中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(5):144-153
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2025259

短生育期油菜中油早1号干物质及养分积累特性

谢尚典[1],明日[2],雷利琴[3],高彦妮[4],刘帅[1],张宗急[2],李倩[3],唐利平[3],欧阳凤仔[4],陆志峰[1],鲁剑巍[1*]
(1. 华中农业大学资源与环境学院,湖北 武汉,430070;
2. 桂林市农业科学研究中心,广西 桂林,541000;
3. 衡阳市农业科学院,湖南 衡阳,421000;
4. 吉安市农业科学研究所,江西 吉安,343000)

摘要:为建立针对性的高效施肥技术体系、提升三熟制冬闲田油菜产能,在桂林、衡阳和吉安3个多熟制区开展田间试验,研究短生育期油菜品种中油早1号的干物质及氮、磷、钾、镁、硼养分积累特性,为稻-稻-油三熟制区扩种油菜提供科学施肥依据。中油早1号在3个试验点的生育期为171~182 d,产量为2125~2317 kg·hm^{-2}。该品种干物质积累呈现"S"型曲线增长,在播种后60 d左右进入蕾薹期,随后开启持续约20 d的快速积累阶段,此阶段干物质积累量占总量的31.3%~40.7%,总干物质在角果期达最大值。植株氮、钾、镁、硼的积累规律与干物质的变化相一致,氮、钾积累峰值出现在终花期至角果初期,幼苗末期至蕾薹中期是快速积累期(均持续约22 d),期间积累量分别占总量的24.0%~32.0%和16.9%~28.0%;磷积累在整个生育期持续上升,快增期出现在蕾薹末期至初花期(持续约25 d),期间累积了总量的15.2%~25.8%;镁、硼积累峰值出现在角果期,快速积累期出现在蕾薹期,分别持续约26 d和23 d,期间积累量分别占总量的24.0%~29.3%和32.2%~34.7%。不同养分在成熟期各器官的分配特征为,氮、磷、硼优先积累在籽粒中,钾主要储存于茎秆中,镁则主要在茎秆和籽粒间均匀分配。在产量水平为2250 kg·hm^{-2}时,中油早1号每生产100 kg籽粒平均需要N 10.62 kg、P_2O_5 2.59 kg、K_2O 16.53 kg、Mg 1.19kg、B 0.024 kg,需求比例为1∶0.24∶1.56∶0.11∶0.0023。综上,中油早1号在桂林、衡阳和吉安均能获得丰产,且生长中无明显越冬停滞期,其每生产100 kg籽粒所需的氮、磷、钾、硼等养分比一般冬油菜高,而区域土壤的养分缺乏程度更严重,因此更需注重增加养分投入量,并适当将肥料重点分配在生育前期。

关键词:短生育期油菜;中油早1号;干物质积累;大量元素;中微量元素
中图分类号:S565.4　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1007-9084(2026)05-0144-10

Dry matter and nutrient accumulation characteristics of the short-growth-duration rapeseed cultivar Zhongyouzao 1

XIE Shang-dian[1], MING Ri[2], LEI Li-qin[3], GAO Yan-ni[4], LIU Shuai[1], ZHANG Zong-ji[2], LI Qian[3], TANG Li-ping[3], OUYANG Feng-zai[4], LU Zhi-feng[1], LU Jian-wei[1*]
(1. *College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*; 2. *Guilin Research Center of Agricultural Sciences, Guilin* 541000, *China*; 3. *Hengyang Academy of Agricultural Sciences, Hengyang* 421000, *China*; 4. *Ji′an Academy of Agricultural Sciences, Ji′an* 343000, *China*)

Abstract: To establish a targeted and efficient fertilization technology system and improve rapeseed yield in winter fallow fields under triple cropping system, field experiments were conducted at 3 triple-cropping sites (Guilin, Guangxi; Hengyang, Hunan; and Ji′an, Jiangxi) to quantify dry matter and nutrient (N, P, K, Mg and B) accumulation dynamics of the early-maturing rapeseed cultivar Zhongyouzao 1, and to provide fertilization guidance for expanding rapeseed cultivation within rice-rice-rapeseed cropping system. Across sites, the growth duration of Zhongyouzao 1 ranged from 171 d to 182 d and seed yield ranged from 2125 to 2317 kg·hm^{-2}. Whole-plant dry mat-

收稿日期:2025-12-01
基金项目:国家油菜产业技术体系建设项目(CARS-12);江西心连心化学工业有限公司-华中农业大学合作项目(2024-01);中央高校基本科研业务费专项基金(2662024PY017)
作者简介:谢尚典(2001-),男,硕士研究生,主要从事施肥技术研究,E-mail: xieshangdian@webmail.hzau.edu.cn
* 通讯作者:鲁剑巍(1967-),男,教授,博士生导师,主要从事油菜营养分管理研究,E-mail: lujianwei@mail.hzau.edu.cn

ter accumulation followed an S-shaped curve pattern: plants entered the stem elongation stage at approximately 60 d after sowing, and thereafter experienced a rapid dry matter accumulation phase lasting approximately 20 d. This rapid phase contributed 31.3%-40.7% of total dry matter. Total dry matter reached its maximum at the pod filling stage. Accumulation patterns of N, K, Mg, and B were consistent with dry matter dynamics. N and K exhibited similar accumulation patterns, peaking at the end of early pod filling stage. Their rapid accumulation phase extended from the late seedling stage to the mid stem elongation stage (about 22 d), contributing 24.0%~32.0% and 16.9%~28.0% of total uptake, respectively. P accumulation increased continuously throughout the entire growth period, with its rapid accumulation phase occurring from the late stem elongation stage to the early flowering stage (approximately 25 d), contributing 15.2%-25.8% of total P. Mg and B accumulated rapidly during stem elongation (approximately 26 d and 23 d, respectively), contributing 24.0%-29.3% and 32.2%-34.7% of their total accumulation, respectively. At physiological maturity, nutrient partitioning among organs displayed distinct characteristics: N, P, and B were preferentially concentrated in seeds; K was primarily retained in stems, while Mg showed relatively equitable distribution between stems and seeds. For a target yield level of 2250 kg·hm^{-2}, production of 100 kg seed required 10.62 kg N, 2.59 kg P_2O_5, 16.53 kg K_2O, 1.19 kg Mg, and 0.024 kg B, corresponding to a nutrient ratio of 1: 0.24: 1.56: 0.11: 0.0023. Overall, Zhongyouzao 1 attained high and stable yields at all 3 sites without a pronounced winter stagnation period. Nutrient requirements (N, P, K, B) per 100 kg of seeds were higher than typical winter rapeseed varieties. Given the more severe nutrient deficiencies in the regional soil, enhancing nutrient input is essential, with fertilizer allocation strategically during early growth stages.

