



徐舒萍,郭丽琢,高玉红,等.磷硅肥施用对油用亚麻籽粒灌浆特性及产量的影响[J].江西农业大学学报,2026,48(4): 1066–1078.

Xu S P, Guo L Z, Gao Y H, et al. Effects of phosphorus and silicon fertilizer application on grain filling characteristics and yield of oilseed flax[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2026, 48(4): 1066–1078.

磷硅肥施用对油用亚麻籽粒灌浆特性及产量的影响

徐舒萍^{1,2}, 郭丽琢^{1,2*}, 高玉红^{1,2,3}, 剡 斌^{1,2,3}, 韩军芳^{1,2}, 范 鑫^{1,2},
秦立志¹, 郭一鸣¹, 赵永伟⁴, 李 瑛⁴

(1. 甘肃农业大学 农学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省高校种业产业研究院, 甘肃 兰州 730070; 4. 定西市农业科学研究院, 甘肃 定西 743000)

摘要:【目的】旨在探究磷硅养分耦合对油用亚麻产量形成的调控效应,为旱区亚麻绿色高产栽培提供依据。【方法】以油用亚麻品种“陇亚11号”为试验材料,采用裂区试验设计,研究磷肥【不施磷(P_0)、75 kg P_2O_5/hm^2 (P_1)、150 kg P_2O_5/hm^2 (P_2)】与硅肥【不施硅(Si_0)、75 kg SiO_2/hm^2 (Si_1)、150 kg SiO_2/hm^2 (Si_2)】用量对油用亚麻籽粒灌浆特性及产量的影响。【结果】施磷肥显著增加了各阶段干物质积累量(DMA),2个施磷水平较不施磷肥显著增加16.18%~22.72%;施磷肥提高了平均灌浆速率(V_{ave})、最大灌浆速率(V_{max})以及灌浆速率最大时生物量(W_{max}),延长了快增、缓增期持续时间。施硅肥显著提高生长后期DMA、 V_{max} 、 W_{max} 以及各持续期灌浆速率。与单施磷肥和单施硅肥相比,磷硅肥配施下 V_{ave} 、 V_{max} 、 W_{max} 分别增加了4.35%~6.35%、4.29%~6.30%、5.47%~7.32%、6.57%~11.29%、6.54%~11.28%、8.64%~10.35%。施用磷肥对有效蒴果数和籽粒产量的提升作用均随施用量的增加呈上升趋势,而硅肥对籽粒产量的提升效果则随施用量的增加呈报酬递减效应。磷硅肥配施对油用亚麻籽粒产量存在显著调控效应,其中 P_2Si_1 处理产量最高,显著高于除 P_2Si_2 之外的其余各处理。与 P_0Si_0 相比, P_1Si_1 、 P_2Si_1 与 P_2Si_2 籽粒产量分别增加12.14%、20.34%和14.97%。相关性分析表明, V_{ave} 、 V_{max} 、快增持续期的灌浆速率与籽粒产量呈极显著正相关。 P_1Si_1 处理的 V_{ave} 、 V_{max} 、 T_{max} 、 W_{max} 以及快增、缓增期的持续天数均位居第1~2位;该处理通过优化灌浆参数,籽粒产量与 P_2Si_2 、 P_2Si_0 均无显著差异,仅比 P_2Si_1 降低6.82%,在减少磷肥用量的情况下仍维持较高产量。【结论】磷硅配施对油用亚麻的产量形成具有协同增效作用;当 $P_2O_5:SiO_2$ 用量配比为75~150:75时,籽粒灌浆优势明显,增产效应大。

关键词:磷肥;硅肥;油用亚麻;干物质积累;籽粒灌浆;产量

中图分类号:S565.9 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2026)04-1066-13

CSTR:32399.14.aauj.2026086



收稿日期:2026-01-30 修回日期:2026-03-10 接受日期:2026-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(32460542)、国家现代农业产业技术体系专项(CARS-14-1-16)和甘肃省科技计划项目-技术创新引导计划(23CXNA0035)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (32460542), National Modern Agricultural Industry Technology System Special Project (CARS-14-1-16), Gansu Provincial Science and Technology Program-Technology Innovation Guidance Plan (23CXNA0035)

作者简介:徐舒萍,硕士生,orcid.org/0009-0002-9322-5980,2452078662@qq.com;*通信作者:郭丽琢,教授,博士,主要从事作物栽培与生理生态研究,orcid.org/0009-0002-6355-664X,guolz@gsau.edu.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

Effects of phosphorus and silicon fertilizer application on grain filling characteristics and yield of oilseed flax

Xu Shuping^{1,2}, Guo Lizhuo^{1,2*}, Gao Yuhong^{1,2,3}, Yan Bin^{1,2,3}, Han Junfang^{1,2},
Fan Xin^{1,2}, Qin Lizhi¹, Guo Yiming¹, Zhao Yongwei⁴, Li Ying⁴

(1.College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2.Gansu Provincial Key Laboratory of Arid land Crop Science, Lanzhou 730070, China; 3.Seed Industry Research Institute of Gansu Provincial University, Lanzhou 730070, China; 4. Dingxi Institute of Agricultural Sciences, Dingxi, Gansu 743000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to elucidate the regulatory effects of phosphorus (P) and silicon (Si) nutrient coupling on the yield formation of oilseed flax, providing a theoretical basis for green and high-yield cultivation of flax in arid regions. [Method] With the oilseed flax cultivar ‘Longya 11’ as experimental material, a split-plot design was employed to investigate the effects of phosphorus fertilizer application rates [no phosphorus (P_0), 75 kg/hm² (P_1), and 150 kg/hm² (P_2)] and silicon fertilizer application rates [no silicon (Si_0), 75 kg/hm² (Si_1), and 150 kg/hm² (Si_2)] on dry matter accumulation (DMA) and grain filling characteristics of oil flax. [Result] The results showed that P application significantly increased DMA at all growth stages, with P_1 and P_2 treatments enhancing DMA by 16.18%–22.72% compared to P_0 . P also improved the average filling rate (V_{ave}), maximum filling rate (V_{max}), and biomass at maximum filling rate (W_{max}), while extending the durations of the rapid and slow filling stage. Si application significantly enhanced late-stage DMA, V_{max} , W_{max} , and filling rates across all three grain filling stages. Compared with the application of phosphorus fertilizer or silicon fertilizer alone, the combined application of phosphorus-silicon fertilizer increased V_{ave} , V_{max} , and W_{max} by 4.35%–6.35%, 4.29%–6.30%, and 5.47%–7.32%, 6.57%–11.29%, 6.54%–11.28%, and 8.64%–10.35%, respectively. Phosphorus fertilizer application enhanced the effective pod number per plant and grain yield, and this effect increased with higher application rates. In contrast, the promoting effect of silicon fertilizer on grain yield followed a pattern of diminishing returns as the application rate increased. The combined application of phosphorus and silicon fertilizers had a significant effect on grain yield; the P_2Si_1 treatment yielded the highest grain yield, which was significantly higher than that of all other treatments except P_2Si_2 . Compared with P_0Si_0 , the grain yields of P_1Si_1 , P_2Si_1 , and P_2Si_2 increased by 12.14%, 20.34%, and 14.97%, respectively. Correlation analysis indicated that the grain-filling rates during the V_{ave} , V_{max} , and rapid-growth phases were highly significantly positively correlated with grain yield. Under the P_1Si_1 treatment, the values for V_{ave} , V_{max} , T_{max} , and W_{max} , as well as the duration of the rapid and slow growth phases, ranked first or second among the nine treatments. The optimization of the grain-filling characteristics resulted in no significant difference in grain yield compared to the P_2Si_2 and P_2Si_0 treatments; yield was only 6.82% lower than that of the P_2Si_1 treatment, maintaining stable yields even with reduced phosphorus fertilizer application. [Conclusion] In summary, the combined application of phosphorus and silicon has a synergistic effect on yield formation in oilseed flax. When the $P_2O_5:SiO_2$ application ratio is maintained between 75:75 and 150:75, there is a significant advantage in seed filling, increasing the yield substantially.

