

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.94203

种肥播施方式对红壤旱地油菜产量及肥料利用率的影响

吕伟生¹ 肖富良¹ 张绍文¹ 郑伟¹ 黄天宝¹ 肖小军¹ 李亚贞¹
吴艳¹ 韩德鹏¹ 肖国滨^{1,*} 张学昆^{2,3,*}

¹ 江西省红壤研究所 / 江西省红壤耕地保育重点实验室 / 农业农村部江西耕地保育科学观测实验站, 江西南昌 330046; ² 长江大学 / 湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北荆州 434023; ³ 中国农业科学院油料作物研究所, 湖北武汉 430062

摘要: 为明确红壤旱地油菜适宜的种肥播施方式, 本研究通过 2017—2018 年和 2018—2019 年 2 年的田间试验, 系统分析传统种肥土表撒播(T1)、种子条播而肥料土表撒施(T2)、种肥等行异位同步播施(T3)和种肥宽窄行异位同步播施(T4) 4 种不同种肥播施方式对油菜产量、密度动态、干物质变化、养分吸收和肥料利用率的影响。结果表明, 种肥播施方式对红壤旱地油菜产量形成和肥料利用率均产生了显著影响, 且在低肥力条件下影响更为显著。相比 T1 和 T2, T3、T4 显著促进了油菜高产的形成和肥料利用率的提高, 但 T3 与 T4 二者之间差异不显著。种肥异位同步播施明显提高了各时期油菜干物质质量, 尤其是显著增加了初花期至成熟期的干物质积累量, 促进了花后根部与地上部干物质同步增长; 同时促进了对 N、P、K 的吸收, 保证较高的植株密度并协同产生充足的角果数, 最终提高油菜产量和肥料利用率。因此, 种肥异位同步播施可显著提高红壤旱地油菜生产力, 建议结合机械化种植因地制宜地推广应用。

关键词: 油菜; 红壤旱地; 种植方式; 产量; 肥料利用率

Effects of sowing and fertilizing methods on yield and fertilizer use efficiency in red-soil dryland rapeseed (*Brassica napus* L.)

LYU Wei-Sheng¹, XIAO Fu-Liang¹, ZHANG Shao-Wen¹, ZHENG Wei¹, HUANG Tian-Bao¹, XIAO Xiao-Jun¹, LI Ya-Zhen¹, WU Yan¹, HAN De-Peng¹, XIAO Guo-Bin^{1,*}, and ZHANG Xue-Kun^{2,3,*}

¹ Jiangxi Institute of Red Soil / Jiangxi Key Laboratory of Red Soil Arable Land Conservation / Scientific Observation and Experimental Station of Arable Land Conservation in Jiangxi, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanchang 330046, Jiangxi, China; ² Yangtze University / Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland, Ministry of Education, Jingzhou 434023, Hubei, China; ³ Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, Hubei, China

Abstract: In order to explicit proper sowing and fertilizing methods of rapeseed production in red-soil dryland, a two-year field experiment covering two rapeseed seasons (2017–2018 and 2018–2019) was conducted with four treatments of sowing and fertilizing methods to analyze the impact on yield formation and fertilizer use efficiency of rapeseed, including conventional sowing and fertilizing method (T1), sowing in row with surface broadcast fertilizing (T2), synchronous sowing in uniform row with side deep fertilizing (T3) and synchronous sowing in wide-narrow row with side deep fertilizing (T4). The results were as follows: The yield and fertilizer use efficiency of rapeseed in red-soil dryland were significantly affected by sowing and fertilizing methods. Besides, these differences were more significant in poor soil condition and drought season (2017–2018) than those in nutrient-rich soil condition and rainy season (2018–2019). Compared with T1 and T2, T3 and T4 promoted the yield formation and increased its fertilizer use efficiency significantly, whereas there was no significant difference between T3 and T4. Specifically, the technique of synchronous drilling sowing with side deep fertilizing could improve dry matter production during the whole growth

本研究由国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-12), 江西省现代农业产业技术体系建设专项(JXARS-08), 江西省重点研发计划项目(20171BBF60032, 20181BBF60004)和江西省科技合作领域重点项目(20161BBH80069)资助。

This study was supported by the China Agriculture Research System (CARS-12), the Jiangxi Agriculture Research System (JXARS-08), the Key Research and Development Program of Jiangxi Province (20171BBF60032, 20181BBF60004), and the Key Program in Technology Cooperation of Jiangxi Province (20161BBH80069).

* 通信作者(Corresponding authors): 肖国滨, E-mail: xiaoguobin@sohu.com; 张学昆, E-mail: zhang.xk@139.com

第一作者联系方式: E-mail: Lvweisheng2008@163.com

Received (收稿日期): 2019-12-23; Accepted (接受日期): 2020-07-02; Published online (网络出版日期): 2020-07-16.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200716.1434.002.html>

period of rapeseed, especially from anthesis to maturity, with a corresponding rise of dry matter accumulation of both underground and aboveground after anthesis. Meanwhile, compared with the conventional cultivation, the technique of synchronous drilling sowing with side deep fertilizing increased the uptake of nutrients (N, P and K), effective plant density and maintained sufficient pod number, and thus improved the yield and fertilizer use efficiency of rapeseed. This study indicated that the technique of synchronous drilling sowing with side deep fertilizing had the potential of improving rapeseed productivity in red-soil dryland of southern China. Therefore, it should be suggested to promote the application according to local condition.

Keywords: rapeseed (*Brassica napus* L.); red-soil dryland; planting pattern; seed yield; fertilizer use efficiency

油菜是我国第一大食用植物油源和第二大饲用蛋白源,近年来种植规模维持在 700 万公顷左右,其中约 80%为南方冬油菜,但仍难以满足内需^[1]。冬油菜种植于冬闲地,不与夏季粮油作物争时抢地,是南方多熟制区轮作换茬和培肥地力的先锋作物^[1-2]。红壤旱地是我国南方红壤区主要的耕地资源,区域光热水资源丰富,生产潜力巨大^[3]。油菜对红壤旱地适应性较强,是红壤旱地的主要种植作物之一。但红壤旱地油菜仅停留于经验种植,机械化程度低,产量、效益及肥料利用率也普遍偏低^[4]。近年来,红壤耕地冬闲甚至撂荒的面积逐年增加,进一步制约了红壤旱地油菜的发展。科学合理的播种和施肥方式是实现作物高产高效生产的重要措施^[5],而目前红壤旱地油菜种肥播施方式还主要采用传统的人工土表撒施,这使得种肥均呈无序分布、养分表聚化,不利于构建高质量群体^[6]。随着农机农艺技术融合发展,种子条播、穴播甚至机械种植与肥料一次性侧位深施同步完成的机械化生产技术将日趋成熟^[7],因此,探究红壤旱地油菜适宜的种肥播施方式颇具意义。

