

DOI: 10.11766/trxb201910140229

麻井彪, 高洁, 张建菲. 缓释肥对紫色土油菜生长和养分吸收利用的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 1040–1050.

MA Jingbiao, GAO Jie, ZHANG Jianfei. Effects of Slow-release Fertilizers on Growth and Nutrient Uptake and Utilization of Canola Grown on Purple Soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 1040–1050.

缓释肥对紫色土油菜生长和养分吸收利用的影响*

麻井彪, 高洁[†], 张建菲

(西南大学农学与生物科技学院, 重庆 400700)

摘要: 分析缓释专用配方肥与当地常用肥对油菜生物量、氮磷钾养分吸收利用及其在土壤中累积的影响, 为油菜节肥高效生产提供依据。通过大田试验, 以油菜品种三峡油 5 号为试验材料, 设置 6 种施肥处理: 以不施肥 (F_0) 和常规施肥 (F_c) 为对照处理, 缓释专用配方肥设置 4 种施肥水平 (F_{375} : $375 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, F_{525} : $525 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, F_{675} : $675 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, F_{825} : $825 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。结果表明, 不同施用量的缓释专用肥料对油菜产量、单株有效角果数以 F_{675} 处理最大, F_{825} 处理次之, F_{375} 处理最小, 其分别较 F_c 处理增产 43.54%、36.82%、13.88%; 施用缓释专用配方肥油菜氮养分损失率从 F_c 处理的 78.30% 降低至 53.97%~73.66%; 磷养分损失率从 F_c 处理的 56.65% 降低至 20.53%~46.13%; 施用缓释专用肥料油菜收获期根区土壤全氮、全磷与全钾含量从 F_c 处理的 $0.6510 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.4044 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $20.74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 上升至 $0.6617\sim 0.6914 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.4072\sim 0.4960 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $28.96\sim 29.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。施肥大幅增加油菜生物量, 缓释专用配方肥的施用不仅利于提升肥料利用率, 同时使得根区土壤养分含量变化较小, 结合农业可持续发展, 实际生产应该施用缓释专用肥。

关键词: 缓释专用配方肥; 油菜; 生物量; 养分吸收利用; 养分损失率; 紫色土

中图分类号: S158 文献标志码: A

Effects of Slow-release Fertilizers on Growth and Nutrient Uptake and Utilization of Canola Grown on Purple Soil

MA Jingbiao, GAO Jie[†], ZHANG Jianfei

(College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400700, China)

Abstract: A fertilization field experiment on *Brassica napus* L., Sanxiayou 5 in cultivar was conducted. The experiment aimed to study effects of special slow-release fertilizer and conventional fertilizer on biomass and nutrients (nitrogen, phosphorus and potassium) uptake and utilization of canola, and nutrient accumulation in soil. The field fertilization experiment on canola (Sanxiayou 5) was designed to have six fertilization treatments, i.e. F_0 (no fertilizers), F_c (conventional fertilizer), F_{375} (special slow-release fertilizer at $375 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), F_{525} (special slow-release fertilizer at $525 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), F_{675} (special slow-release fertilizer at $675 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) and F_{825} (special slow-release fertilizer at $825 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$). Results show that application of slow-release fertilizer improved yield and effective number of pods per plant of canola, exhibiting an order of Treatment $F_{675} >$ Treatment $F_{825} >$

* 公益性行业(农业)科研专项(201503127)和国家自然科学基金项目(31271673)资助 Supported by Special Fund for Agriculture Scientific Research in the Public Interest of China (No. 201503127) and the National Natural Science Foundation of China (No. 31271673)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gaojiexn@sohu.com

作者简介: 麻井彪(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事作物栽培生理生态研究。E-mail: jbma20190408@foxmail.com

收稿日期: 2019-10-14; 收到修改稿日期: 2020-03-01; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-04-03

Treatment F₃₇₅ in the effect. Compared with Treatment F_c, Treatment F₆₇₅, Treatment F₈₂₅ and Treatment F₃₇₅ increased yield of the crop by 43.54%, 36.82% and 13.88%, respectively. Besides, the application reduced N nutrient loss rate from 78.30% (in Treatment F_c) to 53.97% (in Treatment F₃₇₅)-73.66% (in Treatment F₈₂₅), and P nutrient loss rate from 56.65% (in Treatment F_c) to 20.53% (in Treatment F₃₇₅)-46.13% (in Treatment F₈₂₅). Total N, total P and total K in the rhizosphere soil applied with slow-release special fertilizers increased from 0.651 0 g·kg⁻¹, 0.404 4 g·kg⁻¹ and 20.74 g·kg⁻¹(in Treatment F_c) to 0.661 7-0.691 4 g·kg⁻¹, 0.407 2-0.496 0 g·kg⁻¹ and 28.96-29.50 g·kg⁻¹. Fertilization could significantly increase biomass of the crop, and application of special formulated slow-release fertilizer could not only improve fertilizer utilization rate, but also have less impacts on nutrient contents in the rhizosphere soil. Taking into account sustainable development of the agriculture, it is advisable to use the special slow-release fertilizer in practical production.

