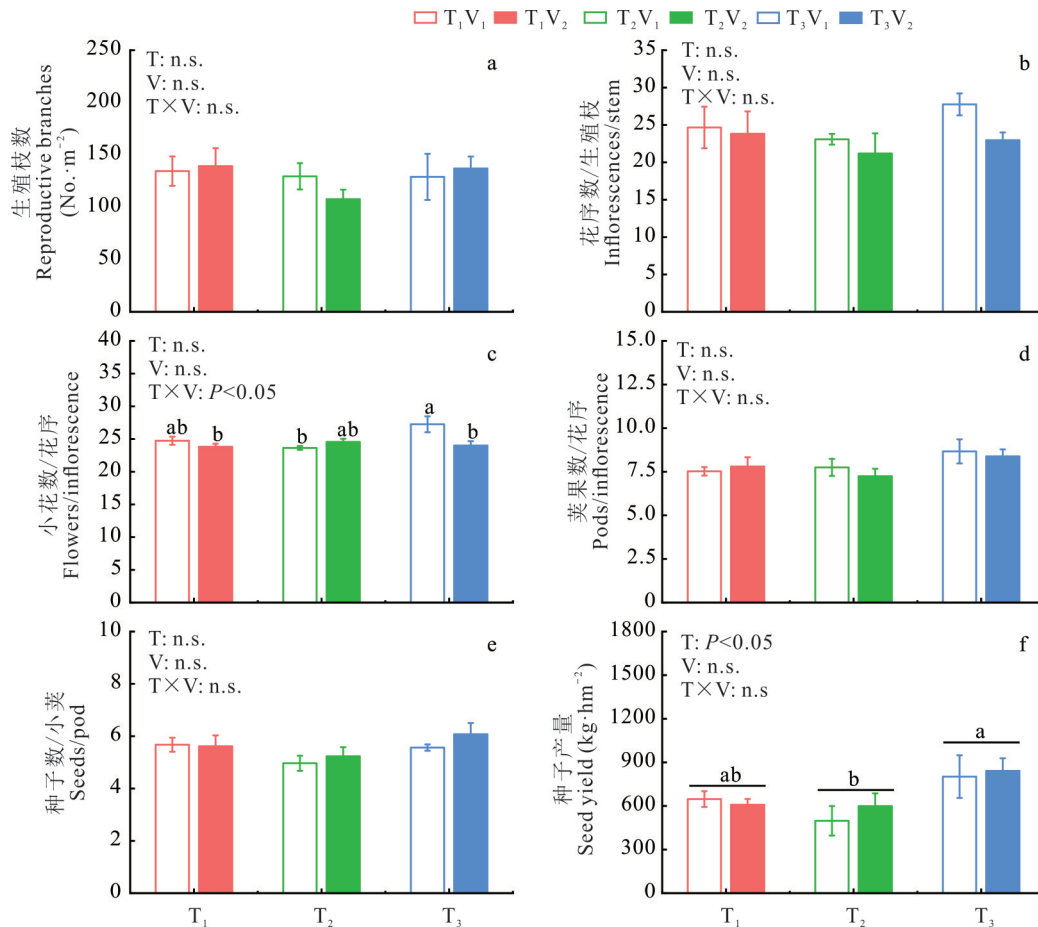


图 4 2021 年种子产量因子及种子产量的双因素方差分析

Fig. 4 Two-way ANOVA of seed yield factors and seed yield in 2021

T 表示不同灌水时期; V 表示不同灌水量; T×V 表示灌水时期和灌水量交互作用。“n.s.”表示无显著差异, 不同小写字母表示差异在 0.05 水平显著。下同。T indicates different irrigation periods; V indicates different irrigation amounts; T×V indicates the interaction between irrigation period and irrigation amount. n.s. indicates no significant difference, and different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level. The same below.