关于科学施肥,研究者普遍倡导“4R”(Right source, Right rate, Right time 和 Right place)养分管理策略^[8]。研究表明,作物有序种植有利于改善群体质量而显著增产^[9-10],同步侧深施肥则在进一步增产的同时显著提高肥料利用率^[11-12]。肥料施入土壤后,特别是在集中深施时会在根区形成一种肥料微域环境^[13],从而刺激根系增殖、构建理想根型、促进养分吸收和地上部生长^[14]。合理的施肥方式可提高水稻^[11,15-16]、玉米^[17-18]、小麦^[5,19]、大豆^[20-21]等作物的产量及肥料利用率,减少面源污染。在油菜中也发现,基肥氮条施(直播油菜)或穴施(移栽油菜)的集中施用方式可减少氮肥损失,保证后期氮素供给,促进根系和地上部生长,进而提高产量与氮肥利用率^[22]。对于油菜肥料集中施用,施肥位置至关重要,施肥太浅影响出苗和扎根,而施肥过深又会增加动力成本^[14,23]。总体而言,肥料(N、P、K)深施在 10 cm 处明显促进油菜根系生长和干物质积累,提高产量和肥料利用率^[14]。

轻简高效的直播油菜和一次性基施且增产增效的专用缓释肥推广规模正逐年扩大,适应当前油菜种植需求的机械化种肥同步播施技术也在不断完善^[6,24]。直播油菜对施肥方式的响应更加敏感,目前相关施肥技术研究集中在氮素管理^[22,25-26]等方面,且研究对象以水田油菜为主,而关于旱地油菜特别是红壤旱地油菜种子与专用缓释肥同步播施方式的研究还鲜有报道。为了明确红壤旱地油菜适宜的种肥播施方式,本文通过 2 年的田间试验,探究不同种肥播施方式对籽粒产量、密度动态、干物质变化、养分吸收和肥料利用率的影响,以期为红壤旱地油菜的高产高效栽培提供理论依据与实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

江西省进贤县张公镇(28°35'N, 116°17'E)属典型的亚热带季风湿润气候,气候温和、雨量充沛。2 年油菜种植期间各月的气温分布和降水量如图 1 所示。2017 年 10 月—2018 年 2 月 5 个月份中 10 月和 1 月的最高气温、最低气温和平均气温略低外,其余各月的气温总体高于 2018—2019 年;各月降水量均表现为 2018—2019 年高于 2017—2018 年,特别是 11 月至翌年 3 月。试验前茬作物是芝麻,秸秆全量还田。土壤为第四纪黏土发育的红壤旱地。2017—2018 年 0~20 cm 耕层的土壤含有机质 18.2 g kg⁻¹、全氮 1.2 g kg⁻¹、碱解氮 107.3 mg kg⁻¹、有效磷 19.5 mg kg⁻¹、速效钾 86.3 mg kg⁻¹、有效硼 0.29 mg kg⁻¹, pH 5.2; 2018—2019 年 0~20 cm 耕层的土壤含有机质 18.2 g kg⁻¹、全氮 1.7 g kg⁻¹、碱解氮 146.4 mg kg⁻¹、有效磷 32.8 mg kg⁻¹、速效钾 132.9 mg kg⁻¹、有效硼 0.42 mg kg⁻¹, pH 5.6。

1.2 试验设计

试验采用的油菜品种为“阳光 2009”(包衣种),由中国农业科学院油料作物研究所提供,种子用量 4.5 kg hm⁻²。所用的肥料为油菜长效专用配方肥,由华中农业大学研制、湖北宜施壮农业科技有限公司生产,N(缓释型) P₂O₅ K₂O 中微量元素(B、Ca、Mg、Zn、S)为 25 7 8 5,按 750 kg hm⁻²的用量一次性基施。

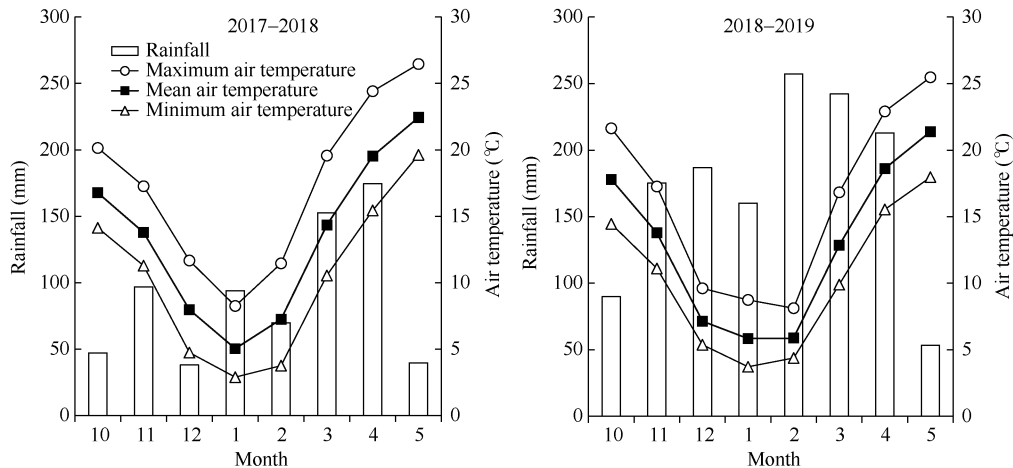


图 1 试验点 2017–2019 年油菜生育期内各月的气温和降水量

Fig. 1 Monthly temperature and rainfall during oilseed rape growth season in each year of 2017–2019 at experimental site

设置种植方式和施肥处理二因素裂区试验，主区种植方式有 4 种：种肥土表撒播(T1)、肥料土表撒施而种子条播(T2)、种肥等行异位同步播施(T3)与种肥宽窄行异位同步播施(T4)，其中 T1 是本地油菜常规种植方式；为计算肥料利用率，各种种植方式下分设不施肥(F0)和施肥(F1) 2 个施肥处理。具体操作如下。T1：肥料和种子均采用表面撒施(播)方式，将肥料撒施后，再撒播种子；不施肥处理则直接撒播种子。T2：先将肥料撒施在地表，再按 20 cm 行距开深约 2 cm 的播种沟并条播种子；不施肥处理则直接开沟条播种子。T3：人工模拟机械种肥等行异位同步播施，按 20 cm 行距开深 2 cm 的播种沟条播种子，再于行间间隔开深 8 cm 的肥沟施肥，种子与肥料的横向距离为 10 cm；不施肥处理则直接开沟条播种子。T4：人工模拟机械种肥宽窄行异位同步播施，按 15 cm (窄行) 25 cm (宽行)开深 2 cm 的播种沟条播种子，再于窄行中间开深 8 cm 的肥沟施肥，种子与肥料的横向距离为 7.5 cm；不施肥处理则直接开沟条播种子。试验 8 个处理，3 次重复，共计 24 个小区，每个小区面积为 5 m × 4 m。2 年均于前 1 年 10 月 15 日播种，不施肥处理分别于 2018 年 5 月 6 日和 2019 年 5 月 12 日收获，施肥处理分别于 2018 年 5 月 9 日和 2019 年 5 月 14 日收获。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤基础肥力 在前茬芝麻收获后，按五点取样法采集 0~20 cm 耕作层土壤，自然风干后磨碎过筛，采用常规方法^[27]分别测定土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和有效硼。