Key words: Special formulated slow-release fertilizer; Canola; Biomass; Nutrient uptake and utilization; Nutrient loss rate; Purple soil

油菜是我国主要的粮油作物, 油菜生产在保障我国食用油供应安全、增加农业经济、提高农民收入、发展生态农业中具有重要作用^[1]。当前油菜栽培过程中面临劳动力不足、肥料施用过量、资源浪费和水体富营养化等社会经济与环境问题。缓释专用配方肥的应用避免了多次施肥的劳动投入和普通施肥因肥料流失而导致的后期早衰, 不仅能有效促进油菜生长、提高产质, 也能很大程度地减少肥料的用量及其污染, 是肥料科学发展的主方向^[2-4]。

油菜单产长期在较低水平徘徊, 施肥不合理是主要原因, 严重制约了油菜生产水平的提高。肥料工业发展到今天, 除传统的氮磷钾单质化学肥料以外, 二元、三元甚至多元化混成复合肥料, 有机无机复合肥, 微量元素肥以及用各种各样原材料生产的废料肥品种随处可见^[5]。在实际生产上, 肥料种类、用量和比例不当均会对油菜生长造成障碍, 影响油菜高产水平的发挥, 降低肥料利用率, 加大对环境的不利影响^[6-7]。有研究^[4, 8-9]指出养分供求不同步是肥料利用率低的一个重要原因, 而油菜缓释专用配方肥在防止油菜后期早衰上有很大效果, 且利于促进冬前绿叶数的增加, 培育理想的越冬壮苗, 加上缓释专用配方肥添加硼等特需微量元素, 增产效果显著, 投入产出比高, 在省工、节肥、增产、环境等方面均存在较大的优势。

前人研究主要集中在氮肥的应用上^[1, 10-11], 对土壤磷钾养分供应状况及养分与作物之间综合关系鲜见报道。本研究以作物生长规律与需肥特性为出发点, 选用缓释专用配方肥作为研究对象, 基于油菜施肥、植株氮磷钾养分吸收利用及土壤氮磷钾

养分变化情况探讨重庆丘陵地区适宜的油菜用肥模式, 探索经济型与生态型的科学施肥技术, 以期为该地区及周边油菜产区油菜生产中科学施肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

试验于 2016 年 10 月至 2017 年 5 月在重庆市北碚区西南大学歇马试验地进行。试验地为旱地紫色土, pH7.8, 播前耕作层土壤含全氮 0.70 g·kg⁻¹、全磷 0.63 g·kg⁻¹、全钾 29.69 g·kg⁻¹、有机质 12.66~16.25 g·kg⁻¹ (平均 15.01 g·kg⁻¹)、有效磷 30.02~49.26 mg·kg⁻¹ (平均 38.23 mg·kg⁻¹)、速效钾 232.6~473.9 mg·kg⁻¹ (平均 356.6 mg·kg⁻¹)。供试植物材料为重庆三峡农业科学院选育的杂交品种三峡油 5 号, 前茬作物为烤烟; 缓释专用肥采用湖北恩施壮农业科技有限公司生产的含有 5% 中微量元素养分的恩施壮油菜缓释专用配方肥, 养分 (N : P₂O₅ : K₂O) 配比为 25 : 7 : 8; 常用肥的底肥为碳酸氢铵 (含氮 17%)、过磷酸钙 (含磷 16%), 追肥为尿素 (含氮 46%)。

试验设 6 个处理 (表 1), 3 次重复, 共 18 个小区, 随机区组排列。小区面积为 20 m² (5 m×4 m), 行株距 40 cm×40 cm。试验于 2016 年 10 月 8 号播种, 播种方式为穴播, 每穴 4~8 粒种子, 于 2~4 叶期间苗, 5~6 叶期定苗, 每穴留一株健壮苗, 2017 年 5 月 2 号收获。缓释专用配方肥于播种前一次性施于穴边, 常用肥基肥穴施, 追肥 (播种后 75 d) 撒施。

表 1 试验处理的施肥量

Table 1 Experimental treatments designed for N, P and K fertilizers application rate / (kg·hm⁻²)

试验小区 Test plot	肥料处理代号 Fertilizer treatment	底肥 Base manure	苗肥 Seedling fertilizer	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
无肥 No fertilizer	F ₀	—	—	—	—	—
常用施肥 Conventional fertilization	F _c	碳酸氢铵 Ammonium bicarbonate: 375 过磷酸钙 Calcium superphosphate: 375	尿素 Urea: 315	210	60	—
缓释专用配方肥 Special slow-release fertilizer	F ₃₇₅ F ₅₂₅ F ₆₇₅ F ₈₂₅	375 525 675 825	— — — —	94 131 169 206	26 37 47 58	30 42 54 66

1.2 样品采集

土壤取样：采用十字交叉法在油菜基肥施用前的 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤各采集 9 个样方（分别为交叉点一处，试验地 2/5 十字线 4 处，试验地 4/5 十字线 4 处）用作播种前试验地养分指标测定；成熟期每个小区植株根区（主根外围 10 cm 内）的土壤采用十字交叉法采集 0~10 cm 和 10~20 cm 各 5 处（交叉点一处，小区 2/5 十字线 4 处）作为一个小区 0~10 cm 和 10~20 cm 的土壤样方。

植株取样：采用十字交叉法在小区边缘 2 行以内挖取样株 5 株，作为养分分析和农艺性状测定。

1.3 指标测定

土壤指标的测定^[9]：土壤 pH 采用水土比 2.5 : 1.0、pH 计测定；全氮采用半微量凯氏法测定；全磷和全钾采用 NaOH 熔融，紫外可见分光光度计（美谱达 UV-1200，上海）测定全磷，火焰光度法（FP6410 火焰光度计，上海仪电）测定全钾；重铬酸钾容量法测定有机质；0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定有效磷；1 mol·L⁻¹ NH₄OAc 浸提—火焰光度法测定速效钾。

植株氮磷钾含量的测定：植株分成茎壳（茎秆和角壳）、籽粒和根，采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮，再分别用凯氏定氮法测定总氮、钼钒黄比色法测定总磷、火焰光度法测定总钾含量。

