

不同磷水平下小麦蚕豆间作对根际有效磷及磷吸收的影响

张梦瑶¹, 肖靖秀¹, 汤利¹, 郑毅^{1,2*}

(1 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2 云南省教育厅, 昆明 650223)

摘要:【目的】探明不同磷水平下小麦-蚕豆间作对根际有效磷含量及作物磷吸收量的影响, 提高磷肥利用率。

【方法】2015—2016 和 2016—2017 两季田间试验在云南农业大学试验基地耕作红壤上进行, 供试小麦品种为云麦-52, 蚕豆品种为玉溪大粒豆。设施 P_2O_5 0 (P_0)、45 (P_{45}) 和 90 kg/hm^2 (P_{90}) 三个水平, 和单作 (M, 包括小麦单作 M_w 和蚕豆单作 M_f) 和间作 (I) 两种种植模式。每季在小麦分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期, 蚕豆分枝期、开花期、结荚期、籽粒膨大期、收获期采取根际土样测定有效磷含量。在小麦蚕豆收获期测定单、间作小麦、蚕豆产量, 并测定作物地上部磷含量。计算土地当量比 (LER) 来衡量间作优势, 并用磷肥农学利用率来反映磷肥的吸收效率。【结果】与单作相比, 在 P_0 、 P_{45} 、 P_{90} 水平下, 2016 年间作种植显著提高了小麦籽粒产量 12.5%、21.7% 和 17.3%, 2017 年间作蚕豆产量较单作分别降低了 16.8%、11.7% 和 8.2%。三个磷水平下, 小麦-蚕豆间作具有产量优势, 土地当量比 (LER) 为 0.95~1.18。与常规施磷水平 (P_{90}) 下的单作相比, 小麦-蚕豆间作条件下, 磷肥减施 1/2 (P_{45}) 并未降低小麦和蚕豆产量。间作种植对小麦根际有效磷含量无显著影响 (除 2016 年成熟期外), 但 2017 年, 在蚕豆分枝期、开花期、结荚期, 间作则分别降低蚕豆根际有效磷含量 20.8%、44.5% 和 18%。与 P_{90} 单作相比, 间作 P_{45} 处理几乎不会降低小麦、蚕豆根际有效磷含量。小麦、蚕豆磷吸收量主要受磷水平的调控, 种植模式对小麦和蚕豆磷的吸收量及磷肥农学利用率均没有影响。【结论】在本试验条件下, 小麦-蚕豆间作提高了小麦籽粒产量, 降低了蚕豆产量; 间作种植主要是改变了蚕豆生育前期根际有效磷含量, 但对作物的磷吸收量没有影响。小麦-蚕豆间作具有减施磷肥、维持作物产量和根际土壤有效磷的潜力。

关键词: 小麦蚕豆间作; 根际有效磷; 磷吸收量; 磷肥农学利用率

Effects of wheat and faba bean intercropping on the available phosphorus contents in rhizospheric soil and phosphorus uptake by crops under different phosphorus levels

ZHANG Meng-yao¹, XIAO Jing-xiu¹, TANG Li¹, ZHENG Yi^{1,2*}

(1 College of Resource and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2 Yunnan Provincial Department of Education, Kunming 650223, China)

Abstract: 【Objectives】The purpose of the study was investigating the effects of wheat and faba bean intercropping on the available phosphorus (P) contents in rhizospheric soil and P uptake by crops, in order to increase utilization rates of P fertilizers. 【Methods】Field trials were conducted on arable red soil in Pilot Base of Yunnan Agricultural University in 2016 and 2017. The tested wheat cultivar was *Triticum aestivum* L. cv. Yunmai-52 and faba bean cultivar was *Vicia faba* L. cv. Yuxidalidou. The three P application rates were: P_2O_5 0 (P_0), P_2O_5 45 kg/hm^2 (P_{45}) and 90 kg/hm^2 (P_{90}). The planting patterns included mono-cropped wheat (M_w), mono-cropped faba bean (M_f), and wheat-faba bean intercropping (I). The rhizosphere soil samples were taken at tillering, joining, heading, filling and maturity stages of wheat, and at branching, flowering, podding, seed filling and harvesting stages of faba bean every year for determining available P contents in rhizosphere. The grain yields

收稿日期: 2018-08-21 接受日期: 2018-11-23

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0200200/007); 国家自然科学基金项目 (31560581, 31460551)。