1.3.2 植株密度 每个小区选定 0.8 m² (1.0 m ×

0.8 m)样点，按相应的规格播 80 粒，分别于全苗期、五叶期和成熟期调查株数密度，并计算表征密度变化的相关指标^[28]：

出苗率(%) = 全苗期苗数/播种粒数×100；

成苗率(%) = 五叶期苗数/全苗期苗数×100；

成株率(%) = 成熟期株数/全苗期苗数×100。

1.3.3 干物质量 分别在油菜苗期(2017 年 12 月 16 日、2018 年 12 月 15 日)、初花期(2018 年 3 月 1 日、2019 年 3 月 3 日)和成熟期(2018 年 5 月 8 日和 2019 年 5 月 13 日)，每个小区选取有代表性的 0.36 m² (0.6 m × 0.6 m)样点，测定植株干物质量。取样时在根茎结合处将根系和地上部分开(成熟期地上部按茎秆、角壳与籽粒分开)，清洗后于 105 条件下杀青 30 min，再于 70 条件下烘干至恒重后称重。

1.3.4 产量及产量构成 待油菜自然成熟后，分小区单独收获籽粒，晾干后称重。产量构成调查则结合成熟期植株密度和干物质量测定同时进行，分别调查收获密度、单株角果数、每角粒数和千粒重。

1.3.5 成熟期地上部养分吸收量 成熟期地上部烘干并称重后，分别将茎秆、角壳与籽粒粉碎，过 0.5 mm 筛，经 H₂SO₄-H₂O₂ 联合消煮，用 FOSS-2300 型全自动定 N 仪测定氮含量，用钼锑抗比色法测定磷含量，用火焰光度计测定钾含量^[27]。

1.3.6 肥料利用率 分别用肥料农学利用率、肥料偏生产力 and 肥料贡献率等指标表征肥料利用率^[29]。相关计算公式如下：

肥料农学利用率(kg kg⁻¹) = (施肥处理产量 - 不施肥处理产量)/施肥处理的养分(N、P₂O₅、K₂O)施用量；

肥料偏生产力(kg kg⁻¹) = 施肥处理产量/施肥处理的养分(N、P₂O₅、K₂O)施用量;

肥料贡献率(%) = (施肥处理产量 - 不施肥处理产量)/施肥处理产量×100。

1.3.7 气象数据采集 各年度的气象数据(日最高气温、平均气温、最低气温及降水量)来自试验地最近的气象站(进贤站号为 58614), 从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获取。

1.4 数据处理与分析

用 Microsoft Excel 2010 和 DPS 7.05 处理数据、绘制图表。除籽粒产量外, 仅对各施肥处理相关数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 籽粒产量

由表 1 可知, 施肥处理、种植方式及二者互作均对油菜籽粒产量产生了显著影响。籽粒产量年际间差异显著, 特别是在不施肥条件下, 2018—2019 年籽粒

产量显著高于 2017—2018 年。施肥显著提高了 2 年油菜产量, 不同种植方式下(T1、T2、T3、T4) 2 年平均增产率分别达 135.0%、141.6%、157.5%和 159.8%。此外, 种植方式之间对油菜产量的影响有所差异, 在不施肥条件下无显著差异, 但条播处理(T2、T3、T4)产量均明显高于撒播处理(T1); 而在施肥条件下这种差异更大, 总体呈现 T3≈T4>T2>T1 的趋势。与常规种植方式(T1)相比, 2017—2018 年种肥异位同步播施(T3、T4)和种子条播而肥料撒施(T2)处理显著增产 24.1%、22.0%和 9.7%; 而在 2018—2019 年, 仅见 T3、T4 处理显著增产 13.6%和 14.9%, T2 增产 8.4%但不显著, 说明低肥力条件下红壤旱地油菜产量对种植方式的响应更加敏感。从 2 年平均产量来看, 在施肥条件下 T3 和 T4 处理均显著高于 T1 和 T2 处理。

2.2 产量构成

由表 2 可知, 在施肥条件下, 种植方式对收获密度和每株角果数具有极显著影响, 而对每角粒数和千粒重无显著影响。各产量构成在 T3、T4 处理

表 1 不同种植方式对油菜籽粒产量的影响
Table 1 Effect of different planting patterns on seed yield of oilseed rape

施肥处理 Fertilizer application	种植方式 Planting pattern	产量 Yield (kg hm ⁻²)		
		2017–2018	2018–2019	平均 Average
F0	T1	678.3 a	1133.3 a	905.8 a
	T2	723.3 a	1196.7 a	960.0 a
	T3	747.5 a	1226.7 a	987.1 a
	T4	732.5 a	1218.3 a	975.4 a
F1	T1	1924.2 c	2111.7 b	2017.9 c
	T2	2111.7 b	2288.3 ab	2200.0 b
	T3	2388.3 a	2398.4 a	2393.3 a
	T4	2346.7 a	2426.7 a	2386.7 a

方差分析 ANOVA

施肥处理 Fertilizer application (F)	**
种植方式 Planting pattern (P)	**
年份 Year (Y)	*
施肥处理×种植方式 F×P	*
施肥处理×年份 F×Y	**
种植方式×年份 P×Y	ns
施肥处理×种植方式×年份 F×P×Y	ns

ns: 无显著差异; *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。数据后面的不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。F0: 不施肥; F1: 施肥; T1: 传统种肥土表撒播; T2: 种子条播而肥料土表撒施; T3: 种肥等行异位同步播施; T4: 种肥宽窄行异位同步播施。
ns: not significant; *, ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. Different lowercase letters within a growing season indicate significant difference at the 0.05 probability level. F0: no fertilizer application; F1: fertilizer application; T1: conventional sowing and fertilizing method; T2: sowing in row with surface broadcast fertilizing; T3: synchronous sowing in uniform row with side deep fertilizing; T4: synchronous sowing in wide-narrow row with side deep fertilizing.

