

除草与磷肥用量对油菜和杂草生长及磷肥利用率的影响

盛倩男, 董小艳, 张洋洋, 廖世鹏, 任涛, 李小坤, 鲁剑巍*

(华中农业大学资源与环境学院 / 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 油菜产量潜力受草害、肥料等影响, 优化杂草管理和磷肥用量在直播油菜种植中发挥着关键作用。在湖北省武汉市开展田间试验, 设置 2 种杂草管理措施 (不除草、除草) 和 4 个施磷水平 (P_2O_5 0、45、90、135 $kg \cdot hm^{-2}$, 分别用 P_0 、 P_{45} 、 P_{90} 、 P_{135} 表示), 测定油菜籽产量、产量构成因子、油菜和杂草的生物量及磷积累量, 并分析磷肥利用率。结果表明, 不论除草与否, P_{90} 处理油菜籽产量最高, 且与不除草相比, 除草后 P_{90} 油菜籽产量提高了 66.3%, 施磷和除草均主要通过增加收获密度和单株角果数来促进增产。不论除草与否, 在施磷 90 $kg \cdot hm^{-2}$ 范围内, 油菜和杂草的生物量及磷积累量均随施磷量的增加显著增加, 除草后更有利于提高油菜相对于杂草的生物量和磷素竞争力; 与不除草相比, 除草后 3 个时期的杂草生物量在总生物量中的占比分别平均降低了 58.8%、67.1% 和 60.4%; 此外, 不除草时杂草磷积累量占总磷积累量的 42.0% ~ 62.0%, 而除草后这种比值随着生育期进程的推进不断缩小。除草和施磷对油菜磷肥利用率存在显著的交互效应, 与不除草相比, 除草后油菜的磷肥利用率平均增加了 18.2%。在油菜-杂草农田体系中, 直播油菜田中杂草养分吸收的情况需要引起重视, 除草和施磷可以显著提高油菜的生物量和磷积累量, 增加油菜在总体系中的磷肥利用率占比, 从空间和养分上削弱杂草的竞争优势, 有效地提高油菜产量和磷肥利用率。

关键词: 直播油菜; 磷肥用量; 田间杂草; 油菜籽产量; 磷肥利用率; 除草

油菜是我国重要的油料作物, 菜籽油占国产食用植物油的一半份额^[1]。我国以冬油菜为主, 其种植区主要分布在长江流域^[2]。随着农业轻简化种植方式的推进与农村劳动力的转移, 直播油菜逐渐成为该流域主要的栽培方式, 与移栽油菜相比, 直播油菜不需要育苗移栽等工作, 省时省工, 操作简单, 经济效益相对较高^[3-4]。然而, 直播油菜田间管理较为粗放, 由于各种环境因素以及耕作条件的变化, 目前在直播油菜生产种植中草害问题远大于移栽油菜^[5-6], 如果杂草防控不及时, 将会与油菜竞争养分等资源, 一般会造成油菜减产 10% ~ 20%, 严重时高达 50% 以上^[7-8]。此外, 冬油菜生育期长的特性增加了农田杂草的生物多样性, 导致油菜田间杂草种类繁多、生物量大、防控难^[9]。目前, 油菜田杂草防除以喷施化学除草剂为主, 虽然化学除草高效经济, 但除草剂投入不佳或

杂草防控不完全等均会影响杂草防除效果; 并且杂草具有抗逆性强、可塑性大等特点, 即使施用了除草剂, 由于其自身生长特性也会贯穿于作物整个生育时期^[10-11]。因此, 杂草与作物间的竞争关系是值得关注的问题。

油菜是一种对磷素缺乏极其敏感的作物, 增施磷肥可促进油菜生长发育, 提高油菜籽产量和磷肥利用率^[12]; 土壤有效磷是影响杂草种群组成的重要因素之一, 磷肥的投入对杂草的生长具有很大的影响^[13]。可见, 磷素管理对作物-杂草之间的竞争作用尤为重要^[14]。蒋敏等^[15]发现, 在施氮或者氮、钾配施的基础上, 增施磷肥有助于降低土壤中杂草种子的数量, 从而减少地上部杂草发生的可能性。Naderi 等^[16]研究表明, 在油菜田间采用条、带状施磷的施肥方式可以有效抑制杂草的生长, 提高油菜籽产量。陆志峰等^[17]研究表明, 缺磷限制油菜的生长, 却对杂草的生长有促进作用, 与油菜相比, 杂草对磷素的响应幅度更大; 此外, 杂草对不同磷水平的响应幅度在种群之间差异较大, 低磷环境下表现更为敏感^[18-19], Blackshaw 等^[20]分析得出在较高的磷水平下, 对磷反应较小的杂草竞争能力将保持不变或下降; 高磷响应的杂草竞争力随

收稿日期: 2023-07-02; 录用日期: 2023-09-01

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1901200); 财政部和农业农村部“国家现代农业产业技术体系 (CARS-12)”。

