作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2026, 52(4): 982−992 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CN 11-1809/S; CODEN TSHPA9 E-mail: zwxb301@caas.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.55070

综 述

直播油菜单产提升的生理基础及实践途径

蒯 婕 娄洪祥 谭晓强 郜耿东 邵东李 肖胜男 赵 杰 徐正华 王 晶 汪 波 周广生*

华中农业大学植物科学技术学院 / 湖北洪山实验室 / 农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室, 湖北武汉 430070

摘 要: 提高我国食用植物油自给率, 确保食用油供给安全是当前我国油料作物生产面临的重要挑战。油菜是食用油、饲料蛋白的重要来源。2000 年以来, 我国油菜生产体系逐步从育苗移栽转向以直播栽培为核心的现代化模式。在这一系统性技术演进下, 我国直播油菜生产技术框架已基本建立, 通过合理密植不仅有效降低了生产成本、提升了生产效能, 也为保障国内食用油供给安全、推动农业可持续发展提供了关键技术支撑。然而, 新模式下仍存在一系列亟待解决的科学与技术问题, 尤其是在高密度种植情境下, 如何协同提升单位面积产量与资源利用效率, 成为当前研究的核心命题, 研究重点正逐渐从宏观栽培体系构建, 转向对“密植”这一关键栽培因子的深入解析, 以揭示其增产增效的内在理论机制及现实限制因素, 为下一步技术突破提供方向指引。本文总结了我国直播油菜发展现状, 提出了直播油菜发展的 1.0~4.0 阶段; 分析了直播油菜密植增产增效的限制因素, 表现在产量构成因素不协同、个体长势弱, 倒伏严重; 借鉴禾本科作物理想株型研究探讨了直播油菜耐密高产的传统理想株型、智慧株型特征和生理基础, 通过生物量高效累积与分配、茎秆质量与抗倒性提升和根-冠协同提高耐密性; 进一步明确了单产提升实现途径和未来发展方向。未来, 随着功能基因挖掘与技术产品化的不断深入, 油菜生产体系将进一步朝着高产、高效、智能化方向发展。

关键词: 直播油菜; 密植; 高产生理; 限制因素; 实践途径

Physiological basis and practical strategies for enhancing rapeseed yield under direct seeding

Kuai Jie, Lou Hong-Xiang, Tan Xiao-Qiang, Gao Geng-Dong, Shao Dong-Li, Xiao Sheng-Nan, Zhao Jie, Xu Zheng-Hua, Wang Jing, Wang Bo, and Zhou Guang-Sheng*

College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University / Hubei Hongshan Laboratory / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, Hubei, China

Abstract: Enhancing the self-sufficiency rate of edible vegetable oil and ensuring the security of oil supply represent a critical challenge for oilseed production in China. Rapeseed is a vital source of both edible oil and feed protein. Since 2000, China’s rapeseed production system has progressively transitioned from seedling transplantation to a modernized model centered on direct-seeding cultivation. Within this systematic technological evolution, a foundational framework for direct-seeding rapeseed production has been largely established. The adoption of rational close planting has not only effectively reduced production costs and enhanced efficiency but has also provided key technological support for safeguarding domestic edible oil supply and promoting sustainable agricultural development. However, this new model still faces a series of scientific and technical problems requiring urgent resolution. A core research question, particularly under high-density planting conditions, is how to synergistically increase yield per unit area and resource use efficiency. Research focus is gradually shifting from constructing macro-level cultiva-

本研究由国家重点研发计划项目(2024YFD2300303), 湖北省专项资金(2023HBSTX4-03)和湖北省重点研发计划项目(2023BBB028)资助。
This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2024YFD2300303), the Earmarked Fund of Hubei Province of China (2023HBSTX4-03) and the Key Research and Development Program of Hubei Province of China (2023BBB028).

* 通信作者(Corresponding author): 周广生, E-mail: zhougs@mail.hzau.edu.cn
第一作者联系方式: E-mail: kuaijie@mail.hzau.edu.cn

Received (收稿日期): 2025-11-18; Accepted (接受日期): 2026-01-22; Published online (网络出版日期): 2026-01-26.
URL: https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20260123.1953.002

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

tion systems to a deeper analysis of the key agronomic factor–“close planting”–aiming to elucidate the underlying theoretical mechanisms and practical constraints for yield and efficiency gains, thereby guiding future technological breakthroughs. This paper summarizes the development status of direct-seeding rapeseed in China and proposes a developmental stages framework (Stage 1.0 to 4.0). It analyzes the limiting factors for achieving high yield and efficiency under close planting, which manifest as non-synergistic yield components, weak individual plant growth, and severe lodging. Drawing insights from ideal plant architecture research in cereal crops, the paper discusses traditional and smart ideal plant architecture traits for lodging-tolerant and high-yielding direct-seeding rapeseed, along with their physiological basis, focusing on efficient biomass accumulation and partitioning, improvement of stem strength and lodging resistance, and root-shoot synergy to enhance density tolerance. Pathways for yield improvement and future research directions are further clarified. With ongoing advances in functional gene discovery and technology commercialization, the rapeseed production system is poised to evolve further towards high yield, high efficiency, and intelligentization.

Keywords: direct-seeded rapeseed; close planting; high-yield physiology; limited factor; practical approaches

1　我国直播油菜发展现状

油菜是世界四大油料作物之一, 也是我国第五大农作物和第一大油料作物, 当前种植面积超 700 万公顷, 年产量 600 多万吨, 同时产出 800 多万吨高蛋白饲料饼粕。我国菜籽油年均消费量达 800 万吨, 是仅次于大豆油的第二大食用植物油[1]。然而, 我国食用植物油自给率多年低于 30%, 供给安全形势长期严峻, 发展油菜产业对保障国家食用油安全具有重大战略意义。在此背景下, 国家近期出台的《加快建设农业强国规划(2024—2035 年)》及《2025 年全国粮油作物大面积单产提升实施方案》明确将提升粮油单产作为核心任务。2025 年中央一号文件也强调农业农村部将继续主攻单产提升, 强化技术与装备支撑。大面积提升油菜单产已成为保障国家油料供给安全的迫切需求。

20 世纪 90 年代及以前, 我国油菜生产主要采用传统育苗移栽方式。该模式虽在一定程度上缓解了前后茬作物间的季节矛盾, 但其作业工序繁杂、劳动力投入大、机械化适配度低, 导致整体生产成本居高不下。随着农村劳动力持续向非农产业转移, 农业用工短缺问题日益凸显, 逐渐成为制约油菜产业稳定发展的关键限制因素。为应对这一挑战, 自 21 世纪初开始, 以轻简高效且适宜机械化生产为特征的直播油菜栽培模式在长江流域主产区逐步开展研究以及示范推广。直播技术通过省去育苗环节, 将种子直接播入大田(主要包括撒播、条播和穴播等方式), 显著降低了人工成本, 适应了现代农业生产发展的需求。