Key words: short-growth-duration rapeseed; Zhongyouzao 1; dry matter accumulation; macronutrients; secondary and micronutrients

我国食用植物油自给率仅三分之一左右,进口依赖度居高不下[1]。油菜作为国内最主要的油料作物之一,在保障食用植物油供给安全方面具有重要战略地位,提升油菜总产已成为保障国家油料安全的紧迫任务[2]。增加油菜总产主要依靠提高单产和扩大种植面积两种途径[3],后者被认为是当前最直接有效的措施,也是保障油料产能的重要基础。相关调查表明,长江流域现有冬闲田约430万公顷,光热资源适宜油菜生长,为扩种油菜提供了巨大潜力[4],在该区域推广稻-稻-油三熟制模式,是高效利用冬闲田、实现粮油兼丰的关键举措。但该模式下留给油菜的种植窗口期仅160~180 d,短生育期油菜因生育期紧凑、能高效衔接茬口的特征,成为三熟制区油菜扩种的核心品种选择[5]。干物质积累是油菜产量形成的物质基础,养分积累则是干物质合成、转运的核心生理支撑,二者的动态积累规律与器官分配特征,直接决定油菜产量高低与养分利用效率[6]。然而,短生育期油菜因生育期大幅压缩,干物质合成与养分吸收的节奏、强度可能发生改变,其积累规律与常规熟期品种是否存在差异尚未明确。加之该区域土壤养分普遍贫瘠,且随着纬度的降低,尤其是南方红黄壤区,土壤pH也随之降低,导致土壤中镁、硼等元素有效性降低,缺乏现象较为普遍[7]。此外,该区域稻田长期处于水旱轮作状态,淹水期间土壤还原条件会增强磷、钾等元素的固定[8,9],而短期干旱又易引起镁、硼等移动性较差的元素有效性下降[10]。因此,探究短生育期油菜在该区域的干物质与养分积累规律,对三熟制区油菜扩种与高产栽培具有重要意义。

已有研究表明,常规熟期油菜整株的干物质及养分积累呈“慢-快-慢”动态变化,蕾薹期至花期为干物质快速积累的关键阶段,也是氮、磷、钾养分吸收的高峰期,养分吸收强度与干物质积累速率高度协同[11-13]。中微量元素中,镁、硼积累动态呈“S”型曲线,积累进程随生育期推进逐步加快,角果期达到最大值[14]。本试验所在三熟制区的相关研究表明,该区域常规熟期油菜干物质与磷、钾的净增量最大值均出现在开花期,镁、硼等中微量元素的积累高峰也同步于花期,且其干物质及钾、镁的总积累量显著高于早熟油菜[15]。然而,短生育期油菜为了在显著压缩的生育期内达到一定产量,其干物质与养分积累规律是否与常规熟期品种一致尚不明确,若沿用常规熟期油菜的栽培与施肥方案,可能无法充分发挥其产量潜力。为此,本研究于2024-2025年度在稻-稻-油三熟制区的桂林、衡阳和吉安三地开展田间试验,以优质双低高油油菜品种中油

早1号为研究对象,探究总结短生育期油菜的干物质及氮、磷、钾、镁、硼养分积累特性,从养分生理角度阐明短生育期油菜的物质积累与养分需求规律,为建立针对性的高效施肥技术体系、提升三熟制冬闲田油菜产能提供理论依据与技术支撑,对推动南方粮油兼丰与农业可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验地基本信息

试验于2024-2025年度在广西省桂林市农业科学院(25°03′55″N,110°18′27″E)、湖南省衡阳市农业科学院(26°52′26″N,112°30′5″E)和江西省吉安市农业科学研究所(27°02′44″N,114°54′23″E)进行,油菜前茬作物均为水稻。衡阳和吉安同属长江中游地区,桂林属珠江流域,3个试验地均为亚热带季风气候。桂林、衡阳、吉安试验点油菜季总积温分别为2784.9、2451.4、2447.7℃;3个试验点油菜季总降水量分别为517.4、400.1、306.5 mm。试验点0~20 cm耕层土壤基础养分状况见表1。

1.2 试验设计

供试油菜品种为中国农业科学院油料作物研究所研发的中油早1号,具有短生育期、高产、高油、多抗等特性。采用条播方式,行距为20 cm,株距为2 cm,播种量为5.25 kg·hm^{-2}(按平均千粒重为3.55 g计算,种植密度约为1.48×10^{6}株·hm^{-2}),成熟时即采用机器联合收获。各试验点油菜播期及生育期划分见表2。N、P_2O_5、K_2O、MgO、B施用量分别为150、67.5、90、37.5、2.25 kg·hm^{-2},肥料品种分别为中化化肥控股有限公司生产的含量45%(15-15-15)的复合肥、尿素(含N 46%)、氯化钾(含K_2O 60%)、无水氯化镁(含$MgCl_2$ 99%)、硼砂(含B 11%)。氮肥以70%基施、20%越冬肥、10%薹肥分3次施用,钾肥以75%基施、25%薹肥分2次施用(其中复合肥作基肥一次性施用);其他肥料全部基施。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤样品 水稻收获后油菜播种前采用"S"形取样法,采集0~20 cm耕层土壤,按常规方法测定其pH、有机质、全氮、速效磷、速效钾、有效镁、有效硼[16]。

1.3.2 生育期植株样品 自播种后每隔15 d取一次植株样,每点取样12次,取样时随机选取3个样点(1 m×1 m)。取样时将整个植株带根挖出,洗净,分为地上部、地下部于105℃杀青30 min,60℃恒温烘干后称取干重。采用粉碎机将样品磨碎至所有样品通过直径为0.5 mm的网筛后,封装于自封袋。

1.3.3 成熟期植株样品 参照刘秋霞等[17]的方法,成熟期收获前,在各试验点选取3个固定样方,调查油菜收获密度,在小区内随机选取长势一致的10株油菜,调查单株角果数,每株均匀选取上中下20个角果调查每角粒数,放置网袋内悬挂风干脱粒后分别统计茎秆、角壳、籽粒的生物量,取部分风干籽粒

表1 供试基础土壤养分状况

Table 1 Chemical properties of the top soil (0-20 cm)