联系方式: 张梦瑶 E-mail: 1102655392@qq.com; * 通信作者 郑毅 E-mail: yzheng@ynau.edu.cn

of wheat and faba bean were weighed, and the P contents in aboveground parts of crops were measured. The land equivalent ratios (LER) and phosphorous agronomy efficiencies were calculated. **【 Results 】** Compared to monocropping, the grain yields of intercropped wheat in P₀, P₄₅ and P₉₀ treatments were increased by 12.5%, 21.7%, and 17.3%, respectively in 2016, while the seed yields of intercropped faba bean were decreased by 16.8%, 11.7%, and 8.2% respectively in 2017. The land equivalent ratio (LER) ranged from 0.95 to 1.18, showing land use advantages of intercropping over monocropping. The yields of intercropped wheat and faba bean were not declined in the P₄₅ treatment, compared to corresponding monocropping in P₉₀ treatment. Intercropping had no significant effect on available P contents in wheat rhizosphere (except at the mature stage in 2016), but decreased those in the faba bean rhizosphere by 20.8%, 44.5% and 18% in 2017 at the branching, flowering and podding stages of faba bean, as compared to those of M_F. Meanwhile, the available P contents in the rhizosphere of intercropped wheat and faba bean under P₄₅ rate were not reduced as compared to those of monocropping wheat and faba bean under P₉₀ rate. The total P uptake by wheat and faba bean were mainly regulated by P rates, not by the planting patterns, and there was no difference in the agronomy efficiency of P fertilizers between monocropped and intercropped wheat. **【 Conclusions 】** Under the tested conditions, intercropping could increase wheat grain yield but decrease faba bean yield, and increase the general land use efficiencies. The intercropping has impact on the available P contents in the rhizosphere mainly at early growth stages of faba bean, so has no effect on the P uptake by crops. Wheat and faba bean intercropping shows potential to reduce P application rate while sustain crop yields and rhizosphere available P.

Key words: wheat and faba bean intercropping; available phosphorus in rhizospheric soil; phosphorus uptake; phosphorus agronomy efficiency

磷是限制植物生长发育的营养元素之一^[1], 施磷肥是保证植物高产稳产的重要措施之一^[2]。当前我国部分土壤由于长期施磷, 磷素已经盈余过多, 农田成为了巨大的潜在磷库^[3], 加上磷的不可再生性导致全球磷储量不断减少, 磷资源匮乏已引起人们的关注^[4]。

合理间作在提高养分资源利用效率方面发挥着重要作用^[5]。在小麦-白羽扇豆^[6]、玉米-花生^[7]、玉米-蚕豆^[8]等间作体系中, 种间促进作用显著提高了磷的吸收。Li 等^[9]在低磷土壤上的研究还发现, 蚕豆分泌的质子和有机酸活化了土壤难溶性磷, 提高了与之间作玉米的磷吸收。这些现象表明合理的间作能显著改善作物的磷营养状况。但前人的研究大多关注石灰性土壤及低磷胁迫下间作对土壤磷的活化效应, 不同施磷条件下, 间作对红壤根际有效磷含量影响的研究尚少; 间作条件下作物磷吸收响应磷肥施用的研究尚未见深入报道。

小麦-蚕豆间作是西南地区主要的小春作物种植模式之一, 具有显著的增产、控病优势^[10-12]。已有研究表明, 小麦-蚕豆间作的根际分泌物可以促进根际红壤中磷的活化, 也可使小麦根际土壤有效磷较单作有所增加^[13-15], 且在较低的肥力水平下, 间作具有更明显的资源利用优势^[16]。但在不同磷水平下, 小麦-

蚕豆间作对根际土壤有效磷含量及作物磷吸收量的影响尚不明确。因此, 本研究以小麦-蚕豆间作为研究对象, 通过两年田间试验, 明确不同磷水平下单、间作作物根际有效磷含量的动态变化及间作对作物磷吸收量的影响, 为进一步揭示小麦蚕豆间作促进红壤磷的高效利用及磷肥合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点设在云南农业大学寻甸大河桥试验基地 (N23°32'、E103°13', 海拔 1953 m), 地处昆明市东北部, 供试土壤为长期熟化的耕作红壤。气候条件属亚热带季风气候, 年均温为 14.7℃, 年降雨量为 1040 mm。2015—2016 和 2016—2017 小麦、蚕豆种植季的平均气温如图 1 所示。