2000 年以来, 我国油菜生产体系逐步完成了以育苗移栽为主导向以直播技术为核心的现代化模式的根本性转型。这一转型不仅是对农业劳动力结构变迁的适应性响应, 更是农业科技持续驱动产业升级的集中体现。从主要研究工作及示范推广阶段来看, 可分为 4 个阶段: 直播油菜 1.0 阶段(2006—2016 年)聚焦于高效群体构建, 提出了“五密栽培”, 解决了从移栽转向直播后的基本产量稳定性问题[2-4]; 2.0 阶段(2014—2024 年)则针对高密度条件下油菜个体根系发育不良、茎秆力学性能弱易倒伏、分枝少冠层薄等三大瓶颈, 发展了以“扩根、壮秆、增枝”为核心的高产技术[5-8]; 进入 3.0 阶段(2020 年至今), 研究重点目标转向真正意义上实现良种良法配套, 通过整合分子标记等生物学手段, 解析产量形成关键性状的生物学基础, 明确品种优缺点, 提出精准配套栽培措施[9-10]; 当前已迈入 4.0 阶段(2024 年至今), 以基因挖掘与智能化技术和新产品研发为双轮驱动, 致力于在高产基础上进一步提升资源利用效率, 实现“高产-高效”协同目标的统一[11]。

这一系统性技术演进, 标志着我国油菜产业在机械化、智能化与生物技术深度融合方面的持续突破, 不仅有效降低了生产成本、提升了生产效能, 也为保障国内食用油供给安全、推动农业可持续发展提供了关键技术支撑, 充分展现了现代农业科技从理论创新到实践的应用。未来, 随着功能基因挖掘与技术产品化的不断深入, 油菜生产体系将进一步朝着高产、高效、智能化的方向演进。在上述技术迭代与体系完善的推动下, 我国直播油菜生产技术框架已基本建立。然而, 新模式下仍存在一系列亟待解决的科学与技术问题, 尤其是在高密度种植情境下, 如何协同提升单位面积产量与资源利用效率, 成为当前研究的核心命题, 研究重点正逐渐从宏观栽培体系构建, 转向对“密植”这一关键栽培因子的深入解析, 以揭示其增产增效的内在理论机制及现实限制因素, 为下一步技术突破提供方向指引。

2 直播油菜密植增产增效的限制因素与理论机制

2.1 密植增产增效的限制因素

实现作物高产稳产、协调高产优质与环境友好的关系, 依赖于适宜的品种和合理的栽培措施[12]。作物产量形成本质上是“源” (光合生产能力)与“库” (籽粒容纳能力)协调统一的过程, 扩源增库是实现高产的基础[13]。合理密植是协调油菜个体与群体关系、提升产量与资源(尤其是肥料、光能)利用效率的核心途径, 也是缩小我国与国际单产差距的关键技术。基于长江流域直播油菜的研究实践, 研究总结出增加种植密度对籽粒产量、品质、茎秆抗倒性、资源利用效率及杂草抑制的规律, 凝练形成了以“以密增产、以密补迟、以密省肥、以密控草、以密适机”为核心的“五密”优质丰产高效栽培技术体系。该体系为构建适宜机械化作业的高产抗倒油菜群体提供了理论支撑, 也为实现油菜大面积单产提升奠定了技术基础。然而, 实际生产中, 现有品种下, 高密度直播油菜增产已达瓶颈, 全国平均产量约 2100 kg hm^{-2}, 低于欧盟的 3300 kg hm^{-2} (生育期差异约 110 d) [14-15], 主要由以下因素导致。

2.1.1 产量构成因素不协同 相较于移栽油菜, 直播油菜个体较小, 其单株产量和产量构成因素在不同密度下变化较大。低密度(< 30 万株 hm^{-2}): 单株分枝数、角果数和粒重较高, 但群体数量不足限制总产。高密度(> 45 万株 hm^{-2}): 分枝数、单株角果数减少、角果变小、每角粒数和千粒重下降, 单株产量显著下降[16-17], 但有效株数成为影响群体产量主导因素[5,18], 群体角果数显著增加, 表明合理密植通过优化群体结构, 发挥群体增产效应[2,5,18-19]。在现有主推品种条件下, 稻茬直播油菜的越冬期成苗率为 35%左右, 当播量为 4.5 kg hm^{-2} 时, 越冬期可获得 45 万株 hm^{-2} 的高产密度要求, 继续增大播种量, 成苗密度受限, 限制了产量进一步提高, 协调高密度条件下成株率和产量构成因素矛盾, 是实现密植高产的重要突破口。

2.1.2 个体长势弱, 倒伏严重 合理密植能优化地上冠层和地下根系的空间分布, 提高光能和土壤养分利用率, 促进生物量积累[5-6]; 但超过密度阈值会加剧资源竞争, 导致冠层郁闭(下层叶片受光不足)、单株生物量下降[19]。倒伏是限制密植的关键因素, 与其他作物(水稻、小麦、玉米)不同, 直播油菜倒伏(主要为茎倒)对密度的响应具有特殊性。在合理密度范围内, 增加密度可降低株高和有效分枝部位高度, 显著增强茎秆顶端(易倒伏部位)的抗倒性[8,20-21]。其机制在于: (1) 形态学: 适度密植降低株高、根颈粗、地上及地下干重, 但增加根冠比, 降低茎秆抗折力和倒伏指数[2]; (2) 生理学: 密度增加促进茎秆上部木质素合成关键基因(*PAL*、*CCR1*、*4CL*)表达, 提高木质素含量, 增强机械强度[15]。而过高密度虽进一步降低株高, 但因根颈粗和单位茎长抗折力下降过大, 反而增加倒伏风险[22]。

2.2 耐密高产的理想株型和生理基础

突破密植高产瓶颈, 实现密植再高产, 需培育具备理想株型和最佳生理特性的耐密品种。

2.2.1 传统理想株型特征 株型(plant architecture)是作物地上部形态和空间特征的综合体现[23]。株高、分枝模式和生长习性是其核心要素[24-25]。第一次绿色革命通过矮化育种(如半矮秆小麦、水稻)显著提高抗倒性, 支撑了禾本科作物高产[26]。主粮作物(水稻、小麦、玉米)的理想株型研究已较成熟[27-28], 近两年系统阐述了适应现代高密度种植与资源限制条件下的关键特征(图 1-A~D) [29]。这些特征旨在通过多学科交叉融合与精准育种技术, 打造新一代高产、高效、广适的作物品种, 为开启下一次绿色革命奠定基础。其共性在于优化冠层结构以最大化光能截获与利用效率, 增强茎秆抗倒伏能力以支撑密植高产, 改良根系构型以提高养分水分吸收效率及抗逆性, 并协调源库关系提升收获指数。

相较于水稻等主粮作物, 油菜理想株型研究进展相对滞后。2018 年, 基于传统中密度生产条件, 傅廷栋院士系统提出了我国甘蓝型油菜理想株型概念模型, 其主要特征包括: 半矮秆(150 cm 左右)、分枝角度小(< 30°)、叶柄短、叶片厚绿、角果直立且长度适中、分枝部位低、结角层厚、角果密度高(≥ 1.5 个 cm^{-1})、收获指数高(> 0.35) [30]。借鉴主粮作物的成功经验, 并结合油菜自身的生物学特性(如角果的光合贡献、分枝习性)和直播高密、机械化生产的特殊需求(降低株高、抗倒伏、适宜机收、减少荫蔽), 耐密直播油菜的理想株型应具备以下核心特征(图 1-E): (1) 株型紧凑: 叶片直立或半直立、分枝和角果着生角度小[31], 减少个体间遮荫, 优化群体光分布。(2) 株高适中、茎秆质量高: 降低重心以增强抗倒性, 并适应机械化收获割台高度。油菜株高通常划分为矮秆型(< 100 cm)、中秆型(100~150 cm)和