地点 Site	pH	有机质 Organic matter /(g·kg^{-1})	全氮 Total N /(g·kg^{-1})	速效磷 Available P /(mg·kg^{-1})	速效钾 Available K /(mg·kg^{-1})	有效镁 Available Mg /(mg·kg^{-1})	有效硼 Available B /(mg·kg^{-1})
桂林 Guilin	6.56	41.26	2.50	15.88	262.0	151.4	0.25
衡阳 Hengyang	5.08	28.04	2.10	12.87	117.9	161.1	0.41
吉安 Ji'an	4.97	23.22	1.70	18.29	103.5	56.9	0.70

表2 播期及生育期划分

Table 2 Sowing date and growth stage divisions /(yy.mm.dd)

地点 Site	播种期 Sowing date	苗期 Seeding	蕾薹期 Stem elongation	花期 Flowering period	角果期 Pod filling	成熟期 Maturity	全生育期 Whole growth duration /d
桂林 Guilin	2024.10.27	2024.10.31-2025.1.1	2025.1.2-2025.2.3	2025.2.4-2025.3.14	2025.3.15-2025.4.15	2025.4.16	171
衡阳 Hengyang	2024.10.25	2024.10.30-2025.1.3	2025.1.4-2025.2.7	2025.2.8-2025.3.12	2025.3.13-2025.4.20	2025.4.21	178
吉安 Ji'an	2024.10.25	2024.10.30-2025.1.4	2025.1.5-2025.2.9	2025.2.10-2025.3.13	2025.3.14-2025.4.24	2025.4.25	182

在60℃条件下烘干至恒重,测定千粒重。在油菜成熟期收获各小区的所有油菜,以风干重计为小区产量,再折算为单产。

1.3.4 植株样品测定方法 称量0.15~0.16 g植株样品置于消化管底部,加入5 mL浓H_2SO_4,在380℃下消煮至无色并过滤定容至50 mL,使用流动注射分析仪(AA3,德国SEAL)测定植株全氮、全磷含量,火焰光度计测定植株全钾含量[18];称量0.20~0.25 g植株样品置于锥形瓶底部,加入5 mL体积比为4:1的HNO_3-$HClO_4$混合酸溶液,在220℃下消煮至无色并过滤定容至50 mL,使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES 5110,美国Agilent)测定有效镁、有效硼含量[19,20]。

1.4 数据处理与分析

参考崔党群[21]的方法,利用Logistic方程模型$y = k/[1+b\times\exp(c\times(x-d))]$拟合油菜干物质和养分积累过程(y为干物质积累量或养分积累量,x为播种后天数,k为常量,b、c、d为回归参数),用于推算油菜生长发育的快速积累阶段。其他计算指标如下:

生育期/成熟期氮积累量(kg·hm^{-2})= 地上部干物质量×地上部养分含量+地下部干物质量×地下部养分含量;磷、钾、镁、硼积累量同上[22]。

成熟期不同部位干物质分配比例(%)= 某一部位干物质量/干物质积累总量×100%;养分积累量同上。

成熟期养分积累量下降比例=(最大养分积累量-成熟期积累量)/最大养分积累量。

百公斤籽粒氮素吸收量(kg/100 kg)= 地上部氮素总吸收量/籽粒产量×100;磷、钾、镁、硼积累量同上。

采用Excel 2021和SPSS 27.0对数据进行整理和分析,利用最小显著性差异(LSD)法在$P<0.05$水平进行差异显著性检验。使用Origin 2024作图,并进行Logistic方程拟合。

2 结果与分析

2.1 产量与成熟期各器官生物量分配

研究结果表明(表3),中油早1号在桂林、衡阳和吉安的产量分别为2125、2296和2317 kg·hm^{-2},平均为2246 kg·hm^{-2},表现较为稳定。随着纬度以及生育期的增加,产量呈现出递增趋势,相应的经济系数(籽粒生物量占地上部总生物量的比例)也随之提高,分别为0.26、0.28和0.30。成熟期总生物量分别为10110、9866和9658 kg·hm^{-2},平均为9878 kg·hm^{-2}。此阶段生物量分配比例约为茎秆:角壳:籽粒:根部=43.2:15.2:22.8:18.8,地上部茎秆、角壳与籽粒的积累比例约为53.2:18.8:28.0,具有茎秆部分占比高而角壳部分占比低的特点。

2.2 干物质量动态变化

中油早1号干物质积累在3个点均呈现典型的"S"型曲线特征(图1),即自出苗后持续积累,角果期(播后150 d)时达到最大值,分别为13 171、12 496、12 441 kg·hm^{-2},平均为12 703 kg·hm^{-2},进入角果期后随着落叶的增加导致成熟期物质积累量出现不同程度下降。拟合结果表明,植株在进入蕾薹期后,将进行持续约20 d的干物质快速积累时期,期间平均积累速率为154.5~204.2 kg·hm^{-2}·d^{-1},累积量占总量的31.3%~40.7%,且随着蕾薹期时长的增加,累积比例呈现下降趋势。地下部干物质积累与全株保持同步动态,角果期达到最大值后出现轻度下降。

2.3 氮素积累量动态变化

中油早1号氮积累动态在3个点均表现为出苗后迅速积累,终花期至角果初期时积累至最大值(图2),桂林、衡阳和吉安分别为240、246、231 kg·hm^{-2},平均为239 kg·hm^{-2},受干物质变化的影响,后