间无显著差异,但 T3、T4 处理较 T1 处理显著提高了收获密度(2 年平均增幅 16.2%)和每株角果数(2 年平均增幅 12.2%),较 T2 处理显著提高了每株角果数(2 年平均增幅 14.6%)。

由表 3 可知,油菜产量与收获密度和每株角果数呈显著正相关关系,而与每角粒数和千粒重负相关。其中,收获密度对产量表现出最强的正直接效应,每株角果数次之。可见,保证较大的收获密度并产生较多的每株角果数,是种肥异位同步播施方式实现油菜高产的主要途径。

2.3 植株密度

种植方式对油菜植株密度(全苗期除外)和成株率的影响达显著水平,对出苗率和成苗率影响较小(表 4)。相比常规种植方式(T1),种肥异位同播处理(T3、T4)显

著提高了 2 年油菜五叶期和成熟期植株密度(平均增幅 12.9%和 16.2%),以及 2017—2018 年的成株率(平均增幅 8.8%),而二者与 T2 处理差异不显著。

2.4 干物质量

由图 2 可知,各处理植株地上部和总的干物质质量均随生育期的推进而显著增加,于成熟期达最大值,而根部干物质量变化规律不尽一致。不同种植方式下油菜干物质量在不同年份和不同生育时期的差异变化有所不同,同时地上部和根部生长对不同种植方式的响应也存在一定差异。在苗期,不同种植方式间地上部干物质量无显著差异,但 2017—2018 年种植方式对根部干物质量影响显著,其中 T3、T4 处理根部干物质量分别比 T1 处理显著提高 18.8%和 21.5%。花期至成熟期,T3、T4 处理根

表 2 不同种植方式对油菜产量构成的影响

Table 2 Effect of different planting patterns on yield components of oilseed rape

年份 Year	种植方式 Planting pattern	收获密度 Plant density ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	每株角果数 Pod number	每角粒数 Seed number	千粒重 1000-seed weight (g)
2017–2018	T1	33.7 b	95.9 b	19.9 a	3.63 a
	T2	37.9 ab	94.1 b	20.1 a	3.78 a
	T3	40.3 a	106.9 a	19.8 a	3.72 a
	T4	40.0 a	107.5 a	19.1 a	3.75 a
2018–2019	T1	41.4 b	93.2 b	18.9 a	3.38 a
	T2	48.1 a	91.1 b	19.0 a	3.54 a
	T3	46.8 a	104.6 a	18.8 a	3.29 a
	T4	47.0 a	106.5 a	18.3 a	3.52 a

方差分析 ANOVA

种植方式 Planting pattern (P)	**	**	ns	ns
年份 Year (Y)	*	ns	ns	*
种植方式×年份 P×Y	ns	ns	ns	ns

ns: 无显著差异; *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。数据后面的不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。处理同表 1。
ns: not significant; *, ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. Different lowercase letters within a growing season indicate significant difference at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 1.

表 3 油菜产量与产量构成的相关系数及通径系数

Table 3 Correlation coefficients and path coefficients between grain yield and yield components of oilseed rape

构成因素 Yield component	产量结构间相关系数 Correlation coefficient among yield components				对 Y 直接通径系数 Direct path coefficient
	X_2	X_3	X_4	产量 Yield (Y)	to Y
收获密度 Plant density (X_1)	0.119	-0.691	-0.587	0.746*	0.944
每株角果数 Pod number (X_2)		-0.292	0.102	0.702*	0.621
每角粒数 Seed number (X_3)			0.635	-0.504	0.287
千粒重 1000-seed weight (X_4)				-0.168	0.198

表示达 0.05 水平显著相关($n=8$)。: Significant at the 0.05 probability level ($n = 8$).

部与地上部干物质保持协同增长，2 年均显著高于 T1 处理，在 2017—2018 年显著高于 T2 处理。而且，较 T1、T2 处理，T3、T4 处理花期和成熟期根部干物质增幅(花期为 9.1%~29.2%、成熟期为 8.2%~33.7%)明显高于地上部(花期为 4.6%~16.3%、成熟期为 6.3%~24.5%)。

2.5 养分吸收量

由图 3 可知，与产量和干物质表现类似，种

肥异位同步播施可获得较高的养分积累，各种植方式下油菜成熟期地上部养分吸收量总体表现为 T3≈T4>T2>T1。除 2018—2019 年 P 吸收量外，T3、T4 处理较 T1 处理显著促进了 N、P、K 吸收量，平均增幅分别为 23.6%、19.1%和 22.7%。2017—2018 年 T3、T4 与 T2 处理 N、K 吸收量均达到显著差异，其中 N 吸收量提高了 12.4%~16.6%，K 吸收量提高了 13.8%~14.9%，而在 2018—2019 年差异不显著。

表 4 不同种植方式对油菜植株密度的影响

Table 4 Effect of different planting patterns on plant density of oilseed rape

年份 Year	种植方式 Planting pattern	植株密度 Plant density ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)			出苗率 Emergence rate (%)	成苗率 Seedling rate (%)	成株率 Mature plant rate (%)
		全苗期 Emergence stage	五叶期 Five-leaf stage	成熟期 Maturity stage			
2017—2018	T1	92.6 a	62.0 b	33.7 b	77.2 a	67.1 a	36.2 b
	T2	96.3 a	66.7 ab	37.9 ab	80.3 a	69.2 a	39.5 a
	T3	100.0 a	69.4 a	40.3 a	83.3 a	69.5 a	40.4 a
	T4	99.1 a	71.3 a	40.0 a	82.6 a	72.1 a	40.5 a
2018—2019	T1	96.3 a	63.9 b	41.4 b	80.3 a	66.6 a	42.9 b
	T2	103.7 a	72.2 a	48.1 a	86.4 a	69.4 a	46.5 a
	T3	101.9 a	71.3 a	46.8 a	84.9 a	70.0 a	46.0 ab
	T4	102.8 a	72.2 a	47.0 a	85.7 a	70.3 a	45.8 ab

方差分析 ANOVA

种植方式 Planting pattern (P)	ns	*	**	ns	ns	*
年份 Year (Y)	*	ns	*	*	ns	*
种植方式×年份 P×Y	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns: 无显著差异; *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。数据后面的不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。处理同表 1。
ns: not significant; *, ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. Different lowercase letters within a growing season indicate significant difference at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 1.