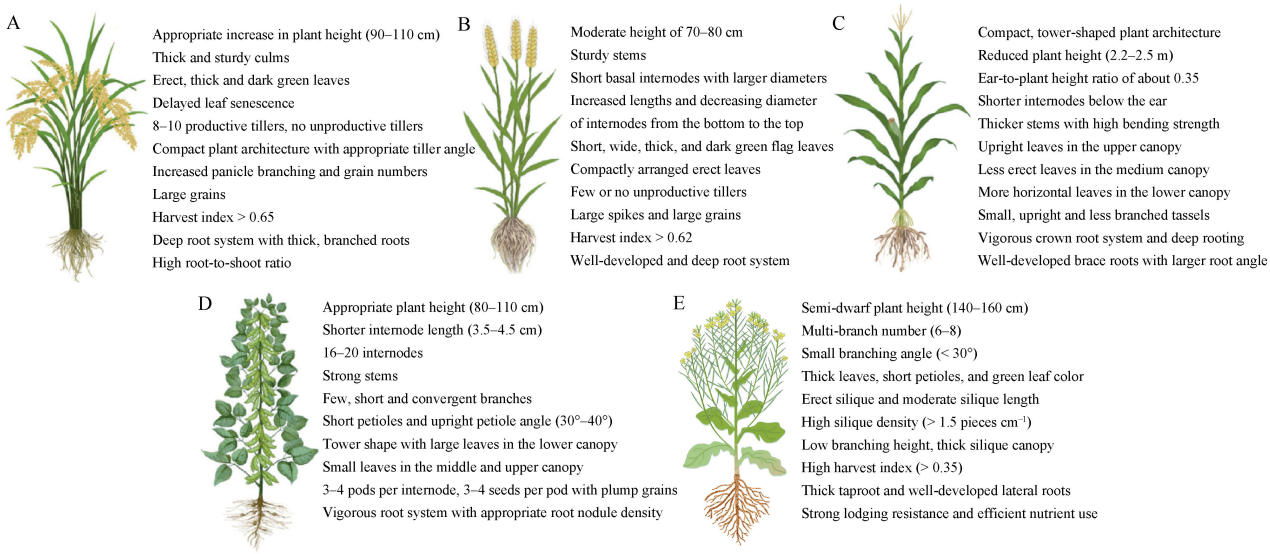


图 1　主要粮油作物的理想株型

Fig. 1　Ideal architectypes for major grain and oil crops

(A) 水稻; (B) 小麦; (C) 玉米; (D) 大豆; (E) 油菜。图中列出了这 5 种作物理想株型对应的优良性状。A–D 图改编自 Li 等[29]的研究。(A) rice; (B) wheat; (C) maize; (D) soybean; (E) rapeseed. The figure lists the desirable traits for the ideal architecture of the five crops, with panels A–D adapted from Li, et al. [29]

高秆型(> 150 cm) [32]。目前主栽品种株高多在 150~200 cm [33]。矮秆型(甚至半矮秆, 80~120 cm)虽抗倒性强、机收损失率低[34-35], 但因生物量积累受限常导致产量下降, 生产应用受限[36]。因此, 探索既能显著增强抗倒性(如降至 140~160 cm)又能维持甚至提高生物量和产量的“半矮秆-中秆”株高区间, 是当前关键目标。(3) 侧根发达, 不早衰: 增强植株在土壤中的锚定力(抗根倒), 花后根系仍能维持较高活力, 提高对土壤养分的吸收能力。(4) 高光效: 叶面积适中, 叶厚色深; 角果层厚, 果皮光合能力强, 粒壳比高, 对籽粒灌浆贡献大。紧凑株型能更充分利用光能, 耐密植潜力更高, 而高秆松散型品种冠层光能利用率低, 存在巨大产量提升空间[37]。(5) 养分高效: 根系吸收能力强, 体内养分转运、再利用效率高, 减小个体养分竞争。

2.2.2　密植条件下智慧株型特征　　高密度直播下, 植株理想株型需具有动态适应环境变化(可塑性)的能力, 尤其是光信号(如红光/远红光比率降低)的感知和响应(避荫反应)至关重要, 如植株冠层可通过感知光信号, 叶/分枝夹角、分枝长短、株高等发生动态响应, 塑造成能高效利用光能的冠层结构, 进而影响产量和抗倒性, 即智慧株型。玉米领域提出的智慧株型(如“上紧下松”冠层结构)及其分子机制(如光信号 phyA-RAVL1 调控 *lac1* 基因动态调节叶夹角)为解决密植负面效应提供了革命性思路[38-39]。借鉴玉米经验, 在油菜理想株型研究基础上, 耐密株型亟需纳入“智慧”和“可塑性”, 如: 探索油菜是否存在类似的光信号感知与传导通路(如光敏色素)调控分枝角度、叶片/角果着生角度, 甚至株高节间伸长。培育具有动态优化冠层结构能力的品种: 例如, 在密植环境下能自动维持或形成更紧凑的上部结构(分枝/角果角度更小、叶片更直立), 同时保证中下部有足够透光率(可能通过调控特定部位分枝或叶片角度), 实现类似“智慧冠层”的效果, 最大化群体光能利用效率。同时强化抗倒可塑性, 研究高密度下油菜茎秆如何响应光竞争信号并增强自身机械强度的机制。

2.2.3　生理过程协同调控　　面向未来农业生产, 实现“高产-高效-稳产”目标, 单一株型改良远远不够, 必须整合关键生理过程: 碳氮代谢协同, 平衡营养生长与生殖生长、源库关系, 即最佳生理型。未来的油菜理想株型和生理型应能在动态密植环境下, 协同优化形态建成、光合碳固定及同化物向籽粒(库)的高效转运、养分高效吸收利用。

(1) 生物量高效累积与分配。耐密直播油菜应具备“秋冬双发、春后早发”的生长发育特性, 生物量积累作为籽粒产量的物质基础, 其动态过程受光合作用、呼吸作用及同化物转运分配共同调控[40]。干物质积累速率与器官分配协调性直接影响收获指数, 品种间差异显著[41]。油菜全生育期干物质积累呈 S

型曲线, 薹期至花期积累最快, 营养生长期以叶片为主要积累器官, 其干物质转移效率决定籽粒形成[42]。越冬期生物量高效累积尤为关键[43]: 此阶段油菜通过光合产物优先分配至地下部, 根冠比增加, 形成 ≥ 6 片真叶、根颈粗> 0.5 cm 的生理结构, 增强抗寒性与返青势[44-45]; 同时通过调整叶角度、提升叶绿素含量维持低温弱光下光合效率, 冬性品种适应性显著优于春性品种[46]。遗传改良中, 分子标记辅助选择与 CRISPR/Cas9 基因编辑等正加速抗寒高生物量品种选育。近期康奈尔大学研究通过筛选玉米野生近缘种的耐寒基因并利用基因编辑等技术降低萌发温度, 将种植期提前至早春, 突破玉米种植季节限制, 使玉米更充分地利用其 C_4 光合作用潜力, 实现增产超 10% [47]。