作者简介: 盛倩男 (1998-), 硕士研究生, 研究方向为作物养分管理与施肥技术。E-mail: shengqiannan@webmail.hzau.edu.cn。

通讯作者: 鲁剑巍, E-mail: lunm@mail.hzau.edu.cn。

着磷肥用量的增加逐渐增强。因此,有必要研究油菜和杂草对磷肥响应的差异性,通过合理施用磷肥调控杂草的生长,提高油菜的养分竞争能力,以便有效利用养分资源,提高肥料利用率。本研究在油菜不除草和除草的条件下,分别施用不同用量磷肥,探讨除草与磷肥用量对直播油菜、杂草生长和养分吸收的影响,进一步明确杂草与直播油菜养分利用率的关系,为直播油菜的生产提供合理的田间管理依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2020年10月至2021年5月在华中农业大学校内试验基地进行,基地位于湖北省武汉市洪山区。供试土壤为红棕壤发育的水稻土,耕层土壤基本理化性质为pH 6.76,有机质 $13.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $15.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $165.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验前茬作物为水稻,供试油菜品种为华油杂62,采用直播种植方式,2020年10月27日播种,2021年5月1日收获,试验过程中无病虫害发生。该试验地点油菜生育期日降水量和日平均气温如图1所示,油菜越冬期气温最低且降水量最少,花期降水量较多。试验地主要杂草包括天葵、苕子、看麦娘、牛繁缕和碎米芥。

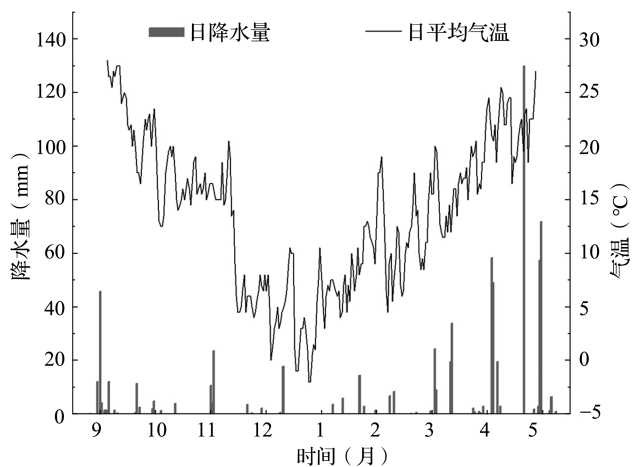


图1 油菜生育期气温和降水量

1.2 试验设计

田间试验采用双因素多水平设计,设置2种杂草管理措施和4个施磷水平。杂草管理设不除草和除草,不除草处理油菜整个生育期不进行任何杂草防控,除草处理用乙草胺乳油(有效成分 $0.375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)进行播种前土壤封闭除草,采用背

负式喷雾器喷洒,喷洒容量为 $750 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$,此后油菜生长过程中不再除草;磷肥用量分别为 $\text{P}_2\text{O}_5 0 (\text{P}_0)$ 、 $45 (\text{P}_{45})$ 、 $90 (\text{P}_{90})$ 和 $135 (\text{P}_{135}) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷肥为过磷酸钙 ($\text{P}_2\text{O}_5 12\%$),作基肥一次性施用。各处理其他肥料用量均为 $\text{N } 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $\text{B } 1.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,供试肥料分别为60%普通尿素 ($\text{N } 46\%$) + 40%控释尿素(美国加洋公司生产, $\text{N } 44\%$)、氯化钾 ($\text{K}_2\text{O } 60\%$) 和硼砂 ($\text{B } 12\%$),均一次性作基肥施用。每个处理3次重复,小区面积为 $10.8 \text{ m}^2 (6 \text{ m} \times 1.8 \text{ m})$,随机区组排列。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品的采集与分析

油菜基肥施用前,采用多点采样法采集耕层(0~20 cm)土壤,风干磨细过筛后按照常规方法测定各项指标^[21]。

1.3.2 植物样品采集与分析

分别于油菜花期(2021年3月21日,播种后144 d)、角果期(2021年4月11日,播种后164 d)和成熟期(2021年4月30日,播种后183 d),在每个小区随机选取一个 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 的样方,分别收取样方内全部的油菜和杂草地上部样品,其中花期和角果期油菜植株样品和3个取样时期的杂草样品均进行全株制样和测定,成熟期的油菜植株分为茎秆、角壳和籽粒3个部分分别制样测定。所有植物样品分别烘干、称重,磨碎后测定养分。采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 联合消煮、流动注射分析仪(AA3,德国)测定植物全磷含量^[21]。

1.3.3 产量及产量构成因子

收获前2~3 d每个小区选取10株有代表性的植株,调查油菜产量构成因子,包括收获密度、单株角果数、每角粒数及收获后千粒重。成熟后各小区油菜单独收获,测定油菜产量。