应值分别为 0.921 和 0.818, 且均以正向的直接效应为主。不同土层土壤水分对种子产量的总效应较小(0.198), 其直接效应表现为负向(-0.409), 间接效应表现为正向(0.607)。

3 讨论

3.1 灌水处理的土壤水分差异

在干旱、半干旱区, 土壤水分是植物生长的关键决定因素^[13], 受到降水、灌溉、蒸散发和植物吸收的影响。水分是植物体内的重要组成成分, 参与植物的各项生理生化反应, 对植物的生长和代谢过程起着至关重要的作用。灌水是人工调控土壤水分的主要方式, 通过灌溉时期和灌溉量影响土壤水分含量的大小和作用深度。本研究中, 虽然 2020 年灌水方案与 2021—2022 年不同, 但是 2020 年 8 月降水量达到 130 mm (图 1a) (相当于灌水 1300 m³·hm⁻²), 已经超过 2020 年灌水方案中最大灌水量 1015 m³·hm⁻², 加之 10 月冬灌 450 m³·hm⁻², 土壤水分得到充分补充。另外, 2021 年分枝期 0~100 cm 土壤水分含量 (图 3a~e) 结果显示, 各土层土壤水分含量均无显著差异, 视为土壤水分条件无差异。在 2021 年开展新灌水方案发现, 灌水对 0~60 cm 土层土壤水分含量影响显著, 与张洁等^[14] 研究结果相同, 其中 0~20 cm 土层土壤水分受到降水和灌水影响较大; 20~40 cm 土层土壤水分是紫花苜蓿用水主要来源, 紫花苜蓿根系主要分布在 0~30 cm 土层^[15], 根系吸水作用消除了各处理间土壤水分含量差异, 与孙铁军等^[16] 研究结果一致; 各处理 40~60 cm 土层土壤水分从现蕾期至收获期均有显著差异, 两次高量灌水 (T₃V₂) 可以使土壤水分含量在整个生育期保持在高于 12.5% 的水平 (图 3c)。在控制灌水第 2 年 (2022 年), 灌水