Keywords: phosphorus fertilizer; silicon fertilizer; oilseed flax; dry matter accumulation; grain filling; yield

【研究意义】油用亚麻(*Linum usitatissimum* L.)是我国西北地区重要的油料作物^[1],因其籽粒富含多种功能性营养成分而在特油作物中独树一帜,市场需求持续增长^[2]。目前国内亚麻籽产量低而不稳,高需求与低产量之间的矛盾日益突出。我国亚麻主产区土壤有效磷供应不足,不仅制约植株的正常生长发育,还会阻碍籽粒灌浆进程,是限制亚麻高产、稳产的关键瓶颈^[3]。施磷具有显著的增产效应^[4-5],但磷肥

施入土壤后易被固定,导致植株所需的有效磷匮乏、种植效益降低。为满足作物生长对磷素的需求,农户长期过量施用磷肥,由此形成了恶性循环^[6]。磷肥是不可更新资源,据估计,全球磷矿资源将在22世纪中叶被耗尽^[7]。可见,提高磷肥有效性是作物增产和资源可持续利用的关键。硅素虽非所有高等植物的必需营养元素,但大量研究证实,硅可促进作物养分吸收,同时增强植物抗旱、抗病等抗逆性能,最终实证稳产高产,该效应已在许多作物上得以证明^[8]。目前针对亚麻硅肥施用及磷硅配施的生长调控相关研究鲜见报道,开展磷硅配施对亚麻产量形成调控机制的研究,对亚麻节磷增产的施肥技术体系优化至关重要^[9]。【前人研究进展】与其他肥料协同配施是提升磷肥有效性的重要途径。氮、钾肥配施能促进亚麻对磷肥的有效利用,进而实现增产^[10-11]。硅与磷化学性质相似,在土壤^[12]和植株体内均存在耦合效应^[13];施硅有助于促进土壤中难溶性磷酸盐向有效态转化^[14],增强作物的磷素吸收与转运能力^[15],最终通过强化光合产物向籽实分配,最终提高籽粒产量。磷硅肥配施对磷肥利用和产量的提升效果,已在水稻^[16]、玉米^[17]等禾本科作物上得到广泛证实。硅虽为禾本科作物生长的必需营养元素,但其对非禾本科作物的磷吸收同样具有促进作用。磷硅配施可促进番茄根系发育及磷素吸收,缓解其低磷胁迫^[18];也可增加甜荞单株粒数和千粒质量,使籽粒产量显著提升^[19]。磷硅配施的协同效应是否普遍适用于各类以硅为有益元素的作物,尚需深入研究。若该效应得以验证,则对节约日益紧缺的磷矿资源大有裨益。

【本研究切入点】现有少量研究初步证实,施硅可以调控胡麻磷素积累与籽粒产量^[20]。氮、磷、钾配施较为普遍,若能通过磷硅配施进一步提升磷肥有效性,能够充分挖掘养分协同带来的增效潜力。此外,硅肥还兼具抗旱、抗倒伏的优势,而干旱和倒伏胁迫又是亚麻减产的主要诱因^[21]。因此,探讨磷硅肥施用对旱区主栽且对磷敏感的油用亚麻籽粒灌浆及产量的调控效应,可为构建节肥、抗逆的增产技术体系提供依据。【拟解决的关键问题】本研究通过裂区试验,分析不同磷硅肥用量对油用亚麻干物质积累、籽粒灌浆特性及籽粒产量的影响,以期对亚麻高产栽培的肥料运筹提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于2021年4月7日至8月12日在甘肃省定西市安定区香泉镇西寨村开展(N 34°26'、E 103°53'),该地海拔约2 050 m,为半干旱雨养农业区。试验年度降水量357.8 mm,平均气温6.3 °C,平均日照时数2 453 h/年,无霜期140 d。供试土壤为黄绵土,土壤耕层的各项理化指标分别为:有机质含量8.99 g/kg,全氮0.82 g/kg,全磷0.71 g/kg,碱解氮41.08 mg/kg,速效磷17.64 mg/kg,速效钾83.27 mg/kg,有效硅96.35 mg/kg,pH 8.13。

1.2 试验设计

本试验采用二因素裂区设计,以磷肥施用量为主处理,硅肥施用量为副处理,主、副处理均设3个梯度,施磷量为0(P₀)、75 kg/hm²(P₁)和150 kg/hm²(P₂),施硅量为0(Si₀)、75 kg/hm²(Si₁)和150 kg/hm²(Si₂),共9个处理,每处理重复3次。副区面积为26 m²(6.5 m×4 m);副区间隔30 cm,主区间隔40 cm,区组间隔50 cm,四周设1 m保护行。

磷、硅肥分别采用磷酸一铵(P₂O₅≥61%)和硅酸钠(含SiO₂ 18.7%),且均为基肥施用。

各处理氮肥(N)、钾肥(K₂O)用量分别为112.5 kg/hm²和75 kg/hm²。氮肥品种为尿素(含N 46.0%)和磷酸一铵(含N 12.0%);施磷处理中的氮素用量,扣除磷酸一铵中的氮素后,不足部分以尿素提供;钾肥(硫酸钾,K₂O≥52.0%)。氮、钾肥总量1/3用作基肥、2/3于现蕾初期进行追施。

供试油用亚麻品种为陇亚11号,种植密度300万株/hm²,条播,播深3 cm,行距20 cm。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质积累

在油用亚麻不同生育时期,选取代表性植株样本,经105 °C杀青后,于85 °C下烘干至恒重,测定、记录其干物质质量。

1.3.2 籽粒灌浆

于开花第1天,选择发育正常、株高相近、无明显病虫害且花朵大小相对一致的单株进行绑花标记。自花后第7天起,每隔7 d取样1次,直至成熟,每次从各小区采集相同部位50个蒴果。杀青、烘干至恒

重,称取干重,测定籽粒增重动态,计算各时间段的灌浆速率。

运用 Logistic 方程对油用亚麻籽粒灌浆过程进行拟合,该方程式为: $Y = K/(1 + Ae^{-r})$,式中 Y 表示籽粒质量, t 为开花后天数, K 代表理论最大粒重, A 、 r 为形状参数,根据公式计算各灌浆参数^[22]。

$$\text{灌浆活跃期: } D(\text{大约完成}90\%) = 6/r \quad (1)$$

$$\text{达最大灌浆速率的时间: } T_{\max} = \ln A/r \quad (2)$$

$$\text{灌浆速率达最大时的生物量: } W_{\max} = K/2 \quad (3)$$

$$\text{最大灌浆速率: } V_{\max} = Kr/4 \quad (4)$$

$$\text{灌浆高峰开始时间: } t_1 = [\ln(A) - 1.317]/r \quad (5)$$

$$\text{灌浆高峰终止时间: } t_2 = [\ln(A) + 1.317]/r \quad (6)$$

$$\text{灌浆结束时间: } t_3 = [\ln(A) + 4.5912]/r \quad (7)$$

由上述结果可得渐增期持续天数($T_1 = t_1$)、快增期持续天数($T_2 = t_2 - t_1$)、缓增期持续天数($T_3 = t_3 - t_2$)。

$$\text{各阶段贡献率} = (\text{某阶段积累的籽粒干重/籽粒最终干重}) \times 100\% \quad (8)$$

1.3.3 产量及其构成因素

于成熟期,每副区选取 20 株亚麻进行考种,测定有效蒴果数、单果籽粒数、千粒质量和单株产量。以副区为单位单独收获,测定单位面积籽粒产量。

1.4 数据处理

试验数据整理采用 Excel 2016 进行;方差分析和多重比较利用 SPSS 25.0 软件进行;相关性分析及绘图运用 Origin 2024、R studio 软件完成。

2 结果与分析

2.1 磷硅肥施用对籽粒产量及其构成因素的影响

由表 1 可知,施磷肥对籽粒产量及产量构成因素的影响均达极显著水平($P < 0.01$)。随施磷量的增加呈不同程度变化,其中 P_1 、 P_2 较 P_0 单果籽粒数显著增加 14.47%、14.86%;有效蒴果数显著增加 14.24%、17.21%,千粒质量显著增加 8.86%、5.29%,单株产量显著增加 39.04%、59.72%;单位面积产量显著增加 5.58% 和 12.01%,表明磷肥利于有效蒴果、籽粒的形成及生长;增加磷肥用量对有效蒴果、单株产量的提升效果显著;施磷改善了产量构成因素,从而促进油用亚麻增产,且增产效果随磷肥用量的增加而显著提高。