1.4 数据分析

收获指数 (HI, %) = 籽粒产量 / 地上部生物量 × 100；
专用肥增产率 (YIR, %) = (施肥产量 - 常用肥

产量) / 常用肥产量 × 100；

氮素养分积累量 (NA_N, kg·hm⁻²) = 干物质量 × 氮含量，同理计算磷素、钾素养分积累量 (NA_P, NA_K)。

养分损失量与损失率：养分损失量 (NL, kg·hm⁻²) = 养分施用量 + 土壤养分供应量 - 养分总积累量；养分损失率 (NLR, %) = 养分损失量 / (养分施用量 + 土壤养分供应量) × 100。

氮素养分吸收效率 (NAE_N, kg·kg⁻¹) = 植株氮素总积累量 / 供氮量 (氮肥施入量 + 当季土壤氮供应量)，同理计算磷素、钾素养分吸收效率 (NAE_P, NKA_E)^[12]。

氮素养分转移率 (NTR_N, %) = 籽粒氮养分总量 / 地上部氮积累总量 × 100，同理计算磷素、钾素养分转移率 (NTR_P, NTR_K)。

氮素当季作物回收率 (TCER_N, %) = 当季作物氮素吸收量 / 施氮量 × 100，同理计算磷素、钾素养分吸收效率 (TCER_P, TCER_K)。

采用 Microsoft Excel 2016 软件计算和处理试验数据及图表制作，用 SPSS 23 软件统计分析，各类指标采用单因素方差分析 (P < 0.05)，最小显著性差异法 (LSD) 进行多重比较。

2 结果

2.1 缓释肥对油菜生物量及其组成的影响

施用缓释专用配方肥油菜的茎秆、角壳及籽粒

生物量明显高于施用常用肥(表 2)。随着缓释专用配方肥用量的增加,油菜总生物量也随之增加,除籽粒产量在 F₈₂₅ 处理降低外,其他生物量构成因子均随着施肥量的增加而增加。除 F₃₇₅ 处理外,施肥处理均显著增加收获指数($P<0.05$),随着缓释专用配方肥用量的增加,收获指数先增后减,在 F₆₇₅ 处

理最高,高于 F_c 处理。

由表 3 可知,与不施肥处理相比,施肥处理油菜增产显著($P<0.05$),其中,缓释专用配方肥处理较 F_c 处理增产 13.88%~43.54%。随缓释专用配方肥用量的增加,油菜的产量呈先增后降的趋势,处理间差异显著,试验中以 F₆₇₅ 处理产量最高,用

表 2 缓释肥对油菜生物量的影响

Table 2 Effects of slow-release fertilizer on biomass of canola

试验处理 Treatments	生物量 Biomass/ (10 ³ t·hm ⁻²)					收获指数 Harvest index
	根 Root	茎秆 Stem	角壳 Pod	籽粒 Oilseed	总生物量 Total	
F ₀	1.26b	2.24c	1.45c	1.47d	6.42d	0.284 9c
F _c	1.65a	2.91c	1.78bc	2.09c	8.43c	0.308 2ab
F ₃₇₅	1.64a	3.50b	2.17b	2.38c	9.69bc	0.295 7bc
F ₅₂₅	1.77a	3.60b	2.22b	2.55bc	10.14ab	0.304 7ab
F ₆₇₅	1.88a	3.75ab	2.36a	3.00a	10.99a	0.329 3a
F ₈₂₅	1.87a	4.02a	2.43a	2.86 ab	11.18a	0.307 2ab

注: 同列不同小写字母表示不同处理在 5%水平下差异显著,下同。 Note: Data followed by different lowercase letters within the same column means significant different ($P<0.05$). The same below.

表 3 缓释肥处理对油菜产量及单株产量构成的影响

Table 3 Effects of f slow release fertilizer on yield and yield composition of canola

试验处理 Treatments	一次分支有效角果数 ^①	二次分支有效角果数 ^②		主序有效角果数 ^③	有效总角果 ^④	每角粒数 ^⑤	千粒重 ^⑥ /g
F ₀	235.6d	9.37a	77.11c	322.1d	17.95d	3.81c	
F _c	287.6c	12.25a	90.38b	390.5c	20.75a	3.87b	
F ₃₇₅	319.9bc	28.77a	95.53a	444.2bc	18.82c	4.19a	
F ₅₂₅	386.6ab	18.36a	96.52a	501.5ab	19.17bc	3.98b	
F ₆₇₅	466.5a	13.21a	97.31a	577.1a	19.63b	3.98b	
F ₈₂₅	454.0a	11.56a	92.03ab	557.6a	19.72b	3.90b	

试验处理 Treatments	单株产量重 ^⑦ / g	产量 Seed yield/ (10 ³ kg·hm ⁻²)			增产率 ^⑧ /100%	
		变幅 Range		平均 Mean		
F ₀	22.02e	1.316	—	1.638	1.469d	-
F _c	31.38d	1.904	—	2.213	2.091c	-
F ₃₇₅	35.07c	1.995	—	2.514	2.337c	13.88
F ₅₂₅	38.27bc	2.407	—	2.818	2.552bc	22.05
F ₆₇₅	45.05a	2.759	—	3.335	3.004a	43.54
F ₈₂₅	42.92ab	2.737	—	2.972	2.861ab	36.82

①Number of effective pods on the first branches, ②Number of effective pods on the secondary branches, ③Number of effective pods on the main inflorescence, ④Total of effective pods, ⑤Grains per pod, ⑥1000-grain Weight, ⑦Yield weight per plant, ⑧Yield increment of the application of special slow-release fertilizer.