1.4 数据计算与统计分析

油菜磷素积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 油菜干物质量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) × 油菜磷含量 (%);

杂草磷素积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 杂草干物质量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) × 杂草磷含量 (%);

农田植物总磷素积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 油菜磷素积累量 + 杂草磷素积累量;

油菜磷肥利用率 (%) = (施磷区油菜地上部磷素积累量 - 不施磷区油菜地上部磷素积累量) ÷ 施磷量 × 100;

农田植物总磷肥利用率 (%) = (施磷区油菜和杂草地上部总磷素积累量 - 不施磷区油菜和杂草地上部总磷素积累量) ÷ 施磷量 × 100。

试验数据利用 Excel 2016 进行处理, 采用 SPSS 25.0 进行数据的统计分析, 最小显著法 (LSD) 检验试验数据的差异显著性水平 ($P < 0.05$), 采用 Origin 2019 绘图。

2 结果与分析

2.1 油菜籽产量及产量构成因子

除草和施磷均可以显著提高油菜籽产量 (图 2)。与 P_0 相比, 不除草和除草处理的油菜在施磷后分别平均增产 854 和 1494 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增产率分别为 418.6% 和 526.1%, 相同磷肥用量下, 除草处理油菜籽产量显著高于不除草处理。在施磷 90 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内, 油菜籽产量随着施磷量的增加而增加, 后再增加施磷量产量不再增加, 施磷 135 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量略有降低。无论除草与否, 油菜籽产量与施磷量的关系均符合一元二次函数变化, 不除草时油菜籽最高产量为 1239 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最佳施磷量为 106 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相比之下, 除草可将最高产量提高至 2066 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 增产率为 66.7%; 在施磷量为 34 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 油菜籽产量即可达到不除草处理下的最高产量, 并将油菜籽生产中所需的磷肥用量降低了 68.5%。

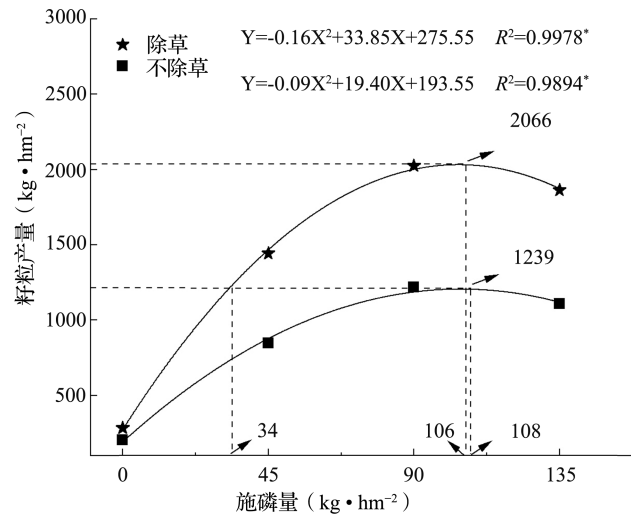


图 2 不同杂草管理下油菜籽产量对施磷量的响应曲线

注: * 表示 $P < 0.05$ 。

产量构成因子结果 (表 1) 显示, 施磷显著提高了收获密度、单株角果数和每角粒数, 在不除草与除草条件下, 与 P_0 处理相比, 施磷后收获密度分别平均提高了 189.3% 和 107.9%, 单株角果数分别平均提高了 79.7% 和 128.9%, 每角粒数分别平均提高了 18.0% 和 29.7%。除草显著提高了单株角果数和每角粒数, 与不除草相比, 除草后单株角果数分别提高了 65.3%, 每角粒数分别提高了 9.9%。除草和施磷二者的交互作用对收获密度存在极显著交互效应 ($P < 0.01$), 但除草和施磷对千粒重影响不显著。

表 1 不同施磷水平和杂草管理下油菜籽产量及产量构成因子

施磷量 (P_2O_5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	收获密度 (万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$)		单株角果数 (个 $\cdot \text{株}^{-1}$)		每角粒数 (粒 $\cdot \text{角}^{-1}$)		千粒重 (g)	
	不除草	除草	不除草	除草	不除草	除草	不除草	除草
0	12.04b	17.59c	37.3b	50.1b	15.0b	15.3b	2.91a	3.06a
45	33.01a	25.00b**	72.4a	115.2a**	17.4a	19.5a*	2.94a	3.14a
90	36.36a	45.83a*	61.1a	117.2a**	18.2a	20.3a**	3.08a	3.07a
135	35.07a	38.89a	67.7a	111.8a*	17.6a	19.8a*	3.07a	3.10a
方差分析								
杂草管理 (W)	ns		**		**		ns	
施磷量 (P)	**		**		**		ns	
W × P	**		*		ns		ns	

注: 同一列不同小写字母表示同一除草措施下施磷量间差异显著 ($P < 0.05$); * 和 ** 分别表示除草和不除草处理间差异达到显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 水平, ns 表示差异不显著。下同。