表 1 磷硅肥施用对籽粒产量及其构成因素的影响

Tab.1 Evaluating the role of phosphorus and silicon supply in determining grain yield and its components

处理		单株有效蒴果数/个	单果籽粒数/个	千粒质量/g	单株产量/g	籽粒产量/(kg·hm ²)
Treatment		Pod number per plant	Seeds per pod	1 000-grain weight	Per plant yield	Grain yield
P_0	Si_0	22.93±3.01 ^c	5.83±0.51 ^d	6.12±0.16 ^c	0.63±0.02 ^c	1450±30 ^c
	Si_1	25.43±2.51 ^{bc}	6.62±0.51 ^{abcd}	6.38±0.14 ^{bcd}	0.67±0.08 ^{de}	1475±55 ^{de}
	Si_2	24.67±1.56 ^c	6.28±0.73 ^{cd}	6.26±0.14 ^{de}	0.87±0.18 ^{de}	1556±45 ^{cd}
P_1	Si_0	26.13±2.06 ^{bc}	6.92±0.35 ^{abcd}	6.69±0.35 ^{abcd}	0.95±0.20 ^{bcd}	1543±58 ^{cd}
	Si_1	29.77±2.35 ^{ab}	7.59±0.59 ^{ab}	7.01±0.18 ^a	1.13±0.16 ^{abc}	1626±64 ^{bc}
	Si_2	27.53±2.16 ^{abc}	6.93±0.40 ^{abcd}	6.72±0.40 ^{abc}	0.92±0.13 ^{bcd}	1561±44 ^{cd}
P_2	Si_0	26.47±3.54 ^{abc}	6.45±0.83 ^{bcd}	6.33±0.41 ^{cde}	0.96±0.14 ^{bcd}	1607±47 ^{bc}
	Si_1	31.27±3.31 ^a	7.75±0.80 ^a	6.81±0.29 ^{ab}	1.31±0.29 ^a	1745±27 ^a
	Si_2	27.87±2.01 ^{abc}	7.32±0.53 ^{abc}	6.62±0.05 ^{abcd}	1.18±0.03 ^{ab}	1667±27 ^{ab}
因素及互作 Factors and interactions						
P		**	**	**	**	**
Si		*	*	*	ns	**
P×Si		ns	ns	ns	ns	*

*和**分别表示 5% 和 1% 水平上差异显著,ns 表示差异不显著。

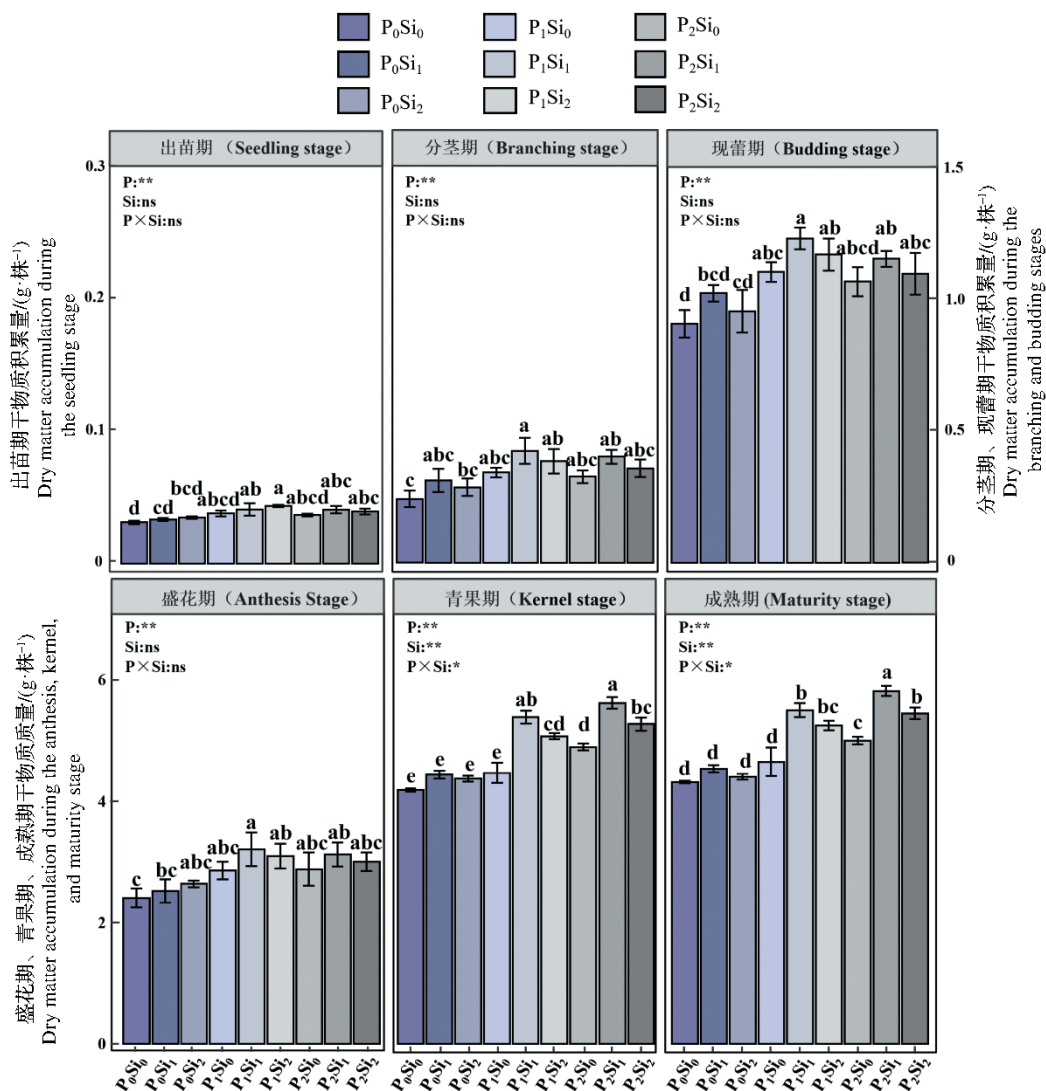
*and ** denote significance at the 5% and 1% levels, respectively; ns denotes non-significance.

施用硅肥可显著增加单果籽粒数、有效蒴果数、千粒质量及籽粒产量。施硅单果籽粒数和有效蒴果数整体由高到低依次为 Si_1 、 Si_2 和 Si_0 ；相较于 Si_0 ， Si_1 、 Si_2 的单果籽粒数分别平均提高 14.38%、6.94%，有效蒴果数平均提升 14.47%、6.0%； Si_1 较 Si_2 的单果籽粒数和有效蒴果数分别提高 6.95% 和 7.99%。在千粒质量和籽粒产量上， Si_1 、 Si_2 较 Si_0 分别平均提高了 5.57%、2.46% 和 5.35%、4.0%。以上结果表明，施硅量的增加对籽粒产量没有进一步的提升效果。

磷硅肥的交互效应对产量构成因素的影响未达显著水平，但对籽粒产量的影响达显著水平。 P_2Si_1 处理籽粒产量最高，较除 P_2Si_2 之外其他处理显著提高 7.32%~20.34%。另外，低磷配施硅肥 (P_1Si_1 、 P_1Si_2) 较 P_2Si_0 单果籽粒数平均增加 7.49%~17.73%，有效蒴果数增加 4.03%~12.47%，千粒质量增加 6.27%~10.85%。结果表明，磷硅肥配施利于产量的提升，以 P_2Si_1 组合最高效；高磷下配施高量硅肥，产量并未进一步显著提升；在适当控制磷肥用量下配施硅肥，能够协同优化籽粒数、蒴果数和粒重，实现节肥、增产的协同。

2.2 磷硅肥施用对干物质积累的影响

由图 1 可知，磷肥对干物质积累在各生育时期均达极显著水平 ($P<0.01$)，但 2 个施磷水平促生效果具有生育阶段间的差异。出苗期至盛花期干物质积累量由高到低依次为 P_1 、 P_2 、 P_0 ，其中 P_1 较 P_0 显著提高



*和**分别表示 5% 和 1% 水平上差异显著，ns 表示差异不显著；P：磷肥；Si：硅肥；P×Si：表示磷肥和硅肥交互；不同小写字母表示油用亚麻同生育时期下不同处理间的差异显著 ($P<0.05$)。

*and ** denote significance at the 5% and 1% levels, respectively; ns denotes non-significance; P: phosphorus fertilizer; Si: silicon fertilizer; P×Si: interaction between phosphorus and silicon fertilizers; Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among fertilization treatments at the same growth stage of oilseed flax.

