



# 外源 NAA 和磷肥互作对胡麻生长发育及产量的调控效应

文泽东<sup>1</sup>,高玉红<sup>1,2</sup>,阮文浩<sup>2</sup>,崔政军<sup>2</sup>,王一帆<sup>2</sup>,剡斌<sup>2</sup>

(1. 甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室,兰州 730070;2. 甘肃农业大学 农学院,兰州 730070)

**摘要** 为探明磷素养分和外源萘乙酸(NAA)对旱地胡麻生长发育及产量形成的调控效应,采用田间二因素裂区试验设计,研究不同磷素水平(P0-不施磷、P1-67.5 kg/hm<sup>2</sup>、P2-135 kg/hm<sup>2</sup>)下于现蕾期和盛花期喷施不同浓度 NAA(N0-不喷激素、N1-20 mg/L、N2-40 mg/L)对胡麻生长发育、干物质积累量、籽粒灌浆速率及产量的影响。结果表明,在 P1 水平下,胡麻茎粗和干物质积累量均在喷施高浓度 NAA 时达最大。盛花期、青果期和成熟期胡麻茎粗,在 P1N2 处理下达最大,较 P0N0 处理高出 5.58%、8.65%和 8.27%;P1 水平下,青果期和成熟期胡麻干物质积累量均随 NAA 浓度的增加而增加,N1 和 N2 分别较 N0 高出 18.19%和 20.70%、9.92%和 11.45%;花后 20 d,胡麻籽粒灌浆速率在 P1 水平下随 NAA 浓度的增加而增加且达到峰值,N1 和 N2 分别较 N0 显著高出 27.45%和 31.76%,籽粒灌浆最大速率  $V_{max}$  表现为 P1N2 较其他处理显著高出 1.06%~12.16%;N2 浓度下,分茎数、每果粒数、产量在 P1 水平较其他处理分别高出 30.76%~70.00%、2.52%~3.30%、5.28%~6.87%,且 P1N2 处理下产量最高。综上表明,施磷 67.5 kg/hm<sup>2</sup> 配合喷施 40 mg/L 萘乙酸可提高胡麻株高、茎粗、干物质积累量,最大灌浆速率以及有效提前胡麻籽粒灌浆最大速率出现时间,从而提高胡麻籽粒产量,可作为旱作农业区适宜的胡麻高产栽培技术措施。

**关键词** 胡麻;外源 NAA;磷肥;灌浆速率;干物质;籽粒产量

磷素养分是作物生长发育和产量形成必不可少的三大营养元素之一,在作物体内参与许多重要的生理生化反应以及新陈代谢过程<sup>[1-4]</sup>。有研究表明,不同梯度磷肥基施均有效促进了作物植株地上部干物质积累,在营养生长期与生殖生长期分别提高了茎秆、叶片与蒴果及籽粒的干物质分配比例,有助于籽粒产量形成,从而获得较好的经济效益<sup>[5]</sup>。原亚琦等<sup>[6]</sup>研究发现,施磷 180 kg/hm<sup>2</sup> 可以显著提高小麦籽粒最大灌浆速率,提前最大灌浆速率时间,促进营养物质向籽粒转移,提高籽粒产量。但在实际生产中,磷肥当季利用率低下<sup>[7]</sup>,而农户为追求高产,大量施用磷肥,不仅增加生产成本,还造成土壤累积态磷含量持续升高,引发一系列生态环境安全问题<sup>[8-9]</sup>。因此,合理施用磷肥,提高磷肥利用效率,对农业可持续发展具有重要意义。

外源激素作为植物生长调节剂可参与植物生

长发育全过程,如种子萌发、茎的伸长、花的诱导和发育、种子和果实的生长等<sup>[10]</sup>。关于外源激素的研究表明,通过施用外源 GA<sub>3</sub> 增加胡麻每果粒数与千粒质量可补偿由于磷素养分不足所带来的负面影响<sup>[2]</sup>。喷施适宜浓度的萘乙酸可刺激玉米生长,促进植株对磷、钾等营养元素的吸收与转运,有利于籽粒营养物质的积累,促进早熟和增产<sup>[11]</sup>。大豆五叶期喷施萘乙酸,可增加植株叶片叶绿素含量,提高光合能力,缓解干旱胁迫,改善植株生长发育状况<sup>[12]</sup>。因此,探究外源萘乙酸与磷肥的协同互作作用,对作物生长发育及产量的形成有重要意义。

胡麻(*Linum usitatissimum* L.)是对磷敏感作物,合理施用磷肥是保证胡麻高产稳产的重要农艺措施之一。适宜的施磷量可以促进胡麻植株地上部各器官对磷素养分的吸收利用,提高干物质的积累速率,加快营养物质向籽粒的转运<sup>[5,13]</sup>。

收稿日期:2023-05-02 修回日期:2023-06-25

基金项目:甘肃省教育科技创新产业支撑计划(2021CYZC-38);国家现代农业产业技术体系(CARS-14-1-16);中央引导地方科技发展专项基金(ZCYD-2021-12);甘肃农业大学干旱生境作物学重点实验室主任基金(GSCS-2020-Z6);国家自然科学基金(31760363);甘肃农业大学伏羲杰出人才项目(Gaufx-02J05)。

第一作者:文泽东,男,硕士研究生,研究方向作物栽培与生态生理理论与技术。E-mail:2660358913@qq.com

通信作者:高玉红,女,教授,博士生导师,研究方向作物高产高效栽培理论与技术。E-mail:gaoyh@gsau.edu.cn

胡麻籽粒是光合产物与养分积累的库,大量的同化产物直接转运到籽粒当中,而适当的施磷量有效提高了转运速率,为胡麻的优质高产奠定了基础<sup>[13-14]</sup>。然而,随着施磷量的增加,胡麻产量、磷肥利用效率及干物质积累与转运速率均下降,致使胡麻品质低劣,经济效益差<sup>[5,14]</sup>。可见,前人关于磷肥施用量对作物产量及磷肥利用效率的研究颇多,但大多集中在单一的施肥制度,关于萘乙酸与磷肥互作对胡麻产量的影响鲜见报道。鉴于此,本研究在旱作农业区将外源 NAA 和施肥制度配合应用于胡麻生产中,探究不同施磷量和不同浓度 NAA 喷施对旱地胡麻生长发育及产量的调控效应,以期为试区胡麻可持续发展提供一定的理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验地位于甘肃省定西市农业科学院油料所,所在地(N 34°26',E 103°52')气候属于中温带干旱、半干旱区,试验地为梯田,土质为黄绵土地,农业种植为典型雨养农业,地貌为黄土高原丘陵沟壑区。平均海拔 2 050 m,年平均气温 6.3 °C,年均日照时数 2 453 h,无霜期 140 d,年均降雨量 400 mm 左右,蒸发量达 1 500 mm。0~30 cm 土