2.2 不同时期的油菜和杂草（地上部）生物量

不论除草与否，在施磷 90 kg · hm⁻² 范围内，油菜和杂草的生物量均随施磷量的增加显著增加；除草显著增加了油菜生物量，降低了杂草的生物量（表 2）。在花期、角果期和成熟期，油菜和杂草的生物量均在 P₉₀ 处理后达到稳定，与 P₀ 处理相比，不除草 P₉₀ 处理的油菜生物量分别提高了 6.9、3.8 和 4.2 倍，除草后 P₉₀ 处理的油菜生物量在 3 个生育期分别提高了 6.1、4.1 和 5.3 倍；杂草的生物量在施用除草剂后分别是 P₀ 处理的 1.6、1.2 和 1.2 倍，与不除草相比分别降低了 60.0%、61.3% 和 52.0%。施用除草剂对农田植物（油菜 + 杂草）地

上部总生物量的影响不明显，但除草显著降低了杂草生物量在总生物量中的占比（W/T），随着生育进程的推进，与不除草相比，除草后油菜平均生物量分别提高了 47.0%、57.7% 和 66.6%，W/T 值分别平均降低了 58.8%、67.1% 和 60.4%，角果期降低程度较为明显；与 P₀ 相比，除草处理在施磷后 W/T 值分别平均降低了 64.0%、71.2% 和 72.0%，分别是不除草的 2.6、3.2 和 2.6 倍。以杂草与总生物量之间的比值作为杂草对油菜生物量竞争力的相对评判标准，可以得出，除草和施磷可以有效地削弱杂草对油菜的生物量竞争力，促进油菜的生长。

表 2 不同施磷水平和杂草管理下油菜及杂草的干物质量

生育期	施磷量 (P ₂ O ₅ kg · hm ⁻²)	油菜 (kg · hm ⁻²)		杂草 (kg · hm ⁻²)		总生物量 (kg · hm ⁻²)		杂草量 / 总量 (%)	
		不除草	除草	不除草	除草	不除草	除草	不除草	除草
花期	0	231c	376c*	370c	249c	601c	625c	61.58a	39.86a*
	45	1071b	1628b*	1184b	343b*	2255b	1971b	52.51b	17.40b*
	90	1824a	2688a*	1487a	405a*	3311a	3093a	44.92c	13.09c*
	135	1906a	2703a*	1378ab	386ab*	3284a	3089a	41.97c	12.51c*
角果期	0	744c	1100c*	855c	504ab*	1599c	1604c	53.48a	31.42a*
	45	2816b	4636b*	2058b	471b*	4874b	5107b	42.22b	9.22b*
	90	3602a	5624a*	2617a	581a*	6219a	6205a	42.08b	9.37b*
	135	3659a	5703a*	2486a	534ab	6145a	6237a	40.46b	8.57b*
成熟期	0	638c	877c*	1084c	663ab*	1722c	1540c*	62.94a	43.05a*
	45	2547b	4361b*	2315b	587b*	4862b	4948b	47.61b	11.87b*
	90	3302a	5530a*	2704a	794a*	6005a	6325a	45.02b	12.55b*
	135	3349a	5617a*	2671a	752a*	6020a	6370a*	44.37b	11.80b*
方差分析									
生育时期 (T)		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.001***	
磷肥用量 (P)		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.001***	
杂草管理 (W)		<0.001***		<0.001***		ns		<0.001***	
T × P		<0.001***		<0.01**		<0.01**		<0.001***	
P × W		<0.001***		<0.001***		ns		<0.001***	
T × W		<0.001***		<0.001***		<0.001***		ns	
T × P × W		<0.001***		<0.001***		<0.05*		ns	

2.3 不同时期油菜和杂草的磷含量和磷素积累量

除草和施磷对油菜及杂草的磷含量和磷素积累量均存在显著的影响(表3)。不论除草与否,在花期、角果期和成熟期,油菜和杂草的磷含量均随施磷量的增加而增加, P₉₀后达到稳定(不除草处理角果期油菜磷含量以 P₁₃₅最高除外), 不论除草与否, 花期和角果期杂草的磷含量均高于油菜, 而成熟期的油菜磷含量高于杂草, 结果表明, 不同生育期油菜和杂草的生长对施磷量的响应程度不同。

除草显著提高了油菜花期至成熟期的磷素吸收, 与不除草相比, 除草后3个时期油菜磷素积累量分别平均提高了59.6%、70.4%和82.5%; 此外, 油菜与杂草的磷素积累量随施磷量的增加而增加。