图 1 不同磷硅施肥处理下各时期干物质积累状况

Fig.1 Dry matter accumulation at different growth stages under varying phosphorus-silicon fertilization treatments

21.05%~37.13%,较P₂提高1.66%~5.91%;进入青果期至成熟期则由高到低依次为P₂、P₁、P₀,青果期P₂较P₀、P₁显著提高了21.51%、5.77%,成熟期分别显著提高22.72%、5.62%。结果表明,P₁施用量利于前期干物质积累,P₂对后期促生效果更佳,但与P₁相比增幅有限。

施硅肥显著促进青果期、成熟期干物质积累($P<0.01$),2个时期均由高到低依次为Si₁、Si₂、Si₀,其中青果期Si₁较Si₀、Si₂分别提高13.97%、4.94%成熟期分别提高13.54%、5.0%。结果表明,施硅肥仅有助于生长后期干物质积累,且以Si₁效果最佳。

施磷基础上施用硅肥能进一步提高干物质积累量,分茎之后干物质积累量由高到低依次为P₁Si₁、P₁Si₂、P₁Si₀,以及P₂Si₁、P₂Si₂、P₂Si₀,且P₁Si₁、P₁Si₂处理各时期干物质积累量均高于P₂Si₀,磷硅交互仅在生殖生长中后期表现出显著差异。青果期及成熟期,P₂Si₁处理干物质积累量均最高,P₁Si₁次之;两处理分别较P₀Si₀显著增加34.24%、28.68%和34.84%、27.51%。结果表明,磷硅配施可实现节肥与促生的协同,为籽粒高产、绿色节肥的生产实践提供了有力支撑。

2.3 籽粒灌浆特性对磷硅肥用量的响应

2.3.1 磷肥和硅肥施用下灌浆速率的动态变化

随灌浆进程推进,各处理组灌浆速率均呈先增后降的单峰变化趋势,且达到最大灌浆速率时的天数基本一致(图2)。不同施肥水平对灌浆速率的影响存在差异(表2)。磷肥用量对灌浆速率的影响由大到小依次为P₁、P₂、P₀,施磷对灌浆速率的提升在花后7个时段(S1~S7)达显著水平,且除S4、S7时段外,其他时段施磷与否间差异显著($P<0.01$)。S4和S7时段P₁、P₂灌浆速率较P₀分别平均提高5.45%、2.87%和27.74%、8.62%;而其余时段,P₁、P₂较P₀增幅介于1.92%~22.56%之间。结果表明,磷肥后期增效更显著,灌浆末期灌浆速率的提升幅度远高于高峰期;此外,灌浆末期P₁的提升幅度(27.73%)是P₂(8.62%)的3.2倍,表明施磷肥对灌浆速率有提升效果,但随施磷量增加,后期增幅降低,P₁较P₂更有利于提高花后灌浆速率。

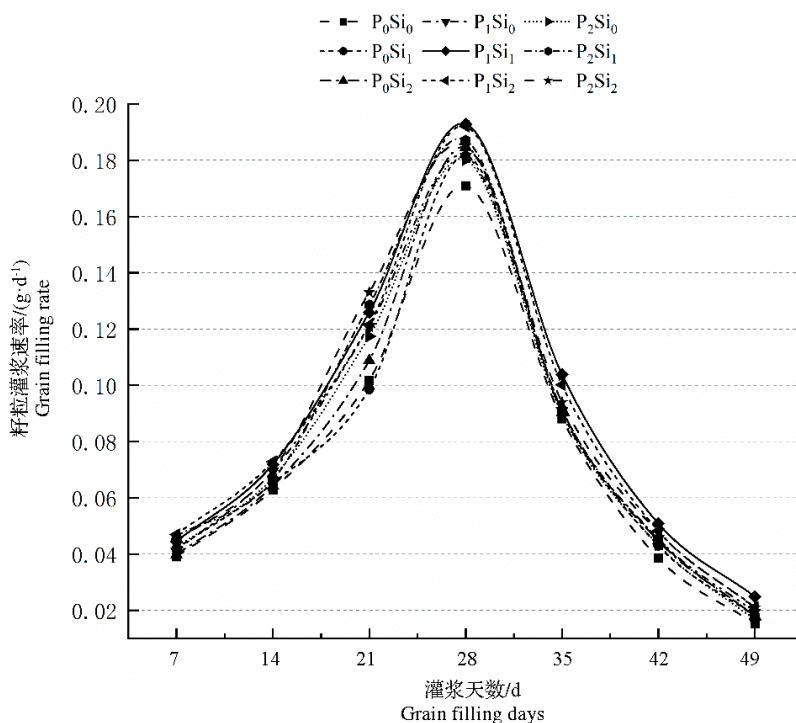


图2 不同处理下油用亚麻灌浆速率的动态变化

Fig.2 Patterns of grain-filling rate dynamics in oilseed flax under varying treatment conditions

施用硅肥S1~S3时段灌浆速率最大值均出现在Si₂处理下,其他时段则出现在Si₁处理下。由此表明,硅肥对灌浆速率的提升随油用亚麻生长及肥料用量增加呈递减效应。施用硅肥后灌浆速率的差异在S3~S6时段内均达极显著水平($P<0.01$),S1时段达显著水平。在灌浆初期S1和高峰期S5时段,Si₁、Si₂较Si₀灌浆速率分别显著提高了8.44%、7.47%(S1)和6.62%、5.86%(S5),Si₁较Si₂平均提高0.90%和0.72%。

综上所述,施用硅肥可加速籽粒灌浆速率,但相较于Si₂、Si₁的提速效果更佳。

磷、硅肥配施的灌浆速率在S3和S5时段差异显著($P<0.01$)。两时段灌浆速率P₁Si₁较P₀Si₁、P₁Si₀显著增加27.69%、4.27%(S3)和13.80%、14.27%(S5);S5时段,P₁Si₁与P₁Si₂、P₂Si₁相比显著提升3.71%和13.85%;P₁Si₁处理灌浆速率均保持较高,且相较于其他处理后期降幅最小。由此表明,适量磷硅肥配比可平衡油用亚麻灌浆速率峰值与持续性,促进灌浆结实,进而提高籽粒产量。

表 2 磷肥和硅肥施用下各时段灌浆速率的方差分析

Tab.2 Analysis of variance of grain-filling rates at different stages under combined phosphorus and silicon fertilization

处理	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
P	**	**	**	*	**	**	*
Si	*	ns	**	**	**	**	ns
P×Si	ns	ns	**	ns	**	ns	ns

S1:花后0~7 d,S2:7~14 d,S3:14~21 d,S4:21~28 d,S5:28~35 d,S6:35~42 d,S7:42~49 d;*和**分别表示5%和1%水平上差异显著,ns表示差异不显著;P:磷肥;Si:硅肥;P×Si:表示磷肥和硅肥互作。

S1:0~7 days after anthesis,S2:7~14 days,S3:14~21 days,S4:21~28 days,S5:28~35 days,S6:35~42 days,S7:42~49 days;*and ** denote significance at the 5% and 1% levels,respectively;ns denotes non-significance;P:phosphorus fertilizer;Si:silicon fertilizer;P×Si:interaction between phosphorus and silicon fertilizers.