(2) 提升茎秆质量与抗倒性。倒伏对产量构成较大影响: 初花—角果期倒伏致单株角果数显著减少, 千粒重降低 0.39~1.27 g, 减产幅度因品种耐密性而存在差异[21-22]。茎秆抗倒伏能力与株高及茎秆质量密切关联[48]。降低株高虽可增强抗倒性, 但易导致减产[49], 故提升茎秆质量成为关键路径。抗倒品种表现为: 茎粗、茎秆充实度大; 皮层细胞层数多、维管束排列紧密[21,50-51]; 结构性碳水化合物(纤维素/半纤维素/木质素)含量高, 通过增强细胞壁网络机械强度抵御外力[52]。茎秆同时承担“源-库”桥梁功能: 高密度下油菜茎秆花后光合产物转运能力直接影响群体产量[8]; 类似番茄中 *SlTPP1* 基因调控的碳资源调度机制, 茎秆通过协调昼夜同化物分配优化根系生物量[53]。因此, 密植下, 高产油菜茎秆结构性物质的组成及网络结构合理, 适宜比例干物质用于维持自身抗倒性, 其余干物质能高效运转至角果, 供籽粒发育。

(3) 根-冠协同提高耐密性。合理密植通过协调个体-群体矛盾实现增产, 但超过阈值(最高产量对应密度)则导致根冠失衡而减产[54-55]。种植密度过高会显著制约植物的根系发育, 导致其根长与根表面积等关键形态参数下降。这种地下部的资源受限信号, 通过“资源-信号”的协同作用, 进而限制了地上部冠层的光合作用能力, 降低了光能利用率[55]。耐密品种则通过优化根系构型(减小体积但提升吸收效率)、增强伤流液活性(提高养分转运能力)维持根冠平衡[9,56]。高产群体根冠结构特征包括: 合理的根冠比, 适度根系干物质累积, 避免根倒, 同时防止根系冗余, 碳资源向籽粒高效分配[57-58]。耐密品种以单位面积养分水分吸收效率提升适应地下竞争[59], 根系伤流液作为根-冠物质交换枢纽调控同化物分配[5]。

3 单产提升实现途径

3.1 选用耐密且生育期配置合理的品种

长江流域高产直播冬油菜要求: 冬春生物量大, 立春不早薹; 惊蛰初花, 清明终花; 春后快发不贪青。采用 45 万株 hm^{-2}、202.5 kg hm^{-2} 的密度和纯氮配置, 优质丰产直播油菜关键参数为: 立春绿叶数大于 10 片, 单株干重大于 10.3 g, 生长点高度低于 25 cm; 初花 3 月 5 日—3 月 10 日, 花期 25~30 d, 终花期单株干重大于 25.5 g, 株高 160~165 cm; 含油量高于 45%。开花关键基因 *BnaFLC.A10* 和 *BnaFLC.A2* 不同单倍型及组合是油菜春化关键因素, 适宜组合确保冬前不早花, 积累较高生物量, 奠定高产基础; *BnaCO.A10* 和 *BnaFT.A2* 基因不同单倍型及组合调控油菜光周期, 确保春后早开花、不贪青。可借助分子标记辅助选择, 进一步提高“冬前不开花, 春后开花早”的品种选用精度, 避免冬前开花的风险, 使得油菜温光需求与自然资源吻合, 高产稳产兼具[38-40]。

3.2 采用种子处理技术, 提高一播全苗稳定性

一播全苗是油菜高产稳产的基础, 壮苗调控是其关键。发展高效稳定的一播全苗壮苗技术, 对提升油菜全程机械化轻简生产水平、促进产业稳健发展具有迫切需求。创新性油菜种子丸粒化技术的应用, 可有效解决油菜种子体积小、粒重轻导致的无人机飞播易飘种、机械播种均匀性差等问题, 满足现代农业精量播种技术与装备的发展需求[11]。该技术可耦合特异性农药与肥料配方, 为直播油菜应对多变环境实现全苗、齐苗、壮苗提供重要保障。然而, 目前丸粒化包衣(含薄膜包衣)技术在棉花、水稻、玉米等应用较多, 但在油菜上相关配方与技术的系统研究鲜见报道。生产实践中, 丸粒化种子常与薄膜包衣、拌种等处理混淆, 其配方多为填充剂与农药、微肥、生长调节剂等的简单组合, 主要功能局限于杀虫杀菌, 缺乏应对不同生产环境的广适性与特异性。当前油菜生产中尚无成熟的丸粒化技术及配套措施, 国内也尚未建立明确的油菜丸粒化种子质量标准。油菜种子具有粒径小、千粒重低、表面光滑且蜡质层丰富等特点, 其生产环境和需求也显著区别于其他作物。因此, 基于前期研究基础(图 2), 亟需开发针对油菜种子特性的丸粒化包衣专用工艺与配方, 加快推广应用。

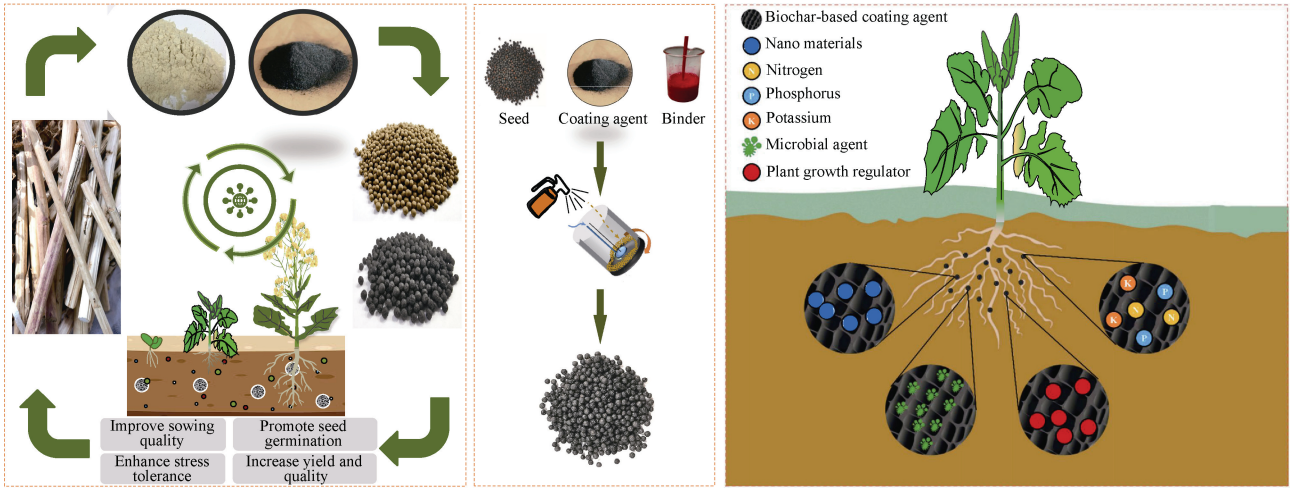


图 2　油菜种子丸粒化流程图

Fig. 2　Seed pelleting process of rapeseed

图片参考 Tan 等[11]并作修改。The figure referred to Tan, et al. [11] with modification.