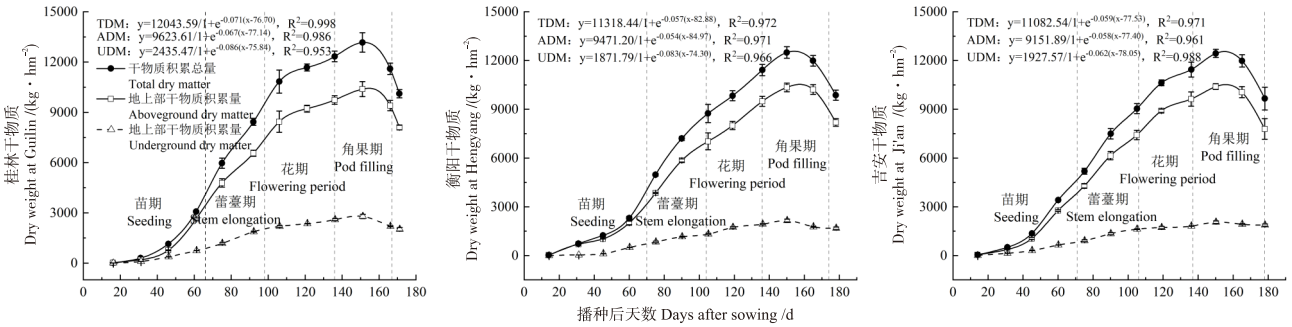
表3 中油早1号成熟期各器官生物量分配

Table 3 Dry matter allocation among organs of Zhongyouzao 1 at maturity

地点 Site	干物质量 Dry matter accumulation /(kg·hm^{-2})							各部位占比 Proportion in different organs /%			
	茎秆 Stem	角壳 Pod wall	籽粒 Seed	地上部 Aboveground	根部 Root	总计 All	经济系数 Harvest index	茎秆 Stem	角壳 Pod wall	籽粒 Seed	根部 Root
桂林 Guilin	4344±58 a	1625±70 a	2125±45 a	8094 a	2016±23 a	10110 a	0.26	43.0	16.1	21.0	19.9
衡阳 Hengyang	4440±68 a	1455±86 a	2296±71 a	8191 a	1675±37 b	9866 a	0.28	45.0	14.7	23.3	17.0
吉安 Ji'an	4029±109 b	1441±77 a	2317±153 a	7787 b	1871±41 ab	9658 a	0.30	41.7	14.9	24.0	19.4
均值 Average	4271	1507	2246	8024	1854	9878	0.28	43.2	15.2	22.8	18.8

注:不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level



注:TDM:总干物质积累量;ADM:地上部干物质积累量;UDM:地下部干物质积累量

Note: TDM: Total dry matter; ADM: Aboveground dry matter; UDM: Underground dry matter

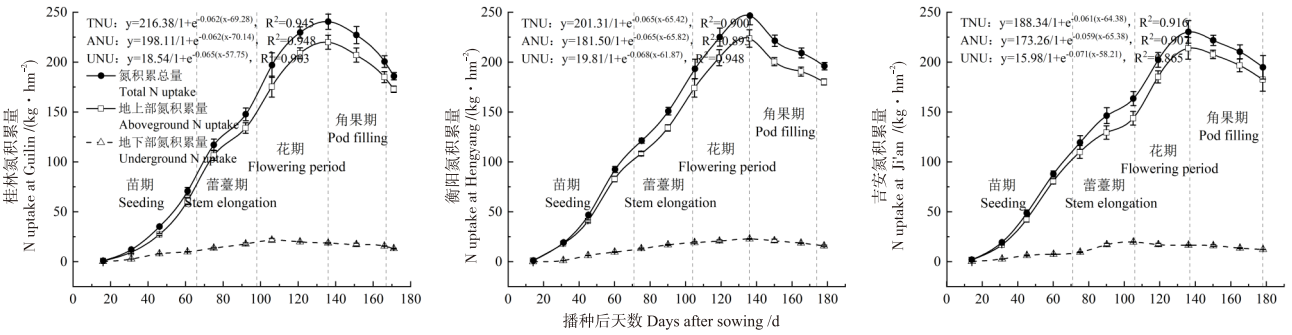
图1 中油早1号干物质量动态变化

Fig. 1 Dynamics of dry matter accumulation in Zhongyouzao 1

期有所下降。与干物质积累特性相比,前期氮积累比例显著高于干物质,主要是由于油菜苗期氮含量较高,因而尽管生物量较小,但仍有较高的氮素积累。全株氮快速积累阶段处于幼苗末期至蕾薹中期(持续约22 d),期间平均积累速率为2.8~3.2 kg·hm^{-2}·d^{-1},累积量占总量的24.0%~32.0%。地下部氮积累与整体趋势相符,表现为从出苗后持续增加,至始花期达最大值后略有回落。成熟期全株氮素总积累量分别为187、196、195 kg·hm^{-2},较最大积累量分别下降22.1%、20.3%、15.6%,此时氮素分配比例约为茎秆∶角壳∶籽粒∶根部=11.4∶17.3∶64.3∶6.9(表4)。

2.4 磷素积累量动态变化

中油早1号磷积累动态与干物质积累有所不同(图3),但3个点整体趋势相同,均持续积累至成熟期。Logistic模型分析表明,磷的快速积累阶段出现在蕾薹末期至初花期,持续约25 d,期间平均积累速率为0.44~0.52 kg·hm^{-2}·d^{-1},累积量占总量的15.2%~25.8%。与全株积累特性不同,地下部磷素自出苗后缓慢积累,花期达到最大值后开始下降。



注:TNU:总氮积累量;ANU:地上部氮积累量;UNU:地下部氮积累量

Note: Total N uptake; ANU: Aboveground N uptake; UNU: Underground N uptake

图2 中油早1号氮积累量动态变化

Fig. 2 N uptake dynamics in Zhongyouzao 1

表4 中油早1号成熟期各部位氮积累量占比

Table 4 N distributions among organs of Zhongyouzao 1 at maturity

地点 Site	氮积累量 N accumulation /(kg·hm^{-2})					各部位占比 Proportion in different organs /%			
	茎秆 Stem	角壳 Pod wall	籽粒 Seed	根部 Root	总计 All	茎秆 Stem	角壳 Pod wall	籽粒 Seed	根部 Root
桂林 Guilin	20.2±0.8 b	31.2±0.9 b	122.7±1.6 b	13.1±0.4 ab	187.2 a	10.8	16.7	65.5	7.0
衡阳 Hengyang	20.6±1.3 b	37.0±1.2 a	123.4±0.5 ab	14.8±0.8 a	195.7 a	10.8	18.9	63.0	7.6
吉安 Ji'an	25.3±2.6 a	31.7±2.9 b	125.4±1.2 a	12.2±0.6 b	194.6 a	13.0	16.3	64.3	6.3
均值 Average	22.0	33.3	123.8	13.4	192.5	11.4	17.3	64.3	6.9

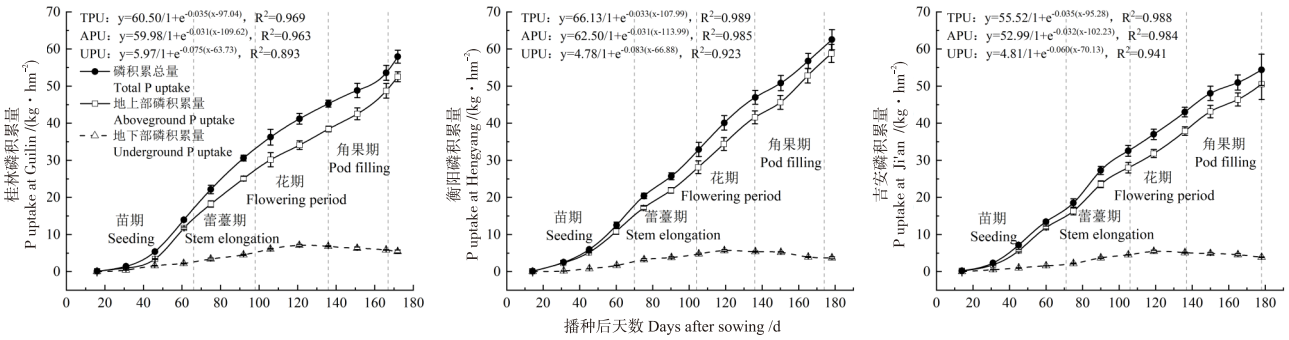
3个点最大磷积累量分别为58、63、54 kg·hm^{-2},平均为58 kg·hm^{-2},此时磷素分配比例约为茎秆:角壳:籽粒:根部=19.0:20.0:53.6:7.5(表5)。