油菜磷素积累量在花期、角果期和成熟期均在 P₉₀后达到稳定, 与 P₀相比, P₉₀处理在不除草时油菜磷素积累量分别提高了10.0、6.3和6.4倍, 除草后分别提高了8.4、6.2和7.8倍。同样, 杂草磷素积累量在 P₉₀后趋于稳定, 除草条件下, P₉₀处理杂草磷素积累量分别是 P₀处理的2.0、1.5和4.1倍, 与不除草相比, 分别降低了55.6%、63.4%和52.9%。除草对农田植物总的磷素积累量的影响不明显, 但显著降低了杂草在总磷素积累量的占比, 不除草下, 杂草磷素积累量占总磷素积累量的50%左右, 而在杂草去除后, 比值随着生育进程的推进不断缩小, 表明相同施磷水平下除草有助于磷养分向油菜的分配, 进而提高油菜相对于杂草的磷素吸收能力。

表3 不同施磷水平和杂草管理下油菜及杂草的磷含量和磷素积累量

生育期	施磷量 (P ₂ O ₅ kg · hm ⁻²)	磷含量 (%)				磷素积累量 (P ₂ O ₅ kg · hm ⁻²)							
		油菜		杂草		油菜		杂草		农田地上部植物		杂草 / 总养分 积累量	
		不除草	除草	不除草	除草	不除草	除草	不除草	除草	不除草	除草	不除草	除草
花期	0	0.24b	0.27b	0.28b	0.29b	1.25d	2.33c*	2.44b	1.66b	3.68c	3.99c	0.65a	0.42a*
	45	0.31a	0.35a	0.33a	0.35a	7.70c	13.16b*	9.05a	2.73a*	16.75b	15.89b	0.55b	0.17b*
	90	0.33a	0.36a	0.32ab	0.36a	13.77b	21.98a*	10.96a	3.34a*	24.73a	25.32a	0.44bc	0.13bc*
	135	0.38a	0.40a	0.32ab	0.35a	16.43a	25.02a*	10.23a	3.14a*	26.67a	28.16a	0.38c	0.11c*
角果期	0	0.20d	0.23c	0.22b	0.25b	3.40d	5.87c*	4.26c	2.87c	7.66d	8.75c	0.55a	0.33a*
	45	0.27c	0.30b	0.28a	0.31a	17.62c	31.85b*	13.23b	3.38bc*	30.84c	35.23b	0.43b	0.10b*
	90	0.30b	0.33ab*	0.29a	0.33a	24.74b	42.08a*	17.36a	4.43a*	42.10b	46.51a*	0.41b	0.10b*
	135	0.33a	0.35a	0.30a	0.33a	27.63a	45.26a*	17.05a	4.05ab*	44.68a	49.31a*	0.38b	0.08b*
成熟期	0	0.21c	0.23c	0.11b	0.13b	3.00c	4.53c*	2.66c	2.02bc	5.66c	6.55c	0.47a	0.30a*
	45	0.24b	0.26b	0.12ab	0.14ab	14.09b	26.34b*	6.32b	1.86c*	20.41b	28.20b*	0.31b	0.07b*
	90	0.29a	0.31a	0.15a	0.17a	22.06a	39.89a*	9.10a	3.17a*	31.16a	43.05a*	0.29b	0.07b*
	135	0.29a	0.32a*	0.15a	0.17a	21.91a	40.66a*	9.39a	3.00ab*	31.30a	43.66a*	0.30b	0.07b*
方差分析													
生育时期 (T)		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.001***	
施磷量 (P)		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.001***	
杂草管理 (W)		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.001***	
T × P		ns		ns		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.01**	
P × W		ns		ns		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.001***	
T × W		ns		ns		<0.001***		<0.001***		<0.001***		<0.001***	
T × P × W		ns		ns		<0.01**		<0.001***		<0.05*		ns	

2.4 油菜和农田地上部植物的磷肥利用率

除草和施磷对农田地上部植物（油菜 + 杂草）的磷肥利用率均存在显著的影响，且两者存在显著的交互作用（图 3）。结果表明，随着施磷量的增加，油菜和总磷肥利用率均呈现下降的趋势，与不除草相比，除草后油菜的磷肥利用率下降的趋势较为明显；但在相同磷肥用量下，除草处理的油菜磷肥利用率和总磷肥利用率显著高于不除草处理，不除草处理油菜的磷肥利用率平均占总磷肥利用率的 74.7%，而除草处理油菜的磷肥利用率平均占总磷肥利用率的 97.9%，除草后油菜的磷肥利用率接近总磷肥利用率。