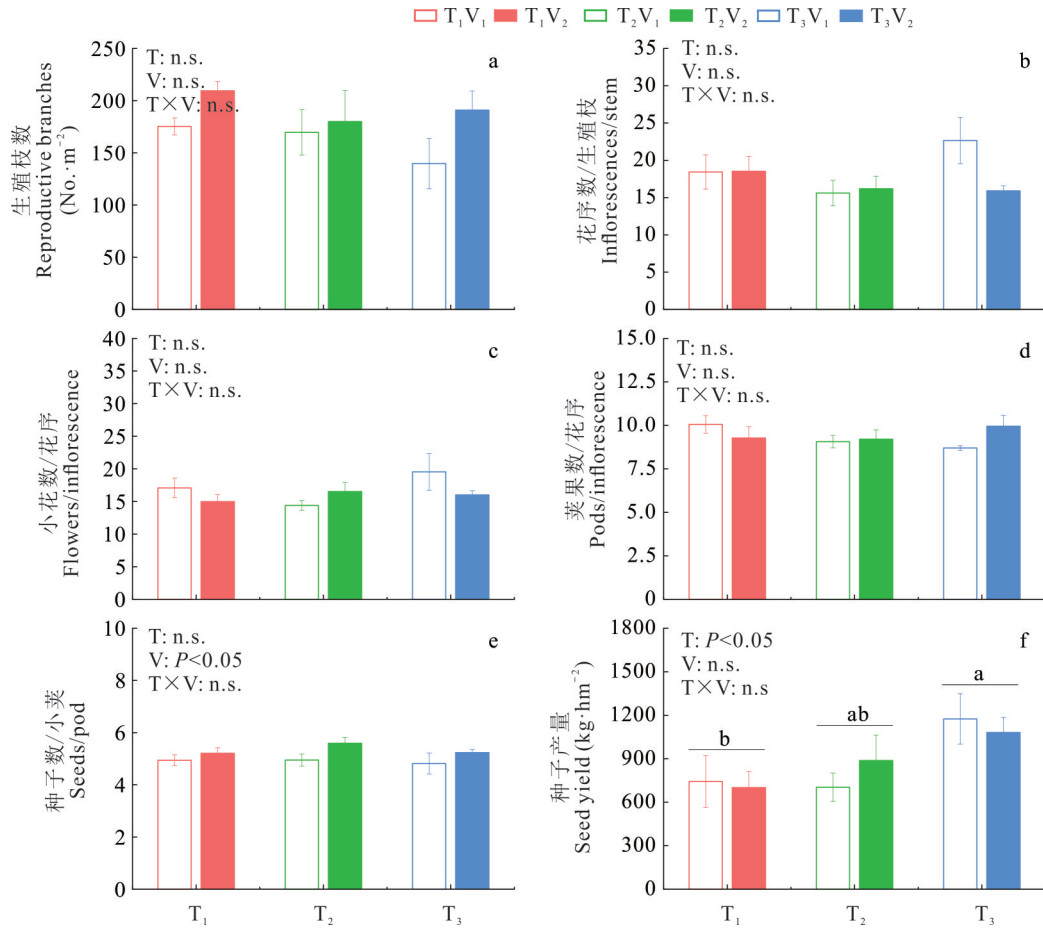


图5 2022年种子产量因子及种子产量的双因素方差分析
 Fig. 5 Two-way ANOVA of seed yield factors and seed yield in 2022

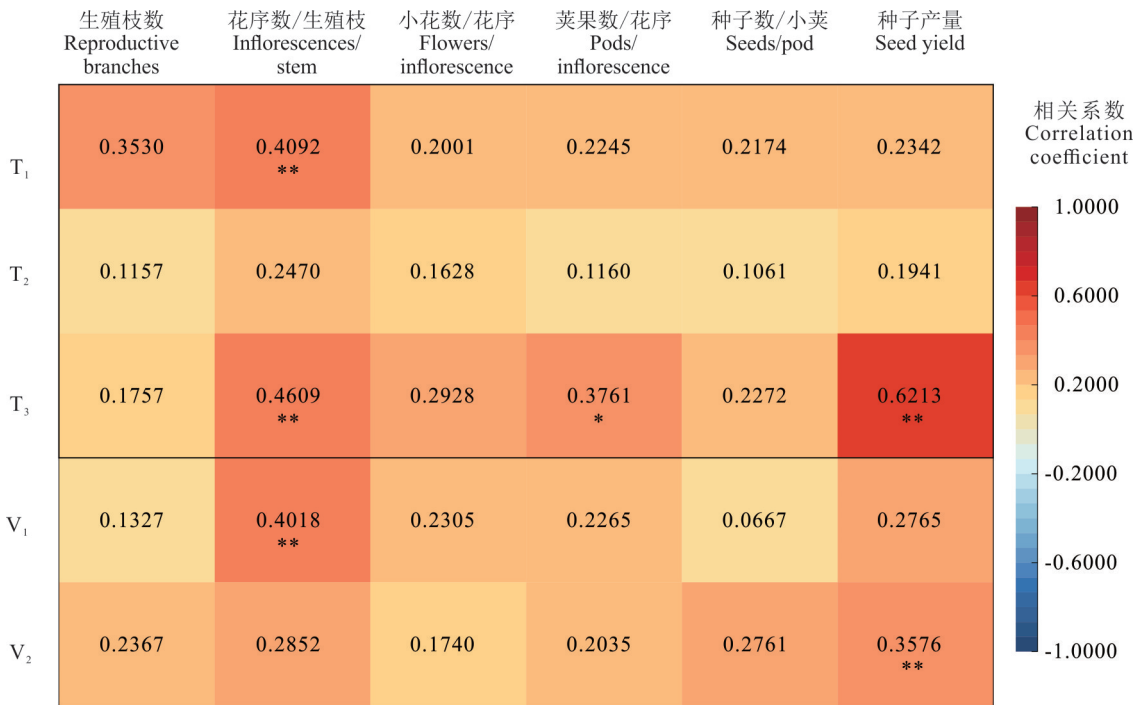


图6 灌水时期与产量因子、产量的相关性分析
 Fig. 6 Point-Biserial correlation analysis between irrigation period with yield factor and yield