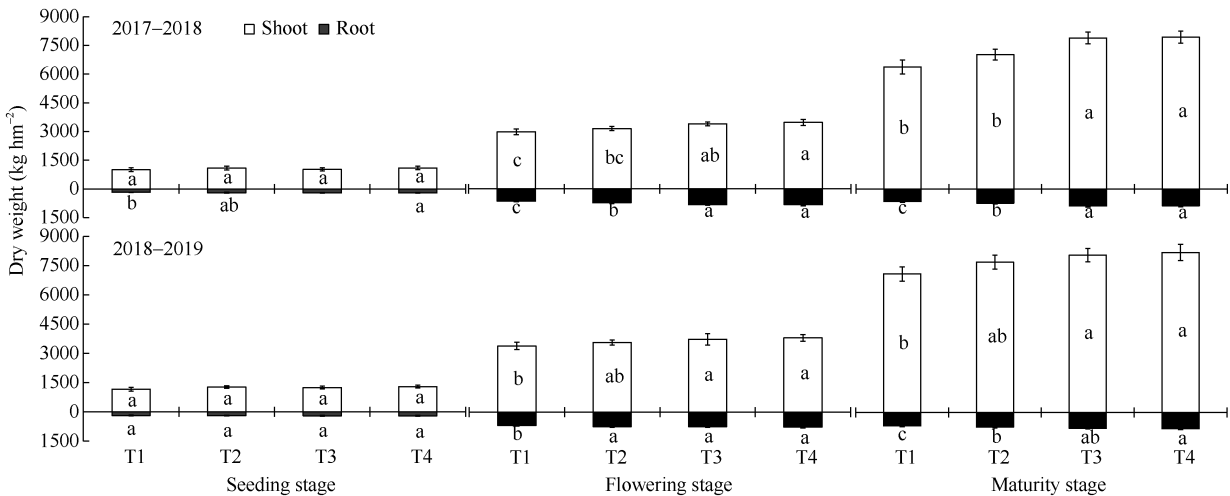


图 2 不同种植方式对油菜各生育期根部和地上部干物质质量的影响

Fig. 2 Effects of different planting patterns on root and shoot dry weight of oilseed rape

图柱上的不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。处理同表 1。

Different lowercase letters on the columns indicate significant difference at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 1.

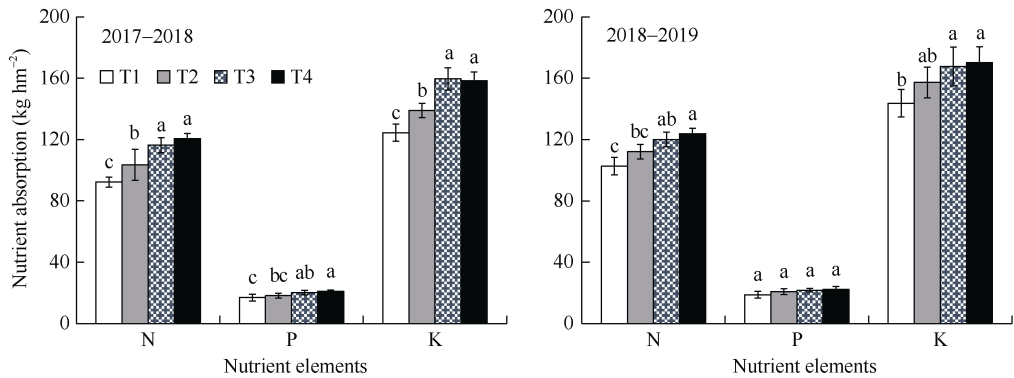


图 3 不同种植方式对油菜地上部 N、P、K 养分吸收量的影响
Fig. 3 Effects of different planting patterns on N, P, K uptake of the oilseed rape shoot
图柱上的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。处理同表 1。
Different lowercase letters on the columns indicate significant difference at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 1.

2.6 肥料利用率

种植方式对油菜肥料利用率产生了显著影响, 其中种肥异位同步播施方式可维持较高的肥料利用率, 尤其是在 2017—2018 年(表 5)。种肥异位同步播施处理(T3、T4)显著提高了肥料农学利用率、肥料偏生产力和肥料贡献率, 三者 2 年均表现为种肥异位同步播施处理(T3、T4)最高, 肥料撒播而种子条播处理(T2)次之, 常规种植方式(T1)最低, 其中 T1 和 T2 处理总体差异不显著。与常规种植方式(T1)相比, 种肥异位同步播施处理(T3、T4)2 年平均肥料农学利用率从 3.6 kg kg^{-1} 增至 4.6 kg kg^{-1} 和 4.8 kg kg^{-1} , 增幅分别为 27.3%和 27.8%; 肥料偏生产力从 6.7 kg kg^{-1} 增至 8.0 kg kg^{-1} 和 7.9 kg kg^{-1} , 增幅分别为 18.6%和 18.3%; 对

于肥料贡献率而言, 从 53.4%增至 59.2%和 59.7%, 增幅分别为 10.8%和 11.7%。总体来看, 2017—2018 年油菜肥料利用率对种植方式的响应更为敏感。

3 讨论

3.1 在有序种植的基础上, 改进施肥方式进一步提高油菜产量及肥料利用率

本研究发现, 与种肥土表撒播常规种植方式相比, 种肥等行异位同步播施、种肥宽窄行异位同步播施和种子条播而肥料撒施等有序种植方式 2 年显著增产 18.9%、18.5%和 9.1%, 同时也显著提高了肥料利用率, 这与其他作物的研究结果基本一致^[10]。有序种植有利于改善红壤旱地油菜群体质量并显著

表 5 不同种植方式对油菜肥料利用率的影响
Table 5 Effect of different planting patterns on fertilizer utilization rates of oilseed rape

种植方式 Planting pattern	肥料农学利用率 Fertilizer agronomic utilization rate (kg kg^{-1})		肥料偏生产力 Fertilizer partial factor productivity (kg kg^{-1})		肥料贡献率 Fertilizer contribution rate (%)	
	2017–2018	2018–2019	2017–2018	2018–2019	2017–2018	2018–2019
T1	4.11 b	3.26 b	6.41 c	7.04 b	61.4 b	45.4 b
T2	4.63 b	3.64 ab	7.04 b	7.63 ab	63.8 b	47.7 ab
T3	5.47 a	3.91 a	7.96 a	7.99 a	68.7 a	49.7 a
T4	5.38 a	4.03 a	7.82 a	8.09 a	68.8 a	50.6 a

方差分析 ANOVA

种植方式 Planting pattern (P)	**	**	*
年份 Year (Y)	*	ns	**
种植方式×年份 P×Y	ns	ns	ns

ns: 无显著差异; *和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。数据后面的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。处理同表 1。
ns: not significant; *, ** indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. Different lowercase letters within a growing season indicate significant difference at the 0.05 probability level. Treatments are the same as those given in Table 1.