供试土壤的基本农化性状为: 有机质 35.05 g/kg、全氮 1.40 g/kg、碱解氮 80.31 mg/kg、速效钾 146.42 mg/kg、有效磷 17.09 mg/kg、pH 值 7.18。

小麦、蚕豆单作及间作田间试验布置于 2014 年 10 月, 前茬作物为玉米。供试小麦品种为云麦-52, 蚕豆品种为玉溪大粒豆。小麦-蚕豆间作田间试验建

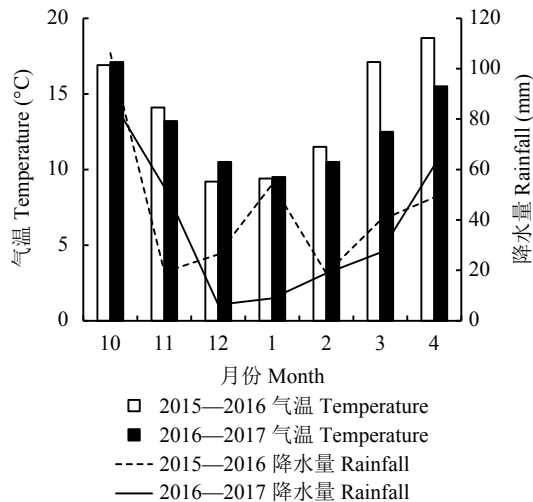


图 1 大河桥试验地 2016 和 2017 年度气温和降水量

Fig. 1 Monthly average air temperature and precipitation during the field experiments in 2016 and 2017

立后, 小麦、蚕豆于每年的 10 月 25—27 日播种、次年 4 月底收获。5—9 月土壤休闲。本试验研究在田间试验建立后第二年开始采集数据并进行相关研究分析。

1.2 试验设计

试验处理含磷水平和种植制度两因素, 施磷水平设 P_0 、 P_{45} 和 P_{90} P_0 为常规用量, P_{45} 为减施 50% 用量。种植方式包括小麦单作 (M_w)、蚕豆单作 (M_f) 和小麦-蚕豆间作 (I)。试验设 3 个磷水平、3 种植模式, 共 9 个处理, 每个处理重复三次, 小区面积 32.4 m^2 ($5.4 \text{ m} \times 6 \text{ m}$)。单作小麦条播种植, 行距 0.2 m; 单作蚕豆行距 0.3 m, 株距 0.1 m。小麦-蚕豆间作种植密度与单作相同, 均为 6 行小麦间 2 行蚕豆, 每个间作小区内 3 个小麦种植带和 3 个蚕豆种植带。间作小区小麦-蚕豆间作行距为 0.2 m。

试验所用磷肥、氮肥、钾肥分别为普通过磷酸钙、尿素和硫酸钾, 过磷酸钙 180 kg/hm^2 和硫酸钾 100 kg/hm^2 作为基肥在小麦、蚕豆播种前一次性施入。蚕豆尿素 90 kg/hm^2 作基肥在播种前一次施用, 小麦尿素 90 kg/hm^2 做基肥, 90 kg/hm^2 在小麦拔节期追施。单作和间作处理的小麦和蚕豆的肥料用量、种植密度、灌溉方式在等面积下都是相同的。施肥灌溉等方法和当地高产农田管理模式一致。

1.3 取样与分析

每年田间试验, 在小麦分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期, 蚕豆分枝期、开花期、结荚期、籽粒膨大期、收获期采取根际土样, 根际土采

用“抖土法”, 随机多点混合采样。所采取的土样风干研磨以后测定有效磷含量, 测定采用 Olsen 法。

在小麦蚕豆收获期测定单、间作小麦、蚕豆产量, 测定作物地上部磷含量。

1.4 数据统计与分析

数据处理使用 Excel, 统计分析采用 SPSS17.0 软件进行 Two-way Anova 多重比较分析。

用土地当量比 (LER) 来衡量间作优势, $LER = (Y_{iw}/Y_{sw}) \times 2/3 + (Y_{if}/Y_{sf}) \times 1/3$ 。式中: Y_{iw} 和 Y_{sw} 分别表示间作小麦和单作小麦的产量; Y_{if} 和 Y_{sf} 分别表示间作蚕豆和单作蚕豆的产量, 2/3 和 1/3 指的是田间试验间作小麦蚕豆和单作小麦蚕豆种植面积的比例。当 LER (土地当量比) 值大于 1 时, 表明此间作体系具有产量优势; 若 LER 小于 1, 则表明间作体系没有优势^[17]。