*和**分别表示在0.05和0.01水平显著相关。* and ** indicate significant correlations at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

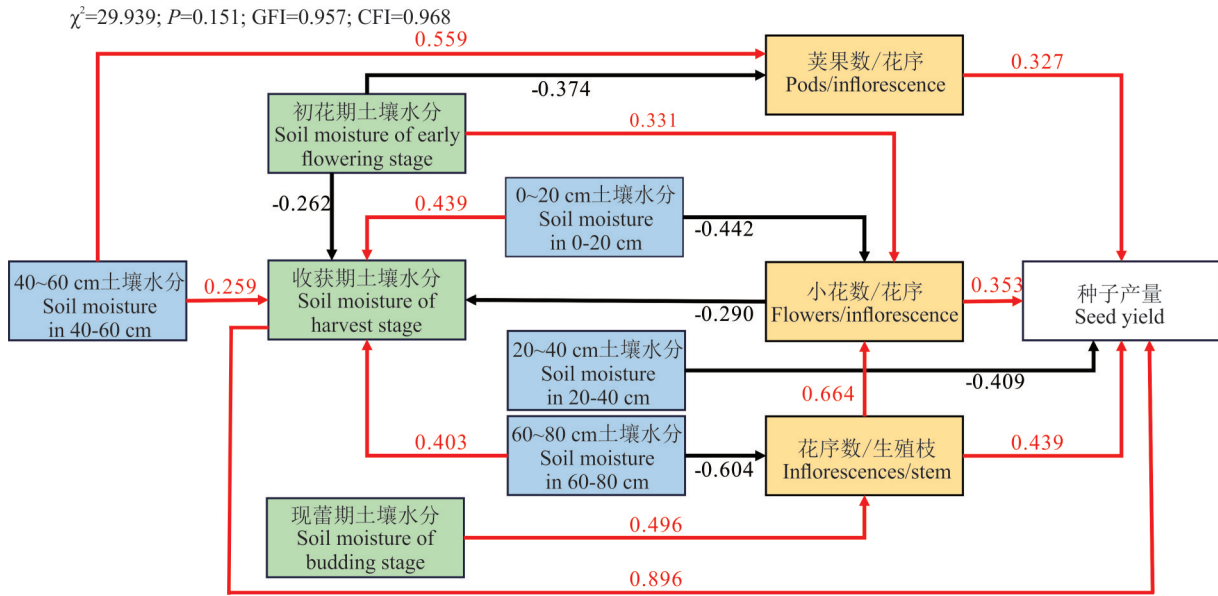


图 7 土壤水分、产量因子与种子产量的结构方程模型

Fig. 7 Structural equation model of soil moisture, yield factors and seed yield

图中因子均为测量变量,蓝色为不同土层土壤水分含量,绿色为不同生育期土壤水分含量,黄色为种子产量因子。红色和黑色实线分别表示在 0.01 水平有显著正向和负向影响,线条上的数字表示标准化路径系数,图中仅展示显著相关的路径。The factors in the figure are all measured variables, blue is the soil moisture content of different soil layers, green is the soil moisture content of different growth stages, and yellow is the seed yield factor. The solid red and black lines indicate significant positive or negative effects at the 0.01 level, respectively, and the value on the lines represent the standardized path coefficients, and only the significantly correlated paths are shown in the graph. GFI: 拟合指数 Goodness of fit index; CFI: 相对拟合指数 Comparative fit index.