2.3.2 磷硅肥施用对籽粒灌浆参数的影响

本研究运用 Logistic 方程对不同磷硅肥用量下籽粒灌浆进程进行拟合分析,具体参数见表3。结果表明,不同处理灌浆过程差异显著,拟合后决定系数 R^2 均分布在0.997~0.999,表明拟合的相关性较高。此外, F 检验结果显示各处理间达到显著水平($P<0.01$),证明方程对灌浆过程拟合效果理想,能够准确描述整个灌浆过程并具备对未来值的预测能力。

表 3 磷硅肥施用对油用亚麻籽粒灌浆参数的影响

Tab.3 Effects of phosphorus and silicon fertilization on grain filling parameters of oilseed flax

处理 Treatment	籽粒灌浆拟合方程 Grain filling fitting equation	R^2	F 值 F value	籽粒灌浆参数 Grain filling parameters			
				$V_{ave}/(g \cdot d^{-1})$	$V_{max}/(g \cdot d^{-1})$	T_{max}/d	W_{max}/g
P ₀ Si ₀	$y=3.671/(1+47.940e^{-0.168x})$	0.998	3 601.317**	0.092 5	0.154 1	23.049 0	1.835 7
P ₀ Si ₁	$y=3.838/(1+46.281e^{-0.165x})$	0.997	2 304.666**	0.094 8	0.158 0	23.290 2	1.918 9
P ₀ Si ₂	$y=3.898/(1+50.747e^{-0.169x})$	0.998	3 180.129**	0.099 0	0.165 0	23.190 5	1.949 1
P ₁ Si ₀	$y=4.015/(1+46.593e^{-0.168x})$	0.999	5 593.312**	0.101 1	0.168 6	22.876 7	2.007 7
P ₁ Si ₁	$y=4.344/(1+45.677e^{-0.164x})$	0.999	6 038.842**	0.107 1	0.178 5	23.248 6	2.171 9
P ₁ Si ₂	$y=4.277/(1+42.987e^{-0.163x})$	0.998	4 511.760**	0.104 7	0.174 5	23.046 2	2.138 5
P ₂ Si ₀	$y=3.946/(1+45.795e^{-0.168x})$	0.998	4 572.351**	0.099 2	0.165 4	22.815 9	1.973 1
P ₂ Si ₁	$y=4.118/(1+46.621e^{-0.169x})$	0.998	5 162.071**	0.104 6	0.174 3	22.691 0	2.058 9
P ₂ Si ₂	$y=4.201/(1+45.469e^{-0.168x})$	0.999	7 434.368**	0.105 6	0.176 0	22.784 2	2.100 7

V_{ave} :平均灌浆速率; V_{max} :籽粒最大灌浆速率; T_{max} :达到最大灌浆速率的时间; W_{max} :灌浆速率最大时生物量;**表示1%水平上差异显著。

V_{ave} : mean grain filling rate; V_{max} : maximum grain filling rate; T_{max} : time to reach maximum grain filling rate; W_{max} : biomass at maximum grain filling rate; ** denote significance at the 1% levels.

施用磷肥可对平均灌浆速率(V_{ave})、最大灌浆速率(V_{max})和灌浆速率最大时生物量(W_{max})产生影响。其中,P₁较P₂ V_{ave} 提高1.15%;P₁、P₂较P₀ V_{max} 分别平均提高9.32%和8.07%, W_{max} 分别平均提高10.77%和7.52%;施用磷肥下上述3个参数由大到小依次为P₁、P₂、P₀。结果表明,施用磷肥可显著提升 V_{ave} 、 V_{max} 及 W_{max} ,但提升效果随磷肥用量增加呈下降趋势。达到最大灌浆速率的时间(T_{max})随磷肥用量增加呈提前趋势,P₀平均较P₂延迟0.41 d(9.8 h),表明施用磷肥可加速油用亚麻灌浆高峰期进程,为后续充分灌浆奠定物质基础。

施用硅肥, $V_{\max}$ 、 $W_{\max}$ 随硅肥用量增加呈上升趋势, Si_2 比 Si_0 、 Si_1 的 $V_{\max}$ 平均提高 5.62%、0.92%, $W_{\max}$ 提高 6.39%、0.63%, 表明施硅肥可提升 $V_{\max}$ 、 $W_{\max}$, 从而加快关键灌浆阶段光合产物的积累, 为最终粒重、产量的提高提供了支持。磷硅互作处理下, V_{ave} 、 $V_{\max}$ 以及 $W_{\max}$ 普遍高于不施肥 (P_0Si_0)、单施磷肥 (P_1Si_0 、 P_2Si_0) 和单施硅肥 (P_0Si_1 、 P_0Si_2), P_0Si_0 各参数均保持最低, 而 P_1Si_1 均保持最高, 且高于 P_2Si_2 。结果表明, 磷硅互作对籽粒灌浆具有促进作用, 同时在 P_1Si_1 下协同效应最佳。

2.3.3 磷硅肥施用对籽粒灌浆持续期的影响

如表 4 所示, 不同施肥处理各阶段灌浆持续时间、速率存在差异。渐增持续期, P_1 、 P_2 分别较 P_0 持续时间平均缩短 1.47% 和 2.49%, 说明随磷肥用量增加, 渐增持续时间缩短, 高供磷水平可加速灌浆启动到关键期的过渡以及早期籽粒库容的建立。进入快增、缓增期, 持续天数均由长到短依次为 P_1 、 P_0 、 P_2 , P_1 较 P_0 、 P_2 快增持续天数平均分别延长 1.29%、1.82%。另外, 灌浆活跃期也表现出与快增、缓增持续天数相同的变化趋势, 而各阶段对粒重的贡献率呈现随施磷量的增加逐步递减的现象。结果表明, 适量磷肥用量可延长籽粒快增、缓增期持续天数, 同时维持物质转运, 使籽粒充实饱满, 而高供磷水平可能导致灌浆后期效率下降。

硅肥对灌浆持续时间的调控效应小于磷肥。施硅后 3 个阶段灌浆持续时间提升幅度均维持在 0.25%~1.04%。增施硅肥均促进了 3 个阶段灌浆速率的提升, 其中, Si_2 分别较 Si_0 、 Si_1 提高 6.25%、1.05% (渐增期), 5.63%、0.94% (快增期), 5.58%、0.96% (缓增期); 但其持续时间、活跃灌浆期均随硅肥用量由高到低依次为 Si_1 、 Si_2 、 Si_0 。硅肥通过与磷协同影响油用亚麻灌浆进程; 综合来看, P_1Si_1 快增、缓增期灌浆速率最高, 快增持续天数与活跃灌浆期较长, 相较于 P_0Si_0 活跃灌浆期延长了 0.77 d (18.5 h)。因此, P_1Si_1 是协调灌浆速率与时期的最优组合, 能够在保证各阶段灌浆时长的同时, 为最终粒重的增加提供条件。

表 4 不同施肥条件下油用亚麻各灌浆阶段的特征

Tab.4 Effects of different fertilization conditions on characteristics of oilseed flax at various grain filling stages

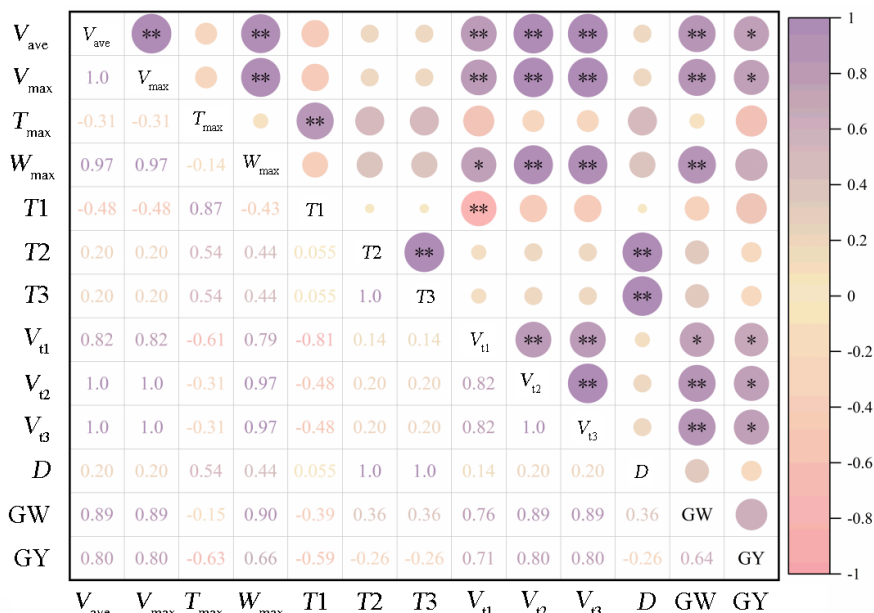
处理 Treatment	渐增持续期			快增持续期			缓增持续期			D/d
	Duration of the gradual			Duration of the rapid			Duration of the slow			
	filling stage			filling stage			filling stage			
	T1/d	V ₁ /(g·d ⁻¹)	G/%	T2/d	V ₂ /(g·d ⁻¹)	G/%	T3/d	V ₃ /(g·d ⁻¹)	G/%	
P ₀ Si ₀	15.205	0.051 0	21.45	15.687	0.135 1	58.59	19.500	0.037 9	20.43	35.733
P ₀ Si ₁	15.291	0.053 0	21.48	15.998	0.138 5	58.69	19.886	0.038 8	20.46	36.441
P ₀ Si ₂	15.413	0.053 4	21.37	15.555	0.144 7	58.40	19.336	0.040 6	20.36	35.434
P ₁ Si ₀	15.034	0.056 4	21.32	15.686	0.147 8	58.26	19.499	0.041 5	20.31	35.731
P ₁ Si ₁	15.237	0.060 2	21.33	16.024	0.156 5	58.27	19.918	0.043 9	20.31	36.501
P ₁ Si ₂	14.976	0.060 4	21.41	16.141	0.153 0	58.50	20.064	0.042 9	20.39	36.767
P ₂ Si ₀	14.958	0.055 7	21.40	15.715	0.145 0	58.46	19.535	0.040 7	20.38	35.797
P ₂ Si ₁	14.913	0.058 3	21.34	15.556	0.152 8	58.29	19.337	0.042 9	20.32	35.436
P ₂ Si ₂	14.923	0.059 5	21.30	15.723	0.154 3	58.18	19.544	0.043 3	20.28	35.814