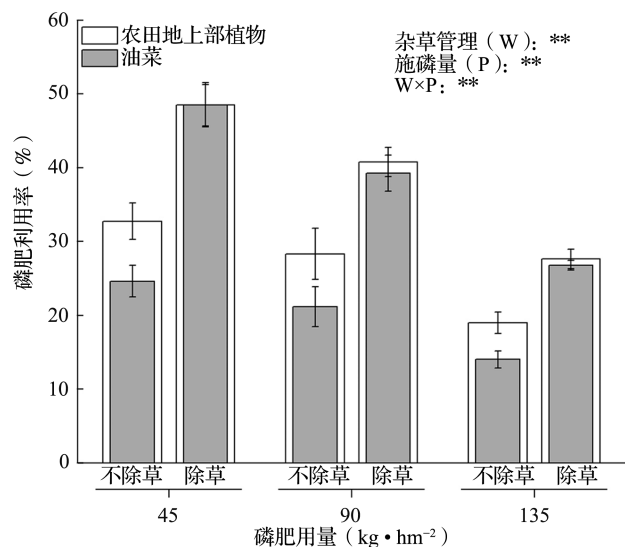


图 3 不同施磷水平和杂草管理下油菜及农田地上部植物的磷肥利用率

注：** 表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 除草和施磷对油菜和杂草生长及磷素吸收的影响

合理施用除草剂可以充分发挥油菜产量潜力^[22]，通过一元二次函数拟合油菜籽产量与施磷量的关系发现，磷肥用量相同的情况下，除草处理油菜的最高产量是不除草处理油菜最高产量的 1.6 倍，除草处理可以通过施用更少的磷肥达到不除草处理下的最高产量；除草和施磷通过提高收获密度和单株角果数来提高产量，二者存在显著交互作用。本试验中，前期通过喷施乙草胺进行了土壤封闭除草；研究表明，封闭除草后油菜生物量显著增加，杂草的生物量显著减少，与之前学者的研究一致^[23]。但在本试验中需要说明的是，冬油菜生育期长，杂草

出苗时间不一，前期的封闭除草并没有完全根除田间杂草，杂草生物量表现为成熟期 > 角果期 > 花期，可能是由于前期油菜冠层闭合封行之后，油菜光能的捕获以及养分的吸收在一定程度上可以削弱杂草的优势地位，生长后期油菜叶片和花朵凋落，冠层不再闭合，有利于杂草生长^[24]。养分积累量是生物量与养分含量的表征，也是作物形成产量构成的重要基础^[25]，施磷提高了油菜及杂草的生物量、磷含量和磷素积累量。与不除草相比，除草处理显著提高了油菜的生物量和磷素积累量，降低了杂草的生物量和磷素积累量，但两者的磷含量均有所增加；其中，与花期和角果期相比，成熟期油菜和杂草的养分含量较低，油菜生长后期由于下部叶片养分向角果的转移，导致叶片脱落，从而损失了大量的养分^[26]，对于杂草来说，杂草与油菜的生育期不匹配，并且杂草的出苗时间与气温、降水和土壤湿度等因素密切相关，或许是因为某类杂草的消亡造成了地上部杂草总养分含量的降低^[27]；另外，本试验中，同一生育期下随着磷肥用量的增加，杂草生物量占总生物量的比值呈现下降的趋势。综上所述，除草和施磷提高了油菜相对于杂草的生物量竞争力以及对磷养分的竞争力。因此，适宜的磷肥用量与合理的除草措施相结合，在保持油菜群体优势的同时，可以从空间和养分两个方面削弱杂草的竞争能力，进而促进油菜的生长和养分的吸收，达到抑制杂草生长的目的。

3.2 杂草控制对提高肥料利用率的启示

肥料利用率是衡量肥料施用是否合理的一项重要指标，提高肥料利用率有利于实现油菜的高产^[28]，在油菜生产中，对于油菜 - 杂草组成的地上部植物体系来说，除油菜吸收占有的养分之外，杂草也会占据一部分养分。当前我国肥料利用率比较低，没有被作物吸收利用的养分一部分残留于土壤，被土壤胶体吸附或者与某种离子发生沉淀作用；另一部分则以淋溶、径流等方式损失掉^[29-30]，这些养分损失的途径或许只考虑了养分离子物理吸附以及特定的化学反应，却忽略了被杂草吸收的养分损失。杂草作为一种植物，具有比作物更强的抗逆能力，能够较好地适应逆境，而且杂草对某种养分来说较为敏感，利用优势的生态种群和生态位与作物竞争养分^[31]；杂草的种类繁多，特性复杂，一年生杂草的存在可能使得养分伴随着其自身的干枯衰亡而不能归还或少量归还田间，从而

