中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(4):215-225
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2025260

基于光照及幼果提前采收的胡麻快速育种技术体系构建

胡祖瑜[1],王利民[2],李闻娟[2],党照[2],谢亚萍[2],赵玮[2],王刚[2],牛亚敏[1],陆楠[1],朱晓燕[1],郑婧[1],武军艳[1],张建平[1,2*],齐燕妮[2*]
(1.甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州,730070;
2.甘肃省农业科学院作物研究所,甘肃 兰州,730070)

摘要:胡麻传统育种周期长、效率低,制约了新品种选育进程。为实现胡麻的快速育种,本研究以三个生育期差异显著的胡麻种质(陇亚13号、陇亚15号、hlinum)为材料,系统探究了不同光周期-光强组合对其关键生育期、农艺性状、产量构成及籽粒品质的影响,并评估了提前采收未成熟种子以缩短育种周期的潜力。结果表明,光周期与光强对各生育阶段均具有显著调控作用,其中T1处理(24 h光照,714 μmol·m^{-2}·s^{-1})效果最为突出,可系统缩短出苗至成熟的全程历时,使早熟种质hlinum、中熟种质陇亚13号和晚熟种质陇亚15号的全生育期分别缩短至65 d、77 d和82.3 d,理论年繁殖代数可达4-6代。光处理显著影响农艺及产量性状,其中陇亚15号千粒重保持较高水平(5.43~7.33 g),T2处理下单株果数与每果粒数综合表现最佳,展现出维持理想株型的潜力。品质性状响应具种质特异性,较长暗周期与中低光强(T7)可使木酚素含量普遍提升至8.81%~13.24%。此外,授粉后12 d采收的种子发芽率可达50%,为"种到种"周期再缩短20 d以上提供了关键技术支撑。本研究构建的光周期-光强协同调控与幼果提前采收相结合的胡麻快速育种体系,缩短大田生育周期,进行快速加代,为实现胡麻高效育种与基础研究提供支撑。

关键词:胡麻;快速育种;光周期;光照强度;生育期
中图分类号:S565.9　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1007-9084(2026)04-0215-11

Rapid breeding technology of flax based on light treatment and early harvest of immature capsules

HU Zu-yu[1], WANG Li-min[2], LI Wen-juan[2], DANG Zhao[2], XIE Ya-ping[2], ZHAO Wei[2], WANG Gang[2], NIU Ya-min[1], LU Nan[1], ZHU Xiao-yan[1], ZHENG Jing[1], WU Jun-yan[1], ZHANG Jian-ping[1,2*], QI Yan-ni[2*]
(1. *College of Agriculture, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China*; 2. *Institute of Crop Research, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou* 730070, *China*)

Abstract: Flax (*Linum usitatissimum* L.) is an important oilseed crop in China, but its traditional breeding process is time-consuming and inefficient, which limits the development of new cultivars. To achieve rapid generation advancement in flax, this study used 3 genotypes with distinct growth durations (Longya 13, Longya 15, and hlinum) to systematically investigate the effects of different photoperiod - light intensity combinations on key growth stages, agronomic traits, yield components, and seed quality. The potential of early harvest of immature seeds for shortening the breeding cycle was also evaluated.Results showed that both photoperiod and light intensity exerted significant regulatory effects on all growth stages. Among the treatments, T1 (24 h light, 714 μmol·m^{-2}·s^{-1}) was the most effective, substantially shortening the period from emergence to maturity. Under this condition, the total growth durations of the early-maturing Hlinum, the mid-maturing 'Longya 13', and the late-maturing 'Longya 15' were reduced to

收稿日期:2025-12-01
基金项目:甘肃省陇原青年英才(2025);国家重点研发计划(2024YFD1600100);国家特色油料产业技术体系(CARS-14-1-05);甘肃省现代寒旱特色农业油料产业技术体系(GSARS-09);中央引导地方科技发展资金(25ZYJA002)
作者简介:胡祖瑜(2001-),女,硕士研究生,主要从事胡麻遗传改良,E-mail: 15623595872@163.com
* 通讯作者:张建平(1972-),男,研究员,主要从事胡麻遗传改良,E-mail: zhangjpzw3@gsagr.ac.cn;
齐燕妮(1987-),女,助理研究员,主要从事胡麻分子育种研究工作,E-mail: xbsdqyn@126.com

65 d, 77 d, and 82.3 d, respectively, allowing a theoretical annual generation turnover of 4-6 cycles. Light treatment significantly affects agronomic and yield traits. Among these, the thousand-kernel weight of Longya 15 remained at a relatively high level (5.43-7.33 g). Under the T2 treatment, the number of capsules per plant and the number of seeds per capsule showed the best comprehensive performance, demonstrating the potential for maintaining an ideal plant architecture. The response of quality traits was germplasm-specific. A longer dark period combined with low to medium light intensity (T7) generally increased the lignan content to 8.81%-13.24%.Moreover, seeds harvested 12 d after pollination exhibited a germination rate of approximately 50%, providing a key technical basis for further shortening the "seed-to-seed" cycle by more than 20 d. This study has established a rapid flax breeding system that integrates the synergistic regulation of photoperiod and light intensity with early harvesting of young fruits. This approach shortens the field growth cycle and enables accelerated generation advancement, thereby providing support for the efficient breeding and fundamental research of flax.

Key words: oil flax; speed breeding; photoperiod; light intensity; growth period

胡麻(*Linum usitatissimum* L.),又称油用亚麻,是亚麻科亚麻属的一年生草本植物[1]。其籽粒富含α-亚麻酸(Omega-3)、木酚素、蛋白质等功能性营养成分[2-4],其中α-亚麻酸含量可高达50%以上[5]。在调节血脂、抗炎及维护心脑血管健康等方面具有重要作用[3,4]。近年来,随着居民健康营养需求增长,国内市场对功能性食用油的消费需求呈现出强劲的增长态势。凭借其卓越的健康属性,胡麻油市场持续扩张[6]。然而,受制于有限种植面积与亟待提升的单产水平,国内供给增长相对滞后。因而,加快高产优质胡麻新品种选育与推广是缓解供需矛盾、促进产业发展的关键路径。