表 1 试验地土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

年份 Year	全氮/(g/kg) Total N	全磷/(g/kg) Total P	有机质/(g/kg) Organic matter	速效磷/(g/kg) Available P	速效钾/(g/kg) Available K	pH
2020	0.81	0.69	17.59	0.027	0.11	8.14

茎粗:在胡麻现蕾期、盛花期、青果期和成熟期,每个小区选择长势均匀植株 10 株,用游标卡尺测量茎粗。

干物质:在胡麻苗期、现蕾期、盛花期、青果期和成熟期,每个小区选择长势均匀的植株采样 10 株。采用烘干法将植株先在 105 °C 下杀青 30 min,再用 80 °C 烘至恒质量,测定胡麻植株的干物质质量。

1.3.2 籽粒灌浆速率 相似株的选取与标记:在胡麻现蕾期(NAA 喷施前)同一天选取开花程度、植株高度和长势长相整齐一致、无病虫害损伤的植株,挂牌标记定株;盛花期(NAA 喷施前)进行第二次定株,即只保留同一天开花的植株,解除其余植株的标签。

取样测定:选取花期和大小一致的主茎分枝,

壤基础肥力见表 1。

### 1.2 试验设计

采用二因素裂区试验设计,以‘轮选 2 号’胡麻品种为参试材料,种植密度为 750 万粒/hm<sup>2</sup>,保苗 420 万株/hm<sup>2</sup>。试验因素分别为供磷水平和激素浓度。供磷水平为主区<sup>[5,13,15]</sup>,设 3 个水平,分别为:P0-不施磷、P1-67.5 kg/hm<sup>2</sup>、P2-135 kg/hm<sup>2</sup>;萘乙酸(NAA)浓度为副区<sup>[16-17]</sup>,设 3 个水平,分别为:N0-0 mg/L、N1-20 mg/L、N2-40 mg/L,每个小区在现蕾期和盛花期各喷施 1 L,以喷施等量清水为对照。共 9 个处理,3 次重复,27 个小区。主区面积 18 m<sup>2</sup>(6 m×3 m);副区面积 6 m<sup>2</sup>(3 m×2 m);小区和重复间均间隔 80 cm,四周设 1 m 保护行。

施肥量为氮肥 150 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥 52.5 kg/hm<sup>2</sup>,氮、磷、钾肥全部做基肥施用。播深 3 cm,行距 20 cm。试验于 2020 年 4 月 9 日播种,8 月 19 日收获。其他管理方式同当地一般大田。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 株高、茎粗及干物质 株高:分别在胡麻苗期、现蕾期、盛花期、青果期和成熟期,每小区选择长势均匀植株 10 株,用直尺测量茎基部到生长点的距离。

自花后第 15 天开始取样,每 5 d 取样 1 次,直到成熟。每小区取 10 个植株主茎,每茎分别取相同部位 5 个蒴果,剥取籽粒共取 50 粒,测定籽粒的鲜质量后在 105 °C 下杀青 15 min,然后于 80 °C 恒温下烘 24 h 至质量恒定,称其质量。灌浆速率的计算公式如下:

灌浆速率(V)=每次测定籽粒的干物质增质量(g)/测定间隔的天数(d);平均灌浆速率(V<sub>mean</sub>)=籽粒干物质增质量(g)/灌浆间隔天数(d);最大灌浆速率(V<sub>max</sub>)=灌浆期测定的灌浆速率最大值;用 Logistic 拟合籽粒增质量动态:

$$Y = K / [1 + \text{EXP}(a - r * t)]$$

$$K = [N_0N_4(N_1 + N_2) - N_1N_2(N_0 + N_4)] / (N_0N_4 - N_1N_2), t_1 + t_2 = t_3 + t_4$$

其中,(t<sub>1</sub>,N<sub>0</sub>),(t<sub>4</sub>,N<sub>4</sub>)分别为实测数据序列

的始点、终点,(t2,N1)、(t3,N2)则为中间两点。

$$\text{估值: } r = \{ \ln(K/N_0 - 1) - \ln(K/N_1 - 1) \} / (t_2 - t_1)$$

$$\text{估值: } a = \ln(K/N_0 - 1) + r * t_1$$

1.3.3 产量及其性状指标 收获前每小区取样20株进行考种(株高、茎粗、分茎数、分枝数、有效果数、每果粒数、千粒质量)。测产时按小区单收单打,测定单位面积籽粒产量。

### 1.4 试验数据处理

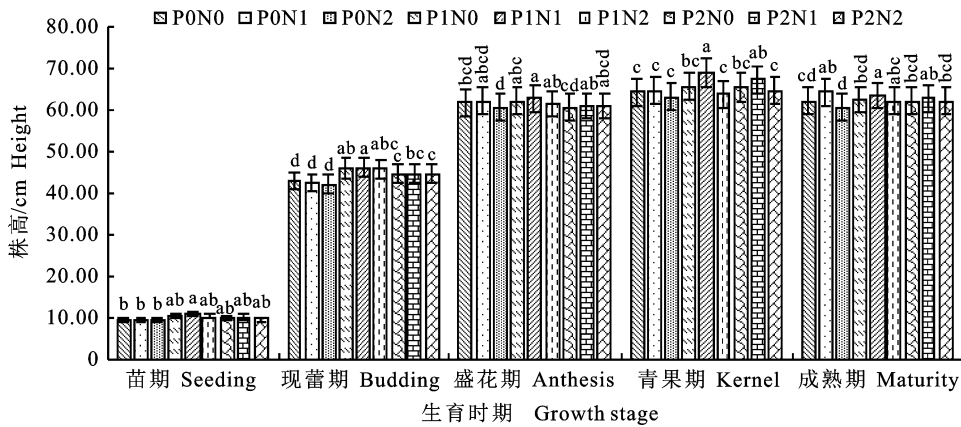
所得数据用 Excel 2017 进行整理汇总,用 SPSS 20.0 数据统计软件进行二因素裂区试验分析方法,图用 Origin 2019 绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源 NAA 和磷肥对胡麻株高的影响

由图 1 可知,胡麻株高随生育进程的推进呈

升高趋势,青果期达最大。喷施 NAA 前各磷素水平下株高除现蕾期外均无显著差异,施磷显著促进了胡麻现蕾期株高,P1(67.5 kg/hm<sup>2</sup>)和 P2(135 kg/hm<sup>2</sup>)分别较不施磷(P0)显著高出 7.05%和 3.79%。喷施 NAA 后,不施磷时成熟期株高表现为 N1 分别较 N0 和 N2 显著高出 3.21%和 5.94%;P1 水平配施 NAA 显著促进了青果期和成熟期株高,N1 较 N0 分别显著高出 5.33%和 1.28%;P2N1 处理亦显著促进了青果期株高。同一激素浓度下(N1),磷肥显著增加了胡麻盛花期至青果期株高,P1 分别较 P0 和 P2 显著高出 1.01%和 2.95%、6.80%和 2.61%。综上所述,施磷 P1-67.5 kg/hm<sup>2</sup> 配施 N1-20 mg/L 外源 NAA(P1N1)可显著增加胡麻株高,且二者对青果期株高交互效应达极显著水平。