一元二次多项式拟合产量与缓释专用配方肥用量间的关系为： $Y=-0.005 1X^2+7.382X+256.6$ ，式中 Y 为产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)， X 为缓释肥施用量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)， $R^2=0.943 9$ 。

施肥与不施肥在产量构成中的千粒重、角粒数和有效角果数间均有显著差异 ($P<0.05$)，施肥均高于不施肥 (表 3)。F_c 处理与缓释专用配方肥处理对产量影响的显著差异主要体现在有效角果数和角粒数，尤其是一次分支有效角果数上，缓释专用配方肥处理的油菜总有效角果数较 F_c 处理多 11.23%~62.23%，

角粒数则较 F_c 处理低 4.96%~9.31%。

2.2 缓释肥对油菜氮磷钾养分吸收利用的影响

2.2.1 对油菜不同器官氮磷钾含量和肥料吸收利用的影响

由表 4 可知，在油菜植株体内，氮和磷主要储存于籽粒，钾主要储存在茎壳与根。植株各部位氮磷钾养分含量随着缓释专用配方肥用量的增加，茎壳和籽粒的氮、磷含量下降，钾含量在茎壳中下降，籽粒无显著变化；根的氮、磷含量先增后减，钾含量无明显变化；F_c 处理茎壳和籽粒的氮、磷含量高于缓释专用配方肥，低于 F₀ 处理，根则相反。

表 4 缓释肥对油菜氮磷钾含量的影响

Table 4 Effects of slow-release fertilizer on NPK nutrient contents in canola

试验处理 Treatments	氮含量			磷含量			钾含量		
	Nitrogen content / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)			Phosphorus content / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)			Potassium content / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)		
	茎壳 ^①	根 ^②	籽粒 ^③	茎壳 ^①	根 ^②	籽粒 ^③	茎壳 ^①	根 ^②	籽粒 ^③
F ₀	3.96a	2.28ab	16.29a	1.02a	0.57e	5.29a	39.19a	28.39a	13.07a
F _c	3.87a	2.00b	16.65a	0.96b	0.76c	5.18a	35.53b	20.88bc	11.61a
F ₃₇₅	3.58ab	2.30ab	16.15a	0.88c	0.98b	5.13ab	35.47b	18.19c	12.08a
F ₅₂₅	3.11bc	2.32ab	15.90a	0.88c	1.00b	4.98bc	36.70ab	22.40b	12.71a
F ₆₇₅	2.83c	2.52a	16.22a	0.78d	1.04a	4.90c	35.93b	21.21b	12.79a
F ₈₂₅	2.73c	2.12b	15.23a	0.74e	0.75d	4.89c	37.27ab	21.47b	12.96a

①Stem and Pod shell, ②Root, ③Oilseed

由表 5 可知，缓释专用配方肥处理氮磷钾的养分累积量 (NA) 均高于 F_c 处理，随缓释专用配方肥用量的增加，磷钾的 NA 总量增加，氮的 NA 总量先增后减。各部位上，随着缓释专用配方肥用量的增加，根与籽粒的氮磷钾 NA 先增后减，茎秆和角壳先减后增。F_c 处理除根 NA_K 高于 F₃₇₅ 处理外，其余部位氮磷钾的 NA 均低于缓释专用配方肥处理。油菜对氮磷钾的养分吸收效率 (NAE) 由大到小依次为钾、磷、氮，分别是 NAE_N: 0.217 1 (F_c)~0.461 2 (F₃₇₅)，NAE_P: 0.433 5 (F_c)~0.791 1 (F₃₇₅)，NAE_K: 1.141 (F_c)~1.257 (F₈₂₅)。缓释专用配方肥处理的 NAE_N、NAE_P 以及当季养分回收率 (TCER_N、TCER_P) 均高于 F_c 处理，并随着用量的

增加 NAE 降低。施肥处理的氮磷钾养分转移率 (NTR) 明显高于 F₀ 处理，缓释专用配方肥氮、磷与钾的 NTR 均以 F₆₇₅ 处理最高，F₈₂₅ 处理次之，F_c 处理氮、磷与钾的 NTR 均高于 F₃₇₅ 处理，低于 F₅₂₅、F₆₇₅ 和 F₈₂₅ 处理。

2.2.2 对油菜当季氮磷钾养分损失量与损失率的影响

相比于常用肥处理，施用缓释专用配方肥的当季氮损失量显著降低 ($P<0.05$)，损失率从 78.30% 分别降低至 F₃₇₅、F₅₂₅、F₆₇₅、F₈₂₅ 处理的 53.97%、63.21%、66.29%、73.66%；磷损失量随施用量的降低 (F₈₂₅~F₃₇₅) 减少 4.43 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ~16.88 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，损失率从 56.65% 降低至 20.53%~46.13% (表 6)。

表 5 缓释肥对油菜氮磷钾的养分积累及吸收利用率的影响

Table 5 Effects of slow-release fertilizer on NPK accumulation and absorption utilization efficiency of canola