植物生长发育是基因与环境协同调控的结果[7-9]。其中,光照作为核心环境信号和光合作用的唯一能量来源,对植物种子萌发、形态建成、生理代谢,生殖生长及产量形成等整个生命周期具有决定性的影响[10-13]。光周期和光照强度是光照环境中的两个核心调控因子。为加速作物遗传改良进程,Watson等人于2018年首次提出了快速育种(speed breeding,SB)技术体系[14]。该技术通过延长光周期至22 h、提升光强至490 ~ 500 μmol·m^{-2}·s^{-1},显著缩短了作物世代周期,使春小麦、硬粒小麦、大麦、鹰嘴豆和豌豆等作物年培育世代数达6代,春油菜达4代,远超传统温室条件下每年2-3代的水平[14]。目前,基于光环境优化的快速育种技术已在十字花科[15]、豆科[16-18]、禾本科[19-21]等多种作物中成功应用。例如,在水稻育种中,采用前期24 h、后期10 h的光照分段调控,配合800 μmol·m^{-2}·s^{-1}光强及适宜的温湿度,可实现年繁育4-5代[20];通过24 h持续光照,花生生育期从145 d缩短至89 d,实现年培育4代[22];在22 h光周期条件下,不同基因型燕麦的开花时间平均缩短11 d;且开花后21 d所有种子仍具备可接受的发芽率,为进一步缩短育种周期提供了关键支撑[21]。综上所述,延长光周期是促进植物生长的有效策略,但若缺乏适宜的光强配合,可能导致植株遭受胁迫甚至死亡。研究表明,在快速育种条件(18 h光照)下,光强显著影响兵豆和鹰嘴豆的株高、单株粒数、开花/成熟时间等关键农艺性状。其中,中低光强(74 ~ 93 μmol·m^{-2}·s^{-1})处理效果最为理想:兵豆开花/成熟时间缩短至27/46 d,鹰嘴豆缩短至28/54 d,较对照减少一半以上,且植株生长状态最佳,胁迫程度最低[23]。

与小麦、油菜等大宗作物相比,胡麻的相关研究明显滞后。尽管早期研究证实持续光照可实现胡麻一年繁育3代[24],并揭示了光照对其生长发育的影响[25],但后续研究缺乏系统性与深度。目前,胡麻育种仍以传统方法为主,面临三大瓶颈:生育周期长(大田环境下需90~130 d)[26]、育种效率低(新品种选育需8-10年)[26],更缺乏对光周期、光强等关键环境参数的系统理论[27]。因此,建立胡麻特异的光周期-光强调控模型,不仅是突破传统育种瓶颈的核心环节、更是为现代分子设计育种提供精准环境参数、最终构建高效育种技术体系与提升新品种选育效率的关键。

本研究以3个生育期差异显著的胡麻种质为材料,通过开展不同光周期与光强组合处理,结合关键农艺性状动态监测分析及种子适时采收技术,旨在建立一套高效的胡麻快速育种技术体系,以期缩短常规大田的生育周期,直接应用于胡麻育种和快速加代,加快新品种选育进程。

1 材料与方法

1.1 材料

本研究选取的材料为hlinum、陇亚13号和陇亚15号,均由甘肃省农业科学院作物研究所胡麻课题组提供,它们的生育期存在显著差异。其中,陇亚13号和陇亚15号是课题组选育的高产、高含油率、抗病且抗倒伏的胡麻品种;hlinum为课题组保存的国外引进资源,具有早熟和矮秆等优良特性。在常规大田种植条件下,hlinum、陇亚13号和陇亚15号的总生育期分别为102 d、116 d和125 d。

1.2 处理方法

1.2.1 种植方法 将胡麻种子直接播种于16 cm×13 cm×10 cm的长方体花盆中,营养土与蛭石的比例为1:3。每盆播种25粒种子(最终平均出苗23株)。每个处理均包含hlinum、陇亚13号和陇亚15号3个材料,每个材料3个重复,所有材料都在同一时间种植。所用营养土名称为丹麦品氏泥炭土,ph约为5.5。培养架置于人工气候室内,培养温度设定为23℃,人工气候室长宽高为5 m×4.8 m×3 m,用黑色遮光布把每个培养架隔开。

本试验采用的光源为LED全光谱高强光植物生长灯。光环境参数如下:红光655~665 nm,绿光515~580 nm,蓝光450~460 nm,远红光730~740 nm,白光:红光:蓝光:远红光= 3:1:1:1。

1.2.2 光周期-光强处理 目前,关于胡麻对光周期和光强的适应性研究鲜有报道。因此本研究参考其他作物快速育种中的常用光照参数,设置了3个光周期处理,分别为24 h光照(即L24)、23 h光照/1 h黑暗(即L23)和22 h光照/2 h黑暗(即L22);同时设置了4个光照强度处理. 对应的,各处理的光合光子通量密度(PPFD)分别为714、571、429和286 μmol·m^{-2}·s^{-1},4种光强均在距离灯板10 cm处测量。基于上述光周期和光强处理,本研究共形成7种光周期-光强组合(表1),以常规大田种植模式为对照(CK)。

1.3 指标测定方法

1.3.1 生长速率 根据《亚麻种质资源描述规范和数据标准》对胡麻关键生育期进行观测记录[28],包括:出苗期、现蕾期、开花期、终花期及成熟期;并计算出苗期时长(播种至出苗的历时日数)、苗期时长(出苗至现蕾期的历时日数)、蕾薹期(现蕾期至开花期的历时日数)、开花期时长(始花至终花的历时日数)、成熟期时长(终花期至成熟期的历时日数)、全生育期(播种至生理成熟期的历时日数)。

1.3.2 株型相关指标 在成熟期,对4个关键株型性状进行测定:株高(植株从子叶痕到主茎顶部的距离)、工艺长度(植株从子叶痕到花序下部主茎第一个分枝基部间的距离)、茎粗(子叶节处的最宽值)、分枝数(植株主茎顶部着生的一级分枝数量)[28]。测定方法如下:每个生物学重复随机选取10株生长状况一致的植株,使用游标卡尺测量茎粗,卷尺测量株高和工艺长度,人工计数分枝数。最终以10株测量数据的平均值作为该重复的观测值。

1.3.3 产量相关性状测定 在成熟期,对单株果

表1 光周期-光强组合

Table 1 photoperiod intensity combination

处理 Treatment	光周期 Photoperiod	光照强度/(μmol·m^{-2}·s^{-1}) Light intensity
T1	24 h光照 24-hour photoperiod	714
T2	24 h光照 24-hour photoperiod	571
T3	23 h光照/1 h黑暗 23 hours light/1 hour dark	571
T4	23 h光照/1 h黑暗 23 hours light/1 hour dark	429
T5	23 h光照/1 h黑暗 23 hours light/1 hour dark	286
T6	22 h光照/2 h黑暗 22 hours light/2 hours dark	429
T7	22 h光照/2 h黑暗 22 hours light/2 hours dark	286

数(植株上着生的全部含种子的蒴果数量)、每果粒数(蒴果中着生的种子粒数)、单株粒重(植株上单个蒴果所有成熟的种子重量)和千粒重等4个关键产量性状进行测定[28]。具体测定方法如下:对于单株果数、每果粒数和单株粒重,每个生物学重复随机选取10株代表性植株进行个体测量,最终以个体测量平均值作为该重复的观测值;对于千粒重的测定,每个重复随机选取1000粒种子,使用0.001 g精度的电子分析天平进行称量。

1.3.4 *品质相关性状* 使用瑞典波通近红外谷物分析仪(型号DA7520),按照仪器默认参数,对每个重复的胡麻籽品质进行测定,包括含油率、脂肪酸组分、蛋白质含量和木酚素含量等。