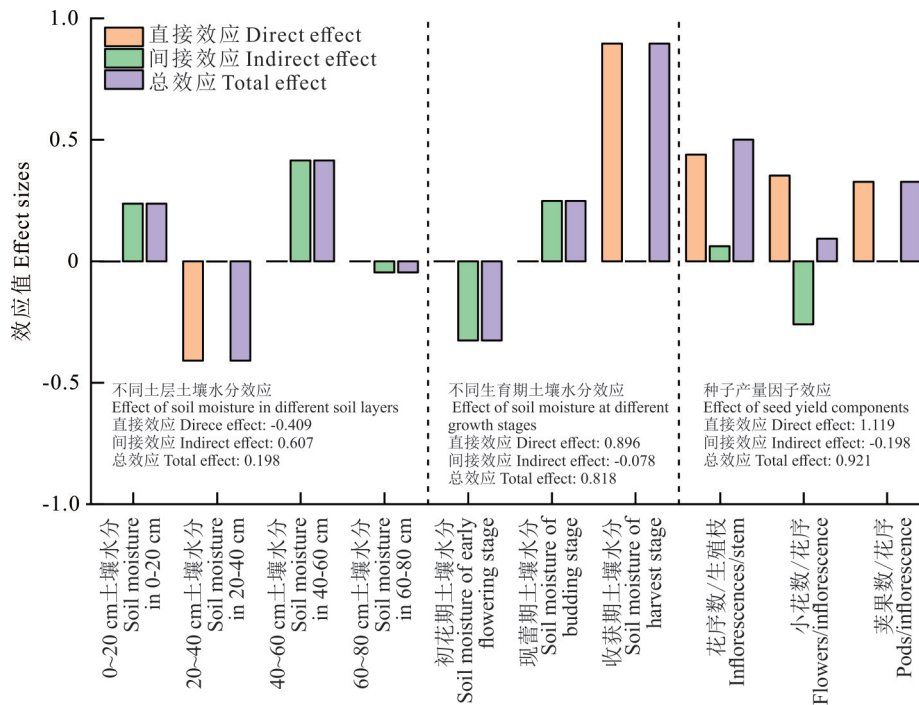


图 8 结构方程模型变量效应值

Fig. 8 Structural equation model variable effect sizes

时期和灌水量对土壤水分含量的影响深入到 80~100 cm 土层,并集中表现在结荚期(图 3i,j),在现蕾期灌水 450 m³·hm⁻² (T₁V₂)有助于深层土壤水分维持,两次高量灌水(T₃V₂)则可以增加这种优势;对于 0~60 cm 土层(图 3f~h),不同时期灌水对土壤水分含量的影响具有滞后性,现蕾期灌水(T₁和 T₃处理)可以使各处理在盛花期具有

较高的土壤含水量,盛花期灌水(T_2 处理)消除了各处理结荚期土壤水分含量差异,并且初花期和盛花期基本处于6月,当月降水仅为22.3 mm(灌水量约为 $223 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$),对土壤水分补充作用不大。

3.2 灌水对种子产量因子和产量的影响

不同生育期灌水对不同作物种子产量的影响有差异,如在小麦(*Triticum aestivum*)繁种研究中发现开花期灌水有利于小麦吸收养分,可以提高百粒重进而提高产量^[17-18],孕穗期灌水能够提高小麦开花后期旗叶光合作用,灌越冬水+孕穗水能够获得较高的籽粒产量和水分利用效率^[19];在绿豆(*Vigna radiata*)的研究中,滴灌可以显著提高种子千粒重、种子数/小荚和种子产量^[20];在棉花(*Gossypium hirsutum*)的研究中,现蕾期和吐絮期降低土壤水分阈值,可以抑制棉花营养生长发育以提高产量^[21]。