3.3　提高秸秆还田条件下整地与播种质量

高质量群体构建是不同耕作播种模式下作物高效生产核心环节。秸秆还田利于培肥地力，但易导致土壤过度疏松(俗称“海绵田”)，造成油菜播种出苗难、根系发育差，难以构建高质量群体。利用联合播种机，集成应用以下关键技术：深翻(25 cm)改善耕层结构；适当深播(约 2 cm)结合播后镇压以保墒提墒；优化行距配置(密度约 45 万株 hm^{-2}，采用等行距配置；密度 45 万株 hm^{-2} 以上，采用宽窄行配置)；肥料隔行深施(8~10 cm)，显著提升了土壤酶活性(如 β-1,4-葡萄糖苷酶、β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶)，促进了根系生物量积累，增大了叶面积指数和角果皮面积指数，增强了群体光合能力。同时，提高了茎秆中钾(K)、硅(Si)、钙(Ca)元素含量，增加了维管束数量，提升了纤维素及木质素含量。这些效应协同保障了“一播全苗、足苗壮苗”，有效协调了个体发育与群体构建、高产潜力与抗倒伏性能之间的矛盾。与农户常规种植模式相比，该技术体系具有以下优点：出苗率提高 15.0%~16.3%；群体光能利用率提高 10.0%~12.0%；根倒角度降低 16.1%；倒伏指数降低 11.7%~17.4%；机收损失率降低 10.0%~14.0%；增产约 8.9%，含油量提高 1.0~1.3 个百分点[24,43-44]。

3.4　构建不同播期下高质量群体，实现壮苗精准调控

基于长江流域 24 个试验点连续 6 年的播期×密度×氮肥裂区互作试验，通过模型寻优与验证，明确了长江流域直播油菜的优化群体配置模式。以湖北省为例，直播油菜的推荐模式为：播期 9 月 25 日—10 月 5 日，密度 45~60 万株 hm^{-2}，施氮量 180~225 kg hm^{-2}。若播期迟于 10 月 5 日，每推迟 5 d，密度需相应增加 3.0~4.5 万株 hm^{-2}。在正常条件下，湖北地区机械播种油菜的越冬成苗率约为 35%，可通过调整播种量(基于目标密度和种子千粒重)实现精准密度调控。建立了以群体绿叶数为关键指标的无人机精准作业模式，通过叶面喷施尿素(促苗)、多效唑或烯效唑(控旺)、硅钾肥(壮秆抗倒)，实现轻简高效、低投入高收益的田间管理，具体措施和效果见表 1。

3.5　采用“一促四防”技术，提高绿色防控效果

在油菜初花期采用“一促四防”技术，即无人机喷施复配药剂(杀虫剂+杀菌剂+0.2%磷酸二氢钾+0.1%速效硼肥)，可协同防治菌核病、花而不实及早衰，增产显著，有效解决抽薹期植株郁闭导致的施药难题。当前化学防治仍是菌核病防控主要手段，但二甲酰亚胺类杀菌剂连续使用 10 年后，核盘菌(Sclerotinia sclerotiorum)已出现抗药性突变，且存在环境风险[62]。基于作物健康生产需求，以盾壳霉(Coniothyrium minitans)为代表的生物防治技术取得突破：花期喷施 ZS-1SB 菌株悬浮液(1×10^7 孢子 mL^{-1})防效达 68.5%~73.2%，土壤施用(300 kg hm^{-2})可消解 81.4%以上菌核，并通过重构根际微生物群落(芽孢杆菌丰度提升 43.7%)增强系统抗性[63-64]。

3.6　优选机械收获参数，降低机收损失率

优质低损收获技术是实现大面积单产提升的关键环节，基于籽粒发育-角果含水量确定机收时期可降低损失率并保障籽粒品质。研究表明角果皮水分

表 1 油菜群体壮苗精确调控技术措施(密度: 45 万株 hm^{-2})

Table 1 Precision regulation techniques for cultivating robust rapeseed populations (Density: 4.5×10^5 plants hm^{-2})

调控时期 Regulatory stage	调控指标 Regulate indicator		栽培措施 Cultivation practice	应用效果 Application effect	参考文献 Reference
冬至前 Before overwintering	群体绿叶数 Green leaf population	4.05×10^6–4.95×10^6 leaves hm^{-2}	无需追施尿素 No need for urea topdressing	一类苗占比> 85% Proportion of grade 1 seedlings exceeded 85%	—
		2.70×10^6–3.60×10^6 leaves hm^{-2}	追施尿素 75 kg hm^{-2} Urea topdressing at 75 kg hm^{-2}		—
		1.35×10^6–2.25×10^6 leaves hm^{-2}	追施尿素 150 kg hm^{-2} Urea topdressing at 150 kg hm^{-2}		—
		> 5.40×10^6 leaves hm^{-2}	无人机喷施 15 L hm^{-2} Drone spray application 15 L hm^{-2} 7.5 g L^{-1} 多效唑 7.5 g L^{-1} Paclobutrazol 2.5 g L^{-1} 烯效唑 2.5 g L^{-1} Uniconazole		[60-61]
蕾薹初期 (薹高 8–12 cm) Early budding stage (Bolting height of 8–12 cm)	茎秆质量 Stem quality		无人机喷施 15 L hm^{-2} Drone spray application 15 L hm^{-2} 4.5 g L^{-1} 硅肥溶液 4.5 g L^{-1} silicon fertilizer solution	增产 6.1% Yield increased by 6.1% 抗倒性增加 8.2% Lodging resistance increased by 8.2% 抗裂角性增加 30.6% Pod shattering resistance increased by 30.6%	[7]
			追施氯化钾 45–75 kg hm^{-2} Apply KCl at 45–75 kg hm^{-2}	增产 5.2% Yield increased by 5.2% 抗倒性增加 6.5% Lodging resistance increased by 6.5% 含油量增加 0.6% Oil content increased by 0.6%	—

含量 11%~13%为油菜联合机收适宜期, 此时形态表现为全株角果完全变黄至主花序脱水干枯且持续约 5 d, 此期收获可实现高千粒重与高含油量, 损失率可降至 7%以下; 终花后 38 d 为油菜籽粒生理成熟期(千粒重与含油量达峰值), 而生理成熟前 5 d 籽粒指标已接近峰值, 故分段机收最适时期为终花后 33 d (生理成熟前 5 d)割倒, 经 3~5 d 后熟即可捡拾脱粒, 此时种子含水量< 15%、叶绿素< 10 mg kg^{-1}、损失率约 5% [65]。然而当前, 我国油菜机械收获比例偏低(约 58%), 其主要瓶颈之一在于收获装备的调度效率不足, 特别是在跨区作业场景下, 信息不对称导致机械闲置与燃油成本增加。未来需加强融合气象、土壤、遥感等多维数据, 构建高精度的成熟期与产量预测模型, 规划最优作业路径、科学配置收割机集群, 数字化智能调度系统的应用将有望显著缩短油菜收获作业周期, 提升油菜机械化收获水平。

4 未来发展方向

以机械联合直播和飞播为代表的直播油菜模式, 凭借其显著的经济效益和广阔前景, 已成为突破油菜生产瓶颈、实现轻简化与机械化的关键途径。随着组学技术、人工智能(artificial intelligence, AI)和系统生物学的迅猛发展, 作物育种和栽培正在步入“智能化时代”, 基于人工智能的精准栽培将重塑油菜栽培方式, 其未来发展将聚焦四大核心方向(图 3):