施肥处理 Treatments	养分类型 Nutrients	NA/ (kg·hm ⁻²)					积累总量 Total	NAE/ (kg·kg ⁻¹)	NTR/ %	TCER/ %
		籽粒	角壳	茎秆	根					
		Oilseed	Pod	Stem	Root					
F ₀	N	23.57c	5.68b	8.77c	2.86c	40.88c	-	61.99	-	
F _c		34.02b	6.89ab	11.26a	3.30b	54.45b	0.217 1	66.51	25.93	
F ₃₇₅		37.83b	7.82a	12.62a	3.79b	62.09ab	0.461 2	64.89	66.05	
F ₅₂₅		40.81ab	6.99ab	11.33a	4.11ab	63.24ab	0.367 4	69.02	48.18	
F ₆₇₅		48.76a	6.67ab	10.59bc	4.73a	70.76a	0.337 5	73.86	41.93	
F ₈₂₅		43.54ab	6.68ab	10.93bc	3.97b	65.04a	0.263 2	71.3	31.53	
F ₀	P	7.66c	1.46d	2.26c	0.71e	12.09c	-	67.31	-	
F _c		10.83bc	1.71c	2.81bc	1.25d	16.60b	0.433 5	70.54	63.35	
F ₃₇₅		11.99b	1.93ab	3.11ab	1.61c	18.63b	0.791 1	70.42	162.54	
F ₅₂₅		12.72ab	1.97a	3.20a	1.76b	19.66ab	0.698 6	71.08	122.50	
F ₆₇₅		14.72a	1.85bc	2.94b	1.94a	21.45a	0.655 3	75.46	103.94	
F ₈₂₅		13.98ab	1.80bc	2.98b	1.40d	20.16ab	0.540 3	74.51	79.94	
F ₀	K	18.93d	56.19e	86.80cd	35.64a	197.56d	-	11.69	-	
F _c		24.26d	63.24e	103.39d	34.45ab	225.34d	1.140 6	12.71	-	
F ₃₇₅		28.75c	76.97d	124.15c	29.88b	259.74c	1.168 1	12.51	104 7.60	
F ₅₂₅		32.39bc	82.44bc	133.68ab	39.63a	288.13b	1.240 5	13.03	830.14	
F ₆₇₅		38.32a	84.71b	134.60ab	39.83a	297.45b	1.228 2	14.88	666.51	
F ₈₂₅		37.04ab	90.32a	149.43a	40.06a	316.86a	1.256 8	13.38	580.90	

注: NA 指养分积累量、NAE 指养分吸收效率、NTR 指养分转移率、TCER 指当季作物养分回收率。Note: NA stands for nutrition accumulation, NAE for nutrition absorption efficiency, NTR for nutrition transfer rate, TCER for this crop extraction rate.

表 6 缓释肥对油菜氮磷钾养分损失量与损失率的影响

Table 6 Effects of slow-release fertilizer on NPK nutrient loss and loss rate

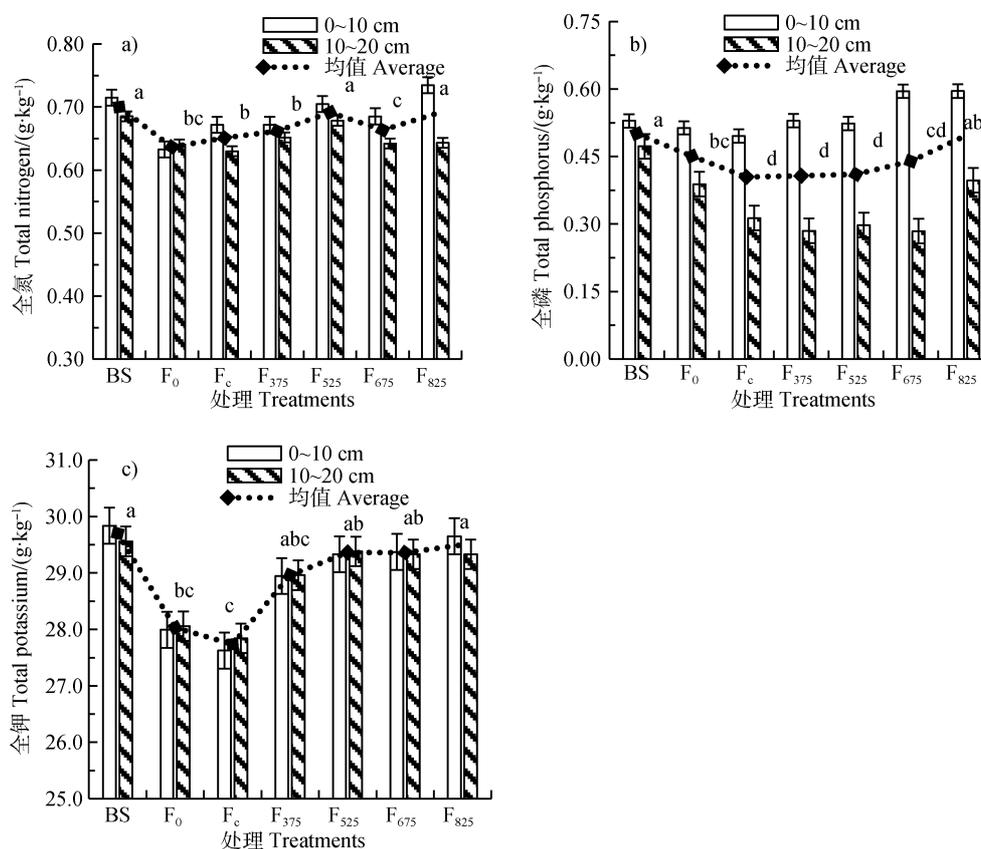
处理 Treatments	损失量 Loss / (kg·hm ⁻²)			损失率 Loss rate / %		
	N	P	K	N	P	K
F ₀	—	—	—	—	—	—
F _c	196.43a	21.69a	—	78.30	56.65	—
F ₃₇₅	72.79e	4.81e	-37.39a	53.97	20.53	-16.81
F ₅₂₅	108.64d	8.59d	-55.86b	63.21	30.41	-24.05
F ₆₇₅	139.12c	11.17c	-55.26b	66.29	34.25	-22.82
F ₈₂₅	181.84b	17.26b	-64.75c	73.66	46.13	-25.68

2.3 缓释肥对植株根区土壤氮磷钾养分的影响

油菜成熟期根区土壤氮磷钾含量较播种前出现不同程度下降, 其中缓释专用配方肥处理的全氮、全磷与全钾分别为播前的 91.5%~98.8%、81.3%~99.0%与 97.5%~99.3%, F_c 处理为 91.7%、80.1%与 93.2% (图 1)。 F_0 、 F_c 、 F_{375} 和 F_{675} 处理全氮下降显著 ($P<0.05$), 在土层分布上, F_0 处理的 0~10 cm 处较 10~20 cm 处下降更明显, 施肥处理则是 10~20 cm 处更明显。全磷含量的下降主要集中于 10~20 cm 土层, 在 0~10 cm 处 F_{675} 处理和 F_{825} 处理反而高于播种前; 随缓释专用配方肥用量的增加, 土壤全磷含量先降后升, F_c 处理在土层 0~10 cm 处显著低于 F_{675} 和 F_{825} , 10~20 cm 处高于 F_{375} 、 F_{525} 和