不同小写字母表示差异显著(P<0.05),下同

Different lowercase letters indicate significant differences (P<0.05), the same below

图 1 不同施磷量和不同 NAA 浓度处理对胡麻株高的影响

Fig. 1 Effects of different phosphorus application and different NAA concentrations on plant height in flax

### 2.2 外源 NAA 和磷肥对胡麻茎粗的影响

由图 2 可知,胡麻全生育期茎粗均呈上升趋势,成熟期达最大。喷施 NAA 前,不同磷素水平下茎粗在各生育时期均表现为 P2>P1>P0,处理间无差异。喷施后,不施磷(P0)时,胡麻茎粗均随 NAA 浓度的增加而增加,青果期,N1 和 N2 分别较 N0 高出 3.17%和 5.57%,成熟期,分别高出 2.61%和 5.08%;盛花期至成熟期,P1 水平下,N1 和 N2 分别较 N0 高出 2.49%和 5.23%、5.22%和 5.50%、5.23%和 5.39%。P2 水平下,N1 和 N2 分别较 N0 则高出 3.24%和 4.15%、3.51%和 3.26%、3.70%和 3.41%。

从同一激素浓度不同磷素水平来看,不喷激素(N0)时,青果期至成熟期茎粗均随磷肥用量的增加而增加,P1 和 P2 分别较 P0 高出 2.98%和 3.24%、2.73%和 2.77%;N1 浓度下,盛花期至成熟期,P1 和 P2 分别较 P0 高出 2.32%和 3.24%、5.02%和 3.58%、5.36%和 3.86%;N2 浓度下,盛花期,P1 和 P2 分别较 P0 高出 4.11%和 3.21%。综合来看,胡麻茎粗因施磷量和 NAA 喷施浓度的不同而存在差异。盛花期、青果期和成熟期胡麻茎粗均在 P1N2 处理下最大,较 P0N0 分别高出 5.58%、8.65%和 8.27%,为胡麻生物学产量的增加奠定基础。

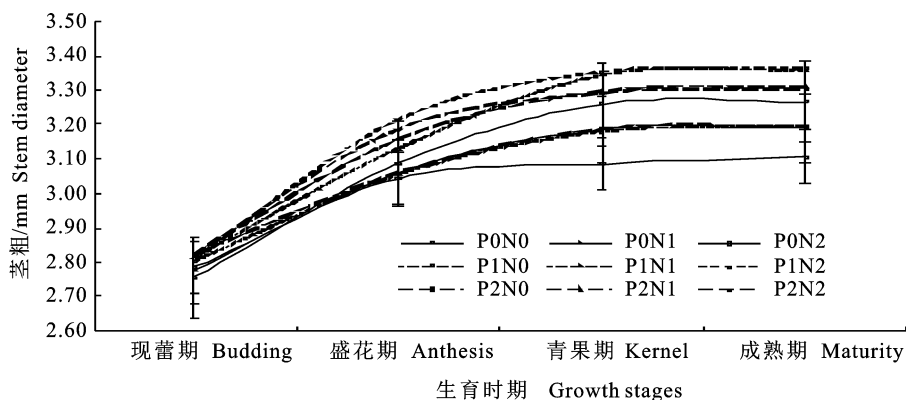


图 2 不同施磷量和不同 NAA 浓度处理对胡麻茎粗的影响

Fig. 2 Effect of different phosphorus application and different NAA concentration on stem diameter in flax

### 2.3 外源 NAA 和磷肥对胡麻干物质积累量的影响

由图 3 可知,胡麻全生育期干物质积累量青果期达最大。喷施 NAA 前,施磷促进现蕾期与盛花期干物质积累量。现蕾期,P1 较 P2 高出 2.60%;盛花期,P1 较 P0 高出 2.61%。喷施 NAA 后,不施磷时,植株干物质积累量在青果期和成熟期为 N2 较 N0 和 N1 分别高出 9.68%和 3.88%、6.30%和 3.92%;P1 水平下,青果期和成熟期均随 NAA 浓度的增加而增加,N1 和 N2 分别较 N0 高出 18.19%和 20.70%、9.92%和 11.45%;P2 水平下,盛花期至成熟期,N1 和 N2 分别较 N0 高出 11.87%和 10.09%、16.88%和 8.99%、6.59%和 3.61%。

从同一激素浓度来看,不喷激素时,植株干物

质积累量在青果期至成熟期为 P1 和 P2 分别较 P0 分别高出 4.59%和 4.92%、3.65%和 3.21%。N1 浓度下,盛花期至成熟期,P1 较 P0 分别高出 4.70%、17.06%和 11.38%,P2 较 P0 分别高出 9.85%、16.14%和 7.54%。N2 浓度下,青果期和成熟期,P1 较 P0 分别高出 15.09%和 8.66%;盛花期和青果期,P2 较 P0 分别高出 5.93%和 4.25%。

综合比较发现,P1N2 处理可促进胡麻干物质累积,青果期和成熟期,P1N2 较 P0N0 分别高出 26.23%和 15.52%。说明施用 67.5 kg/hm<sup>2</sup> 配合喷施 40 mg/L 高浓度 NAA(P1N2)可促进植株生长,提高干物质积累量,为胡麻高产奠定了良好的基础。

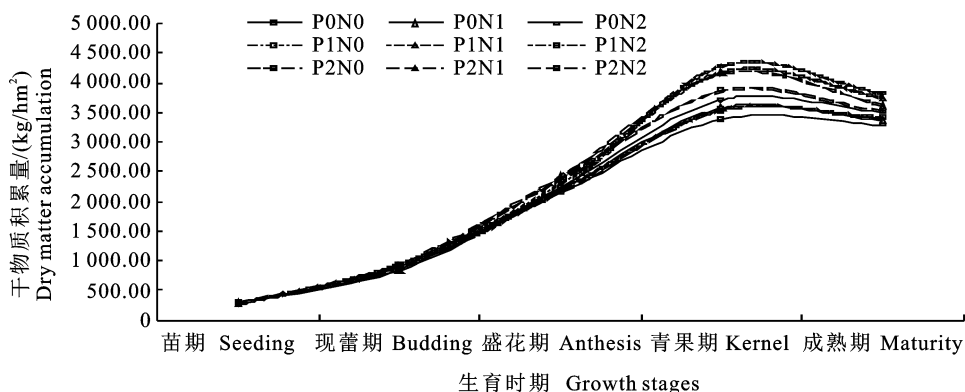


图 3 磷肥与外源 NAA 互作对胡麻干物质积累量的影响

Fig. 3 Effects of interaction between phosphate fertilizer and exogenous NAA on dry matter accumulation in flax