(1) 加强优良品种筛选, 明确品种特性。依托基因编辑与表型组学技术的深度融合, 加快挖掘高产等关键基因位点, 推动高产品种的精准选育。结合“生理聚合”策略, 在单株优良性状基础上, 构建大田群体尺度上的“理想株型+最佳生理型”协同设计体系, 为品种优化提供理论支撑。

(2) 实现品种与栽培技术精准配套, 充分挖掘

单产潜力。开发密植群体产量形成的关键性状的分子标记系统，利用该系统明确当前重大品种的优缺点，建立精准配套栽培技术体系；在此基础上，挖掘密植群体产量形成重要性状关键基因，实现精准高效调控，推动品种特性与栽培措施深度融合。

(3) 开发增产新技术与新产品，提升资源利用效率。重点发展抗旱(湿)起垄、无人机与农机协同作业等新型田间装备，并积极研发外源调控物质等物化产品，推动智能装备精准执行农艺指令，有效降低资源消耗。依托全域感知网络与作物生长模型，融合人工智能与机器学习算法，实现栽培策略的动态优化，系统提高水、肥、药等资源的利用效率。

(4) 构建智慧生产技术体系，全面提高作业效能。农用无人机撒播、机械联合直播等轻简播种方式已显著提升播种环节效率。未来将进一步推进农机装备智能化升级，强化无人机与地面农机的集群协同，结合高精度感知与智能决策系统，实现耕种管收全环节的精准高效作业，大幅提升大田作业效能与区域单产水平。

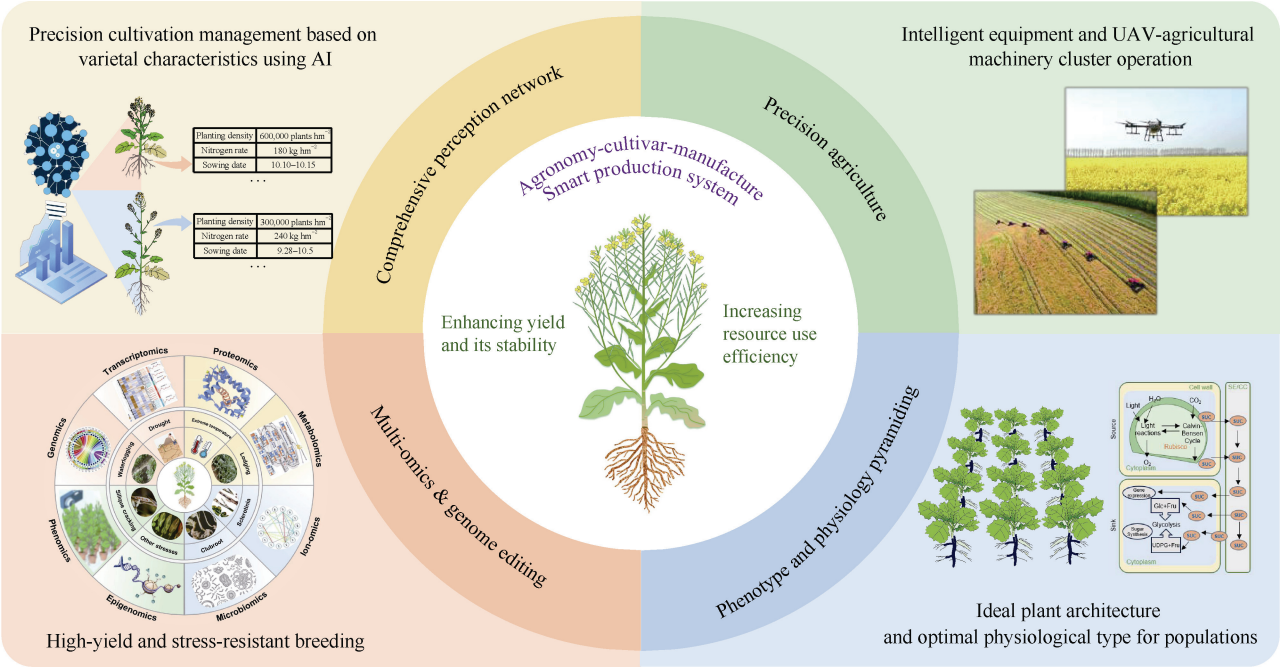


图 3　直播油菜未来发展方向

Fig. 3　The future development directions of directly sown rapeseed

发展方向主要包括: (1) 表型与生理性状聚合; (2) 基因组编辑与多组学驱动的精准设计育种; (3) 精准调控网络构建; (4) 基于新技术与产品的智慧农业。

Development directions mainly include: (1) phenotype and physiology pyramiding; (2) genome editing and multi-omics-driven precision design breeding; (3) construction of comprehensive perception networks; (4) smart agriculture based on new technologies and products.

References

[1] 马云倩, 李淞淋. 营养视角下中国近 60 年来居民食用植物油消费状况研究. 中国油脂, 2020, 45(2): 3–9.
Ma Y Q, Li S L. Consumption status of edible vegetable oil in China in the past six decades in the view of nutrition. China Oils Fats, 2020, 45(2): 3–9 (in Chinese with English abstract).

[2] Li X Y, Zuo Q S, Chang H B, et al. Higher density planting benefits mechanical harvesting of rapeseed in the Yangtze River Basin of China. Field Crops Res, 2018, 218: 97–105.

[3] 蒯婕, 王积军, 左青松, 等. 长江流域直播油菜密植效应及其机理研究进展. 中国农业科学, 2018, 51: 4625–4632.
Kuai J, Wang J J, Zuo Q S, et al. Effects and mechanism of higher plant density on directly-sown rapeseed in the Yangtze River Basin of China. Sci Agric Sin, 2018, 51: 4625–4632 (in Chinese with English abstract).

[4] 张春雷, 李俊, 余利平, 等. 油菜不同栽培方式的投入产出比较研究. 中国油料作物学报, 2010, 32: 57–64.
Zhang C L, Li J, Yu L P, et al. Input/output analysis on rapeseed production practices under different cultivation mode. Chin J Oil Crop Sci, 2010, 32: 57–64 (in Chinese with English abstract).

[5] Lou H X, Zhao B W, Peng Y, et al. Auxin plays a key role in nitrogen and plant density-modulated root growth and yield in different plant types of rapeseed. Field Crops Res, 2023, 302: 109066.

[6] Kuai J, Li X Y, Ji J L, et al. Response of leaf carbon metabolism

and dry matter accumulation to density and row spacing in two rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes with differing plant architectures. Crop J, 2022, 10: 680–691.

[7] Kuai J, Sun Y Y, Guo C, et al. Root-applied silicon in the early bud stage increases the rapeseed yield and optimizes the mechanical harvesting characteristics. Field Crops Res, 2017, 200: 88–97.

[8] Wang Y F, Wang Y Y, Xing R P, et al. Density-tolerant rapeseed increased population yield by enhancing post-anthesis nonstructural carbohydrate translocation efficiency in stem. Physiol Plant, 2025, 177: e70341.

[9] Zhao B W, Lou H X, Wang Y Y, et al. Efficient root nitrogen transport is a key factor in improving nitrogen utilization and yield of semi-dwarf rapeseed. Field Crops Res, 2025, 322: 109758.