F_{675} 处理, 低于 F_{825} 处理。全钾含量 F_0 处理与 F_c 处理显著低于缓释专用配方肥处理。

如图 2a) 所示, 油菜成熟期根区土壤有效磷含量与播前相比有不同程度的降低, 其中, F_c 、 F_{375} 、 F_{525} 与 F_{675} 处理的 10~20 cm 土层显著下降 ($P<0.05$)。随着缓释专用配方肥用量的增加, 有效磷平均含量先降后升。从图 2b) 可以看出, 油菜成熟期根区土壤 0~10 cm 处土壤速效钾含量较播种前显著降低 ($P<0.05$), 降低幅度达 22.2% (F_{375})~34.7% (F_{825}), F_0 、 F_c 和 F_{375} 处理显著高于 F_{525} 、 F_{675} 和 F_{825} 处理。随着缓释专用配方肥用量的增加, 速效钾含量缓慢下降。10~20 cm 土壤速效钾含量各处理间无显著差异, 除 F_{825} 处理外, 其余较播前无显著变化。



注: BS 指播种前, 0~10 cm 指 0~10 cm 土层, 10~20 cm 指 10~20 cm 土层。下同。 Note: BS stands for before sowing; 0~10 cm for the 0~10 cm soil layer; and 10~20 cm the 10~20 cm soil layer. The same below.

图 1 缓释肥对油菜根区土壤全氮、全磷、全钾含量的影响

Fig. 1 Effects of slow-release fertilizer on NPK contents in the rhizosphere soil of canola

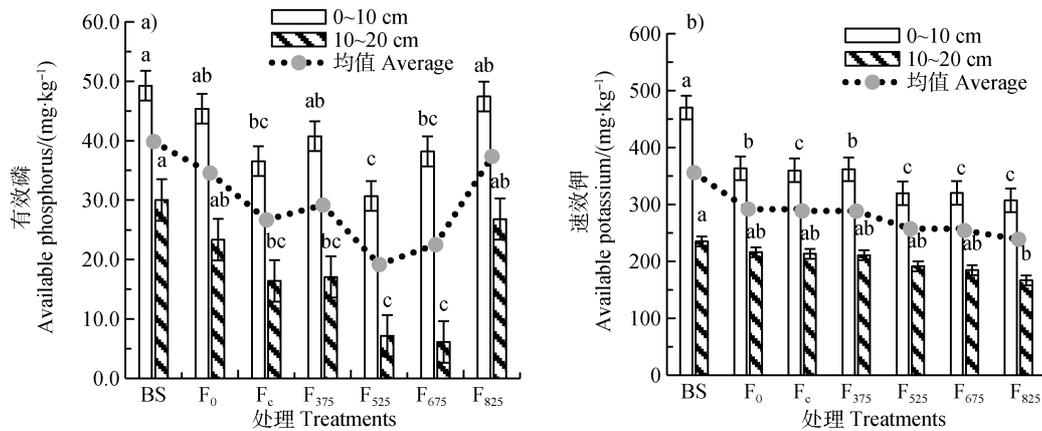


图 2 缓释肥对油菜根区土壤有效磷和速效钾养分含量的影响

Fig. 2 Effects of slow-release fertilizer on available phosphorus and available potassium content in the rhizosphere soil of canola

3 讨论

3.1 缓释肥对紫色土油菜产出的影响

作物的优质高产在很大程度上取决于土壤能否适时适量供给作物必需的大量、中量、微量营养物质。在大田生产条件下，即使生产环境适合，多数土壤并不能满足作物优质高产对养分的需求，因此各种肥料的使用成为农业生产的必要条件^[5]。研究^[13-14]表明，油菜需肥性强，施肥能显著增加油菜的产出，施肥状态下油菜的根、茎、壳和籽粒等生物量及收获指数的显著提高为增产打下基础。本研究结果表明，施用缓释专用配方肥油菜产量较常用肥增加 13.88% (F₃₇₅) ~ 43.54% (F₆₇₅) (表 3)，常用肥处理由于油菜生长后期养分不足，长势缓慢，养分首先满足生殖器官的供应，致使茎秆与角壳生物量相对较低，同时由于养分供应不合理，导致有效角果数少，千粒重较低 (表 3)。多元长效缓释专用配方肥施用增产效果非常明显，其实现了一次性基肥施用技术，不仅减少了精耕细作时的施肥次数，而且还稳定了产量^[15-16]。本试验结果显示，缓释专用配方肥以低施用量带来的收益远高于高施用量的常用肥，说明缓释专用配方肥有较好的生态经济效益，因此，应用缓释专用配方肥是同时解决高产与节肥这两个问题的良好方向。