### 2.4 外源 NAA 和磷肥对胡麻籽粒灌浆速率的影响

由图 4 可以看出,随着花后天数推进,胡麻籽粒灌浆速率变化均呈现先升后降趋势,且在花后 20 d 籽粒灌浆速率达到峰值。不施磷(P0)时,籽粒灌浆速率在花后第 15 d 和 20 d 表现为高浓度

激素(N2) > 低浓度激素(N1) > 不喷激素(N0)。P1 和 P2 水平下,花后 20 d,N1 和 N2 分别较 N0 显著高出 27.45%和 31.76%、24.89%和 3.43%;从同一激素浓度看,花后 20 d,不喷激素(N0)时,P1 分别较 P0 和 P2 显著高出 14.86%和

9.44%, N1 与 N2 浓度下, P1 分别较 P0 和 P2 显著高出 38.89% 和 11.68%、33.33% 和 39.41%。综合来看, 花后 20 d, 施用 67.5 kg/hm<sup>2</sup> 搭配 40

mg/L NAA(P1N2) 处理下胡麻籽粒灌浆速率达到最大, 促进营养物质向籽粒转移, 利于提高籽粒产量。

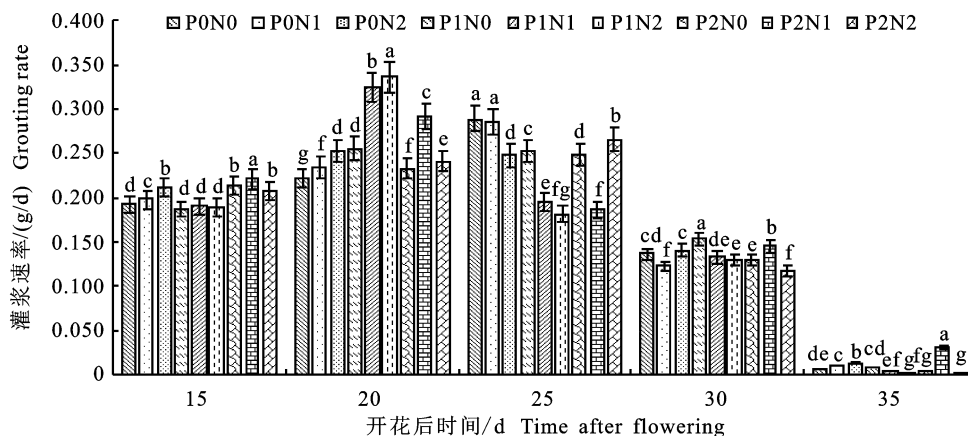


图 4 磷肥与外源 NAA 交互对胡麻籽粒灌浆速率的影响

Fig. 4 Effects of interaction between phosphate fertilizer and exogenous NAA on grain filling rate in flax

由表 2 可知, 施磷量与外源 NAA 喷施浓度均对胡麻花后 15~25 d 籽粒灌浆的影响效应达极显著水平, 施磷量与外源 NAA 交互对胡麻花后 15~25 d 籽粒灌浆效应达极显著水平, 对花后 30 d 影响显著, 对花后 35 d 无显著影响。

表 2 外源激素与磷肥交互对胡麻籽粒灌浆的效应分析

Table 2 Effect analysis of interaction between exogenous hormones and phosphate fertilizer on grain filling in flax

处理 Treatment	15 d	20 d	25 d	30 d	35 d
P	**	**	**	NS	*
NAA	**	**	**	*	NS
P×NAA	**	**	**	*	NS

注: \* 表示在 0.05 水平下的显著性, \*\* 表示 0.01 水平下的显著性, NS 表示无显著差异。

Note: \* Significant at the 0.05 level of probability, \*\* Significant at the 0.01 level of probability, NS indicate no significance.

2.5 胡麻籽粒灌浆 Logistic 方程

由表 3 可知, 不同 P 肥水平和外源 NAA 处理下胡麻籽粒灌浆(Y) 依据开花后天数(t) 的动态过程均可用 Logistic 方程  $Y=K/[1+EXP(a-r * t)]$  加以回归描述, 决定系数( $R^2 \geq 0.985$ )。施磷量和 NAA 喷施浓度对籽粒灌浆最大增长速率( $V_{max}$ )、平均增长速率( $V_{mean}$ )及籽粒灌浆最大增

表 3 磷肥与外源 NAA 交互对胡麻籽粒灌浆 Logistic 模型

Table 3 Interaction effect of phosphorus fertilizer and exogenous NAA on flax grain filling logistic model

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	决定系数 $R^2$	最大增长速率出现时间/d $T_{max}$	最大增长速率/(g/d) $V_{max}$	平均增长速率/(g/d) $V_{mean}$
P0 N0	$Y=7.007/(1+e^{3.091-0.146t})$	0.985	21.22 a	0.255 c	0.169 abc
N1	$Y=7.093/(1+e^{3.063-0.148t})$	0.990	20.74 abc	0.262 abc	0.170 abc
N2	$Y=6.913/(1+e^{3.205-0.154t})$	0.993	20.81 ab	0.266 abc	0.173 ab
P1 N0	$Y=7.093/(1+e^{3.075-0.146t})$	0.991	21.01 ab	0.259 bc	0.171 abc
N1	$Y=6.907/(1+e^{3.274-0.164t})$	0.991	19.96 c	0.283 ab	0.170 abc
N2	$Y=6.747/(1+e^{3.381-0.170t})$	0.991	19.93 c	0.286 a	0.167 bc
P2 N0	$Y=6.840/(1+e^{3.077-0.151t})$	0.993	20.33 bc	0.259 bc	0.166 c
N1	$Y=6.993/(1+e^{3.159-0.156t})$	0.994	20.29 bc	0.272 abc	0.175 a
N2	$Y=6.853/(1+e^{3.163-0.156t})$	0.993	20.32 bc	0.267 abc	0.166 bc

注: 同行数字后不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters following the same rows of numbers indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).