1.3.5 *种子活力* 在开花后10~20 d期间,每间隔2 d采收果实,阴干后脱粒。将胡麻种子均匀铺放于湿润滤纸上,并确保种子间有适当间距。每日观察记录发芽种子的数量,持续观察7 d,最后计算发芽率。发芽率(%)=(第7 d发芽种子数/供试种子总数)×100%;从不同采收时期中选取种子,将种子播种于长方形的花盆中,营养土与蛭石的比例为1∶3,以幼苗突破基质表面为出苗标准,统计最终出苗株数并计算出苗率:出苗率(%)= 最终出苗株数/播种总粒数×100%。

1.4 数据处理

采用Excel 2021进行数据整理及图表绘制,利用SPSS 21.0进行显著性分析(Duncan法[29])和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同光周期-光强组合对胡麻生育期的影响

方差分析表明,光周期与光强对三个胡麻种质的出苗期均具有显著影响。如图1A所示,所有处理均显著缩短了出苗期,较以常规大田种植模式为对照(CK)平均提前5.67~8.67 d。其中,T1处理下各种质出苗最快,仅需3.33 d;光强降低时(T2),出苗期略有延长。

光周期与光强对苗期时长具有显著的调控作用(图1B)。与CK相比,仅T1处理显著缩短了所有参试种质的苗期,陇亚13号、陇亚15号和hlinum分别缩短了8.3、10和12 d。进一步分析发现:在相同光周期下,苗期随光强增加而缩短(如T1<T2,T3<T4<T5);在相同光强下,苗期随光周期延长而缩短(如T2<T3,T4<T6)。不同种质对光周期与光强组合的响应存在显著差异,陇亚13号的苗期在各处理间变异幅度最大,而hlinum的变异幅度最小。

如图1C所示,T1处理使各种质开花期缩短至7.67~8.33 d,较CK缩短11.33~15 d;而T7处理使开花期延长至15.67~17.67 d。提高光强或延长光周期均可促进开花进程,其中陇亚13号对光环境变化最敏感,开花期变异幅度达9.34 d,hlinum在多数处理下开花期(7.67~15.67 d)均短于其他两个种质。

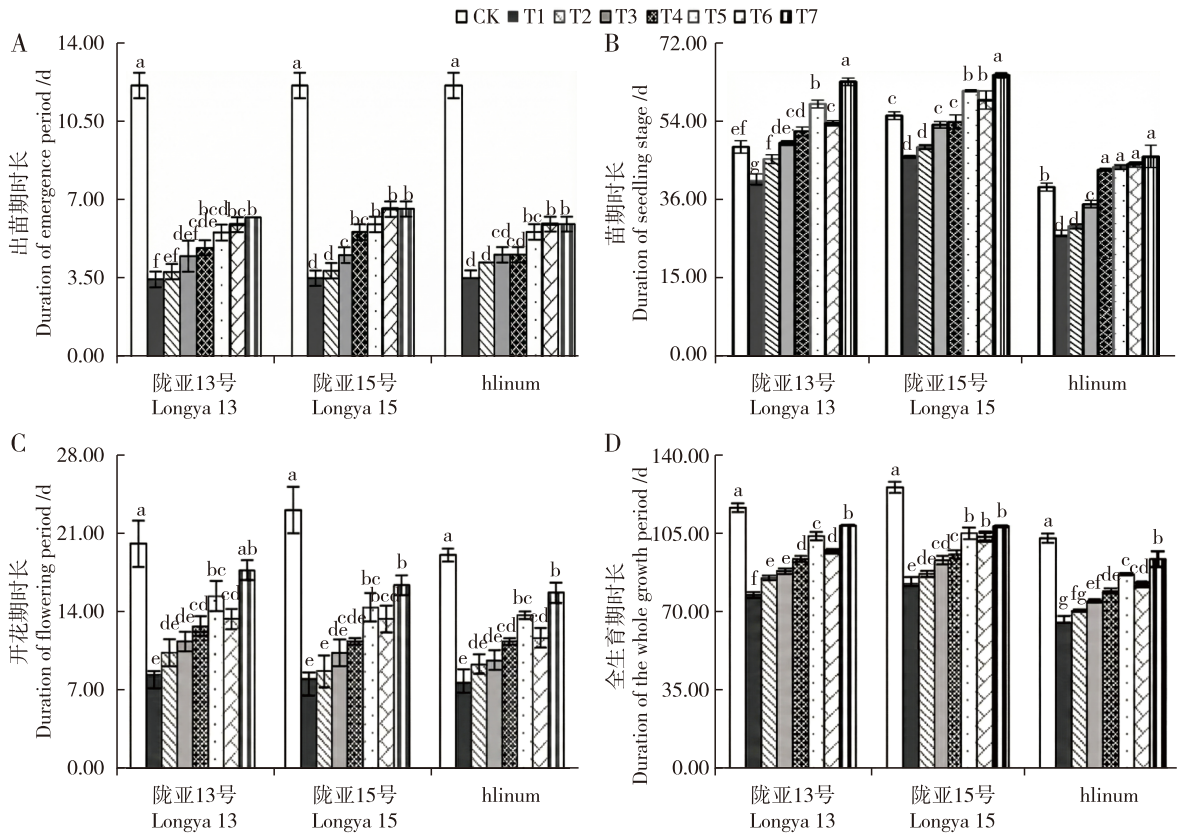
如图1D所示,与CK相比,所有光周期-光强处理均显著缩短了三个胡麻种质的全生育期。其中,T1处理缩短效应最强,使陇亚13号、陇亚15号和hlinum的全生育期分别缩短至77、82.3和65 d,较CK分别减少39.0 d、42.7 d和37 d,缩短幅度达33.6%~36.3%。此外,在固定光周期下,提高光强(T1 *vs* T2,T3 *vs* T4,T4 *vs* T5,T6 *vs* T7)可使生育期缩短2.7~11.7 d;而在固定光强下,延长光周期(T2 *vs* T3,T4 *vs* T6,T5 *vs* T7)亦可缩短3.0~7.7 d。值得注意的是,陇亚13号对光环境变化最为敏感,其生育期在不同处理间变异幅度高达31 d。

2.2 不同光周期-光强组合对胡麻关键农艺性状的影响

如图2A所示,三个胡麻种质对光周期-光强组合的响应存在明显差异。陇亚13号与陇亚15号在各处理下的株高均低于CK,但变化幅度与显著性不尽相同。具体而言,陇亚13号仅在T1、T3和T4处理下株高显著降低,降幅为19.1%~26.7%;而陇亚15号除T3处理外,在其他6个处理下株高均显著低于CK,降幅达14.0%~26.1%。与之相反,hlinum表现出较强的表型稳定性,其株高在多数处理间无显著差异,且在T3处理下株高较CK显著增加27.1%。

如图2B所示,不同胡麻种质对光环境的响应呈现明显的基因型依赖性。具体表现为:陇亚15号在T3处理下工艺长度达到56.93 cm,较CK显著增加23.98%;陇亚13号在T2与T7处理下工艺长度分别达到49.97 cm和50.37 cm,较CK分别增加23.69%和24.68%;而hlinum虽在各处理下工艺长度均高于CK,但处理间无显著差异,其中T1-T3处理较CK显著增加83.55%~101.62%。