被损失掉；多年生的杂草生存繁衍能力强，养分资源可能会反复利用或者导致养分的再吸收。对于作物的减产，可能大多归咎于恶劣天气或病虫害等，却忽视了杂草危害的隐蔽性^[11]，本试验中，不除草条件下杂草磷素积累量占总磷素积累量的34.3%~50.5%，而除草条件下杂草磷素吸收量占总磷素吸收量的12.8%~20.8%，尤其是在成熟期占比最小；此外，虽然磷肥利用率随着磷肥用量的增加而下降，但在除草处理中，油菜磷肥利用率平均占总养分利用率的97.9%，与不除草处理相比提高了31.1%，除草处理的油菜磷肥利用率与总磷肥利用率（油菜+杂草）近乎一致；陆志峰等^[17]研究表明，与其他施肥处理相比，缺磷处理杂草干物质量略高于同一施肥处理油菜的干物质量，且杂草的磷积累量是油菜磷积累量的1.4倍；Abbas等^[32]研究表明，因杂草不受控制的生长而损失近30 kg·hm⁻²的P₂O₅养分吸收量，由此推断，杂草在获取养分方面占据主导地位，因此，能够进入目标作物的养分显著减少。可见，杂草吸收的养分含量是不容忽视的，改进施肥和杂草管理措施来提高肥料利用率将会是最直接、最有效的措施，因此，这就要求在分析与评价作物养分利用率的时候，要注意杂草是否是田间作物养分利用率的限制因素之一。提高肥料利用效率不仅可通过提高作物产量和养分吸收量来实现，还可以考虑进行有效的田间杂草管理，注重除草与肥料的合理施用。

4 结论

杂草管理与磷肥用量以及二者的交互作用均显著影响油菜的产量及产量构成因子、油菜和杂草的生物量、养分积累量以及养分利用率。花期、角果期和成熟期油菜及杂草的生长和养分吸收均以角果期最佳，田间试验结果表明，杂草在苗前封闭除草的条件下，虽然前期生长受到抑制，但也会有一部分后期出苗的杂草存在“逃逸”现象，不同磷肥用量的调控可以促进油菜的生长，从空间和养分上削弱杂草的竞争优势。本试验中，相同杂草管理措施下，当施磷量维持在P₂O₅ 90 kg·hm⁻²时，油菜产量达到最高，杂草防控效果最优，推荐P₂O₅ 90 kg·hm⁻²为最佳施磷量。此外，在油菜-杂草农田体系中，除草显著提高了油菜在总体系中的养分利用率占比，可见，直播油菜田中杂草养分吸收利用的情况需要引起重视。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 王汉中. 我国油菜产业发展的历史回顾与展望[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(2): 300-302.
- [3] 王寅, 汪洋, 鲁剑巍, 等. 直播和移栽冬油菜生长和产量形成对氮磷钾肥的响应差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 132-142.
- [4] 李敏, 韩上, 武际, 等. 氮肥施用对直播冬油菜产量及氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(1): 51-58.
- [5] Wang L, Liu Q X, Dong X Y, et al. Herbicide and nitrogen rate effects on weed suppression, N uptake, use efficiency and yield in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Global Ecology Conservation, 2019, 17: e529.
- [6] 胡文诗, 刘秋霞, 任涛, 等. 提高冬油菜播量及施氮量抑制杂草生长的机理研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 137-143.
- [7] Shekhawat K, Rathore S S, Dass A, et al. Weed menace and management strategies for enhancing oilseed brassicas production in the Indian sub-continent: A review [J]. Crop Protection, 2017, 96: 245-257.
- [8] Adeux G, Vieren E, Carlesi S, et al. Mitigating crop yield losses through weed diversity [J]. Nature Sustainability, 2019, 2: 1018-1026.
- [9] 盛倩男, 余小红, 周雄, 等. 油菜与杂草生物量和养分竞争对氮磷钾肥用量的响应[J]. 中国农业科学, 2023, 56(3): 481-489.
- [10] 牛新胜, 刘美菊, 张宏彦, 等. 不同耕作、秸秆及氮素管理措施对冬小麦-夏玉米轮作田杂草生物量影响的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2011(6): 49-53.
- [11] 强胜. 杂草学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2009: 181-183.
- [12] Hu Y F, Ye X S, Shi L, et al. Genotypic differences in root morphology and phosphorus uptake kinetics in brassica napus under low phosphorus supply [J]. Journal of Plant Nutrition, 2010, 33(6): 889-901.
- [13] 尹力初, 蔡祖聪. 长期不同施肥对玉米田间杂草种群组成的影响[J]. 土壤, 2005(1): 56-60.
- [14] Carlesi S, Bigongiali F, Antichi D, et al. Green manure and phosphorus fertilization affect weed community composition and crop/weed competition in organic maize [J]. Renewable Agriculture and Food Systems, 2019, 35(5): 493-502.
- [15] 蒋敏, 沈明星, 施林林, 等. 长期定位施肥对稻麦轮作农田土壤杂草种子库的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 555-563.
- [16] Naderi R, Bijanzadeh E. Chemical, mechanical and integrated weed management under two phosphorous fertilizer application methods in rapeseed [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015, 61(4): 543-551.