在紫花苜蓿种子繁殖过程中,现蕾期、盛花期和结荚初期水分需求敏感,是种子生殖生长的重要时期^[13],但过量灌溉会刺激新生枝条的大量生长,易造成倒伏,反而影响种子产量^[22]。在本研究中,灌水量和灌水时期在两年试验期内对生殖枝数、花序数、小花数、荚果数和种子数没有持续影响,仅2021年的小花数/花序和2022年的种子数/小荚有显著差异(图4c和图5e),表明紫花苜蓿个体形态特征(即产量因子)的变化并非灌水因子直接影响,而是植物自身调控对生态环境变化的综合响应。也有研究表明,紫花苜蓿花部特征对分枝期、初花期和结荚期灌溉不同频次不敏感,对水分胁迫的响应不显著^[23]。灌水时期对种子产量有显著影响(图4f和图5f),说明灌水时期对种子产量的显著作用并非主要通过直接改变产量因子来实现。另外,植被在不同生长阶段的蒸散强度不同^[16],水分在植物-土壤-大气中的动态变化,种子产量的差异是紫花苜蓿对水分亏缺综合反应的结果。

3.3 土壤水分、种子产量因子与种子产量的互作关系

土壤水分直接影响植物的生理过程,是植物光合作用、养分运输和代谢反应的基础^[24]。大量研究表明灌水对紫花苜蓿种子产量因子有显著影响,生殖枝数、花序数、结荚率和千粒重对种子产量起主导作用^[11,23,25-26],在本研究中得到相同结果,灌水可以显著提高花序数/生殖枝、荚果数/花序和种子产量(图6),但不同灌水量的影响作用存在差异。目前,已有研究表明0~60 cm土层土壤水分对紫花苜蓿种子生产起决定性作用^[27],在本研究中20~40 cm土层具有直接的负效应,0~20 cm和40~60 cm土层以间接正效应为主(图8)。初花期和现蕾期土壤水分含量对种子产量分别产生间接负效应和正效应,此时紫花苜蓿对水分的需求不同(图7),初花期水分的供应过量导致小花数增多、荚果数降低^[28],现蕾期水分不足可能导致花期缩短、花序数降低,从而直接影响种子产量。通过结构方程模型发现(图7),直接影响种子产量的因素有5个,其中荚果数/花序、小花数/花序、花序数/生殖枝和收获期土壤水分对种子产量为正向影响,20~40 cm土壤水分为负向影响;影响收获期土壤水分的因素较多,其中0~20 cm、40~60 cm和60~80 cm土壤水分具有正向作用,说明保持表层(0~20 cm)和较深层次(40~80 cm)土壤水分含量,有助于提高种子产量。

4 结论

宁夏中部紫花苜蓿种子田土壤水分维持在8%~25%,滴灌水 $225 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 可以入渗至0~60 cm土层,滴灌水 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 可以入渗至0~80 cm土层。滴灌时期是影响紫花苜蓿种子产量的主因素,滴灌水量是影响小花数和种子数的主因素。在5月中下旬现蕾期滴灌水 $225 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,可提高种子田花序上的小花数,到6月中旬盛花期,根据降水情况滴灌水 $225 \sim 450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,可为种子生长补充水分,种子产量可达 $900 \sim 1050 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

参考文献 References:

- [1] Mao P S, Ou C M, Jia Z C, *et al.* Research progress for seed production technology of herbage and turfgrass in China. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(1): 1-11.
毛培胜, 欧成明, 贾志程, 等. 我国牧草与草坪草种子生产技术的研究进展. 中国草地学报, 2023, 45(1): 1-11.
- [2] Mao P S, Wang M Y, Ou C M. Analysis for the developing status and trend in the forage seed industry in China. Journal of Grassland and Forage Science, 2018(6): 1-6.
毛培胜, 王明亚, 欧成明. 中国草种业的发展现状与趋势分析. 草学, 2018(6): 1-6.
- [3] Mao P S, Hou L Y, Wang M Y. Limited factors and key technologies of forage seed production in the northern of China.