长速率出现时间( $T_{max}$ )影响不同。不施磷(P0)时,  $T_{max}$ 、 $V_{max}$ 、 $V_{mean}$  在不同 NAA 喷施浓度下均无显著性差异;P1 水平下,  $T_{max}$  表现为 N0 较 N1 和 N2 分别显著高出 5.26% 和 5.42%,  $V_{max}$  表现为 N1 和 N2 较 N0 分别显著高出 9.26% 和 10.42%;P2 水平下,  $V_{mean}$  表现为 N1 较 N0 和 N2 均显著高出 5.42%。从同一激素浓度不同磷素水平来看,不喷激素(N0)时,  $T_{max}$  表现为 P0 较 P2 显著高出 4.38%;N1 浓度下,  $T_{max}$ 、 $V_{max}$  和  $V_{mean}$  在不同处理下无显著差异;N2 浓度下,  $T_{max}$  表现为 P0 较 P1 显著高出 4.42%。综合来看,磷肥对胡麻籽粒灌浆最大增长速率出现时间与平均增长速率影响较小,高浓度激素对籽粒灌浆最大速率影响显著,  $V_{max}$  表现为 P1N2 较其他处理显著高出 1.06%~12.16%。说明,不同 P 肥水平

下喷施高浓度 NAA 能有效提高胡麻籽粒灌浆最大速率,且在 P1N2 最大增长速率最大,为籽粒质量的增加奠定了良好基础。

## 2.6 外源 NAA 和磷肥对胡麻籽粒产量及其构成因子的影响

由表 4 和表 5 可知,施磷量与外源 NAA 对胡麻产量及其构成因子具有显著影响。不施磷(P0)时, N2 显著增加了分枝数、每果粒数及产量,较其他处理分别显著高出 11.58%~12.97%、5.92%~8.25%及 4.38%~7.38%;P1 水平下,分枝数、每果粒数、产量表现为 N2 较其他处理分别显著高出 1.64%~4.20%、0.74%~4.23%、2.16%~8.96%;N1 显著增加了 P2 水平下每果粒数与产量,较 N0 分别显著高出 3.35%和 5.49%。

表 4 不同处理下胡麻籽粒产量及其构成因素

Table 4 Grain yield and its components in flax under different treatments

处理 Treatment	分茎数 Number of stems	分枝数 Number of branches	有效蒴果数 Pod number per plant	每果粒数 Seed number per pod	千粒质量/g 1 000-grain mass	产量/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Grain yield	
P0	N0	0.17±0.05 c	5.70±0.08 f	12.40±0.24 c	7.27±0.21 d	6.38±0.03 d	1 355±20.78 g
	N1	0.13±0.05 c	5.63±0.17 f	12.70±0.98 c	7.43±0.05 d	6.52±0.05 ab	1 394±15.71 f
	N2	0.10±0.08 c	6.36±0.09 bc	13.17±1.04 abc	7.87±0.09 bc	6.42±0.06 bcd	1 455±7.85 de
P1	N0	0.30±0.00 bc	6.10±0.16 de	12.83±0.05 bc	7.80±0.08 c	6.50±0.04 abc	1 427±7.85 ef
	N1	0.43±0.05 a	5.95±0.04 e	14.13±0.41 a	8.07±0.05 ab	6.51±0.08 ab	1 522±20.78 b
	N2	0.17±0.05 c	6.20±0.08 cd	13.95±0.12 ab	8.13±0.05 a	6.40±0.04 cd	1 555±20.78 a
P2	N0	0.13±0.05 c	6.43±0.09 b	13.07±0.25 abc	7.77±0.05 c	6.39±0.03 d	1 422±15.71 ef
	N1	0.10±0.08 c	5.93±0.09 e	13.53±0.12 abc	8.03±0.12 ab	6.58±0.01 a	1 500±13.61 bc
	N2	0.13±0.05 c	6.97±0.05 a	14.10±0.33 a	7.93±0.05 abc	6.36±0.07 d	1 477±7.86 cd

注:同列数字后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters following the same column of numbers indicate significant differences ( $P<0.05$ ).

表 5 外源激素与磷肥互作对胡麻籽粒产量及其构成因素相关性分析

Table 5 Correlation analysis of interaction between exogenous hormones and phosphate fertilizer on grain yield and components in flax

处理 Treatment	分茎数 Number of stems	分枝数 Number of branches	有效蒴果数 Pod number per plant	每果粒数 Seed number per pod	千粒质量/g 1 000-grain mass	产量/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Grain yield
P	**	**	NS	**	NS	**
NAA	NS	**	**	**	**	**
P×NAA	*	**	NS	*	NS	*

注: \* 表示在 0.05 水平下的显著性, \*\* 表示 0.01 水平下的显著性, NS 表示无显著差异。

Note: \* indicates significance at the 0.05 level of probability, \*\* indicates significance at the 0.01 level of probability, NS indicates no significance.

从同一激素浓度看,施磷 67.5 kg/hm<sup>2</sup> 对胡麻产量及其构成因子影响较大。不喷激素时

(N0),每果粒数和籽粒产量在 P1 处理下较 P0 显著高出 7.29%和 5.31%;N1 浓度下, P1 水平分

茎数、有效蒴果数较其他处理分别高出 230.77%~330.00%、4.43%~11.26%;N<sub>2</sub> 浓度下,分茎数、每果粒数、产量在 P<sub>1</sub> 水平较其他处理分别高出 30.76%~70.00%、2.52%~3.30%、5.28%~6.87%。

结合表 5 可知,单株有效蒴果数和千粒质量受外源 NAA 影响程度大于磷肥,分茎数则相反,施磷量与外源 NAA 对分枝数、每果粒数和籽粒产量的交互效应均达极显著水平,且 P<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 处理下产量最高。

表 6 外源激素与磷肥互作对胡麻农艺性状相关性分析

Table 6 Correlation analysis of exogenous hormones and phosphate fertilizer interaction on agricultural traits in flax

处理 Treatment		苗期 Seeding	现蕾期 Budding	盛花期 Anthesis	青果期 Kernel	成熟期 Maturity
株高 Height	P	NS	* *	*	NS	* *
	NAA	—	—	*	* *	* *
	P×NAA	—	—	NS	* *	NS
茎粗 Thick	P	—	NS	*	* *	* *
	NAA	—	—	* *	* *	* *
	P×NAA	—	—	* *	* *	* *
干物质 Dry matter	P	NS	*	NS	* *	*
	NAA	—	—	* *	* *	*
	P×NAA	—	—	NS	* *	*

注: \* 表示在 0.05 水平下的显著性, \* \* 表示 0.01 水平下的显著性, NS 表示无显著差异。

Note: \* indicates significance at the 0.05 level of probability, \* \* indicates significance at the 0.01 level of probability, NS indicates no significance.