[10] Qu Z Y, Tian Z, Wei L Q, et al. A chaperonin *BnaC01.CCT8* contributes to silique length and seed weight by affecting auxin and jasmonic acid signalling in *Brassica napus*. Plant Biotechnol J, 2025, 23: 3934–3948.

[11] Tan X Q, Wang Z K, Zhang Y J, et al. Biochar-based pelletized seed enhances the yield of late-sown rapeseed by improving the relative growth rate and cold resistance of seedlings. Ind Crops Prod, 2025, 223: 119993.

[12] Rizzo G, Monzon J P, Tenorio F A, et al. Climate and agronomy, not genetics, underpin recent maize yield gains in favorable environments. Proc Natl Acad Sci USA, 2022, 119: e2113629119.

[13] Zamski E, Schaffer A A. Photoassimilate Distribution Plants and Crops Source-sink Relationships. London: Routledge, 2017.

[14] Angadi S V, Cutforth H W, McConkey B G, et al. Yield adjustment by canola grown at different plant populations under semi-arid conditions. Crop Sci, 2003, 43: 1358–1366.

[15] Kuai J, Sun Y Y, Zhou M, et al. The effect of nitrogen application and planting density on the radiation use efficiency and the stem lignin metabolism in rapeseed (*Brassica napus* L.). Field Crops Res, 2016, 199: 89–98.

[16] 王翠翠, 陈爱武, 王积军, 等. 湖北双季稻区免耕直播油菜生长及产量形成. 作物学报, 2011, 37: 694–702.
Wang C C, Chen A W, Wang J J, et al. Growth and yield formation of No-tillage direct-seeding rapeseed in Hubei double cropping rice area. Acta Agron Sin, 2011, 37: 694–702 (in Chinese with English abstract).

[17] 李小勇, 周敏, 王涛, 等. 种植密度对油菜机械收获关键性状的影响. 作物学报, 2018, 44: 278–287.
Li X Y, Zhou M, Wang T, et al. Effects of planting density on the mechanical harvesting characteristics of semi-winter rapeseed. Acta Agron Sin, 2018, 44: 278–287 (in Chinese with English abstract).

[18] 宋稀, 刘凤兰, 郑普英, 等. 高密度种植专用油菜重要农艺性状与产量的关系分析. 中国农业科学, 2010, 43: 1800–1806.
Song X, Liu F L, Zheng P Y, et al. Correlation analysis between agronomic traits and yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) for high-density planting. Sci Agric Sin, 2010, 43: 1800–1806 (in Chinese with English abstract).

[19] Diepenbrock W. Yield analysis of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): a review. Field Crops Res, 2000, 67: 35–49.

[20] Zhang S J, Liao X, Zhang C L, et al. Influences of plant density on the seed yield and oil content of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). Ind Crops Prod, 2012, 40: 27–32.

[21] Kuai J, Li X Y, Ji J L, et al. The physiological and proteomic characteristics of oilseed rape stem affect seed yield and lodging resistance under different planting densities and row spacing. J Agron Crop Sci, 2021, 207: 840–856.

[22] 巩若琳, 宋波, 杨志叶, 等. 迟播和密度对不同油菜品种抗倒伏及产量的影响. 作物学报, 2023, 49: 2777–2792.
Gong R L, Song B, Yang Z Y, et al. Effects of sowing date and density on lodging resistance and yield of different rapeseed cultivars. Acta Agron Sin, 2023, 49: 2777–2792 (in Chinese with English abstract).

[23] Reinhardt D, Kuhlemeier C. Plant architecture. EMBO Rep, 2002, 3: 846–851.

[24] Loudet O, Chaillou S, Merigout P, et al. Quantitative trait loci analysis of nitrogen use efficiency in *Arabidopsis*. Plant Physiol, 2003, 131: 345–358.

[25] Xing Y Z, Zhang Q F. Genetic and molecular bases of rice yield. Annu Rev Plant Biol, 2010, 61: 421–442.

[26] Duan E C, Wang Y H, Li X H, et al. *OsSHI1* regulates plant architecture through modulating the transcriptional activity of IPA1 in rice. Plant Cell, 2019, 31: 1026–1042.

[27] Dastan S, Ghareyazie B, Teixeira da Silva J A. Selection of ideotype to increase yield potential of GM and non-GM rice cultivars. Plant Sci, 2020, 297: 110519.

[28] Wang D P, Fahad S, Saud S, et al. Morphological acclimation to agronomic manipulation in leaf dispersion and orientation to promote “Ideotype” breeding: evidence from 3D visual modeling of “super” rice (*Oryza sativa* L.). Plant Physiol Biochem, 2019, 135: 499–510.

[29] Li X, Xie C, Cheng L, et al. The next Green Revolution: integrating crop architectype and physiotype. Trends Biotechnol, 2025, 43: 2479–2493.

[30] Fu T D, Zhou Y M. Progress and future development of hybrid rapeseed in China. Eng Sci, 2013, 11: 13–18.

[31] Wang H, Cheng H T, Wang W X, et al. Identification of *BnaYUCCA6* as a candidate gene for branch angle in *Brassica napus* by QTL-seq. Sci Rep, 2016, 6: 38493.

[32] 刘后利. 实用油菜栽培学. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. pp 84–92.
Liu H L. Practical Rapeseed Cultivation. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1987. pp 84–92 (in Chinese).

[33] Zhang S, Li C, Li Q, et al. Functional divergence of *BAK1* genes from *Brassica rapa* in regulating plant architecture. Genet Mol Res, 2015, 14: 14587–14596.

[34] Zhao C J, Cui X B, Xie M L, et al. Chromosome-scale genome assembly-assisted identification of *Brassica napus BnDCPA1* for improvement of plant architecture and yield heterosis. Plant Commun, 2024, 5: 100854.

[35] Li H T, Li J J, Song J R, et al. An auxin signaling gene *BnaA3.IAA7* contributes to improved plant architecture and yield heterosis in rapeseed. New Phytol, 2019, 222: 837–851.

[36] Li H T, Feng H, Guo C C, et al. High-throughput phenotyping accelerates the dissection of the dynamic genetic architecture of plant growth and yield improvement in rapeseed. Plant Biotechnol J, 2020, 18: 2345–2353.

[37] 殷艳, 陈兆波, 余健, 等. 我国油菜生产潜力分析. 中国农业科技导报, 2010, 12(3): 16–21.
Yin Y, Chen Z B, Yu J, et al. Analysis of potential for rapeseed production in China. J Agric Sci Technol, 2010, 12(3): 16–21 (in Chinese with English abstract).

[38] Tian J G, Wang C L, Chen F Y, et al. Maize smart-canopy architecture enhances yield at high densities. Nature, 2024, 632: 576–584.

[39] Sheng H J, Zhang H, Deng H, et al. Maize *COMPACT PLANT 3* regulates plant architecture and facilitates high-density planting. Plant Cell, 2025, 37: koaf029.

[40] 王振林, 贺明荣, 傅金民, 等. 源库调节对灌溉与旱地小麦开花后光合产物生产和分配的影响. 作物学报, 1999, 25: 162–168.
Wang Z L, He M R, Fu J M, et al. Effects of source sink manipulation on production and distribution of photosynthate after flowering in irrigated and rainfed wheat. Acta Agron Sin, 1999, 25: 162–168 (in Chinese with English abstract).