- Chinese Science Bulletin, 2016, 61(2): 250–260.
- 毛培胜, 侯龙鱼, 王明亚. 中国北方牧草种子生产的限制因素和关键技术. 科学通报, 2016, 61(2): 250–260.
- [4] Xiao C, Ji Q, Zhang F, *et al.* Effects of various soil water potential thresholds for drip irrigation on soil salinity, seed cotton yield and water productivity of cotton in northwest China. *Agricultural Water Management*, 2023, 279: 108172.
- [5] Yavuz D, Yavuz N. How does lateral spacing affect seed yield and net income in trickle-irrigated sunflower under different irrigation regimes? *Gesunde Pflanzen*, 2023, 75(2): 415–429.
- [6] Thomas, Robertson M J, Fukai S, *et al.* The effect of timing and severity of water deficit on growth, development, yield accumulation and nitrogen fixation of mungbean. *Field Crops Research*, 2004, 86(1): 67–80.
- [7] Lu Y, Zhuang C N, Wang L H, *et al.* Comprehensive technology study on improving alfalfa seed yield. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2015, 36(2): 338–340.
- 鲁英, 庄长楠, 王丽红, 等. 提高苜蓿种子产量综合配套技术研究. 中国农机化学报, 2015, 36(2): 338–340.
- [8] Meng J M, Li W J. Effects of subsurface drip irrigation on alfalfa growth and seed production. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(1): 291–295.
- 孟季蒙, 李卫军. 地下滴灌对苜蓿的生长发育与种子产量的影响. 草业学报, 2012, 21(1): 291–295.
- [9] Li G L, Liu X P, Du G M, *et al.* Influence of different irrigation treatments on alfalfa seed yield and components. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2011, 42(12): 130–134.
- 李国良, 刘香萍, 杜广明, 等. 不同时期滴灌对紫花苜蓿种子产量及其构成因子的影响. 东北农业大学学报, 2011, 42(12): 130–134.
- [10] Chen J W, Li W J, Shi D. Effect of different water volume of subsurface drip irrigation on the yield and components of alfalfa seeds. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2011, 48(1): 177–181.
- 陈金炜, 李卫军, 师东. 地下滴灌不同灌水量对苜蓿种子产量构成因子的影响. 新疆农业科学, 2011, 48(1): 177–181.
- [11] 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. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(9): 76–85.
- 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. 草业学报, 2022, 31(9): 76–85.
- [12] Wang X M, Zhang H, Song R, *et al.* Comparison of forage seed production between China and U. S. A. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(10): 2115–2125.
- 王雪萌, 张涵, 宋瑞, 等. 中美牧草种子生产比较. 草地学报, 2021, 29(10): 2115–2125.
- [13] Graham M, Ates S, Melathopoulos A P, *et al.* Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 7452.
- [14] Zhang J, Ma P F, Wu S L, *et al.* Study on characteristics of soil water change and law of crop water consumption under shallow buried drip irrigation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 111–118.
- 张洁, 马鹏飞, 吴素利, 等. 浅埋滴灌土壤水分变化特征及作物耗水规律. 水土保持学报, 2023, 37(6): 111–118.
- [15] Bai W M, Zuo Q, Huang Y F, *et al.* Effect of water supply on root growth and water uptake of alfalfa in Wulanbuhe sandy region. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(1): 35–41.
- 白文明, 左强, 黄元仿, 等. 乌兰布和沙区紫花苜蓿根系生长及吸水规律的研究. 植物生态学报, 2001, 25(1): 35–41.
- [16] Sun T J, Nie M H, Teng W J, *et al.* Effects of different grasses for ecological restoration on soil evapotranspiration. *Northern Horticulture*, 2024(3): 71–78.
- 孙铁军, 聂明鹤, 滕文军, 等. 不同生态修复草种对土壤水分蒸散的影响. 北方园艺, 2024(3): 71–78.
- [17] Zhang Z Y, Qin B T, Xiong S P, *et al.* Effects of irrigation at flowering stage on soil nutrient and root distribution in wheat field. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(12): 3328–3336.
- 张志勇, 秦步坛, 熊淑萍, 等. 小麦开花期灌水对土壤养分及根系分布的影响. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3328–3336.
- [18] Han D W, He J N, Li H R, *et al.* Effects of irrigation period on individual structure, population structure and canopy photosynthesis of winter wheat. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 38(3): 577–586.
- 韩东伟, 何建宁, 李浩然, 等. 灌水时期对冬小麦个体、群体结构和冠层光合作用的影响. 江苏农业学报, 2022, 38(3): 577–586.
- [19] Yang S, Zhang X Q, Xu J R, *et al.* Effects of irrigation period on growth and water consumption characteristics of winter wheat. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(6): 36–44.
- 杨思, 张晓琪, 徐家瑞, 等. 灌水时期对冬小麦生长发育及耗水特性的影响. 灌溉排水学报, 2021, 40(6): 36–44.