- [17] 陆志峰, 鲁剑巍, 鲁君明, 等. 施肥对油菜及田间杂草物质养分积累量的影响 [J]. 杂草科学, 2013, 31 (1): 10-14.
- [18] Hoveland C S, Buchanan G A, Harris M C. Response of Weeds to Soil Phosphorus and Potassium [J]. Weed Science, 1976, 24 (2): 194-201.
- [19] Blackshaw R E, Brandt R N. Phosphorus fertilizer effects on the competition between wheat and several weed species [J]. Weed Biology and Management, 2009, 9 (1): 46-53.
- [20] Blackshaw R E, Brandt R N, Henry J H, et al. Weed species response to phosphorus fertilization [J]. Weed Science, 2004, 52: 406-412.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 14-107.
- [22] 王芙蓉, 张博学, 郭岷江, 等. 苗后除草剂喷施时期对杂草防治及冬油菜产量和品质的影响 [J]. 作物杂志, 2020 (5): 204-208.
- [23] 汪梦竹, 慕小倩, 李玉菲, 等. 油菜和小麦种苗根系对乙草胺的耐性差异分析 [J]. 植物保护学报, 2017, 44 (2): 337-342.
- [24] Rathke G W, Behrens T, Diepenbrock W. Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006, 117 (2-3): 80-108.
- [25] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006 (5): 622-627.
- [26] 刘晓伟. 冬油菜养分吸收规律及不同养分效率品种特征比较研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [27] 鲁军雄, 陈社员, 官春云, 等. 长江中下游油菜田杂草发生规律及实用防治策略 [J]. 作物研究, 2012, 26 (6): 639-642.
- [28] 邹娟, 鲁剑巍, 陈防, 等. 长江流域油菜氮磷钾肥料利用现状研究 [J]. 作物学报, 2011, 37 (4): 729-734.
- [29] 张铎, 李岚涛, 林迪, 等. 施磷水平对菊芋块茎产量、品质、植株生理特性与磷利用率的影响 [J]. 草业学报, 2022, 31 (6): 139-149.
- [30] 王火焰, 周健民. 肥料养分真实利用率计算与施肥策略 [J]. 土壤学报, 2014, 51 (2): 216-225.
- [31] 唐静, 黄菲, 李继福, 等. 冬油菜与杂草对长期不同施肥的差异化适应 [J]. 土壤, 2018, 50 (2): 291-297.
- [32] Abbas R N, Iqbal A, Iqbal M A, et al. Weed-free durations and fertilization regimes boost nutrient uptake and paddy yield of direct-seeded fine rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Agronomy, 2021, 11: 2448.

Effects of weeding and phosphorus fertilizer application on growth and phosphorus utilization fertilizer rates of rapeseed and weed

SHENG Qian-nan, DONG Xiao-yan, ZHANG Yang-yang, LIAO Shi-peng, REN Tao, LI Xiao-kun, LU Jian-wei* (College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/ Key Laboratory of Arable Land Conservation Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan Hubei 430070)

Abstract: The yield potential of rapeseed is affected by grass damage, fertilizers, and other factors. Optimizing weed management and phosphorus fertilization play a key role in direct-seeding rapeseed cultivation. A field experiment was conducted in Wuhan, Hubei Province, with two weed management measures (weed-free and weedy) and four phosphorus application levels (P_2O_5 0, 45, 90, 135 $kg \cdot hm^{-2}$, represented by P_0 , P_{45} , P_{90} and P_{135} , respectively) being set up. The oilseed rape yield, yield components, biomass and nutrient absorption of rapeseed and weeds were measured, and the fertilizer utilization efficiency was analyzed. The results showed that whether weeded or not, the yield of rapeseed treated with P_{90} was the highest, and compared with no weeding, the yield of rapeseed treated with P_{90} increased by 66.3% after weeding. Weeding and phosphorus application promoted the yield by increasing the harvest density and the pods per plant. Regardless of weeding or not, the biomass and phosphorus accumulation of rape and weeds increased significantly with the increase of phosphorus application rate in the range of P_2O_5 90 $kg \cdot hm^{-2}$, and weeding was more conducive to improving the biomass and phosphorus competitiveness of rape relative to weeds. Compared with no weeding, the proportion of weeds in total biomass after weeding decreased by 58.8%, 67.1% and 60.4%, respectively. In addition, the phosphorus accumulation of weeds accounted for 42.0%-62.0% of the total phosphorus accumulation without weeding, and the ratio decreased with the process of growth period after weeding. There was a significant interaction effect between weeding and phosphorus application on the phosphorus fertilizer utilization rate of rapeseed. Compared with no weeding, the phosphorus fertilizer utilization rate of rapeseed after weeding increased by an average of 18.2%. In the rapeseed-weed farmland system, attention needs to be paid to the nutrient absorption of weeds in direct-seeding rapeseed fields. Weeding and phosphorus application could significantly increase the biomass and phosphorus accumulation of rapeseed, increase the proportion of rapeseed in the overall system in terms of phosphorus fertilizer rate, weaken the competitive advantage of weeds in terms of space and nutrient, and effectively improve rapeseed yield and phosphorus fertilizer rate.

Key words: direct-seeding rapeseed; phosphorus fertilizer rate; field weed; yield of rapeseed; nutrient utilization; weeding