T1: 渐增期持续天数; T2: 快增期持续天数; T3: 缓增期持续天数; V_{i1} : 渐增期灌浆速率; V_{i2} : 快增期灌浆速率; V_{i3} : 缓增期灌浆速率; D: 灌浆活跃期; G: 灌浆对最后粒重的贡献率。

T1: duration of gradual increase stage; T2: duration of rapid increase stage; T3: duration of slow increase stage V_{i1} : grain filling rate during gradual increase stage; V_{i2} : grain filling rate during rapid increase stage; V_{i3} : grain filling rate during slow increase stage; D: active grain filling period; G: contribution of grain filling to final grain weight.

2.4 籽粒灌浆参数、千粒质量及产量的相关性

各籽粒灌浆参数、千粒质量与产量相关性分析结果见图 3。平均灌浆速率 (V_{ave})、最大灌浆速率 ($V_{\max}$)、灌浆速率最大时生物量 ($W_{\max}$)、快增期与缓增期灌浆速率 (V_{i2} 、 V_{i3}) 均与千粒质量呈极显著正相关 ($P<0.01$); V_{ave} 、 $V_{\max}$ 、 V_{i1} (渐增期灌浆速率)、 V_{i2} 及 V_{i3} 与产量显著正相关 ($P<0.05$)。 P_2Si_1 处理 V_{ave} 、 $V_{\max}$ 、 $W_{\max}$ 及 3 个阶段灌浆速率均维持较高水平, 其千粒质量、产量亦较高, 表明磷硅肥配施通过调控上述灌浆参数提高了产量。 综上, V_{ave} 、 $V_{\max}$ 、 $W_{\max}$ 、 V_{i2} 与 V_{i3} 是促进籽粒充实和产量形成的关键参数, 表明灌浆速率与生物量积累的协同调控是驱动籽粒饱满和高产的关键生理基础。



V_{ave} :平均灌浆速率; V_{max} :籽粒最大灌浆速率; T_{max} :达到最大灌浆速率的时间; W_{max} :灌浆速率最大时生物量; $T1$:渐增期持续天数; $T2$:快增期持续天数; $T3$:缓增期持续天数; V_{t1} :渐增期灌浆速率; V_{t2} :快增期灌浆速率; V_{t3} :缓增期灌浆速率; D :灌浆活跃期; G :灌浆对最后粒重的贡献率; GW :千粒质量; GY :籽粒产量;数字代表相关系数,圆圈越大和颜色越深,表示,相关性越高;反之,相关性越低。*, $P<0.05$ **, $P<0.01$ 。

V_{ave} : mean grain filling rate; V_{max} : maximum grain filling rate; T_{max} : time to reach maximum grain filling rate; W_{max} : biomass at maximum grain filling rate; $T1$: duration of gradual increase stage; $T2$: duration of rapid increase stage; $T3$: duration of slow increase stage; V_{t1} : grain filling rate during gradual increase stage; V_{t2} : grain filling rate during rapid increase stage; V_{t3} : grain filling rate during slow increase stage; D : active grain filling period; G : contribution of grain filling to final grain weight; GW : 1000-grain weight; GY : grain yield; The numerical values represent correlation coefficients. The size and color intensity of the circles correspond to the strength of the correlation, with larger and darker circles indicating higher correlations. *, $P<0.05$ **, $P<0.01$.

图3 油用亚麻灌浆特征参数、千粒质量及产量的相关性分析

Fig.3 Grain-filling parameters, 1000-grain weight, and yield in oilseed flax were examined for their interrelationships.

3 讨论

3.1 磷硅肥配施对作物产量的影响

干物质积累是作物产量形成的关键基础,肥料运筹可通过影响干物质的积累量而调控籽粒产量。磷对油用亚麻的干物质积累及籽粒产量形成至关重要。油用亚麻对磷有较高需求,相关研究表明,胡麻地上部干物质日增量随施磷量的增加相应提升^[23];施磷能显著促进茎秆、蒴果皮干物质积累量,且该促进作用随施磷量增加而更显著^[24]。胡麻千粒质量、单株产量随施磷量增加呈先增后减的变化趋势,两者较不施肥平均提高 10.09%、23.01%^[25]。籽粒产量也随磷肥用量的增加而增加,与不施磷肥相比提高 15.11%~24.10%,平均提高了 16.97%^[26]。本研究试区土壤有效磷含量偏低,在 150 kg/hm² 的磷肥用量下,干物质积累量与产量仍较不施磷处理显著提高了 22.72% 和 12.01%,充分证明油用亚麻对磷的较高需求。施磷量在 75~150 kg/hm² 范围时,磷肥对干物质积累的提升效果出现增幅减小的现象,体现了肥效的报酬递减。磷肥通过促进干物质的积累与转运提高籽粒产量,产量的增加是磷肥对有效蒴果、籽粒形成及粒重增加的协同结果。

硅肥对禾本科作物产量的提升已得到广泛证实,适量硅肥供应亦可提高其他科属作物的干物质积累量及籽粒产量^[27]。适量硅肥可有效促进花生的分枝分化与地上部干物质积累^[28],提高油菜地上部的干物质积累及其在成熟期籽粒中的分配比例^[8];大豆施硅后同化物质的积累和转移量上升^[29],籽粒产量显著提高,与未施硅的对照相比,低、中、高硅肥用量处理的增产幅度分别达到 16%、33% 和 12%,其增产效应呈现报酬递减趋势^[30]。施用硅肥后甜荞的增产幅度亦可达 26.30%~31.78%^[31]。油用亚麻施用硅肥的报道较少,但已有研究表明,单施硅肥在宽幅匀播条件下对干物质积累存在显著提升效果^[20];也有研究

表明,单施硅肥对干物质积累无显著的促进主效,而低钾下配施硅肥的养分互作效应可使干物质积累显著提高^[32]。本研究表明,施用硅肥显著提高油用亚麻生长后期的干物质积累量及籽粒产量,两者的提升效果均随施硅量的增加而增幅减小。综上,硅肥增产效果因土壤而异,发挥硅肥的增产潜力更需把握适宜的用量范围。

磷硅肥配施对作物干物质积累及籽粒产量的调控表现出明显互补作用^[33];这一效应已在番茄^[18]、大豆^[34]和甜荞^[19]等作物上得以体现。本研究验证了此结果,即磷硅配施显著提高了油用亚麻生育后期干物质积累,为籽粒产量的提升奠定了良好的物质基础。磷硅肥配施各处理下籽粒产量普遍较高,其中以 P_2Si_1 处理产量最突出,较 P_0Si_0 对照增产20.34%。这进一步证实,适量的磷硅肥配施在调控非禾本科作物生长中存在协同增效作用,为磷硅肥配施的广泛应用奠定了基础。