增产增效, 但与水稻等^[30]作物不同的是, 本试验中宽窄行种植相比等行距种植并未显著增产, 这可能与油菜株高较高、群体密度较大及早地种植根系发达等因素有关。与种子条播而肥料撒施相比, 种肥等行异位同步播施和种肥宽窄行异位同步播施等肥料集中深施处理也显著提高了籽粒产量和肥料利用率, 这与水田油菜^[14,22]及其他作物体系^[15-21]的研究结论相类似。但相比水田油菜, 本研究肥料集中深施较肥料表施处理的增产效果仅与水田移栽油菜相近^[22], 却远低于水田直播油菜^[14,22]。这既可能与油菜栽培模式对施肥方式的响应差异和立地条件差异有关^[31], 也可能是因为本研究采用的是一次性基施的专用缓释肥。缓释肥能够显著减少氮素氨挥发损失及地表径流损失, 即使是表施也较普通肥料增产增效^[6]。总而言之, 在有序种植的基础上, 改进施肥方式能够进一步提高作物产量与肥料利用率。

3.2 种肥异位同播提高油菜产量及肥料利用率的原因

一般而言, 种肥同层撒施时, 肥料距离种子较近, 可能影响出苗和发根。Hocking 等^[23]研究表明, 油菜种肥表层同播时成苗率显著低于其他肥料深施处理。苏伟等^[32]在盆栽试验中也发现, 肥料浅施时(深度 2~4 cm)油菜出苗率不到 65%, 并且前期生长明显受阻。而本研究显示, 种肥异位同步播施处理仅对越冬期至成熟期植株密度和成株率的影响显著, 对全苗期密度、出苗率、成苗率影响较小。这与前人研究结果存在差异, 可能还是因为本研究采用的是一次性基施的专用缓释肥, 其对种子的安全性比普通肥料更高^[33]; 再者就是供试种子为包衣种子且基肥含有较多的中微量元素, 提高了油菜苗期的抗逆性; 此外, 2 年播种后都有一定的降雨(尤其是 2018—2019 年), 由于雨水从上而下的冲击, 使表施的营养逐渐下移, 减弱了土表养分富集对出苗的影响^[32]。以上因素也导致各处理苗期干物质质量差异较小, 但根系干物质质量(尤其是在中后期)差异更大, 足见根部生长对种肥播施方式的响应更敏感。作物根系形态和生理的可塑性强, 施肥位置可显著影响根系生长、生理活性及空间分布, 进而影响养分吸收和产量形成^[14,18]。种肥异位同步播施促进油菜高产的形成和肥料利用率的提高, 主要得益于肥料深施显著改善了花后根部生长, 增加了初花至成熟期的干物质积累量, 促进了花后根部与地上部的协同增长以及养分吸收。直播油菜总干物质质量呈“S”形曲线

变化, 干物质积累集中在薹期至角果期^[22], 通过肥料集中深施以减少养分损失, 保证油菜“前促后稳”的供肥需求, 尤其是保障油菜生长后期土壤养分供应, 促进根系增殖和深层扩展并提高深层根系活力, 为获得高产量和高肥效奠定了物质和生理基础^[6,31]。禾本科作物的相关研究^[5,16,18]也表明, 肥料合理深施有利于提高拔节后, 特别是花后干物质累积和养分吸收, 改善生育后期的营养状况与生理活性, 提高灌浆结实期群体的光合生产力和对光合产物的同化力, 从而促进高产的形成。相比移栽油菜, 直播油菜个体纤弱, 群体密度不稳定并易受环境影响, 但科学的养分管理可以影响个体发育, 从而调控群体密度与生长过程^[29,31]。与前人关于直播油菜的研究不同, 在密度控制方面本试验并未进行间苗定苗, 因此更多是反映群体质量。但种肥异位同步播施处理在维持较大的群体(较高的植株密度)的同时, 也促进了个体的壮大(较多的单株角果数、正常的每角粒数及千粒重), 最终获得充足的角果数而实现高产增效。

3.3 不同气象及地力条件下油菜产量及肥料利用率对种肥异位同播的响应差异

本研究中油菜产量和肥料利用率在不同年份间存在一定差异, 可能主要与土壤基础肥力及气象条件的差异有关。2017—2018 年试验地基础肥力偏低, 基础产量相对较低, 种肥异位同步播施不仅能够减少肥料养分损失, 同时还可以保证土壤养分供应, 最终显著提高产量和肥料利用率; 2018—2019 年试验地基础肥力较高, 基础产量则相对较高, 虽然表施增加了土壤养分损失, 但由于土壤本身养分供应充足, 所以种肥异位同步播施的优势并没有 2017—2018 年明显。但在施肥条件下油菜产量年份间差异较小, 而 2017—2018 年各处理油菜肥料利用率普遍高于 2018—2019 年, 这可能主要受降水量的影响。2018—2019 年油菜生长期间降水量明显偏多, 由此造成光合生产受限及相对较大的养分淋溶损失是增产潜力和肥料利用率降低的主要原因^[14,35]。但有趣的是, 在 2018—2019 年试验中, 降水量增加并未造成到像同期大面积水田油菜一样的严重渍害。其原因在于: 本研究为旱地油菜小区试验, 土壤渍水相对较轻, 且供试品种阳光 2009 耐渍性较强, 也在一定程度上减轻了渍害^[35]; 更重要的是, 所采用的缓控释肥较普通肥料含有更多的中微量元素并降低了养分损失, 可实现以水调肥并以肥减渍的双重

效果^[6,35]。

机械化种肥同步播施技术实现了有序种植和控释肥一次性侧位深施相融合,并同步实现增产提质增效,将会得到更广泛的应用。然而,目前涉及红壤旱地油菜种肥同步播施技术的研究较少,而且本研究仅在江西红壤区采用人工模拟机械种肥异位同播技术进行2年对比试验,不同土壤肥力和种植制度下的行距配置、肥料用量及施肥位置等相关技术参数仍需进一步优化,从而进一步完善红壤旱地油菜高产高效栽培技术和理论体系。

4 结论

相比传统种肥撒播及种子条播而肥料撒施的种植方式,种肥异位同步播施明显提高了各时期油菜干物质质量,尤其是显著增加了初花期至成熟期的干物质积累量,促进了花后根部与地上部的同步增长;同时促进了N、P、K吸收,保证较高的植株密度并协同产生充足的角果数,最终提高油菜产量和肥料利用率。种肥异位同步播施可显著提高红壤旱地油菜生产力,建议结合机械化种植因地制宜地进行推广应用。