- [20] Mansoor R, Hassan H. Wick irrigation improves seed yield and water use efficiency in mung bean. *Irrigation and Drainage*, 2024, 73(3): 813–828.
- [21] Gao R, Chen Z Q, Hong M, *et al.* Effects of soil moisture threshold on growth, water consumption and yield of cotton under mulched drip irrigation in northern Xinjiang. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2023, 34(6): 200–209.
高瑞, 陈志卿, 洪明, 等. 土壤水分阈值对北疆膜下滴灌棉花生长、耗水规律及产量的影响. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(6): 200–209.
- [22] Li Y J, Min J C, Xia T G, *et al.* Path-coefficient analysis on seed yield of single alfalfa plant and correlative traits. *Acta Agrestia Sinica*, 1996, 4(2): 141–147.
李拥军, 闵继淳, 夏天刚, 等. 留种苜蓿单株粒重与相关性状的通径分析. *草地学报*, 1996, 4(2): 141–147.
- [23] Hou Z Z, Zhang A Q, Zhu J Z. The quantitative characteristics of seed yield components and floral traits under different irrigation patterns of alfalfa. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2013, 50(9): 1668–1674.
侯真珍, 张爱勤, 朱进忠. 不同灌溉模式下苜蓿种子产量构成因素及花部特征对水分亏缺的响应. *新疆农业科学*, 2013, 50(9): 1668–1674.
- [24] Gu Z, Qi Z, Burghate R, *et al.* Irrigation scheduling approaches and applications: A review. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2020, 146(6): 4020007.
- [25] Meng J M, Li W J. Water distribution pattern and influence on alfalfa seed yield using subsurface drip irrigation. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(6): 907–910.
孟季蒙, 李卫军. 苜蓿种子生产田地下滴灌水分分布格局及其对苜蓿种子产量的影响. *草地学报*, 2010, 18(6): 907–910.
- [26] Li X F, Yu X G, Li W J, *et al.* Study on water requiring regulation and prediction model of alfalfa seed production. *Pratacultural Science*, 2007, 24(3): 30–34.
李雪峰, 余晓光, 李卫军, 等. 苜蓿种子生产需水规律及其需水量预测预报模型的研究. *草业科学*, 2007, 24(3): 30–34.
- [27] Han J G, Wang Y W, Gao H W. The seed production of purple alfalfa//Proceedings of the first China alfalfa development conference. Beijing: China Grassland Society, Beijing Rural Committee, 2001: 21–25.
韩建国, 王赞文, 高洪文. 紫花苜蓿的种子生产//首届中国苜蓿发展大会论文集. 北京: 中国草原学会, 北京市农村委员会, 2001: 21–25.
- [28] Liu M G, Wang Z K, Mu L, *et al.* Effect of regulated deficit irrigation on alfalfa performance under two irrigation systems in the inland arid area of midwestern China. *Agricultural Water Management*, 2021, 248: 106764.