如图2C所示,与CK相比,所有处理均导致三个胡麻种质的分枝数明显降低,且分枝数随着光强减弱与光周期缩短呈明显递减趋势。其中,T5、T6与T7处理下分枝数降低最为显著,陇亚13号、陇亚15号及hlinum在T7处理下分枝数分别降至4.03、2.9和2.9,较CK减少41.6%~70%。种质间比较显示,



注:A:出苗期时长;B:苗期时长;C:开花期时长;D:全生育期时长。不同小写字母仅代表同一品种不同处理间在0.05水平差异显著

Note: A: duration of emergence period; B: duration of seedling stage; C: duration of flowering period; D: duration of the whole growth period. Different lowercase letters mean significant differences between various treatments at 0.05 level for the same duration of treatment

图1 不同光周期-光强组合下三个胡麻种质关键生育期

Fig. 1 Key growth stages of three flax germplasms under varying photoperiod and light intensity combinations

陇亚13号受影响相对较小,各处理下分枝数保持相对较高水平;而陇亚15号和hlinum在低光强条件下分枝数显著降低,其在T5和T7处理下分枝数降幅均超过65%。

如图2D所示,与CK相比,所有处理均导致三个胡麻种质的茎粗减小,且陇亚15号茎粗随着光强减弱与光周期缩短呈明显的递减趋势。种质间比较分析发现,陇亚15号在光处理下茎粗虽呈下降趋势,但仅在T7处理下(2 mm)与CK(3.22 mm)具有显著差异;陇亚13号在T7处理下茎粗最低仅为1.87 mm,大多处理间差异不显著;hlinum茎粗在各光处理下均维持较低水平(1.48~1.94 mm),且处理间均无显著变化。

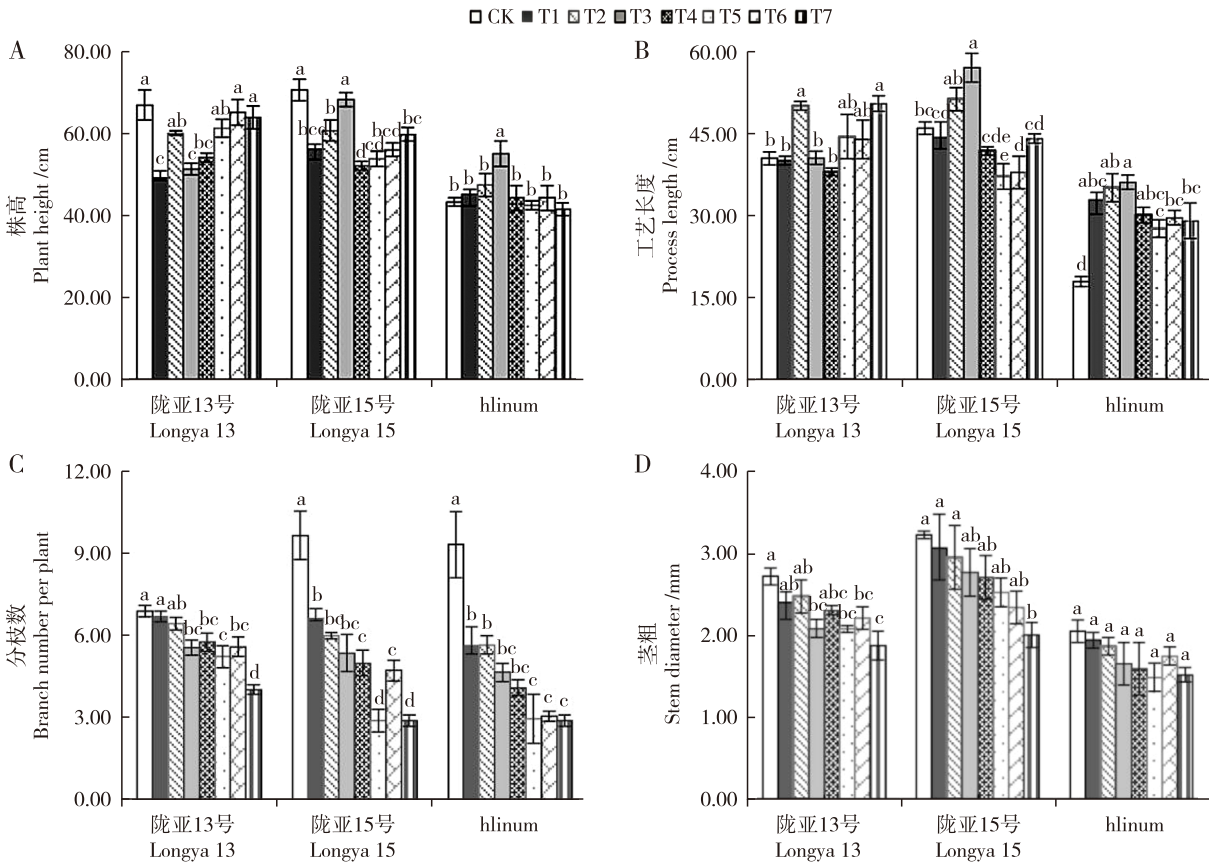
2.3 不同光周期-光强组合对胡麻关键产量性状的影响

不同光周期-光强组合对三个胡麻种质产量性状形成均具有显著调控作用(图3)。在单株果数方面(图3A),与CK相比,T1-T7处理导致三个种质结实数普遍下降,且单株果数随着光强减弱与光周期缩短呈递减趋势,其中T7处理结实数最少,三个种质单株果数较CK降低54.0%~59.0%。不同处理间T2单株果数最高,陇亚13号、陇亚15号和hlinum的单株果数分别为13.67、15.00和11.67。

在每果粒数方面(图3B),所有处理均导致陇亚13号和hlinum每果粒数下降,且呈现与单株果数相似的递减趋势,T7处理下三个种质每果粒数降至4.17~5.33粒,较CK减少27.0%~37.3%。同样T2处理下每果粒数最高,陇亚13号、陇亚15号和hlinum的每果粒数分别为7.83、7.47和6.6。

单株粒重受光环境影响最为显著,所有光处理均显著降低了三个胡麻种质的单株粒重,且与前两个性状呈现相似的递减趋势,T7处理下三个种质的单株粒重降至0.14~0.29 g,较CK降低60.3%~75.0%(图3C)。

T1-T7处理下三个胡麻种质的千粒重均低于CK,且千粒重对光环境的响应呈现种质特异性(图3D)。陇亚15号千粒重在各处理下保持较高水平(5.43~7.33 g),而陇亚13号与hlinum在T1-T4处



注:A:株高;B:工艺长度;C:分枝数;D:茎粗。不同小写字母仅代表同一品种不同处理间在0.05水平差异显著

Note: A: plant height; B: process length; C: branch number; D: stem diameter. Different lowercase letters only mean significant differences between various treatments at 0.05 level for the same duration of treatment

图2 不同光周期-光强组合下三个胡麻种质关键农艺性状

Fig. 2 Key agronomic traits of three flax germplasms under varying photoperiod and light intensity combinations