3.2 缓释肥对油菜 N、P、K 吸收利用及根区土壤养分变化的影响

缓释专用配方肥的肥效以其同作物生长发育进

程相对匹配的特点，不仅促进作物发挥生长潜力，也使肥料利用率有较大的提高，弥补了少施或不施有机肥对化肥养分大量损失的影响，对降低农业化肥污染，响应国家的节肥高效生产开辟了新路径^[5, 9, 17]。本研究表明，施用常用肥的氮磷钾养分积累量均明显低于施用缓释专用配方肥 (表 5)。油菜 N、P、K 需求量巨大，合理地施用肥料能有效促进作物生长、提高产质及肥料利用率，其原理和技术主要集中于不同营养元素的数量和比例的调节及供应时间，油菜对 N、P、K 的吸收利用情况能有效表征施肥效益^[18]。本研究结果显示，施用常用肥油菜茎壳的 N、P、K 含量均明显高于施用缓释专用肥，而籽粒的含量差异却不明显，K 甚至低于施用缓释肥 (表 4)，尽管施用常用肥的茎壳生物量相对较少，但其养分转移率也仅高于产量较低的 F₃₇₅ 处理 (表 5)，表明相较于常规用肥，缓释专用配方肥因其与植物吸肥特性机制相适应，不仅提高肥料利用率，也利于油菜各部位生物量的均衡生长，有助于提高油菜产量与品质。施用常用肥的养分吸收效率与当季养分回收率均低于施用缓释专用配方肥 (表 5)，表明相较于常用肥，缓释专用配方肥实现节肥高效生产。施用缓释肥 P、K 的当季养分回收率出现大于 100% 的现象 (表 5)，主要是由于其后期养分供应仍然得到满足，以及茎秆和角壳对 K 的富集作用，积累较多的 P 和 K，对于籽粒，仅有 F₃₇₅ 因其较低的施肥基数才使得当季养分回收率超过 100%。考虑到油菜秸秆基本还田情况，这不仅利于

提高 P、K 的利用率,也有增加土壤有机质和土壤 P、K 有效含量的作用。试验中当季养分回收率、养分转移率和养分吸收效率的结果说明,多元缓释专用配方肥中养分配比释放合理,符合油菜的养分需求规律。

以往研究表明,缓释专用配方肥有利于养分合理释放,协调植物养分需求与土壤养分供应之间矛盾^[14, 19-20]。本试验结果表明,施肥不足,加上作物根系活动促使矿质元素的释放及土壤自身淋失,油菜收获时,根区土壤全氮、全磷和全钾含量较播前出现下降,如 F₀ 处理(图 1);另一种原因可能是养分释放与油菜吸收不同步或过量释放,流失严重,加上前期长势较好、后期生长养分需求较大,导致根区土壤氮磷钾养分含量下降^[21],如 F_c 处理;再者,前茬作物是烤烟,速效钾含量可能较高。因为表层土壤有机质含量相对较高及磷素易被土壤固化,再加上缓释肥养分释放与油菜需求同步等原因,施肥处理在根区 0~10 cm 处部分处理高于播前,在 10~20 cm 处全氮和全磷下降明显(图 1)。与此同时,根区 10~20 cm 土层的区域磷素因不断被吸收和流失而出现短暂相对偏低状况,有效磷含量的变化也具有相似性。速效钾在土壤中易于流动转移,所以 0~10 cm 与 10~20 cm 土层速效钾含量差异不显著(图 2)。由于缓释专用配方肥养分合理释放,油菜吸钾量虽大,但根区全钾下降并不显著(图 1)。施用常用肥根区全钾含量较低反而速效钾含量相对较高,虽有油菜生长后期大量的落花、落叶和落果对表土产生影响^[22],但主要还是钾素释放过度、流失严重及后期生长不足的体现。相反,缓释专用配方肥随用量的增加,根区全钾含量增高,速效钾含量却相对较低(图 1 和图 2),原因可能是高用量专用肥植株干物质较多,积累大量的钾素,再者缓释专用肥在油菜生长过程中不断释放,对土壤养分起互补作用,因而较低缓释肥用量根区速效钾含量反而表现出高于较多用量。由于根系活力中心偏向 0~10 cm 土层,及上层速效钾的下渗补充,成熟期根区土壤 10~20 cm 处速效钾含量较播前并无明显变化,0~10 cm 却下降显著,降低幅度达 22.2% (F₃₂₅)~34.7% (F₈₂₅)(图 2)。综上所述,施用缓释专用配方肥既明显增产又提高氮磷钾养分利用

率,反观常用肥氮磷施用量虽多,在生物量较低的情况下,收获期其根区土壤氮磷钾含量却较低,而有效磷与速效钾含量又较高,表明施用常用肥氮磷钾损失、浪费现象严重。本研究仅进行初步探讨,缺乏年度重复试验,结果有待进一步完善。

4 结 论

施用缓释专用配方肥不仅较施用常用肥显著增加油菜生物量,同时利于提高油菜对氮磷钾养分的吸收利用,且对根区土壤磷钾有效养分有保护作用,维持根区土壤全氮、全磷和全钾含量的降低幅度小于常用肥和不施肥。缓释专用配方肥以油菜需肥特性为出发点,合理用量,既高产又可平衡土壤肥力,在油菜生产上很大程度地提高了经济效益与环境效益,尤其以 675 kg·hm⁻² 最佳。

参考文献 (References)

- [1] Li M, Wu J, Han S, et al. Application effect of controlled-release nitrogen fertilizers under rice-rapeseed rotation systems[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24 (1): 105—113. [李敏, 武际, 韩上, 等. 稻油轮作制下控释氮肥的施用效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (1): 105—113.]
- [2] Ren T B, Zhao J X, Dai X L. Effects of different fertilizer and application amount on yield and quality of direct seeding rape[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2018, 46 (2): 22—25. [任廷波, 赵继献, 戴祥来. 不同肥料及施用量对直播油菜产量及品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2018, 46 (2): 22—25.]
- [3] Zhang Z, Lu J W, Cong R H, et al. Evaluating agroclimatic constraints and yield gaps for winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)—A case study[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 7852.
- [4] Wang J W, Wang Y L, Yao Y, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus retention and release of soil aggregates in upland red soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (5): 1240—1250. [王经纬, 王艳玲, 姚怡, 等. 长期施肥对旱地红壤团聚体磷素固持与释放能力的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54 (5): 1240—1250.]
- [5] Yang J H, Wang C L, Dai H L. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring[M]. Beijing: China Land