磷吸收量 = 磷浓度 × 生物量。用磷肥农学利用率来反映磷肥的吸收效率, 磷肥农学利用率 = (施磷区籽粒产量 - 不施磷区籽粒产量)/施磷量。

2 结果与分析

2.1 不同磷水平下小麦蚕豆间作对作物产量的影响

2016 年 P_0 、 P_{45} 、 P_{90} 水平下 LER 分别为 1.12、1.13 和 1.09, 2017 分别为 0.95、1.18 和 1.05。从两年的结果来看, 间作产量优势 (LER 数值的大小) 受磷水平的调控, 从 LER 数值大小来看, 总体表现为 $P_{45} > P_{90}$, 2016 年差异达显著水平 (图 2)。

间作对作物产量的影响年际间变化较大, 2016 年小麦单作和间作产量总体显著高于 2017 年, 蚕豆产量单作和间作两年差异较小 (图 3)。2016 年间作小麦产量三个磷水平下均显著高于单作, P_0 、 P_{45} 、 P_{90} 水平下分别增加了 12.5%、21.7% 和 17.3%。而 2017 年 P_0 和 P_{45} 水平下较单作分别增加了 14.4% 和 18.8%。

2017 年, 单作蚕豆产量总体显著高于间作产量, P_0 、 P_{45} 、 P_{90} 水平下间作蚕豆产量较单作分别降低了 16.8%、11.7% 和 8.2% (图 3)。

2.2 不同磷水平下小麦蚕豆间作对根际有效磷含量的影响

两年的田间试验表明, 除 2016 年间作降低了小麦成熟期根际有效磷含量外, 间作种植对小麦根际有效磷含量均无影响 (表 1)。与 P_0 和 P_{45} 水平相比, P_{90} 水平仅在小麦拔节期显著提高了根际有效磷含

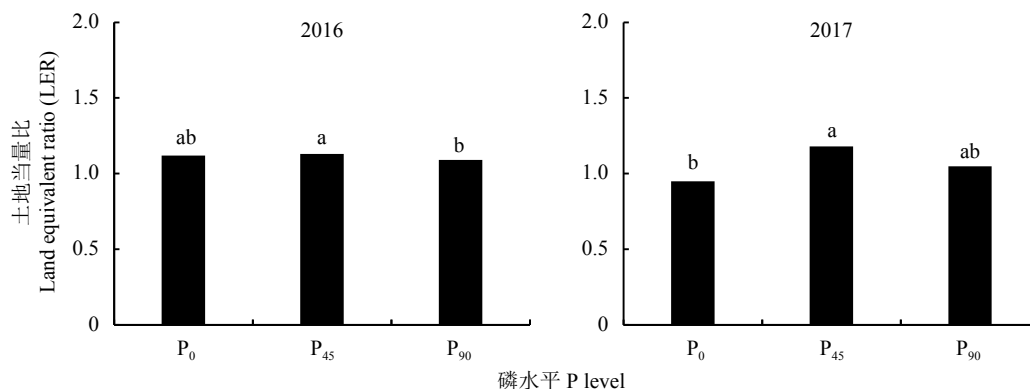


图 2 不同磷肥施用水平下小麦蚕豆间作体系土地当量比

Fig. 2 Land equivalent ratio (LER) of wheat and faba bean intercropping system under different phosphate application levels

[注 (Note): P_0 — P_2O_5 0 kg/hm²; P_{45} — P_2O_5 45 kg/hm²; P_{90} — P_2O_5 90 kg/hm²; 柱上不同小写字母表示不同磷水平间差异显著 (Differnt letters above the bars indicate significant differences among different P levels ($P < 0.05$)).]