3.2 磷硅肥配施对作物籽粒灌浆特性的影响

灌浆期是籽粒建成与物质积累的关键阶段,其灌浆进程和强度与作物最终产量形成密不可分。合理的磷肥用量能够有效促进胡麻对养分的吸收利用^[35],加快营养物质向籽粒中高效转运,继而提高籽粒产量。本研究结果表明,施磷肥显著提升了灌浆速率,但其促进效果随施磷量增加呈报酬递减趋势;该结果与前人在苦荞^[36]上的研究结论一致。已有研究表明,适量施用磷肥能显著提高胡麻最大灌浆速率、活跃灌浆天数、每果粒数与千粒质量^[35];磷肥亦可提升小麦渐增期灌浆速率,为高产奠定基础^[37]。本试验进一步表明,随磷肥用量的增加,油用亚麻最大灌浆速率、平均灌浆速率及其对应的生物量均出现下降趋势。与小麦研究结果不同的是,磷肥不仅提高了渐增期灌浆速率,对另外2个阶段的速率也有提高;此外,磷肥用量的增加使渐增持续时间缩短,而快增、缓增持续时间均在 75 kg/hm^2 磷肥用量时,时间最长。结果表明,施用磷肥可加速灌浆进入快增期,而快增、缓增期在适量施用磷肥时可有效延长。

硅可助力作物对磷的吸收^[20],满足作物生长中的营养需求并向籽实输送。施硅通过增加小麦穗数与穗粒数以扩大库容,并在灌浆期通过提高胞间 CO_2 浓度加速灌浆进程,改善物质运输能力^[38]。本试验发现,适量硅肥可提高油用亚麻最大灌浆速率与灌浆速率最大时生物量,表明施硅肥使籽粒物质积累在关键阶段显著增强;而生物量的提高,则进一步说明硅肥对灌浆高峰期物质储存潜力有所加强。

4 结 论

施用磷肥可显著促进油用亚麻干物质积累,且在 75 kg/hm^2 施磷水平下,平均灌浆速率、最大灌浆速率及其对应生物量均得到提升。施用硅肥对3个持续期灌浆速率、最大灌浆速率及其对应的生物量具有促进作用,产量显著增加。磷肥是调控籽粒产量的主导因素,而硅肥能促进磷素的供应,两者协同使最大灌浆速率时生物量及籽粒产量得到提高。当磷、硅肥用量均为 75 kg/hm^2 时,灌浆速率达到峰值,千粒质量显著高于其他处理。综合油用亚麻灌浆特性与产量形成规律,以 $150\text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$ 与 $75\text{ kg SiO}_2/\text{hm}^2$ 的施肥配比,可在实现较优灌浆动态的同时维持籽粒产量最高,是适宜油用亚麻高效增产的施肥策略。

致谢:甘肃省教育科技创新产业支撑计划项目(2021CYZC38)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 缪纯庆,刘秦,范惠玲,等.张掖市不同海拔地区5个胡麻品种品质特性比较分析[J].生物技术进展,2021,11(3):330-337.
Miao C Q, Liu Q, Fan H L, et al. Analysis on quality character of five flaxseed varieties in different altitude regions of Zhangye[J]. Current Biotechnology, 2021, 11(3):330-337.
- [2] 文明,高玉红,吴兵,等.胡麻氮素营养及高效利用研究进展[J].中国油料作物学报,2024,46(6):1222-1231.
Wen M, Gao Y H, Wu B, et al. Research progress on nitrogen application of oil flax[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(6):1222-1231.
- [3] 马幸康,高玉红,吴兵,等.有机肥对旱地胡麻籽粒灌浆特性的影响[J].江西农业大学学报,2022,44(6):1349-1361.
Ma X K, Gao Y H, Wu B, et al. Effect of organic fertilizer on grain filling characteristics of flax in dryland[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(6):1349-1361.

- [4] 李云祥,冯玉磊,常逢虎,等.甘肃中部干旱地区油用亚麻氮磷钾土壤养分丰缺指标研究[J].中国油料作物学报,2024,46(1):135-142.
- Li Y X, Feng Y L, Chang F H, et al. Research on the abundance-deficiency index of the soil N, P and K nutrients for oil flax in the middle arid area of Gansu[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(1): 135-142.
- [5] 谢亚萍,李爱荣,闫志利,等.不同供磷水平对胡麻磷素养分转运分配及其磷肥效率的影响[J].草业学报,2014,23(1):158-166.
- Xie Y P, Li A R, Yan Z L, et al. Effect of different phosphorus levels on phosphorus nutrient uptake, transformation and phosphorus utilization efficiency of oil flax[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(1): 158-166.
- [6] 李亚莉,阮文浩,高玉红,等.施磷量和萘乙酸浓度对胡麻抗旱生理特性及其产量的影响[J].中国油料作物学报,2025,47(6):1502-1511.
- Li Y L, Ruan W H, Gao Y H, et al. Effects of phosphorus application and naphthalene acetic acid concentration on drought-resistant physiological characteristics of oil flax and its yield[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2025, 47(6): 1502-1511.
- [7] 张伟,陈轩敬,马林,等.再论中国磷肥需求预测:基于农业绿色发展视角[J].土壤学报,2023,60(5):1389-1397.
- Zhang W, Chen X J, Ma L, et al. Re-prediction of phosphate fertilizer demand in China based on agriculture green development[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1389-1397.
- [8] 赖莹.硅肥对稻茬直播油菜产量和抗倒性的影响[D].成都:四川农业大学,2022:41-46.
- Lai Y. Effects of silicon fertilizer on yield and lodging resistance of direct seeding rapeseed in paddy field[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2022: 41-46.
- [9] Grant C A, Monreal M A, Irvine R B, et al. Preceding crop and phosphorus fertilization affect cadmium and zinc concentration of flaxseed under conventional and reduced tillage[J]. Plant and Soil, 2010, 333: 337-350.
- [10] 吴兵,高玉红,谢亚萍,等.氮磷配施对旱地胡麻干物质积累和籽粒产量的影响[J].核农学报,2017,31(5):996-1004.
- Wu B, Gao Y H, Xie Y P, et al. Effects of nitrogen application combined with phosphorus on dry matter accumulation and seed yield of rain-fed flax[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(5): 996-1004.
- [11] 王同鑫,高玉红,李喜强,等.不同施钾水平配合氮磷对胡麻抗倒伏特性及产量的影响[J].中国麻业科学,2023,45(1):1-12.
- Wang T X, Gao Y H, Li X Q, et al. Effects of different potassium application levels combined with nitrogen and phosphorus on lodging resistance and yield of flax[J]. Plant Fiber Sciences in China, 2023, 45(1): 1-12.
- [12] 胡克伟,颜丽,关连珠.土壤硅磷元素交互作用研究进展[J].土壤通报,2004(2):230-233.
- Hu K W, Yan L, Guan L Z. Interaction of silicon and phosphorus in soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004(2): 230-233.
- [13] Hu A Y, Xu S N, Qin D N, et al. Role of silicon in mediating phosphorus imbalance in plants[J]. Plants, 2020, 10(1): 51.
- [14] 杨丹,田甜,闫颖,等.外源硅对碱性土壤磷位及磷有效性影响[J].生态环境学报,2017,26(12):2052-2056.
- Yang D, Tian T, Yan Y, et al. Effect of exogenous silicon on phosphate potential and phosphorus availability in alkaline paddy soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(12): 2052-2056.
- [15] 张嘉莉,朱从桦,豆攀,等.硅、磷配施对玉米苗期生长及氮磷钾积累的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(5):677-688.
- Zhang J L, Zhu C H, Dou P, et al. Effect of phosphorus and silicon application on the uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium by maize seedlings[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(5): 677-688.
- [16] 孙颖,王旭东,王莺,等.硅磷配施对水稻土中速效养分和水稻产量的影响[J].浙江农林大学学报,2015,32(4):551-556.
- Sun Y, Wang X D, Wang Y, et al. Soil available nutrients and rice yield with silicon and phosphorus fertilization[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2015, 32(4): 551-556.
- [17] 朱从桦,李其勇,程明军,等.氮磷钾减量配施硅肥对玉米养分吸收、利用及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2018(1/2):56-63.
- Zhu C H, Li Q Y, Cheng M J, et al. Effects of reducing nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer combined with silicon fertilizer on nutrient absorption, utilization and yield of maize[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018(1/2): 56-63.
- [18] 梁颖.低磷条件下外源硅对番茄幼苗生长发育的调控效应[D].晋中:山西农业大学,2020:47-55.
- Liang Y. Regulation effects of exogenous silicon on tomato growth and development under low phosphorus condition[D]. Jin-