- Press, 2008. [杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.]
- [6] Zhu Y, Liao S P, Liu Y, et al. Differences of annual nutrient budgets between rapeseed-rice and wheat-rice rotations in the Yangtze River Basin[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25 (1): 64—73. [朱芸, 廖世鹏, 刘煜, 等. 长江流域油-稻与麦-稻轮作体系周年养分收支差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (1): 64—73.]
- [7] Lu J W, Chen F, Zhang Z Q, et al. Effect of phosphor application rate on rapeseed yield, nutrient absorption and profit[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2005, 27 (1): 73—76. [鲁剑巍, 陈防, 张竹青, 等. 磷肥用量对油菜产量、养分吸收及经济效益的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2005, 27 (1): 73—76.]
- [8] Lu J W, Chen F, Liu D B, et al. Study of potassium recommendation for rapeseed according to soil available potassium content[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2001 (5): 46—48. [鲁剑巍, 陈防, 刘冬碧, 等. 根据土壤速效钾确定油菜钾肥推荐用量的研究[J]. *湖北农业科学*, 2001 (5): 46—48.]
- [9] Fan L Y, Huang X Q, Hui R K, et al. Application of a sustained release special fertilizer in direct-seeding rape[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2014 (15): 8—11. [范连益, 黄晓勤, 惠荣奎, 等. 缓释型油菜专用配方肥在直播油菜生产上的应用研究[J]. *湖南农业科学*, 2014 (15): 8—11.]
- [10] Cheng Y, Zhang J B, Cai Z C. Key role of matching of crop-specific N preference, soil N transformation and climate conditions in soil N nutrient management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (3): 507—515. [程谊, 张金波, 蔡祖聪. 气候-土壤-作物之间氮形态契合在氮肥管理中的关键作用[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (3): 507—515.]
- [11] Bouchet A S, Laperche A, Bissuel-Belaygue C, et al. Nitrogen use efficiency in rapeseed. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36 (2): 38.
- [12] Bu R Y, Ren T, Lu J W, et al. Analysis of P fertilizer efficiency under rice-rapeseed rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (6): 1227—1234. [卜容燕, 任涛, 鲁剑巍, 等. 水稻—油菜轮作条件下磷肥效应研究[J]. *中国农业科学*, 2014, 47 (6): 1227—1234.]
- [13] Zou J, Lu J W, Chen F, et al. Effect of nitrogen, phosphorus, potassium, and boron fertilizers on yield and profit of rapeseed (*Brassica napus* L.) in the Yangtze River basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35 (1): 87—92. [邹娟, 鲁剑巍, 陈防, 等. 氮磷钾硼肥施用对长江流域油菜产量及经济效益的影响[J]. *作物学报*, 2009, 35 (1): 87—92.]
- [14] Huang Y, Li T X, Zhang X Z, et al. Establishment of fertilization recommendation indexes of rapeseed soil based on the “3414” field experiments in the middle of Sichuan hilly regions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46 (10): 2058—2066. [黄亿, 李廷轩, 张锡洲, 等. 基于“3414”试验的川中丘陵区油菜施肥指标体系构建[J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (10): 2058—2066.]
- [15] Li X K, Wang S P, Lu J W, et al. Application quantity of multi-nutrient and long-effect special fertilizer for rapeseed[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2011, 33 (6): 593—597. [李小坤, 王素萍, 鲁剑巍, 等. 多元长效油菜专用肥的适宜用量研究[J]. *中国油料作物学报*, 2011, 33 (6): 593—597.]
- [16] Guan C Y. The cultivation pattern change of winter rapeseed to increase and develop production[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2006, 28 (1): 83—85. [官春云. 改变冬油菜栽培方式, 提高和发展油菜生产[J]. *中国油料作物学报*, 2006, 28 (1): 83—85.]
- [17] Meng Y D, Xu F H, Yang F, et al. Situation of fertilizer application and analysis of fertilizer saving potential in crop farming in China[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2015, 30 (9): 1—4, 13. [孟远夺, 许发辉, 杨帆, 等. 我国种植业化肥施用现状与节肥潜力分析[J]. *磷肥与复肥*, 2015, 30 (9): 1—4, 13.]
- [18] Wang Y, Lu J W, Li X K, et al. Effects of nitrogen, phosphorus, potassium, and boron fertilizers on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) direct-sown in the Yangtze River basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39 (8): 1491—1500. [王寅, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 长江流域直播冬油菜氮磷钾硼肥施用效果[J]. *作物学报*, 2013, 39 (8): 1491—1500.]
- [19] Zhang M, Zhao H, Chen L, et al. High efficiency fertilization technology for potato special fertilizer in winter crop area of Guizhou[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29 (1): 109—114. [张萌, 赵欢, 陈龙, 等. 贵州冬作马铃薯专用肥高效施肥技术[J]. *西南农业学报*, 2016, 29 (1): 109—114.]

- [20] Zhejiang Agricultural University. Plant nutrition and fertilizer[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.[浙江农业大学. 植物营养与肥料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.]
- [21] Shi W M. Root exudates and nutrient availability [J]. Soils, 1993, 25 (5): 252—256. [施卫明. 根系分泌物与养分有效性[J]. 土壤, 1993, 25 (5): 252—256.]
- [22] Li C M, Wang X Y, Sun B. Characteristics of nutrient release and its affecting factors during plant residue decomposition under different climate and soil conditions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (5): 1206—1217. [李昌明, 王晓玥, 孙波. 不同气候和土壤条件下秸秆腐解过程中养分的释放特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54 (5): 1206—1217.]

(责任编辑: 陈荣府)