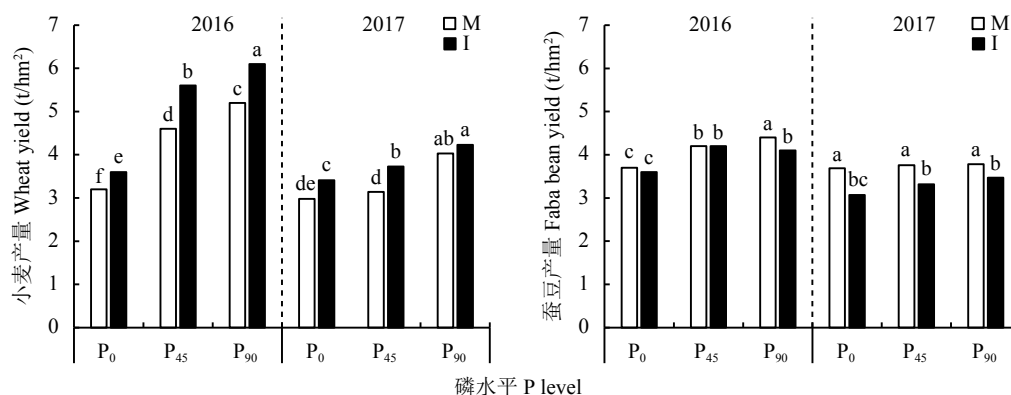


图 3 不同磷肥施用水平下单、间作小麦和蚕豆的籽粒产量

Fig. 3 Yields of inter- and mono-cropped wheat and faba bean under different P rates

[注 (Note): P_0 — P_2O_5 0 kg/hm²; P_{45} — P_2O_5 45 kg/hm²; P_{90} — P_2O_5 90 kg/hm²; M—单作 Monocropping; I—间作 Intercropping. 柱上不同字母表示同一年度不同施磷水平及不同种植模式下小麦或者蚕豆产量差异显著 ($P < 0.05$) Differnt letters above bars indicate that the yield of wheat or faba bean is significantly different in the same year at the 0.05 level under different P rates and different planting patterns.]

量, 在其他生育期不同施磷水平间根际有效磷含量无差异。但是, 由于种植模式和磷肥施用水平交互作用显著, 2016 年在小麦抽穗期, P_{90} 水平下间作较单作显著提高了小麦根际有效磷含量 28.4%; 在小麦灌浆期, P_0 水平下, 间作有效磷含量显著高于单作 30.9%。同样, 在 2017 年小麦成熟期, P_{45} 水平下, 间作有效磷含量低于单作, 达到显著差异。说明不同磷肥施用水平下小麦-蚕豆间作改变了特定生育期小麦根际有效磷含量, 但是年际之间变异较大。

与小麦不同, 间作种植改变了不同生育期蚕豆根际有效磷含量。2016 年, 间作显著提高了蚕豆分枝期根际有效磷含量 10%; 2017 年, 在蚕豆分枝期、开花期、结荚期, 间作则分别降低蚕豆根际有效磷含量 20.8%、44.5% 和 18%。与 P_0 和 P_{45} 水平相

比, P_{90} 水平显著提高了蚕豆根际有效磷含量, 尤其是在蚕豆分枝期和蚕豆开花期。同样, 由于磷肥施用水平和种植模式交互作用显著, 2016 年 P_{90} 水平下, 蚕豆分枝期和开花期, 间作显著提高了蚕豆根际有效磷 36.9% 和 25.4%; 而 2017 年, P_{45} 水平下, 间作分别降低蚕豆分枝期及开花期根际有效磷 37.7% 和 45.0%; P_{90} 水平下间作降低开花期蚕豆根际有效磷含量 56.5% (表 2)。

2.3 不同磷水平下小麦蚕豆间作对磷吸收量的影响

由表 3 可以看出, 在小麦产量较高的 2016 年, 施磷增加了小麦的吸磷量, 但没有达到显著水平, 在产量较低的 2017 年, 施磷没有增加小麦的吸磷量。2016 年, 施磷显著增加了蚕豆的磷素吸收量, 但 P_{45} 、 P_{90} 水平间差异不显著。2017 年施磷处理蚕豆

表 1 小麦不同生育期根际土壤有效磷含量 (mg/kg)
Table 1 Available phosphorus contents in rhizosphere soil of wheat at different growing stages