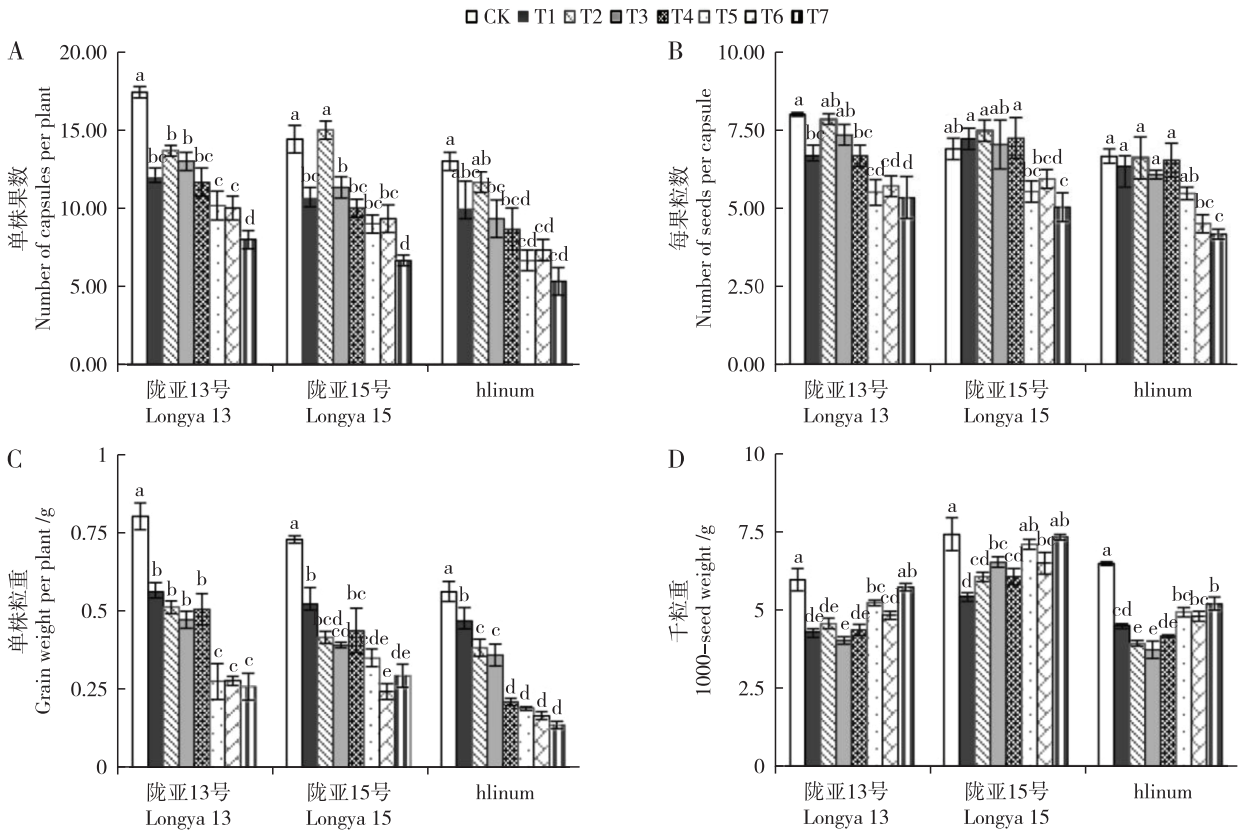
理下千粒重显著降低(降幅23.5%~42.5%),但在T5-T7处理下有所恢复。

2.4 不同光周期-光强组合对胡麻籽粒关键品质性状的影响

不同光周期-光强组合对三个胡麻种质蛋白质含量与含油率的影响存在显著的基因型特异性(表2)。其中,陇亚13号的蛋白质含量在T3处理下最高(25.99%),但其他处理均降低了其含油率;与之相反,陇亚15号各处理的蛋白质含量均低于CK,但其含油率在T7处理下达到峰值(38.30%);在hlinum中,T3与T7处理分别获得了最高的蛋白质含量(21.90%)与含油率(39.89%)。

不同光处理显著改变了三个胡麻种质的脂肪酸组成(表2)。在油酸方面,陇亚13号和陇亚15号各处理的油酸含量均显著高于CK,分别以T1(41.60%)和T3(37.19%)处理为最高;hlinum则在T2处理下油酸含量最高(37.59%)。亚油酸含量在陇亚13号各处理之间无显著变化;陇亚15号在T4处理下最高(15.27%),且显著高于CK;而hlinum亚油酸含量在各处理下均低于CK,其中T7处理(13.31%)降幅显著。就亚麻酸含量而言,陇亚13号各处理含量均低于CK,以T1处理为最低(37.84%);陇亚15号仅T5处理(44.68%)显著低于CK;hlinum则相反,各处理亚麻酸含量均显著高于CK。此外,光处理普遍提高了硬脂酸含量,其中T2和T3处理在各种质中提升幅度最大,如陇亚13号在上述两个处理中分别较CK提高了约1倍和0.8倍。棕榈酸在陇亚13号的T3和T7处理下较CK提高约50%;陇亚15号仅在T6处理下显著高于CK;而hlinum在T3处理为最高(8.01%)。

木酚素含量对不同光周期-光强组合的响应在各种质之间表现有明显差异(表2)。其中,较长暗周期配合中低光强(T6、T7)显著提升了木酚素含量,尤以T7处理的效果最为突出,使陇亚13号、陇亚15号和hlinum的木酚素含量分别增至10.30%、8.81%和13.24%,且在陇亚13号和hlinum中均为最高值,并显著高于CK。相比之下,连续光照(T1、T2)或短暗周期处理(T3)下的木酚素含量普遍



注:A:每株果数;B:每果粒数;C:单株粒重;D:千粒重。不同小写字母仅代表同一品种不同处理间在0.05水平差异显著

Note: A: number of capsules per plant; B: number of seeds per capsules; C: grain weight per plant; D: 1000-seed weight. Different lowercase letters only mean significant differences between various treatments at 0.05 level for the same duration of treatment

图3 不同光周期-光强组合下三个胡麻种质关键产量性状

Fig. 3 Key yield traits of three flax germplasms under varying photoperiod and light intensity combinations

较低。

2.5 不同成熟度胡麻种子活力比较分析

本研究通过比较授粉后不同时期采收的胡麻种子发芽率和成苗率,系统分析了种子成熟度对其活力的影响(表3)。结果表明,随着授粉后天数的增加,胡麻种子的发芽率和成苗率显著提高,种子活力呈现持续增强的趋势。授粉后14 d及以上采收的种子发芽率超过60%;至20 d时,发芽率可达到90%,成苗率可达到89%,显著高于早期采收组。

3 讨论

3.1 光环境能量总量对胡麻生育进程具有明显的剂量调控效应

本研究通过系统分析不同光周期-光强组合对三个胡麻种质的影响,揭示了光环境对胡麻全生育进程的显著调控作用。其中,T1处理(高光强+长光周期)在加速生育进程方面表现最为突出,使早、中、晚熟种质的全生育期分别缩短至65 d、77 d和82.3 d,理论年繁殖代数可达4-6代,显著高于传统大田条件下的1-2代。这一结果与Watson等提出的"快速育种"理念及Kabade等在水稻中的相关发现高度一致,表明基于光周期与光强协同调控的策略在缩短作物世代周期方面具有跨物种的适用性与巨大潜力[14,20]。