References

- [1] 刘成,冯中朝,肖唐华,马晓敏,周广生,黄凤洪,李加纳,王汉中. 我国油菜产业发展现状、潜力及对策. 中国油料作物学报, 2019, 41: 485–489.
Liu C, Feng Z C, Xiao T H, Ma X M, Zhou G S, Huang F H, Li J N, Wang H Z. Development, potential and adaptation of Chinese rapeseed industry. *Chin J Oil Crop Sci*, 2019, 41: 485–489 (in Chinese with English abstract).
- [2] 王汉中. 以新需求为导向的油菜产业发展战略. 中国油料作物学报, 2018, 40: 613–617.
Wang H Z. Development, potential and adaptation of Chinese rapeseed industry. *Chin J Oil Crop Sci*, 2018, 40: 613–617 (in Chinese with English abstract).
- [3] 赵其国,黄国勤,马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策. 生态学报, 2013, 32: 7615–7622.
Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures. *Acta Ecol Sin*, 2013, 32: 7615–7622 (in Chinese with English abstract).
- [4] 汪瑞清,罗涛,胡立勇,肖运萍,吕丰娟,魏林根. 氮肥施用比例对油菜芝麻复种模式产量和品质的影响. 中国油料作物学报, 2018, 40: 94–100.
Wang R Q, Luo T, Hu L Y, Xiao Y P, Lyu F J, Wei L G. Effects of nitrogen application ratio on yield and quality of rapeseed-sesame multiple cropping pattern. *Chin J Oil Crop Sci*, 2018, 40: 94–100 (in Chinese with English abstract).
- [5] 黄明,王朝辉,罗来超,王森,曹寒冰,何刚,刁超朋. 垄覆沟播及施肥位置优化对旱地小麦氮磷钾吸收利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2018, 24: 1158–1168.
Huang M, Wang Z H, Luo L C, Wang S, Cao H B, He G, Diao C P. Effects of ridge mulching, furrow seeding, and optimized fertilizer placement on NPK uptake and utilization in dryland wheat. *J Plant Nutr Fert*, 2018, 24: 1158–1168 (in Chinese with English abstract).
- [6] 鲁剑巍,任涛,丛日环,李小坤,张洋洋. 我国油菜施肥状况及施肥技术研究展望. 中国油料作物学报, 2018, 40: 712–720.
Lu J W, Ren T, Cong R H, Li X K, Zhang Y Y. Prospects of research on fertilization status and technology of rapeseed in China. *Chin J Oil Crop Sci*, 2018, 40: 712–720 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张含笑,林参,左青松,杨光,冯倩南,冯云艳,冷锁虎. 种植密度和施肥量对油菜毯状苗生长的影响. 作物学报, 2019, 45: 1691–1698.
Zhang H X, Lin S, Zuo Q S, Yang G, Feng Q N, Feng Y Y, Leng S H. Effects of plant density and N fertilizer spraying concentration on growth of rapeseed blanket seedlings. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 1691–1698 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张福锁. 高产高效养分管理技术. 北京: 中国农业大学出版社, 2012. p 42
Zhang F S. Nutrient Management Technology for High-yield and High-efficiency Crop Production. Beijing: China Agricultural University Press, 2012. p 42 (in Chinese).
- [9] 张洪程,郭保卫,陈厚存,周兴涛,张军,朱聪聪,陈京都,李桂云,吴中华,戴其根,霍中洋,许轲,魏海燕,高辉,杨雄. 水稻有序摆、抛栽的生理生态特征及超高产形成机制. 中国农业科学, 2013, 46: 463–475.
Zhang H C, Guo B W, Chen H C, Zhou X T, Zhang J, Zhu C C, Chen J D, Li G Y, Wu Z H, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H, Yang X. Eco-physiological characteristics and super high yield formation mechanism of ordered transplanting and optimized broadcasting rice. *Sci Agric Sin*, 2013, 46: 463–475 (in Chinese with English abstract).
- [10] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科学技术出版社, 2000. p 34.
Ling Q H. The Quality of Crop Population. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2000. p 34 (in Chinese).
- [11] 陈雄飞,罗锡文,王在满,张明华,胡炼,曾山,莫钊文. 水稻穴播同步侧位深施肥技术试验研究. 农业工程学报, 2014, 30(16): 1–7.
Chen X F, Luo X W, Wang Z M, Zhang M H, Hu L, Zeng S, Mo Z W. Experiment of synchronous side deep fertilizing technique with rice hill-drop drilling. *Trans CSAE*, 2014, 30(16): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- [12] 钟雪梅,黄铁平,彭建伟,卢文璐,康兴蓉,孙梦飞,宋思明,唐启源,陈裕新,湛冬至,周旋. 机插同步一次性精量施肥对双季稻养分累积及利用率的影响. 中国水稻科学, 2019, 33: 436–446.
Zhong X M, Huang T P, Peng J W, Lu W L, Kang X R, Sun M F, Song S M, Tang Q Y, Chen Y X, Zhan D Z, Zhou X. Effects of machine-transplanting synchronized with one-time precision fertilization on nutrient uptake and use efficiency of double cropping rice. *Chin J Rice Sci*, 2019, 33: 436–446 (in Chinese with English abstract).
- [13] 鲁如坤. “微域土壤学”: 一个可能的土壤学的新分支. 土壤学报, 1999, 36: 287–288.