2.5 钾素积累量动态变化

中油早1号钾积累动态表现自出苗后持续积累,角果初期积累至最大值(图4),3个点分别为391、353、372 kg·hm^{-2},平均为372 kg·hm^{-2},受干物质变化的影响,后期略有下降。桂林和吉安点钾积累特性与干物质基本一致,而衡阳点在播后60~90 d内钾积累比例显著低于干物质积累比例,主要原因在于该阶段内衡阳积温较高(为470.08℃,显著高于桂林387.95℃和吉安298.05℃),导致出现明显的"生物量稀释效应",使植株钾含量相对较低,从而引起钾积累比例与干物质之间的不匹配现象。同氮积累特性相似,"中油早1号"钾快速积累阶段亦处于幼苗末期至蕾薹中期(持续约22 d),期间平均积累速率为2.8~4.0 kg·hm^{-2}·d^{-1},累积量占总量的16.9%~28.0%。地下部钾积累特性与整体一致,终花期至角果初期达到最大值,随后略有下降。成熟期钾素总积累量分别为325、294、324 kg·hm^{-2},较最大积累量分别下降17.0%、16.6%、12.9%,此阶段油菜茎秆、角壳、籽粒和根部钾素积累比例约为54.0:19.2:17.7:9.1(表6)。

2.6 镁素积累量动态变化

中油早1号镁积累动态均表现为自出苗后快速积累,角果期达到最大积累量(图5),3个点分别为



注:TPU:总磷积累量;APU:地上部磷积累量;UPU:地下部磷积累量

Note: TPU: Total P uptake; APU: Aboveground P uptake; UPU: Underground P uptake

图3 中油早1号磷积累量动态变化

Fig. 3 P uptake dynamics in Zhongyouzao 1

表5 中油早1号成熟期各部位磷积累量占比

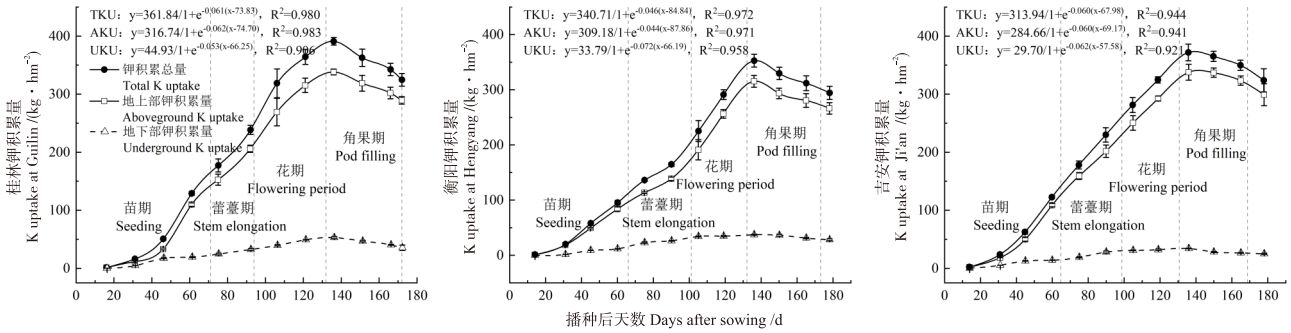
Table 5 P distributions among organs of Zhongyouzao 1 at maturity

地点 Site	磷积累量 P accumulation /(kg·hm^{-2})					各部位占比 Proportion in different organs /%			
	茎秆 Stem	角壳 Pod wall	籽粒 Seed	根部 Root	总计 All	茎秆 Stem	角壳 Pod wall	籽粒 Seed	根部 Root
桂林 Guilin	11.9±0.8 a	11.4±0.3 a	29.3±0.5 b	5.4±0.4 a	57.9 a	20.6	19.6	50.5	9.3
衡阳 Hengyang	13.1±0.4 a	12.2±0.5 a	33.5±1.6 a	3.7±0.3 a	62.5 a	21.0	19.5	53.6	5.9
吉安 Ji'an	8.4±0.8 b	11.3±0.9 a	30.8±1.4 b	3.9±0.1 a	54.4 a	15.4	20.8	56.6	7.2
均值 Average	11.1	11.3	31.2	4.3	58.3	19.0	20.0	53.6	7.5

表6 中油早1号成熟期各部位钾积累量占比

Table 6 K distributions among organs of Zhongyouzao 1 at maturity

地点 Site	钾积累量 K accumulation /(kg·hm^{-2})					各部位占比 Proportion in different organs /%			
	茎秆 Stem	角壳 Pod wall	籽粒 Seed	根部 Root	总计 All	茎秆 Stem	角壳 Pod wall	籽粒 Seed	根部 Root
桂林 Guilin	172.1±3.2 b	63.5±2.7 a	53.9±0.5 b	35.1±4.6 a	324.6 a	53.0	19.6	16.6	10.8
衡阳 Hengyang	160.7±2.5 c	54.0±5.6 b	54.3±2.7 b	25.3±1.6 b	294.3 b	54.6	18.3	18.5	8.6
吉安 Ji'an	175.8±4.0 a	63.8±4.2 a	58.5±1.6 a	25.8±1.0 b	323.8 a	54.3	19.7	18.1	8.0
均值 Average	169.5	60.4	55.6	28.7	314.3	54.0	19.2	17.7	9.1