进一步分析发现,光周期与光强在调控胡麻生育进程中既存在协同效应,也表现出独立的正向调控作用。在固定光强下,延长光周期可显著促进胡麻发育进程,如T2较T3、T4较T6、T5较T7的平均生育期缩短达4.67 d,说明延长光照对发育进程具有独立的促进作用,与Mobini等在蚕豆中观察到的光周期效应相吻合,表明该调控机制在作物中可能具有一定的保守性[17]。另一方面,在固定光周期(如L23)条件下,随着光强从286(T5)提升至571 μmol·m^{-2}·s^{-1}(T3),参试种质的平均生育期从97.78 d显著缩短至84.78 d,降幅达13.33%,这一结果说明,在光周期保持不变的情况下,光强本身仍可独立并显著地调控作物的生长发育进程。类似现象在已

表2 不同光周期-光强组合下三个胡麻种质关键品质性状

Table 2 Key quality traits of three flax germplasms under different photoperiod and light intensity combinations /%

品种 Variety	处理 Treatment	蛋白 Protein	含油率 Oil content	油酸 Oleic acid	亚油酸 Linoleic acid	亚麻酸 Linolenic acid	木酚素 Lignans	硬脂酸 Stearic acid	棕榈酸 Palmitic acid
陇亚13号 Longya 13	CK	24.95ab	39.31a	33.54d	13.93a	43.79a	7.41d	4.64e	6.06d
	T1	23.56bc	36.55c	41.60a	13.27a	37.84c	7.79cd	7.38bc	6.27cd
	T2	22.70c	33.29d	40.07ab	13.83a	41.42ab	7.15d	9.21a	6.43cd
	T3	25.99a	33.85d	38.71abc	13.98a	40.18bc	4.98e	8.50ab	9.04a
	T4	23.94bc	38.05abc	36.29cd	13.96a	40.18bc	7.42d	7.23bc	7.75b
	T5	22.35c	36.34c	37.82bc	14.14a	40.60abc	8.78bc	6.64cd	7.51b
	T6	23.62bc	37.10bc	37.95bc	13.43a	40.58abc	9.57ab	7.23bc	7.07bc
	T7	23.61bc	38.55ab	37.71bc	14.16a	42.10ab	10.30a	5.38de	9.30a
	P	0.004	0.001	0.002	0.981	0.040	0.001	0.001	0.001
	LSD	1.58	1.68	3.55	/	2.75	1.44	2.02	1.46
陇亚15号 Longya 15	CK	24.61a	37.72ab	29.83e	13.40c	48.13a	6.66cd	4.71c	6.08bcd
	T1	22.55bc	37.66ab	34.26c	14.40abc	48.53a	7.40c	6.23b	5.55d
	T2	22.18c	34.52cd	33.96c	13.86bc	50.17a	5.88d	8.21a	5.88cd
	T3	22.39c	32.98d	37.19a	14.69ab	48.91a	5.85d	9.07a	6.58bc
	T4	21.88c	37.24ab	32.56d	15.27a	49.83a	9.28ab	6.43b	7.03ab
	T5	22.65bc	35.57bc	35.65b	14.00bc	44.68b	6.78cd	5.88bc	6.92b
	T6	23.45b	37.32ab	32.53d	14.47abc	47.59a	9.83a	6.57b	7.94a
	T7	22.11c	38.30a	34.85bc	13.71bc	48.22a	8.81b	5.54bc	6.61bc
	P	0.018	0.001	0.001	0.055	0.014	0.001	0.001	0.001
	LSD	0.952	2.27	1.05	/	2.16	1.45	1.59	1.07
hlinum	CK	21.41ab	38.27ab	36.98ab	15.41a	38.02c	10.69b	7.01c	7.38ab
	T1	20.11bc	36.48bc	36.62ab	13.93ab	46.14ab	9.13bc	7.95bc	6.42b
	T2	20.86ab	34.66cd	37.59a	14.01ab	45.35ab	9.39bc	8.56ab	6.71ab
	T3	21.90a	35.54d	37.32ab	14.41ab	43.95ab	7.91c	9.57a	8.01a
	T4	21.56ab	36.34bc	37.37ab	14.98ab	42.76b	9.65bc	8.03bc	7.54ab
	T5	21.05ab	36.43bc	37.43ab	13.95ab	42.32b	9.96b	7.00c	7.64ab
	T6	20.88ab	37.92ab	36.54ab	14.35ab	47.75a	11.09b	7.56bc	7.40ab
	T7	19.37c	39.89a	35.28b	13.31b	46.94a	13.24a	7.40c	7.26ab
	P	0.039	0.001	0.283	0.296	0.001	0.001	0.001	0.013
	LSD	1.48	2.24	/	/	3.20	1.96	1.41	0.979

注:不同小写字母仅代表同一品种不同处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters only mean significant differences between various treatments at 0.05 level for the same duration of treatment

表3 不同成熟度胡麻种子活力

Table 3 Seed vigor of flax seeds at different maturity levels

授粉后天数 /d Days after pollination	发芽率 /% Germination rate	成苗率 /% Seedling emergence rate
10	36	30
12	50	45
14	63	58
16	65	63
18	70	77
20	90	89

有研究中亦有报道:例如Karsai等在大麦研究中指出,在光周期固定为16 h的条件下,提高光强能显著促进抽穗进程[30],进一步印证了在光周期恒定时,光强仍能独立调控作物发育速率。在多数情况下,光强提升所引起的生育期缩短效应,显著大于仅延长光周期所产生的影响,揭示在胡麻生育进程中,光强可能较光周期具有更强的调控主导性。在水稻SpeedFlower体系也发现了类似的现象,在24 h光周期下,将光强从400提升至800 μmol·m^{-2}·s^{-1}仍能显著促进抽穗开花,且多数品种在高光强条件下,

不同光周期处理间的开花时间差异较小,进一步说明光强度对生育进程的调控作用相较于光周期更为直接和敏感,在一定程度上可覆盖光周期的影响[20]。

综合来看,在长日照配合中-高光强处理下,胡麻各关键生育阶段(出苗期、现蕾期、开花期)均同步提前,从而使全生育期被有效压缩。各处理间关键生育期随光能输入总量增加呈逐步递减趋势,表明光环境能量总量对胡麻生育进程具有明显的剂量调控效应。