- Lu R K. Microzone soil science: a possible new branch of soil science. *Acta Pedol Sin*, 1999, 36: 287–288 (in Chinese with English abstract).
- [14] Su W, Liu B, Liu X W, Li X K, Ren T, Cong R H, Lu J W. Effect of depth of fertilizer banded-placement on growth, nutrient uptake and yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Eur J Agron*, 2015, 62: 38–45.
- [15] 舒时富, 唐湘如, 罗锡文, 黎国喜, 王在满, 郑天翔, 贾兴娜. 机械深施缓释肥对精量穴直播超级稻生理特性的影响. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 89–92.
- Shu S F, Tang X R, Luo X W, Li G X, Wang Z M, Zheng T X, Jia X N. Effects of deep mechanized application of slow-release fertilizers on physiological characteristics of precision hill-direct-seeding super rice. *Trans CSAE*, 2011, 27(3): 89–92 (in Chinese with English abstract).
- [16] Xiang J, Haden V R, Peng S B, Bouman Bas A M, Huang J L, Cui K H, Visperas R M, Zhu D F, Zhang Y P, Chen H Z. Effect of deep placement of nitrogen fertilizer on growth, yield, and nitrogen uptake of aerobic rice. *Aust J Crop Sci*, 2013, 7: 870–877.
- [17] 姜超强, 王火焰, 卢殿军, 周健民, 王世济, 祖朝龙. 一次性根区穴施尿素提高夏玉米产量和养分吸收利用效率. *农业工程学报*, 2018, 34(12): 146–153.
- Jiang C Q, Wang H Y, Lu D J, Zhou J J, Wang S J, Zu C L. Single fertilization of urea in root zone improving crop yield, nutrient uptake and use efficiency in summer maize. *Trans CSAE*, 2018, 34(12): 146–153 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陈晓影, 刘鹏, 程乙, 董树亭, 张吉旺, 赵斌, 任伯朝. 土壤深松下磷肥施用深度对夏玉米根系分布及磷素吸收利用效率的影响. *作物学报*, 2019, 45: 1565–1575.
- Chen X Y, Liu P, Cheng Y, Dong S T, Zhang J W, Zhao B, Ren B Z. Effects of phosphorus fertilizer application depths on root distribution and phosphorus uptake and utilization efficiencies of summer maize under subsoiling tillage. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 1565–1575 (in Chinese with English abstract).
- [19] 温樱, 王东. 底肥分层条施提高冬小麦干物质积累及产量. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23: 1387–1393.
- Wen Y, Wang D. Basal fertilization in strips at different soil depths to increase dry matter accumulation and yield of winter wheat. *J Plant Nutr Fert*, 2017, 23: 1387–1393 (in Chinese with English abstract).
- [20] 宋秋来, 张晓雪, 周全, 龚振平, 马春梅, 董守坤, 徐瑶. 侧向施肥距离对大豆氮磷钾吸收及产量的影响. *大豆科学*, 2014, 33(1): 79–82.
- Song Q L, Zhang X X, Zhou Q, Gong Z P, Ma C M, Dong S K, Xu Y. Effect of lateral fertilization distance on N, P and K absorption and yield in soybean. *Soybean Sci*, 2014, 33(1): 79–82 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张晓雪, 吴冬婷, 龚振平, 马春梅. 施肥深度对大豆氮磷钾吸收及产量的影响. *核农学报*, 2012, 26: 364–368.
- Zhang X X, Wu D T, Gong Z P, Ma C M. Effect of fertilization depth on N, P, K absorption and yield in soybean. *J Nuclear Agric Sci*, 2012, 26: 364–368 (in Chinese with English abstract).
- [22] 刘波, 鲁剑巍, 李小坤, 丛日环, 吴礼树, 叶川, 郑伟, 徐维明, 姚忠清, 任涛. 不同栽培模式及施氮方式对油菜产量和氮肥利用率的影响. *中国农业科学*, 2016, 49: 3551–3560.
- Liu B, Lu J W, Li X K, Cong R H, Wu L S, Ye C, Zheng W, Xu W M, Yao Z Q, Ren T. Effects of different cultivations and nitrogen application methods on seed yield and nitrogen use efficiency of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 3551–3560 (in Chinese with English abstract).
- [23] Hocking P J, Mead J A, Good A J, Diffey S M. The response of canola (*Brassica napus* L.) to tillage and fertilizer placement in contrasting environments in southern New South Wales. *Aust J Exp Agric*, 2003, 43: 1323–1335.
- [24] 张青松, 廖庆喜, 肖文立, 刘晓鹏, 魏国梁, 刘立超. 油菜种植耕整地技术装备研究与发展. *中国油料作物学报*, 2018, 40: 702–711.
- Zhang Q S, Liao Q X, Xiao W L, Liu X P, Wei G L, Liu L C. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing. *Chin J Oil Crop Sci*, 2018, 40: 702–711 (in Chinese with English abstract).
- [25] 任涛, 鲁剑巍. 中国冬油菜氮素养分管理策略. *中国农业科学*, 2016, 49: 3506–3521.
- Ren T, Lu J W. Integrated nitrogen management strategy for winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) in China. *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 3506–3521 (in Chinese with English abstract).
- [26] 谷晓博, 李援农, 黄鹏, 杜娅丹, 方恒, 陈朋朋. 种植方式和施氮量对冬油菜产量与水氮利用率的影响. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 113–123.
- Gu X B, Li Y N, Huang P, Du Y D, Fang H, Chen P P. Effects of planting patterns and nitrogen application rates on yield, water and nitrogen use efficiencies of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Trans CSAE*, 2018, 34(10): 113–123 (in Chinese with English abstract).
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. pp 25–114.
- Bao S T. Soil Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 25–114 (in Chinese).
- [28] 郑伟, 叶川, 肖国滨, 陈明, 李亚贞, 黄天宝, 肖小军, 刘小三, 朱昌兰. 油-稻共生期对农林套播油菜苗期性状及产量形成的影响. *中国农业科学*, 2015, 48: 4254–4263.
- Zheng W, Ye C, Xiao G B, Chen M, Li Y Z, Huang T B, Xiao X J, Liu X S, Zhu C L. Effects of symbiotic period on seedling traits and yield components of interplanting rapeseed in rice. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 4254–4263 (in Chinese with English abstract).
- [29] 王寅, 鲁剑巍, 李小坤, 任涛, 丛日环, 占丽平. 长江流域直播冬油菜氮磷钾硼肥施用效果. *作物学报*, 2013, 39: 1491–1500.
- Wang Y, Lu J W, Li X K, Ren T, Cong R H, Zhan L P. Effects of nitrogen, phosphorus, potassium, and boron fertilizers on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) direct-sown in the Yangtze River Basin. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 1491–1500 (in Chinese with English abstract).
- [30] 朱德泉, 储婷婷, 武立权, 张顺, 何海兵, 张俊. 宽窄行配置对机插中晚稻生长特性及产量的影响. *农业工程学报*, 2018, 34(18): 102–112.
- Zhu D Q, Chu T T, Wu L Q, Zhang S, He H B, Zhang J. Effects of spacing-adjustable wide-narrow row on growth characteristics and yield of machine-transplanted mid- and late-season rice. *Trans CSAE*, 2018, 34(18): 102–112 (in Chinese with English abstract).

- [31] 王寅, 鲁剑巍. 中国冬油菜栽培方式变迁与相应的养分管理策略. 中国农业科学, 2015, 48: 2952–2966.
Wang Y, Lu J W. The transitional cultivation patterns of winter oilseed rape in China and the corresponding nutrient management strategies. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 2952–2966 (in Chinese with English abstract).
- [32] 苏伟. 油菜轻简化生产中几项养分管理关键技术的初步研究. 华中农业大学博士学位论文, 湖北武汉, 2010.
Su W. Preliminary Study on Several Crucial Technologies about Nutrient Management of Simplified Cultivation of Rapeseed. PhD Dissertation of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [33] 胡文诗, 刘秋霞, 张萌, 任涛, 李小坤, 丛日环, 鲁剑巍. 专用肥不同施用量对直播油菜生长和产量的影响. 湖北农业科学, 2016, 55: 4437–4440.
Hu W S, Liu Q X, Zhang M, Ren T, Li X K, Cong R H, Lu J W. Effects of the long-acting formula fertilizer rate on growth and seed yield of direct-seeding oilseed rape. *Hubei Agric Sci*, 2016, 55: 4437–4440 (in Chinese with English abstract).
- [34] 许晶, 曾柳, 徐明月, 程勇, 张学昆, 邹锡玲. 油菜耐渍性种质资源筛选与评价. 中国油料作物学报, 2014, 36: 748–754.
Xu J, Zeng L, Xu M Y, Cheng Y, Zhang X K, Zou X L. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed. Screening and evaluation of waterlogging tolerance in *Brassica napus* germplasm resources. *Chin J Oil Crop Sci*, 2014, 36: 748–754 (in Chinese with English abstract).
- [35] 丛日环, 张智, 鲁剑巍. 长江流域不同种植区气候因子对冬油菜产量的影响. 中国油料作物学报, 2019, 41: 894–903.
Cong R H, Zhang Z, Lu J W. Climate impacts on yield of winter oilseed rape in different growth regions of the Yangtze River Basin. *Chin J Oil Crop Sci*, 2019, 41: 894–903 (in Chinese with English abstract).