注：TKU：总钾积累量；AKU：地上部钾积累量；UKU：地下部钾积累量

Note: TKU: Total K uptake; AKU: Aboveground K uptake; UKU: Underground K uptake

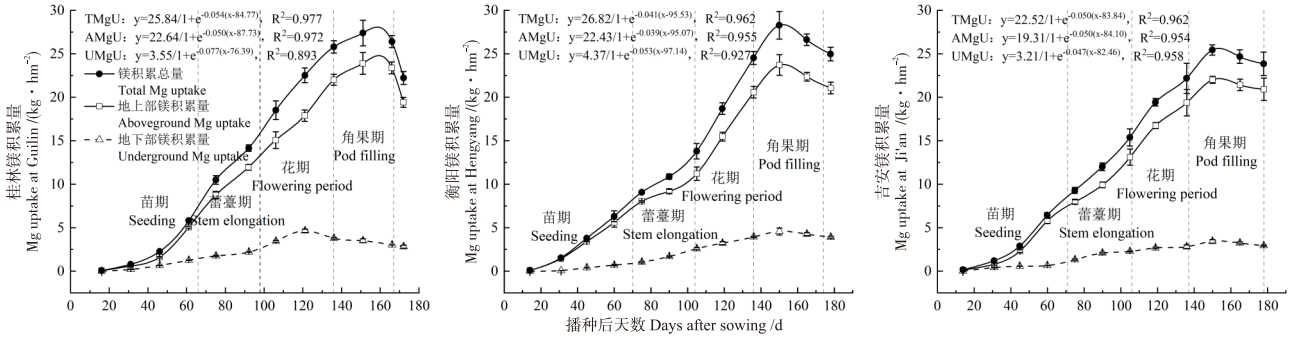
图4 中油早1号钾积累量动态变化

Fig. 4 K uptake dynamics in Zhongyouzao 1

27、28、25 kg·hm^{-2}，平均为27 kg·hm^{-2}，随后出现不同程度下降。与钾素积累动态一致，衡阳点在播后60~90 d内的镁积累比例亦显著低于干物质积累比例，该现象可能也是由于“生物量稀释效应”引起。与干物质积累特性相同，全株镁快速积累阶段亦出现在蕾薹期（持续约26 d），期间平均积累速率为0.27~0.34 kg·hm^{-2}·d^{-1}，累积量占总量的24.0%~29.3%。地下部镁积累同样呈现“S”型变化曲线。成熟期镁素总积累量分别为22、25、24 kg·hm^{-2}，较峰值分别下降17.8%、10.7%、4.8%，此时油菜镁素分配比例约为茎秆∶角壳∶籽粒∶根部=31.6∶18.7∶36.2∶13.5（表7）。

2.7 硼素积累量动态变化

中油早1号硼积累特性在3个点均表现为“S”型曲线（图6），自出苗后迅速积累，角果期达到最大值，分别为566、484、603 g·hm^{-2}，平均为551 g·hm^{-2}，随后出现轻度下降。与镁相同，硼快速积累阶段同样出现在蕾薹期（持续约23 d），期间平均积累速率为5.8~7.8 g·hm^{-2}·d^{-1}，累积量占总量的32.2%~34.7%。地下部硼积累动态与整株一致，于角果期



注：TMgU：总镁积累量；AMgU：地上部镁积累量；UMgU：地下部镁积累量

Note: TMgU: Total Mg uptake; AMgU: Aboveground Mg uptake; UMgU: Underground Mg uptake

图5 中油早1号镁积累量动态变化

Fig. 5 Mg uptake dynamics in Zhongyouzao 1

表7 中油早1号成熟期各部位镁积累量占比

Table 7 Mg distributions among organs of Zhongyouzao 1 at maturity

地点 Site	镁积累量 Mg accumulation /(kg·hm^{-2})					各部位占比 Proportion in different organs /%			
	茎秆 Stem	角壳 Pod wall	籽粒 Seed	根部 Root	总计 All	茎秆 Stem	角壳 Pod wall	籽粒 Seed	根部 Root
桂林 Guilin	7.3±0.2 a	4.1±0.2 a	8.0±0.3 a	2.8±0.2 a	22.2 b	32.9	18.5	36.0	12.6
衡阳 Hengyang	7.8±0.3 a	4.7±0.2 a	8.6±0.2 a	3.9±0.1 a	25.0 a	31.2	18.8	34.4	15.6
吉安 Ji'an	7.3±0.4 a	4.5±0.3 a	9.1±0.7 a	2.9±0.1 a	23.8 ab	30.7	18.9	38.2	12.2
均值 Average	7.5	4.4	8.6	3.2	23.7	31.6	18.7	36.2	13.5

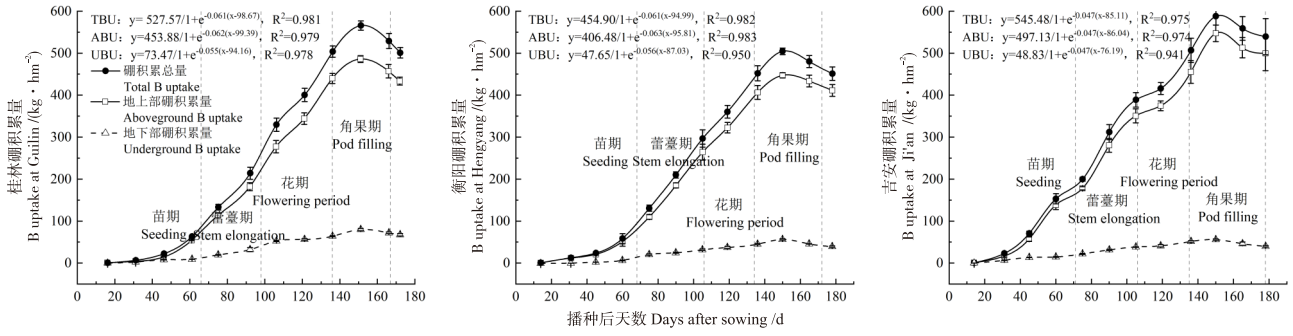
达到最大值。成熟期硼积累量分别为501、451、539 g·hm^{-2},较峰值分别下降11.5%、6.8%、10.6%,此时油菜茎秆、角壳、籽粒和根部的硼积累量占比约为18.4∶25.8∶45.9∶9.9(表8)。将干物质及氮、磷、钾、镁、硼积累的关键参数进行汇总(表9),可见不同养分的快速积累阶段、持续时长及成熟期分配存在明显差异,这些特征为短生育期油菜的施肥调控提供了关键时间节点。