- zhong: Shanxi Agricultural University, 2020: 47-55.
- [19] 吴康红. 硅磷配施对甜芥倒伏性能及产量的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2020: 44-54.
- Wu K H. Effect of silicon and phosphate combined application on lodging resistance and yield of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) [D]. Chongqing: Southwest University, 2020: 44-54.
- [20] 王瑞珺, 吴兵, 高玉红, 等. 施硅量和播种方式对胡麻养分积累及分配规律的影响[J]. 中国油料作物学报, 2025, 47(2): 478-487.
- Wang R J, Wu B, Gao Y H, et al. Effects of silicon application rate and sowing patterns on the nutrient accumulation and distribution pattern of oilseed flax [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2025, 47(2): 478-487.
- [21] 刘亚辉, 郭丽琢, 高玉红, 等. 钾硅肥配施对胡麻茎秆碳水化合物及抗倒性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(2): 410-423.
- Liu Y H, Guo L Z, Gao Y H, et al. Effects of combined application of potassium and silicon fertilizer on carbohydrate and lodging resistance of oil flax stem [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, 44(2): 410-423.
- [22] 张妍妍, 李迎, 刘翔辰, 等. 深松耕作条件下滴灌对冬小麦花后干物质积累及灌浆特性的影响[J]. 作物学报, 2025, 51(11): 3065-3079.
- Zhang Y Y, Li Y, Liu Y C, et al. Effects of drip irrigation on post-anthesis dry matter accumulation and grain-filling characteristics of winter wheat under subsoiling tillage [J]. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(11): 3065-3079.
- [23] 谢亚萍, 闫志利, 李爱荣, 等. 施磷量对胡麻干物质积累及磷素利用效率的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(10): 1581-1587.
- Xie Y P, Yan Z L, Li A R, et al. Effect of phosphorus application rate on dry matter accumulation and phosphorus utilization efficiency in oil flax [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(10): 1581-1587.
- [24] 赵永伟, 李瑛, 高玉红, 等. 施磷水平对胡麻干物质积累和磷吸收与利用的影响[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(1): 15-22.
- Zhao Y W, Li Y, Gao Y H, et al. Effects of phosphate fertilizer level on dry matter accumulation, phosphorus absorption and utilization of flax [J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2021, 52(1): 15-22.
- [25] 吴兵, 谢亚萍, 牛俊义, 等. 施磷对胡麻生长率和磷吸收利用率及其产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 114-119.
- Wu B, Xie Y P, Niu J Y, et al. Effect of phosphorus fertilization on physiological parameters and yield of oilseed flax [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1): 114-119.
- [26] 牛小霞, 谢亚萍, 王斌, 等. 磷对胡麻叶和蒴果皮中叶绿素质量分数、籽粒产量和品质的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(8): 1189-1196.
- Niu X X, Xie Y P, Wang B, et al. Effect of phosphorus on chlorophyll mass fraction in leaves and capsule pericarps, seed yield and quality of oilseed flax [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2017, 26(8): 1189-1196.
- [27] 胡时友, 杨利, 彭成林, 等. 施用硼、硅肥并减施氮、磷、钾肥对油菜生长和产量的影响[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(19): 3624-3625.
- Hu S P, Yang L, Peng C L, et al. Effects of boron and silicon fertilizers with reducing the rates of N, P, K fertilizers on the growth and yield of rapeseed [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(19): 3624-3625.
- [28] 陈雷, 张枫叶, 吴继华, 等. 施硅对连作花生生长发育和产量的影响[J]. 花生学报, 2022, 51(3): 28-33.
- Chen L, Zhang F Y, Wu J H, et al. Effects of silicon application on growth and yield of peanut under continuous cropping condition [J]. Journal of Peanut Science, 2022, 51(3): 28-33.
- [29] 耿朝辉, 刘波, 刘国清, 等. 硅肥对夏大豆干物质积累及品质的影响[J]. 中国种业, 2014(6): 48-49.
- Geng Z H, Liu B, Liu G Q, et al. Effects of silicon fertilizer on dry matter accumulation and quality of summer soybeans [J]. China Seed Industry, 2014(6): 48-49.
- [30] 牟英辉, 陈志梁, 程艳波, 等. 硅肥对大豆农艺性状、产量及品质的影响[J]. 大豆科学, 2012, 31(4): 625-629.
- Mu Y H, Chen Z L, Cheng Y B, et al. Effects of silicon fertilization on agronomic traits, yield and quality of soybean [J]. Soybean Science, 2012, 31(4): 625-629.
- [31] 余恒志. 硅肥对甜芥倒伏和产量相关性状的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2018: 15-58.
- She H Z. Effects of silicon fertilizer on lodging and yield related factors in common buckwheat (*F. esculentum*) [D]. Chongqing: Southwest University, 2018: 15-58.
- [32] 苟振宇, 郭丽琢, 高玉红, 等. 钾硅肥配施对旱地胡麻干物质积累及籽粒灌浆的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(20): 17-25.

- Gou Z Y, Guo L Z, Gao Y H, et al. Effects of combined application of potassium and silicon fertilizer on dry matter accumulation and grain filling of oil flax[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(20): 17-25.
- [33] 任海, 付立东, 王宇, 等. 硅磷肥对水稻生长发育及产量品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(17): 57-61.
- Ren H, Fu L D, Wang Y, et al. Effects of silico-phosphate fertilizer on rice growth, development, yield, and quality[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(17): 57-61.
- [34] 林泳怡, 周燕飞, 邓金环, 等. 生物炭与磷添加促进赤红壤的硅形态转化和大豆植株硅吸收转运[J]. 生态环境学报, 2025, 34(5): 710-719.
- Lin Y Y, Zhou Y F, Deng J H, et al. Biochar combined with phosphorus promote silicon fraction transformation and Si absorption of soybean plant in latosolic red soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 34(5): 710-719.
- [35] 文泽东, 高玉红, 阮文浩, 等. 外源 NAA 和磷肥互作对胡麻生长发育及产量的调控效应[J]. 西北农业学报, 2024, 33(9): 1648-1658.
- Wen Z D, Gao Y H, Ruan W H, et al. Regulatory effect of exogenous NAA and phosphate fertilizer interaction on flax growth and yield[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2024, 33(9): 1648-1658.
- [36] 李振宙, 王炎, 吴兴慧, 等. 磷肥处理对苦荞灌浆特性及充实度的影响[J]. 上海农业学报, 2020, 36(5): 29-34.
- Li Z Z, Wang Y, Wu X H, et al. Effects of phosphate fertilizer on filling characteristics and plumpness of tartary buckwheat[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2020, 36(5): 29-34.
- [37] 林婷婷, 张永丽, 石玉, 等. 施磷量对小麦旗叶衰老和籽粒灌浆特性的影响[J]. 应用生态学报, 2025, 36(6): 1791-1802.
- Lin T T, Zhang Y L, Shi Y, et al. Effects of phosphorus fertilizer application rates on the characteristics of flag leaves senescence and grain filling of wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(6): 1791-1802.
- [38] 郝立冬, 贾森, 刘绍武, 等. 施用硅肥对田间春小麦花后源库关系的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 119-124.
- Hao L D, Jia S, Liu Z W, et al. Effect of application of silicon fertilizer to source-store relationship of spring wheat after flowering[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(6): 119-124.

(责任编辑:熊淑琪)



第一作者简介:徐舒萍, 2023年毕业于山东华宇工学院, 现为甘肃农业大学农学院农艺与种业专业 2024 级硕士生, 曾获甘肃农业大学 2025 年学业奖学金, 研究方向为作物栽培与生理生态。



通信作者简介:郭丽琢, 教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事旱地与绿洲农作制、作物栽培与生理生态方面的研究工作。主持和参加科研项目 20 余项, 参编教材、专著 10 部, 在核心期刊上发表论文 70 余篇。