[41] 姜东, 于振文, 李永庚, 等. 高产小麦营养器官临时贮存物质积运及其对粒重的贡献. 作物学报, 2003, 29: 31–36.
Jiang D, Yu Z W, Li Y G, et al. Accumulation and redistribution of temporal reserves in vegetative organs and its contribution to grain weight in high yield winter wheat. Acta Agron Sin, 2003, 29: 31–36 (in Chinese with English abstract)

[42] 廖桂平, 官春云. 甘蓝型冬油菜*(Brassica napus)*干物质积累、分配与转移的特性研究. 作物学报, 2002, 28: 52–58.
Liao G P, Guan C Y. Study on characteristics of dry matter accumulation, distribution and transfer of winter rapeseed (*Brassica napus*). Acta Agron Sin, 2002, 28: 52–58 (in Chinese with English abstract).

[43] 冷锁虎, 夏建飞, 胡志中, 等. 油菜苗期叶片光合特性研究. 中国油料作物学报, 2002, 24: 10–13.
Leng S H, Xia J F, Hu Z Z, et al. Studies on photosynthetic characteristics of rapeseed leaves. Chin J Oil Crop Sci, 2002, 24: 10–13 (in Chinese with English abstract).

[44] 刘自刚, 孙万仓, 杨宁宁, 等. 冬前低温胁迫下白菜型冬油菜抗寒性的形态及生理特征. 中国农业科学, 2013, 46: 4679–4687.
Liu Z G, Sun W C, Yang N N, et al. Morphology and physiological characteristics of cultivars with different levels of cold-resistance in winter rapeseed (*Brassica campestris* L.) during cold acclimation. Sci Agric Sin, 2013, 46: 4679–4687 (in Chinese with English abstract).

[45] Kappen L, Hammler A, Schultz G. Seasonal changes in the photosynthetic capacity of winter rape plants under different nitrogen regimes measured in the field. J Agron Crop Sci, 1998, 181: 179–187.

[46] 刘自刚, 张长生, 孙万仓, 等. 不同生态区冬前低温下白菜型冬油菜不同抗寒品种(系)的比较. 作物学报, 2014, 40: 346–354.
Liu Z G, Zhang C S, Sun W C, et al. Comparison of winter rapeseed varieties (lines) with different cold resistance planted in the northern-extending regions in China under low temperature before winter. Acta Agron Sin, 2014, 40: 346–354 (in Chinese with English abstract).

[47] Ojeda-Rivera J O, Barnes A C, Ainsworth E A, et al. Designing a nitrogen-efficient cold-tolerant maize for modern agricultural systems. Plant Cell, 2025, 37: koaf139.

[48] Shah A N, Tanveer M, Rehman A U, et al. Lodging stress in cereal-effects and management: an overview. Environ Sci Pollut Res, 2017, 24: 5222–5237.

[49] Islam M S, Peng S B, Visperas R M, et al. Lodging-related morphological traits of hybrid rice in a tropical irrigated ecosystem. Field Crops Res, 2007, 101: 240–248.

[50] Huang G M, Liu Y R, Guo Y L, et al. A novel plant growth regulator improves the grain yield of high-density maize crops by reducing stalk lodging and promoting a compact plant type. Field Crops Res, 2021, 260: 107982.

[51] Hu Y, Javed H H, Liu L, et al. Evaluate the sensitivity of rapeseed lodging under low light: a field study on the biomechanics of stem and root lodging in rapeseed (*Brassica napus* L.). Field Crops Res, 2025, 327: 109881.

[52] Burton R A, Gidley M J, Fincher G B. Heterogeneity in the chemistry, structure and function of plant cell walls. Nat Chem Biol, 2010, 6: 724–732.

[53] Chai L, Wang H, Yu H J, et al. Trehalose-6-phosphate phosphatase SlTPP1 adjusts diurnal carbohydrate partitioning in tomato. Plant Cell Environ, 2025, 48: 6213–6230.

[54] Assefa Y, Vara Prasad P V, Carter P, et al. Yield responses to planting density for US modern corn hybrids: a synthesis-analysis. Crop Sci, 2016, 56: 2802–2817.

[55] Li J, Xie R Z, Wang K R, et al. Variations in maize dry matter, harvest index, and grain yield with plant density. Agron J, 2015, 107: 829–834.

[56] 吴斌, 任伟, 班祥奔, 等. 不同耐密性玉米品种地上部与根系性状的协同效应. 植物营养与肥料学报, 2023, 29: 57–67.
Wu B, Ren W, Ban X B, et al. Coordination of shoot and root traits of maize cultivar types with different density tolerance. J Plant Nutr Fert, 2023, 29: 57–67 (in Chinese with English abstract).

[57] Yang J C, Zhang H, Zhang J H. Root morphology and physiology in relation to the yield formation of rice. J Integr Agric, 2012, 11: 920–926.

[58] van Ittersum M K, Cassman K G, Grassini P, et al. Yield gap analysis with local to global relevance: a review. Field Crops Res, 2013, 143: 4–17.

[59] 田龙兵, 沈兆鉴, 赵孝天, 等. 种植密度与施氮量互作对不同玉米品种产量和水分利用效率的影响. 中国农业科学, 2024, 57: 4221–4237.
Tian L B, Shen Z Y, Zhao X T, et al. Interactive effects of planting density and nitrogen application rate on plant grain yield and water use efficiency of two maize cultivars. Sci Agric Sin, 2024, 57: 4221–4237 (in Chinese with English abstract).

[60] Kuai J, Li X Y, Yang Y, et al. Effects of paclobutrazol on biomass production in relation to resistance to lodging and pod shattering in *Brassica napus* L. J Integr Agric, 2017, 16: 2470–2481.

[61] Kuai J, Yang Y, Sun Y Y, et al. Paclobutrazol increases canola seed yield by enhancing lodging and pod shatter resistance in *Brassica napus* L. Field Crops Res, 2015, 180: 10–20.

[62] Zhou F, Zhang X L, Li J L, et al. Dimethachlon resistance in *Sclerotinia sclerotiorum* in China. Plant Dis, 2014, 98: 1221–1226.

[63] Zeng L M, Zhang J, Han Y C, et al. Degradation of oxalic acid by

the mycoparasite *Coniothyrium minitans* plays an important role in interacting with *Sclerotinia sclerotiorum*. Environ Microbiol, 2014, 16: 2591–2610.

[64] 杨潇湘, 黄小琴, 张蕾, 等. 生防菌盾壳霉对油菜根际土壤微生物群落结构的影响. 中国农学通报, 2022, 38(32): 92–98.
Yang X X, Huang X Q, Zhang L, et al. Biocontrol fungus *Coniothyrium minitans*: effects on microbial community structure in oilseed rape rhizosphere soil. Chin Agric Sci Bull, 2022, 38(32): 92–98 (in Chinese with English abstract).

[65] 白晨阳, 何菡子, 贾才华, 等. 机械收获方式对油菜籽粒关键性状的影响. 中国农业科学, 2021, 54: 2991–3003.
Bai C Y, He H Z, Jia C H, et al. Effect of the mechanical harvesting methods on the key traits of rapeseed. Sci Agric Sin, 2021, 54: 2991–3003 (in Chinese with English abstract).