3 讨论

3.1 短生育期油菜养分积累特性

中油早1号生育期仅171~182 d,生长过程无明显越冬停滞,其干物质和养分积累呈现出明显的速生特性,与常规熟期油菜存在明显差异。与常规熟期品种相比,中油早1号氮和钾快速积累期集中在幼苗末期至蕾薹中期,磷素快速积累期集中在蕾薹末期至初花期,养分吸收高峰整体前移且持续时间更短[15,23],日均吸收强度更高,这是其适应短生育期、实现快速建成的重要生理特征。但与同为短生育期品种的湘油420和湘油642相比,二者规律存在时序差异,湘油420和湘油642的干物质及氮、磷、钾等养分积累高峰多后移至开花至角果发育期[15,24],而中油早1号因生育期更短、生长进程更快,养分吸收高峰显著前移,更偏向于前期集中吸收。尽管品种间存在时序差异,但两类短生育期油菜均突破了常规品种苗期至花期缓慢积累的模式[14,25],将养分快速吸收阶段高度压缩,整体节奏更紧凑、吸收强度更高,这是短生育期油菜适配三熟制紧茬口的共同生理特点。同时,在养分分配上,中油早1号氮和磷优先向籽粒转运,钾主要留存于茎秆,与同类早熟品种规律相近,且氮和钾峰值出现在花期、磷持续积累至成熟的次序与常规油菜基本一致[26],说明不同熟期油菜的养分吸收顺序和源库转运逻辑具有相对稳定性。

结合本研究结果,针对南方短生育期油菜可提出以下施肥建议:生产上应遵循“基肥为主、追肥前移、稳氮增钾、补施磷硼”的原则。基肥应占总施肥量的70%以上,以复合肥搭配有机肥施用,保证氮、磷、钾及中微量元素基础供应;在5~6叶苗期及时追施少量氮肥,促进幼苗早发快长,为后期速生奠定群体基础;蕾薹期作为养分吸收关键期,应稳施氮肥、重施钾肥,配合叶面喷施硼肥,满足氮、钾快速积累需求,同时保障磷素持续供应至成熟期。对于稻-稻-油三熟制区等茬口紧张区域,可适当简化追肥次数,采用基肥+蕾薹肥两次施肥模式,避免因追



注:TBU:总硼积累量;ABU:地上部硼积累量;UBU:地下部硼积累量

Note: TBU: Total B uptake; ABU: Aboveground B uptake; UBU: Underground B uptake

图6 中油早1号硼积累量动态变化

Fig. 6 B uptake dynamics in Zhongyouzao 1

表8 中油早1号成熟期各部位硼积累量占比

Table 8 B distributions among organs of Zhongyouzao 1 at maturity

地点 Site	硼积累量 B accumulation /(g·hm^{-2})					各部位占比 Proportion in different organs /%			
	茎秆 Stem	角壳 Pod wall	籽粒 Seed	根部 Root	总计 All	茎秆 Stem	角壳 Pod wall	籽粒 Seed	根部 Root
桂林 Guilin	91.0±5.1 b	125.7±2.7 b	216.7±1.8 b	67.5±3.0 a	500.9 b	18.2	25.1	43.3	13.5
衡阳 Hengyang	77.2±4.5 c	122.6±6.0 c	211.4±3.5 c	39.9±1.9 b	451.1 c	17.1	27.2	46.9	8.8
吉安 Ji′an	107.8±5.4 a	135.9±4.4 a	255.7±3.3 a	39.8±1.9 b	539.3 a	20.0	25.2	47.4	7.4
均值 Average	92.0	128.1	228.0	49.1	497.1	18.4	25.8	45.9	9.9

表9 干物质与养分积累及分配的关键生长参数

Table 9 Critical growth parameters of dry matter and nutrient accumulation and distribution

	快增期 Rapid accumulation period	快增期平均速率 Average accumulation rate/(kg·hm^{-2}·d^{-1})	快增期持续时间 Duration (d)	积累动态特征 Accumulation dynamics	成熟期分配特征 Distribution at maturity
干物质 Dry matter	蕾薹期 Stem elongation	154.5~204.2	20	“S”增长,角果期达到最大值 S-curve growth peaks at the pod filling	茎秆>籽粒>根部>角壳 Stem>Seed>Root>Pod wall
氮 N	幼苗末期至蕾薹中期 Late seeding to mid-stem elongation	2.8~3.2	22	“S”增长,花期达到最大值 S-curve growth peaks at the flowering period	籽粒>角壳>茎秆>根部 Seed>Pod wall>Stem>Root
磷 P	蕾薹末期至初花期 Late stem elongation to early flowering period	0.44~0.52	25	持续积累至成熟期 Accumulates until maturity stage	籽粒>茎秆>角壳>根部 Seed>Stem>Pod wall>Root
钾 K	幼苗末期至蕾薹中期 Late seeding to mid-stem elongation	2.8~4.0	22	“S”增长,花期达到最大值 S-curve growth peaks at the flowering period	茎秆>角壳>籽粒>根部 Stem>Pod wall>Seed>Root
镁 Mg	蕾薹期 Stem elongation	0.27~0.34	26	“S”增长,角果期达到最大值 S-curve growth peaks at the pod filling	籽粒>茎秆>角壳>根部 Seed>Stem>Pod wall>Root
硼 B	蕾薹期 Stem elongation	5.8~7.8×10^{-3}	23	“S”增长,角果期达到最大值 S-curve growth peaks at the pod filling	籽粒>角壳>茎秆>根部 Seed>Pod wall>Stem>Root

肥过晚错过养分吸收高峰;在土壤肥力偏低、保肥性较差的田块,可少量分次追肥,提高养分利用率。该施肥模式可与短生育期油菜紧凑的养分吸收节奏相匹配,既能满足植株快速生长的养分需求,又能提升养分向籽粒的转运效率,为南方短生育期油菜高产高效栽培提供技术支撑。

3.2 中油早1号与常规熟期油菜单位产量养分需求比较

中油早1号每生产100 kg籽粒需N 10.62 kg、P_2O_5 2.59 kg、K_2O 16.53 kg、MgO 1.19kg、B 0.024 kg,需求比例为1∶0.24∶1.56∶0.11∶0.0023,其单位产量所需氮、钾元素的绝对需求量分别较常规品种高出约127.4%和120.1%[27]。这一高需求现象,除生育期压缩导致的单位时间吸收强度增加外,更深层的原因可能在于其为保障“速生稳产”而形成了独特的养分分配策略与生理冗余。在短暂的生育期内,植株面临更大的环境波动与发育风险,为应对这种不确定性,并支撑蕾薹期快速生长,植株可能倾向于在营养器官中积累更高比例的钾素,以维持强大的渗透调节与物质运输能力[28-30];同时,较高的氮素储备也为持续高效的光合作用提供了“缓冲库”[31]。因此,其较高的单位产量养分需求,是“速生”特性与“抗逆稳产”需求共同作用下的综合结果。尽管在绝对需求量上显著偏高,但其单位产量所需的氮、磷、钾、镁和硼元素的比例与常规熟期油菜基本一致[26],表明不同熟期类型在籽粒养分构成上仍具有共性基础。