磷水平 P level	种植模式 Planting pattern	2016					2017				
		分蘖期 Tilling	拔节期 Joining	抽穗期 Heading	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity	分蘖期 Tilling	拔节期 Joining	抽穗期 Heading	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
P ₀	M	19.1 a	22.8 a	17.5 b	15.5 c	18.1 a	25.7 a	18.9 c	11.7 a	12.9 a	5.0 c
	I	15.7 a	20.2 a	20.4 ab	20.3 ab	16.9 a	25.4 a	22.6 abc	11.3 a	12.3 a	5.3 bc
P ₄₅	M	21.6 a	24.4 a	20.9 b	22.4 bc	21.1 a	28.4 a	18.3 c	15.5 a	10.5 a	7.4 a
	I	17.8 a	17.5 a	18.5 b	19.3 abc	20.9 a	24.9 a	19.9 bc	16.5 a	15.6 a	7.1 b
P ₉₀	M	21.2 a	30.1 a	19.4 b	18.3 abc	22.7 a	28.7 a	25.4 ab	14.2 a	13.1 a	8.6 a
	I	22.4 a	29.1 a	24.9 a	24.8 a	16.5 a	30.9 a	27.3 a	16.6 a	17.9 a	7.8 a
种植模式 Planting pattern											
P ₀		17.4 b	21.5 b	18.9 a	17.9 a	17.5 a	25.5 a	20.8 b	12.6 a	11.5 a	5.1 b
P ₄₅		19.7 ab	21.0 b	19.7 a	20.8 a	20.9 a	26.7 a	19.1 b	13.0 a	16.0 a	7.2 a
P ₉₀		21.8 a	29.6 a	22.2 a	21.6 a	19.6 a	29.9 a	26.4 a	15.5 a	15.4 a	8.2 a
施磷量 P rate											
	M	20.7 a	25.8 a	19.3 a	18.7 a	20.6 a	27.6 a	20.9 a	12.1 a	13.8 a	7.0 a
	I	22.3 a	22.3 a	21.3 a	21.5 a	18.1 b	27.1 a	23.3 a	15.3 a	14.8 a	6.7 a
显著性 Significance											
施磷水平 P rate (P)		*	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	**
种植模式 (PP) Planting pattern		ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
P × PP		ns	ns	*	*	ns	ns	*	ns	ns	*

注 (Note): P₀—P₂O₅ 0 kg/hm²; P₄₅—P₂O₅ 45 kg/hm²; P₉₀—P₂O₅ 90 kg/hm²; M—单作 Monocropping; I—间作 Intercropping. 同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$). *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ns—不显著 Not significant.

的磷吸收量不仅没有增加, 反而有所降低, P₉₀ 水平的间作蚕豆吸磷量显著低于 P₀ 水平 (表 3)。综合比较 2016、2017 两年的田间试验结果, 施磷显著提高了作物的磷吸收量, 但种植模式对小麦磷吸收量没有影响, 施磷水平和种植模式交互作用显著。

2.4 不同磷水平下间作对小麦磷肥农学利用率的影响

不同施磷量对磷肥农学利用率影响显著, 但不同种植模式对磷肥农学利用率无显著影响 (表 4)。2016 年减磷 1/2 (P₄₅) 较常规施磷 (P₉₀) 提高磷肥农学利用率 54.8%, 2017 年减磷 1/2 处理下较 P₉₀ 水平则降低磷肥农学利用率 38.9%。

3 讨论

3.1 不同磷水平下小麦蚕豆间作对作物产量的影响

本研究表明, 在有效磷含量中等 (Olsen-P 17 mg/kg)

的土壤上, 小麦蚕豆间作产量同时受施磷水平和种植模式的影响。间作主要是提高小麦产量而显示间作产量优势, 这与前人在小麦蚕豆间作试验的研究结果一致^[13-14, 18]。本研究发现, 随着施磷量的增加, 小麦产量也随之增加, 这与胡雨彤等^[19]试验结果一致。但 P₄₅、P₉₀ 水平下, 蚕豆产量则无显著差异。说明在有效磷含量中等的土壤上, 小麦较蚕豆而言对磷肥用量更为敏感。并不需要当地农户常规用量 90 kg/hm² 施磷量即可满足蚕豆的生长需要。适当增施磷肥可以促进豆科作物根瘤的形成、提高豆科作物产量^[20-21]。但是本试验条件下, 并未发现磷肥减施显著降低了单间作蚕豆的产量, 磷肥减施是否改变了单间作蚕豆根瘤的形成, 它们两者之间的关联如何? 尚需进一步深入探讨。

本研究表明在减磷 1/2 处理下, LER 值最大。在当前磷肥用量下, P₄₅ 水平下间作小麦蚕豆产量与

表 2 蚕豆不同生育期根际土壤有效磷含量 (mg/kg)

Table 2 Available phosphorus contents in rhizosphere soil of faba bean at different growing stages