3.2 光环境能量总量对胡麻农艺、产量和品质具有明显的剂量调控效应

在农艺性状方面,光处理显著影响了株高、工艺长度、分枝数和茎粗等关键指标。值得注意的是,不同种质对光环境的响应存在明显差异,hlinum在多数处理下表现出较强的表型稳定性,而陇亚13号与陇亚15号则对光强和光周期变化更为敏感。与CK相比,所有处理均导致三个胡麻种质的分枝数和茎粗减小。特别是在低光强与短光周期组合处理(如T5-T7)下,参试材料的分枝数和茎粗普遍下降,这可能与光合产物供应不足直接相关,揭示在实际快速育种过程中应避免光环境设置过低,以维持理想株型。Wang等的研究发现,*BRC1*基因的表达水平与分枝数呈显著负相关;在低光强与短光周期共同作用下,光合产物的匮乏可诱导*BRC1*基因上调表达,进而抑制侧芽的萌发与伸长[31]。此外,杜彦修等系统总结了弱光对水稻形态的影响,指出低光不仅延缓生育进程、降低光合能力,还会导致分蘖减少、茎秆细弱与株型劣化等现象[32]。值得进一步探讨的是,光处理的影响除光强与光周期外,是否还与光质有关。前人在拟南芥、大麦等模式或重要作物中已证实,不同光谱成分可通过光敏色素、隐花色素等光受体信号通路,调控关键激素的合成与信号转导,从而深刻影响植株的分枝(分蘖)发育[33-35]。目前关于光谱波段对胡麻形态建成的影响尚缺乏系统研究。未来的研究方向可以聚焦于以下两个方面:(1)利用转录组学和代谢组学,解析光环境能量总量调控胡麻分枝成花的关键基因网络和代谢通路;(2)通过人工气候室和田间试验相结合,建立胡麻不同品种的光能量总量需求模型,明确不同生育阶段的最优光环境配置,为不同生态区胡麻生产提供精准的光环境调控方案。综上所述,低光环境不仅直接限制光合效率,还可能通过调控碳分配与分枝关键基因的表达,多层次地影响植株的形态建成。

产量性状对光环境的响应同样显著。本研究中,与CK相比,T1-T7处理下三个胡麻种质的单株果数、每果粒数和单株粒重等性状均呈下降趋势;但其中T1与T2处理在单株果数、每果粒数和单株粒重等指标上相对表现较好。随着光强减弱与光周期缩短,多数产量构成因子呈逐步下降趋势,尤其在T7处理下降幅最为显著。Han等在苜蓿研究中指出,当光强低于250 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$或光周期短于16 h时,植株的光合速率、生物量积累及花芽分化效率均显著降低,进而直接影响分枝数、结荚数等产量相关性状[36];Li等对春小麦的研究也发现,弱光与短光周期会抑制分蘖发生与穗部发育,导致有效穗数减少[37]。类似地,在冬小麦中,遮荫处理会引起小麦徒长、茎粗下降,同时导致结实率与千粒重显著降低[38,39]。上述结果表明,尽管适当延长光周期和提高光强可显著缩短生育期,但若整体光照条件不足,仍将严重限制作物产量的形成。因此在设计快速育种体系时,需综合考虑光周期与光照的配置,在实现生育期缩短的同时,兼顾产量性状的稳定与提升。

品质性状对光照的响应表现出明显的种质特异性。本研究中,木酚素含量在较长暗周期与中低光强下(如T6、T7)普遍提升。此外,脂肪酸组成也显著受光环境调控。在油酸方面,陇亚13号和陇亚15号各处理的油酸含量均显著高于CK,就亚麻酸含量而言,陇亚13号各处理含量均低于CK。hlinum则相反,各处理亚麻酸含量均显著高于CK。表明不同种质在不同光处理下表现出不同的脂肪酸积累模式。Dybing等在亚麻研究中发现,脂肪酸积累对环境变化高度敏感,尤其在籽粒成熟过程中,光条件的变化会引起油酸与亚油酸积累趋势显著差异[40]。Karki等在拟南芥中证实,种子发育期间的光强变化能够重塑脂肪酸代谢通路的活性,进而影响油脂组分中饱和与不饱和脂肪酸的比例[41]。以上结果表明,光环境可作为调控品质性状形成的重要信号因子。通过精准调控光周期与光强,有望实现对特定品质性状的定向优化。

3.3 幼果提前采收对胡麻生育周期的缩短效应

本研究首次验证了幼果提前采收技术在胡麻快速育种中的可行性。研究显示,授粉后12 d采收的种子发芽率已达50%,能够满足下一代播种的基本需求,较常规成熟期(授粉后35~40 d)[42]可缩短繁殖周期20 d以上。该结果与燕麦及鹰嘴豆中采

用延长光周期结合早期采摘以缩短育种年限的研究结果相一致[16],更与Edet等在豇豆中整合长光周期、高光强及未充分成熟种子烘干处理,从而实现理论上年8代繁育的研究思路一致[18]。这些研究结果表明,将光环境调控与幼果提前采收相结合,是突破传统育种周期限制、实现作物快速育种的有效途径。

4 结论

本研究成功构建了一套整合光环境优化与幼果提前采收技术的胡麻快速育种技术体系。结果表明,T1处理(24 h光照,714 μmol·m^{-2}·s^{-1})为最优光周期-光强组合,可使早、中、晚熟胡麻种质全生育期缩短至65~82.3 d,理论年繁殖代数达4-6代。高光强与长光周期组合在有效缩短生育期的同时可维持相对理想的农艺、产量及品质性状。此外,授粉后12 d采收的种子发芽率可达50%,使单世代周期进一步缩短20 d以上。该体系为实现胡麻高效育种提供了可靠的技术路径与实践依据。

参考文献:

[1] Burrows G E, Tyrl R J. Toxic Plants of North America (Second Edition)[M]// Forty-Seven, Linaceae DC. ex Perleb. US: Wiley, 2012: 808-811.

[2] Pramanik J, Kumar A, Prajapati B. A review on flaxseeds: Nutritional profile, health benefits, value added products, and toxicity[J]. eFood, 2023, 4(5): e114. DOI:10.1002/efd2.114.

[3] Tolkachev O N, Zhuchenko A A. Biologically active substances of flax: medicinal and nutritional properties (a review)[J]. Pharm Chem J, 2004, 34(7): 360-367. DOI:10.1023/A: 1005217407453.

[4] Goyal A, Sharma V, Upadhyay N, et al. Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food [J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(9): 1633-1653. DOI:10.1007/s13197-013-1247-9.

[5] Silska G, Walkowiak M. Comparative analysis of fatty acid composition in 84 accessions of flax (*Linum usitatissimum* L.)[J]. J Pre Clin Clin Res, 2019, 13(3): 118-129. DOI:10.26444/jpccr/111889.

[6] 王瑞元. 我国亚麻籽油的消费市场前景看好[J]. 中国油脂, 2018, 43(1): 1-3.

[7] Sultan S E. Phenotypic plasticity for plant development, function and life history[J]. Trends Plant Sci, 2000, 5(12): 537-542. DOI:10.1016/s1360-1385(00)01797-0.

[8] Nicotra A B, Atkin O K, Bonser S P, et al. Plant phenotypic plasticity in a changing climate[J]. Trends Plant Sci, 2010, 15(12): 684-692. DOI: 10.1016/j.tplants.2010.09.008.

[9] Hou J, Liu M, Yang K, et al. Genetic variation for adaptive evolution in response to changed environments in plants[J]. J Integr Plant Biol, 2025, 67(9): 2265-2293. DOI:10.1111/jipb.13961.

[10] Kami C, Lorrain S, Hornitschek P, et al. Light-regulated plant growth and development[M]//Plant Development. Amsterdam: Elsevier, 2010: 29-66. DOI: 10.1016/s0070-2153(10)91002-8.