### 3 讨论与结论

磷作为植物生长发育所必需的营养元素,在干物质积累与分配和籽粒产量形成中起着重要作用<sup>[18-19]</sup>。适宜的磷肥施用量可有效促进作物对养分的吸收利用,协调光合产物的分配比例,加快营养物质向籽粒的转运,进而提高产量<sup>[13-14]</sup>。而过高的磷肥施用量,则会抑制作物生长发育,不利于产量形成<sup>[20]</sup>。本试验表明,不同磷肥用量与现蕾期和盛花期喷施不同浓度 NAA 均可显著增加胡麻株高与茎粗,为增加其生物学产量奠定了基础,其中 P<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 处理效果最佳。施磷有效提高了胡麻地上部干物质积累量,且全生育期随磷肥用量的增加呈先升高后降低趋势。说明磷肥施用量具有一定的阈值,并非越多越好,这与前人的研究结果一致<sup>[21-22]</sup>。进入生殖生长阶段后,适宜的施磷量提高了最大籽粒灌浆速率,每果粒质量与千粒质量增加,且在 P<sub>1</sub>(67.5 kg/hm<sup>2</sup>) 处理下干物质积累量显著增加,为胡麻高产奠定了良好的基础。

### 2.7 外源 NAA 与磷肥互作对胡麻农艺性状的效应分析

由表 6 可知,磷肥对胡麻盛花期株高、茎粗影响显著,外源 NAA 对胡麻盛花期株高、茎粗、干物质积累量影响显著;青果期除磷肥对胡麻株高无显著影响外,其他处理对胡麻株高、茎粗、干物质积累量的影响均达极显著水平;成熟期除 P×NAA 对株高无显著交互效应外,其他处理对胡麻株高、茎粗均达极显著水平,磷肥、外源 NAA、P×NAA 对干物质积累量的影响均达显著水平。

外源激素具有促进光合作用,提高养分吸收与利用效率,促进光合产物在作物各器官中的积累与转运<sup>[16,23]</sup>,作物光合能力对 NAA 的响应因养分供应不同而存在差异<sup>[24]</sup>。本试验中施 67.5 kg/hm<sup>2</sup> 花后干物质积累量随 NAA 喷施浓度的增加而增大,施 135 kg/hm<sup>2</sup> 配合喷施 20 mg/L 的 NAA 增加了干物质积累量及其对籽粒的贡献率,千粒质量显著增加。这可能是由于喷施外源 NAA 显著促进了胡麻生长发育,提高了叶片叶绿素含量与光合效率,刺激光合产物的积累,加快了胡麻光合同化物的积累与分配<sup>[16]</sup>。同时,喷施适宜浓度的外源 NAA 改变了磷素养分与同化产物在植株体内的运输方向及分布,打破了植株原有的库源关系,加强了以籽粒为库的极性运输,削弱了茎秆与叶片对养分和光合产物的消耗,从而促进胡麻籽粒产量的增加<sup>[25-26]</sup>。

灌浆过程是影响籽粒产量形成的重要生理过程,而 Logistic 方程能够更好地解释作物籽粒产量形成的动态变化规律,从而揭示磷肥和外源

NAA 对胡麻籽粒灌浆速率的互作效应。本研究表明,施磷量与外源 NAA 喷施浓度对胡麻籽粒灌浆特性产生显著影响,籽粒灌浆最大增长速率出现时间在 P0N0 处理下有效提前,最大增长速率在 P1N2 处理下显著增大,平均增长速率无显著变化,分析其原因可能是施磷延缓了胡麻叶片的衰老,延长光合时间,增加灌浆活跃天数<sup>[27]</sup>,而高浓度外源 NAA 的喷施提高了净光合速率,降低光呼吸代谢,从而增大灌浆速率<sup>[28]</sup>。同时 NAA 作为一种植物生长调节剂,可通过影响内源激素与蔗糖磷酸合成酶、蔗糖合成酶等的活性,进而调节养分的积累与分配,最终表现为籽粒干物质积累量的增加<sup>[11]</sup>。

作物产量形成是由各产量构成因素共同决定的。不合理的施肥制度无法满足胡麻对养分的需求,从而出现减产现象,主要表现为有效果数及千粒质量下降<sup>[29]</sup>。有研究表明,通过施用外源 GA<sub>3</sub> 增加每果粒数与千粒质量可补偿由于磷素养分不足所带来的负面影响<sup>[2]</sup>。本试验中,P0 处理下(除 P0N2)的有效果数、每果粒数与千粒质量均低于施磷处理,而喷施高浓度外源 NAA 则可有效补偿由于磷肥供应不足所带来的抑制作用,与前人研究结果一致<sup>[2]</sup>。合理的施肥制度与外源激素的互作是保障作物增产增收的基础。侯云鹏等<sup>[27]</sup>等研究发现,施磷可通过提高玉米穗粒质量与百粒质量,进而显著提高产量,在玉米苗期叶面喷施 10 mg/L 萘乙酸也可有效提高穗粒质量与百粒质量及产量<sup>[30]</sup>。本试验中,施用 67.5 kg/hm<sup>2</sup> 显著增加了胡麻有效果数、每果粒数及千粒质量,NAA 喷施浓度在 40 mg/L 时有有效果数及每果粒数增加显著,且二者对分枝数与每果粒数的互作效应显著,最终表现为 P1N2 处理下胡麻产量最高。通过胡麻籽粒产量与其产量构成因子的相关性分析也进一步证实了胡麻增产的原因主要在于磷肥与外源 NAA 促进了胡麻产量要素的协同提升。

综上所述,磷肥和 NAA 互作对旱地胡麻干物质积累、籽粒灌浆速率及籽粒产量的形成影响显著。通过不同梯度磷肥基施配合喷施不同浓度 NAA 可增大胡麻株高与茎粗,显著提高了干物质积累速率与籽粒灌浆速率,促进胡麻有效果数、每果粒数与千粒质量的增加,为试区胡麻高产奠定基础。其中施磷 67.5 kg/hm<sup>2</sup> 与喷施 40 mg/L NAA 处理下产量达最大。目前关于