磷水平 P level	种植模式 Planting pattern	2016					2017				
		分枝期 Branching	开花期 Flowering	结荚期 Podding	籽粒膨大期 Seed filling	成熟期 Harvest	分枝期 Branching	开花期 Flowering	结荚期 Podding	籽粒膨大期 Seed filling	成熟期 Harvest
P ₀	M	17.6 b	17.8 b	13.5 a	19.5 a	15.9 a	25.1 b	19.0 c	10.5 a	8.9 a	4.4 d
	I	16.6 b	19.9 b	17.0 a	20.1 a	17.2 a	23.1 b	16.9 c	10.5 a	11.5 a	5.9 cd
P ₄₅	M	19.5 b	22.7 b	15.2 a	21.0 a	18.5 a	37.4 a	39.3 b	15.3 a	8.9 a	8.3 bc
	I	19.7 b	19.2 b	16.9 a	15.6 a	14.4 a	23.6 b	21.6 c	10.3 a	8.6 a	9.7 b
P ₉₀	M	22.9 b	22.9 b	19.7 a	19.3 a	17.9 a	38.7 a	52 a	19.2 a	16.3 a	10.3 ab
	I	36.3 a	30.7 a	18.1 a	17.9 a	18.1 a	33.7 a	22.6 c	16.2 a	12.6 a	12.8 ab
种植模式 Planting pattern											
P ₀		17.1 b	18.8 b	15.3 a	19.8 a	16.6 a	24.1 b	17.9 b	10.9 b	10.2 b	5.2 c
P ₄₅		19.5 b	20.9 b	16.1 a	18.3 a	16.5 a	30.3 a	30.4 a	12.8 b	8.7 b	9.0 b
P ₉₀		29.6 a	26.8 a	18.9 a	18.6 a	17.9 a	36.2 a	37.3 a	17.7 a	14.4 a	11.5 a
施磷量 P rate											
	M	20.0 b	21.1 a	16.1 a	19.9 a	17.5 a	33.7 a	36.8 a	15.0 a	11.3 a	7.6 b
	I	24.2 a	23.2 a	17.3 a	17.8 a	16.6 a	26.7 b	20.4 b	12.0 b	10.9 a	9.5 a
显著性 Significance											
施磷水平 P rate (P)		**	**	ns	ns	ns	**	**	**	**	**
种植模式 (PP) Planting pattern		*	ns	ns	ns	ns	*	**	*	ns	*
P × PP		*	*	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	*

注 (Note): P₀—P₂O₅ 0 kg/hm²; P₄₅—P₂O₅ 45 kg/hm²; P₉₀—P₂O₅ 90 kg/hm²; M—单作 Monocropping; I—间作 Intercropping; 同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$). *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ns—不显著 Not significant.

P₉₀ 水平下单作相比, 并未降低产量, 反而有增产的趋势, 说明间作在减磷的情况下具有维持作物产量的潜力, 这为深入研究间作系统磷肥减施、提高磷肥利用效率提供了有力的证据。但具体小麦蚕豆间作系统中, 磷肥减施量及其最佳磷肥用量推荐, 还需深入研究。

两年的试验结果均表明, 小麦蚕豆间作具有间作产量优势。但是, 年际之间产量及间作增产效应差异较大 (图 3)。从两年的田间气象数据来看 (图 1), 2015—2016 年小麦蚕豆种植季, 前期气温低, 后期高; 而 2016—2017 年则正好相反。这可能是造成年际差异的主要原因。因此, 小麦蚕豆间作的产量特征及间作效应还需要多年的田间试验进一步加以验证。

3.2 不同磷水平下小麦蚕豆间作对根际有效磷含量的影响

王宇蕴等^[13]、张德闪等^[14]的研究表明, 小麦蚕豆

间作显著地提高了小麦根际土壤有效磷含量, 但本研究结果表明 (表 1), 间作几乎对小麦根际有效磷含量无影响。张丽等^[22]在玉米大豆间作系统中的研究表明, 间作能够促进玉米植株对土壤有效磷的吸收, 导致根际有效磷的耗竭。而本试验条件下, 小麦蚕豆间作对小麦地上部磷吸收也没有影响。这可能与土壤条件、试验环境不同有关。与小麦不同的是, 2017 年的结果表明, 间作种植显著降低了蚕豆根际有效磷含量, 但是地上部磷的吸收也没有差异。总之, 从本研究来看, 小麦蚕豆间作确实是改变了根际有效磷含量, 但是年际之间变异较大。