[11] Legris M, Ince Y Ç, Fankhauser C. Molecular mechanisms underlying phytochrome-controlled morphogenesis in plants[J]. Nat Commun, 2019, 10: 5219. DOI: 10.1038/s41467-019-13045-0.

[12] 王雅寒, 刘勋成. 光调控植物种子萌发分子机制研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(2): 294-300.

[13] Yoon Y E, Cho J Y, Kim Y N, et al. Variation of saponarin content in barley sprouts (*Hordeum vulgare* L.) by natural light shielding: implication of the importance of light intensity[J]. ACS Omega, 2023, 8(39): 35837-35844. DOI:10.1021/acsomega.3c03458.

[14] Watson A, Ghosh S, Williams M J, et al. Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding[J]. Nat Plants, 2018, 4(1): 23-29. DOI: 10.1038/s41477-017-0083-8.

[15] Yao Y, Zhang P, Wang H B, et al. How to advance up to seven generations of canola (*Brassica napus* L.) per annum for the production of pure line populations?[J]. Euphytica, 2016, 209(1): 113-119. DOI: 10.1007/s10681-016-1643-0.

[16] Samineni S, Sen M, Sajja S B, et al. Rapid generation advance (RGA) in chickpea to produce up to seven generations per year and enable speed breeding[J]. Crop J, 2020, 8(1): 164-169. DOI:10.1016/j.cj.2019.08.003.

[17] Mobini S, Khazaei H, Warkentin T D, et al. Shortening the generation cycle in faba bean (*Vicia faba*) by application of cytokinin and cold stress to assist speed breeding[J]. Plant Breed, 2020, 139(6): 1181-1189. DOI: 10.1111/pbr.12868.

[18] Edet O U, Ishii T. Cowpea speed breeding using regulated growth chamber conditions and seeds of oven-dried immature pods potentially accommodates eight generations per year[J]. Plant Meth, 2022, 18(1): 106. DOI: 10.1186/s13007-022-00938-3.

[19] Song Y X, Duan X Y, Wang P F, et al. Comprehensive speed breeding: a high-throughput and rapid generation system for long-day crops[J]. Plant Biotechnol J, 2022, 20(1): 13-15. DOI:10.1111/pbi.13726.

[20] Kabade P G, Dixit S, Singh U M, et al. SpeedFlower: a comprehensive speed breeding protocol for *indica* and *japonica* rice[J]. Plant Biotechnol J, 2024, 22(5): 1051-1066. DOI:10.1111/pbi.14245.

[21] González-Barrios P, Bhatta M, Halley M, et al. Speed breeding and early panicle harvest accelerates oat (*Avena sativa* L.) breeding cycles[J]. Crop Sci, 2021, 61(1): 320-330. DOI:10.1002/csc2.20269.

[22] O'Connor D J, Wright G C, Dieters M J, et al. Development and application of speed breeding technologies in a commercial peanut breeding program[J]. Peanut Sci, 2013, 40(2): 107-114. DOI:10.3146/ps12-12.1.

[23] Mitache M, Baidani A, Bencharki B, et al. Exploring the impact of light intensity under speed breeding conditions on the development and growth of lentil and chickpea[J]. Plant Meth, 2024, 20(1): 30. DOI: 10.1186/s13007-024-01156-9.

[24] Sysoeva M I, Markovskaya E F, Shibaeva T G. Plants under continuous light: a review[J]. Plant Stress, 2010, 4(1): 5-17.

[25] 孙洪涛, 傅卫东, 柳新. 在温室条件下人工光照与温度对亚麻生长发育的影响[J]. 中国麻作, 1986(3): 35-36.

[26] 周宇, 高凤云, 何瑞超, 等. 油用亚麻新品种内亚十三号的选育[J]. 中国麻业科学, 2024, 46(4): 197-200.

[27] 徐大鹏, 姚泽恩, 尹永智. 不同光强对胡麻幼苗生长发育特性的影响[J]. 现代农业科技, 2013, (8): 9-10.

[28] 王玉富, 栗建光. 亚麻种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006.

[29] Duncan D B. Multiple range and multiple F tests[J]. Biometrics, 1955, 11(1): 1. DOI:10.2307/3001478.

[30] Karsai I, Kőszegi B, Kovács G, et al. Effects of temperature and light intensity on flowering of barley (*Hordeum vulgare* L.)[J]. Acta Biol Hung, 2008, 59(2): 205-215. DOI:10.1556/ABiol.59.2008.2.7.

[31] Wang M, Le Moigne M A, Bertheloot J, et al. BRANCHED1: a key hub of shoot branching[J]. Front Plant Sci, 2019, 10: 76. DOI:10.3389/fpls.2019.00076.

[32] 杜彦修, 季新, 张静, 等. 弱光对水稻生长发育影响研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2013, 21(11): 1307-1317.

[33] Gomez-Roldan V, Fermas S, Brewer P B, et al. Strigolactone inhibition of shoot branching[J]. Nature, 2008, 455(7210): 189-194. DOI:10.1038/nature07271.

[34] Finlayson S A, Krishnareddy S R, Kebrom T H, et al. Phytochrome regulation of branching in *Arabidopsis*[J]. Plant Physiol, 2010, 152(4): 1914-1927. DOI: 10.1104/pp.109.148833.

[35] 林荣呈, 刘宏涛, 李继刚, 等. 植物光信号转导研究领域近十年重要研究进展[J]. 植物生理学报, 2024, 60(3): 399-429.

[36] Han L J, Lv Y Y, Zhang Y F, et al. Optimizing the light intensity, nutrient solution, and photoperiod for speed breeding of alfalfa (*Medicago sativa* L.) under full-spectrum LED light[J]. Agronomy, 2025, 15(9): 2067. DOI:10.3390/agronomy15092067.

[37] Li J L, Zhang Y Q, Cheng R F, et al. Light spectrum, intensity, and photoperiod are key for production as well as speed breeding of spring wheat in indoor farming[J]. Plant Enviro Interactions, 2025, 6(5): e70085. DOI: 10.1002/pei3.70085.

[38] Li H W, Jiang D, Wollenweber B, et al. Effects of shading on morphology, physiology and grain yield of winter wheat[J]. Eur J Agron, 2010, 33(4): 267-275. DOI: 10.1016/j.eja.2010.07.002.

[39] 张秋霞. 遮荫和密度对冬小麦茎秆抗倒伏性能的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.

[40] Dybing C D, Zimmerman D C. Fatty acid accumulation in maturing flaxseeds as influenced by environment[J]. Plant Physiol, 1966, 41(9): 1465-1470. DOI:10.1104/pp.41.9.1465.

[41] Karki N, Bates P D. The effect of light conditions on interpreting oil composition engineering in *Arabidopsis seeds*[J]. Plant Direct, 2018, 2(6): e00067. DOI: 10.1002/pld3.67.

[42] 张明. 胡麻生育时期界定标准探讨[J]. 甘肃农业科技, 2018(3): 9-14.

(责任编辑:郭学兰)