P×NAA 互作效应的增产机理还不够深入,二者对胡麻籽粒产量形成过程中生理特性的调控机制尚不明确,有待进一步深入研究。

#### 参考文献 Reference:

- [1] 杨紫杭,张林,冯固.土壤微生物在枸橼性和聚合态磷肥活化利用中的作用[J].植物营养与肥料学报,2022,28(4):654-663.  
YANG Z H,ZHANG L,FENG G. Role of soil microorganisms in the activation and utilization of lycium-soluble and polymerized phosphate fertilizers[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*,2022,28(4):654-663.
- [2] 曹智,高玉红,牛俊义,等.外源赤霉素对不同磷素水平下胡麻产量形成的调控效应研究[J].中国油料作物学报,2022,44(2):399-409.  
CAO ZH,GAO Y H,NIU J Y, et al. Regulatory effect of exogenous gibberellin on the formation of flax yield at different phosphorus levels[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*,2022,44(2):399-409.
- [3] 赵家煦,张一鹤,韩晓增,等.东北黑土区长期不同磷肥施用量对大豆生长及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):116-121.  
ZHAO J X,ZHANG Y H,HAN X Z, et al. Effects of long-term different phosphate fertilizer application rates on soybean growth and yield in black soil area of Northeast China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2018,36(5):116-121.
- [4] 闫金垚,宋毅,陆志峰,等.磷肥用量对油菜籽产量及品质的影响[J].作物学报,2023,49(6):1668-1677.  
YAN J Y,SONG Y,LU ZH F, et al. Effects of phosphate fertilizer dosage on rapeseed yield and quality [J]. *Acta Crops Sinica*,2023,49(6):1668-1677.
- [5] 谢亚萍,同志利,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 ZH L,LI A R, et al. Effects of phosphorus application rate on dry matter accumulation and phosphorus use efficiency of flax[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*,2013,27(10):1581-1587.
- [6] 原亚琦,孙敏,林文,等.底墒和磷肥对旱地小麦籽粒灌浆特性及产量的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(1):57-67.  
YUAN Y Q,SUN M,LIN W, et al. Effects of bottom moisture and phosphate fertilizer on grain filling characteristics and yield of dryland wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2020,28(1):57-67.
- [7] 张锦滨,王晓云,孟圆,等.不同磷肥用量对水稻产量效益、磷肥利用率及土壤养分的影响[J].中国农学通报,2021,37(32):96-101.  
ZHANG J B,WANG X Y,MENG Y, et al. Effects of different phosphate fertilizer dosage on rice yield efficiency,



- phosphate fertilizer utilization rate and soil nutrient content [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(32): 96-101.
- [8] 胡怡凡, 刘佳坪, 王子楷, 等. 轮作提高土壤磷生物有效性改善后茬作物磷素营养[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1305-1310.
- HU Y F, LIU J P, WANG Z K, *et al.* Crop rotation improves soil phosphorus bioavailability and improves phosphorus nutrition in post-stubble crops[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2021, 27(8): 1305-1310.
- [9] 区惠平, 周柳强, 黄金生, 等. 赤红壤蔗区 11 年连续增量施磷下磷素演变及其对甘蔗产量与磷流失的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(22): 4623-4633.
- QU H P, ZHOU L Q, HUANG J SH, *et al.* Evolution of phosphorus under 11-year continuous incremental phosphorus application in red loam cane area and its effect on sugarcane yield and phosphorus loss[J]. *China Agriculture Science*, 2020, 53(22): 4623-4633.
- [10] OLIVEIRA LEANDRO-SILVA-DE, BRONDANI GILVANO-EBLING, MOLINARI LETÍCIA-VAZ, *et al.* Optimal cytokinin/auxin balance for indirect shoot organogenesis of *Eucalyptus cloeziana* and production of ex vitro rooted micro-cuttings[J]. *Journal of Forestry Research*, 2022, 33(5): 1573-1584.
- [11] 王志远, 罗 裳, 韩永亮, 等. 萘乙酸和邻氨甲酰苯甲酸对玉米花后养分吸收及转运的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(1): 127-137.
- WANG ZH Y, LUO SH, HAN Y L, *et al.* Effects of naphthaleneacetic acid and o-carbamoylbenzoic acid on nutrient uptake and transport after maize flowering[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2022, 28(1): 127-137.
- [12] 梁 鹏, 邢兴华, 周 琴, 等.  $\alpha$ -萘乙酸对干旱和复水处理下大豆幼苗生长和光合作用的影响[J]. *大豆科学*, 2011, 30(1): 50-55.
- LIANG P, XING X H, ZHOU Q, *et al.* Effects of  $\alpha$ -naphthaleneacetic acid on growth and photosynthesis of soybean seedlings under drought and rehydration treatment [J]. *Soybean Science*, 2011, 30(1): 50-55.
- [13] 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 ZH L, *et al.* Effects of different phosphorus levels on nutrient transport and distribution of flax phosphorus and its phosphate fertilizer efficiency [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2014, 23(1): 158-166.
- [14] 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 combined nitrogen and phosphorus application on dry matter accumulation and grain yield of flax in dry land[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(5): 996-1004.
- [15] 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.* Effects of phosphorus application on flax growth rate, phosphorus uptake and utilization rate and yield[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(1): 114-119.
- [16] 曹 莹, 张贺楠, 孟 军, 等. 木醋液与萘乙酸钠复合作用对花生光合特性及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 185-191, 210.
- CAO Y, ZHANG H N, MENG J, *et al.* Effects of composite interaction of wood vinegar and naphthaleneacetate on photosynthetic characteristics and yield of peanuts[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1): 185-191, 210.
- [17] 时 蕾, 袁婷婷, 许中秋, 等. 萘乙酸对太子参光合特性的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2021, 43(2): 253-260.
- SHI L, YUAN T T, XU ZH Q, *et al.* Effect of naphthaleneacetic acid on photosynthetic properties of Prince ginseng[J]. *Journal of Jiangxi Agricultural University*, 2021, 43(2): 253-260.
- [18] 陈远学, 李汉邯, 周 涛, 等. 施磷对间套作玉米叶面积指数、干物质积累分配及磷肥利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2799-2806.
- CHEN Y X, LI H H, ZHOU T, *et al.* Effects of phosphorus application on leaf area index, dry matter accumulation allocation and phosphate fertilizer use efficiency of intercropping maize [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(10): 2799-2806.
- [19] 王国兴, 徐福利, 王渭玲, 等. 氮磷钾及有机肥对马铃薯生长发育和干物质积累的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(3): 106-111.
- WANG G X, XU F L, WANG W L, *et al.* Effects of nitrogen, phosphorus, potassium and organic fertilizer on growth and dry matter accumulation of potato[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(3): 106-111.
- [20] 索炎炎, 张 翔, 司贤宗, 等. 不同施锌方式下外源磷对花生根系形态、叶绿素含量及产量的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2021, 43(4): 664-672.
- SUO Y Y, ZHANG X, SI X Z, *et al.* Effects of exogenous phosphorus on root morphology, chlorophyll content and yield of peanut under different zinc application methods [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2021, 43(4): 664-672.
- [21] 张 勉, 孙 敏, 高志强, 等. 施磷对旱地小麦土壤水分、干物质累积和转运的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(1): 98-103.
- ZHANG M, SUN M, GAO ZH Q, *et al.* Effects of phosphorus application on soil moisture, dry matter accumulation and transport of dryland wheat[J]. *Journal of Trit-*