4 结论

(1)中油早1号在桂林、衡阳和吉安的生育期分别为171、178和182 d,产量分别为2125、2296和2317 kg·hm^{-2},经济系数分别为0.26、0.28、0.30。成熟期各器官生物量积累比例平均为茎秆∶角壳∶籽粒∶根部=43.2∶15.2∶22.8∶18.8,地上部茎秆、角壳与籽粒的积累比例平均为53.2∶18.8∶28.0。

(2)中油早1号干物质积累呈现出“S”型曲线特征,自出苗后持续积累,播后60~80 d是快速积累期,角果期达到最大值。氮、钾、镁、硼积累特性亦呈现为“S”型曲线,与干物质相比,养分快速积累时期前移且集中,氮和钾积累量于花期达到最大值,镁和硼于角果期达到积累量最大值,而磷的最大积累量在成熟期。成熟期油菜氮、磷和硼优先向籽粒转运,钾主要储存在茎秆,镁在茎秆和籽粒间均衡分配。

(3)生产100 kg籽粒平均需要N 10.62 kg、P_2O_5 2.59 kg、K_2O 16.53 kg、MgO 1.19kg、B 0.024 kg,需求比例为1∶0.24∶1.56∶0.11∶0.0023。

参考文献:

[1] 王瑞元. 2022年我国粮油产销和进出口情况[J]. 中国油脂, 2023, 48(6): 1-7. DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230101.

[2] 殷艳, 尹亮, 张学昆, 等. 我国油菜产业高质量发展现状和对策[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(8): 1-7. DOI: 10.13304/j.nykjdb.2020.1050.

[3] 冯海棠, 王汉中. 新形势下的我国食用植物油供给安全对策[J]. 中国油料作物学报, 2024, 46(2): 221-227. DOI: 10.19802/j.issn.1007-9084.2024021.

[4] 刘成, 冯中朝, 肖唐华, 等. 我国油菜产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(4): 485-489.

[5] 李荣德, 何平, 罗莉霞, 等. "稻-稻-油"生产模式下短生育期冬油菜品种选育与推广现状分析[J]. 中国农业科学, 2024, 57(5): 846-854.

[6] 田效琴, 李卓, 刘永红. 施氮量和播种密度对不同熟期油菜干物质量和产量的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(4): 798-807.

[7] 任涛, 郭丽璇, 张丽梅, 等. 我国冬油菜典型种植区域土壤养分现状分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(8): 1606-1616.

[8] 吴璐璐, 张水清, 黄绍敏, 等. 长期定位施肥对潮土磷素形态和有效性的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 379-386. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2020061102.

[9] 张会民, 徐明岗, 陈义, 等. 长期施肥土壤钾素演变[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.

[10] Wang H, Tu N-M. Current situation and prospect of rice cropping systems[J]. Crop Res, 2006(5): 498-503.

[11] 段玉, 张君, 景宇鹏, 等. 河套灌区麦后复种饲料油菜养分吸收规律及施肥效应[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(6): 848-854.

[12] 曹金华, 王建平, 朱家成, 等. 双低杂交油菜'丰油10号'干物质积累及养分吸收规律[J]. 中国农学通报, 2017, 33(34): 32-39.

[13] 余垚颖, 莫太相, 刘金丹, 等. 四川油菜NPK吸收利用规律及肥料利用率研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(10): 35-42.

[14] 刘晓伟, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 直播冬油菜钙、镁、硫养分吸收规律[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(6): 638-644.

[15] 胡宇倩, 资涛, 熊廷浩, 等. 早熟与常规熟期冬油菜品种养分吸收规律差异研究[J]. 作物杂志, 2020(1): 117-123. DOI: 10.16035/j.issn.1001-7283.2020.01.019.

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[17] 刘秋霞. 氮肥施用调控直播冬油菜产量构成因子的机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. DOI: 10.27158/d.cnki.ghznu.2020.000063.

[18] Wolf B. A comprehensive system of leaf analyses and its use for diagnosing crop nutrient status[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 1982, 13(12): 1035-1059. DOI: 10.1080/00103628209367332.

[19] 向勇, 邓聂, 易田芳, 等. 恒温摇床提取-电感耦合等离子体质谱法测定土壤中有效态镉的含量[J]. 理化检验-化学分册, 2022, 58(4): 447-451.

[20] 中华人民共和国农业农村部. 肥料汞、砷、镉、铅、铬、镍含量的测定: NY/T1978-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[21] 崔党群. Logistic曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. 数理统计与管理, 2005(1): 112-115. DOI: 10.13860/j.cnki.sltj.2005.01.020.

[22] 李静, 闫金垚, 胡文诗, 等. 氮钾配施对油菜产量及氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(6): 941-948.

[23] 邹娟, 鲁剑巍, 吴江生, 等. 4个双低甘蓝型油菜品种钙、镁、硫吸收动态[J]. 华中农业大学学报, 2009, 28(3): 295-299. DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2009.03.012.

[24] 胡宇倩, 张振华, 熊廷浩, 等. 南方三熟区早熟油菜品种养分需求特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(7): 1339-1348.

[25] 刘晓伟, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 直播冬油菜干物质积累及氮磷钾养分的吸收利用[J]. 中国农业科学, 2011, 44(23): 4823-4832.

[26] 石磊, 梁宏玲, 徐芳森, 等. 甘蓝型油菜幼苗体内磷组分差异与磷高效关系的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008(2): 351-356.

[27] 鲁剑巍, 任涛, 丛日环, 等. 我国油菜施肥状况及施肥技术研究展望[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 712-720.

[28] 谷贺贺, 崔鑫, 李静, 等. 钾肥用量对油菜产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(6): 1091-1102.

[29] Jin S H, Huang J Q, Li X Q, et al. Effects of potassium supply on limitations of photosynthesis by mesophyll diffusion conductance in *Carya cathayensis*[J]. Tree Physiol, 2011, 31(10): 1142-1151. DOI: 10.1093/treephys/tpr095.

[30] Wang M, Zheng Q S, Shen Q R, et al. The critical role of potassium in plant stress response[J]. Int J Mol Sci, 2013, 14(4): 7370-7390. DOI: 10.3390/ijms14047370.

[31] Zhang Z, Ahmed S, Chattha M S, et al. Managing plant density and nitrogen fertilizer to reduce nitrogen input without yield reduction of late-sown cotton after wheat by improving light interception and sink nitrogen partitioning in a double cropping system[J]. Field Crops Res, 2023, 295: 108875. DOI: 10.1016/j.fcr.2023.108875.

(责任编辑:郭学兰)