- iceae Crops*, 2016, 36(1):98-103.
- [22] 岳俊芹,李向东,邵运辉,等. 氮钾固定配施下施磷量对小麦光合、干物质转运及产量形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(4):473-481.  
YUE J Q, LI X D, SHAO Y H, *et al.* Effects of phosphorus application rate on photosynthesis, dry matter transport and yield formation of wheat under fixed nitrogen and potassium application[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(4):473-481.
- [23] 李健忠,薛立新,朱金峰,等. 赤霉素和萘乙酸互作对烤烟生长、碳氮代谢及烟叶品质的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(9):1473-1481.  
LI J ZH, XUE L X, ZHU J F, *et al.* Effects of gibberellin and naphthaleneacetic acid on growth, carbon and nitrogen metabolism and tobacco leaf quality of flue-cured tobacco[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(9):1473-1481.
- [24] 郭允娜,李衍素,贺超兴,等. 亚适宜温光下萘乙酸对番茄幼苗生长与生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(10):3053-3058.  
GUO Y N, LI Y S, HE CH X, *et al.* Effects of sodium naphthalene acetate on growth and physiological characteristics of tomato seedlings under subsuitable temperature and light[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10):3053-3058.
- [25] 代晓燕,苏以荣,陈风雷,等. 顶端调控措施对烤烟生长、内源激素及氮钾累积的影响[J]. 中国农学通报, 2008(8):234-240.  
DAI X Y, SU Y R, CHEN F L, *et al.* Effects of apical regulatory measures on flue-cured tobacco growth, endogenous hormones and nitrogen and potassium accumulation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008(8):234-240.
- [26] 彭正萍,门明新,马峙英,等. 去穗和萘乙酸涂切口对小麦体内光合产物和磷分配的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(9):1563-1566.  
PENG ZH P, MEN M X, MA ZH Y, *et al.* Effects of depanicle and naphthaleneacetic acid coating incision on photosynthetic products and phosphorus fractionation in wheat [J]. *Chinese Journal of Crops*, 2007, 33(9):1563-1566.
- [27] 侯云鹏,孔丽丽,刘志全,等. 覆膜滴灌条件下磷肥后移对玉米物质生产与磷素吸收利用的调控效应[J]. 玉米科学, 2019, 27(6):138-144.  
HOU Y P, KONG L L, LIU ZH Q, *et al.* Regulatory effect of phosphate fertilizer backshift on material production and phosphorus uptake and utilization in maize under mulching drip irrigation[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(6):138-144.
- [28] 邢兴华,徐泽俊,齐玉军,等. 外源  $\alpha$ -萘乙酸对花期干旱大豆碳代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4):1215-1224.  
XING X H, XU Z J, QI Y J, *et al.* Effects of exogenous  $\alpha$ -naphthaleneacetic acid on carbon metabolism of arid soybean during flowering [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(4):1215-1224.
- [29] 李政升,麻丽娟,董宏伟,等. 钾肥用量对不同品种旱地胡麻抗倒伏能力及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(23):69-76.  
LI ZH SH, MA L J, DONG H W, *et al.* Effects of potassium fertilizer dosage on lodging resistance and yield of different cultivars of dryland flax[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(23):69-76.
- [30] 聂乐兴,姜兴印,吴淑华,等. 四种植物生长调节剂对高产玉米生理效应及产量影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2010, 41(2):216-220.  
NIE L X, JIANG X Y, WU SH H, *et al.* Effects of four plant growth regulators on physiological effects and yield of high-yield maize[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2010, 41(2):216-220.

## Regulatory Effect of Exogenous NAA and Phosphate Fertilizer Interaction on Flax Growth and Yield

WEN Zedong<sup>1</sup>, GAO Yuhong<sup>1,2</sup>, RUAN Wenhao<sup>2</sup>, CUI Zhengjun<sup>2</sup>,  
WANG Yifan<sup>2</sup> and YAN Bin<sup>2</sup>

(1. Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop, Lanzhou 730070, China;

2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract** To investigate the regulatory effects of phosphorus nutrients and exogenous naphthaleneacetic acid (NAA) on the flax growth, development and yield formation in dryland conditions, we explored the effects of spraying different concentrations of NAA (N0: hormone, N1: 20 mg/L, N2: 40 mg/L) at different phosphorus levels (P0: no phosphorus application, P1: 67.5 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/hm<sup>2</sup>, P2: 135 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/hm<sup>2</sup>) during the budding and anthesis stages on flax growth and development, dry matter ac-

cumulation, grain filling rate, and yield. The results showed that at the P1 level, the stem diameter and dry matter accumulation of flax reached their maximum when spraying high concentrations of NAA. The stem diameter of flax during its anthesis, kernel and maturity stages was the largest under P1N2 treatment, which was 5.58%, 8.65%, and 8.27% higher than that under P0N0 treatment, respectively; Specifically, N1 and N2 treatments resulted in dry matter accumulations that were 18.19% and 20.70% higher (respectively) during the kernel stage and 9.92% and 11.45% higher (respectively) during the maturity stage compared to the N0 treatment. At 20 days after flowering, the filling rate of seeds increased at the P1 level and reached a peak with the increase of NAA concentration. Specifically, N1 and N2 treatments were significantly higher than N0 by 27.45% and 31.76%, respectively. The maximum grain filling rate ( $V_{max}$ ) indicated that P1N2 was significantly higher by 1.06% to 12.16% compared to other treatments; Under N2 concentration, the number of stems, grains per fruit, and yield were 30.76%–70.00%, 2.52%–3.30%, and 5.28%–6.87% higher than other treatments at the P1 level respectively, and the yield was the highest under P1N2 treatment. In summary, the application of 67.5 kg  $P_2O_5/hm^2$  of phosphorus combined with the application of 40 mg/L of naphthoic acid can increase the height, stem diameter, dry matter accumulation, maximum filling rate, and accelerate the timing of maximum filling rate of flax seeds, thereby increasing the yield of flax seeds. This integrated approach represents as a suitable high-yield cultivation technique for flax in arid agricultural areas.

**Key words** Flax; Exogenous NAA; Phosphate fertilizer; Grouting rate; Dry matter; Grain yield

**Received** 2023-05-02

**Returned** 2023-06-25

**Foundation item** Education, Science and Technology Innovation Industry Support Program of Gansu Province (No. 2021CYZC-38); China Agriculture Research System of MOF and MARA (No. CARS-14-1-16); the Project for Central Government Guides Local Science and Technology Development (No. ZCYD-2021-12); Research Program of Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University (No. GSCS-2020-Z6); the National Natural Science Foundation of China (No. 31760363); the Fuxi Outstanding Talents Cultivation Plan of Gansu Agricultural University (No. Gaufx-02J05).

**First author** WEN Zedong, male, master student. Research area: crop cultivation and ecological physiology theory and technology. E-mail: 2660358913@qq.com

**Corresponding author** GAO Yuhong, female, professor, doctoral supervisor. Research area: high-yield and high-efficiency crop cultivation theory and technology. E-mail: gaoyh@gsau.edu.cn

(责任编辑: 成敏 Responsible editor: CHENG Min)