禾本科作物和豆科作物的根际过程差异较大, 因此, 豆科—禾本科作物间作会显著改变根际有效磷含量及磷的循环^[23]。本研究同样发现, 不同磷水平下, 种植模式和磷肥施用水平显著改变了蚕豆根际有效磷含量。但值得关注的是, 虽然间作改变了蚕豆根际有效磷含量, 但间作对蚕豆地上部磷吸收量

表 3 小麦和蚕豆磷吸收量 (kg/hm^2)
Table 3 Total amounts of phosphorus uptake by wheat and faba bean

施磷水平 P level	种植模式 Planting pattern	2016		2017	
		小麦 Wheat	蚕豆 Faba bean	小麦 Wheat	蚕豆 Faba bean
P ₀	M	38.73 ab	28.16 c	51.59 a	40.79 a
	I	32.09 b	21.09 c	42.25 a	56.73 a
P ₄₅	M	44.58 a	35.51 abc	53.06 a	31.59 b
	I	46.92 a	40.49 ab	52.87 a	31.62 b
P ₉₀	M	47.93 a	52.48 a	63.13 a	31.19 b
	I	50.34 a	34.25 b	61.53 a	33.41 ab
种植模式 Planting pattern					
P ₀		35.41 c	24.63 b	46.92 c	48.76 a
P ₄₅		45.75 b	38.00 a	52.97 b	31.61 b
P ₉₀		49.14 a	43.37 a	62.33 a	32.30 b
施磷量 P rate					
	M	43.75 a	38.72 a	55.93 a	34.52 a
	I	43.12 a	31.94 a	52.22 a	40.59 a
显著性 Significance					
施磷水平 P rate (P)		**	*	**	*
种植模式 Planting pattern (PP)		ns	ns	ns	ns
P × PP		**	*	ns	*

注 (Note): P₀—P₂O₅ 0 kg/hm²; P₄₅—P₂O₅ 45 kg/hm²; P₉₀—P₂O₅ 90 kg/hm²; M—单作 Monocropping; I—间作 Intercropping. 同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$). *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ns—不显著 Not significant.

表 4 2016 和 2017 年小麦磷肥农学利用率 (kg/kg)
Table 4 Phosphorus agronomy efficiency of wheat in 2016 and 2017

项目 Item		2016	2017
磷水平 P level	P ₄₅	40.4 a	10.4 b
	P ₉₀	26.1 b	13.9 a
种植模式 Planting pattern	I	36.3 a	10.9 a
	M	30.3 a	13.5 a
显著性 Significance			
磷水平 P rate		*	*
种植模式 Planting pattern		ns	ns

注 (Note): P₄₅—P₂O₅ 45 kg/hm²; P₉₀—P₂O₅ 90 kg/hm²; M—单作 Monocropping; I—间作 Intercropping; 同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in a column indicate significant difference between different treatments ($P < 0.05$). *— $P < 0.05$; ns—不显著 Not significant.

并没有影响, 说明间作种植改变了土壤磷的转化过程, 但是不同磷水平下间作如何调控豆科作物磷的

吸收, 仍需要深入分析。两年田间试验均证实, 由于磷素的吸收主要集中在生育前期, 后期的磷素营养主要依靠磷在作物体内的周转来完成。因此, 磷肥施用水平主要影响小麦、蚕豆生长前期根际有效磷含量; 当小麦蚕豆进入生殖生长阶段后, 根际有效磷含量并不受磷肥施用水平的调控 (除 2017 年收获期); 同时, 小麦蚕豆间作也主要是改变了蚕豆生长前期根际有效磷的含量 (表 2)。然而, 不同磷水平下, 小麦蚕豆间作系统中, 根际有效磷含量的改变与作物地上部磷的吸收有怎样的关系, 其对间作产量优势的形成贡献如何, 目前尚不清楚。

3.3 不同磷水平下小麦蚕豆间作对磷吸收的影响

本试验条件下, 种植模式对磷吸收量没有影响 (表 3)。但由于种植模式和磷肥施用水平的交互作用, 2016 和 2017 年 P₄₅ 水平间作下小麦、蚕豆磷吸收量与 P₉₀ 水平单作相比均未降低, 说明间作在适当减磷的情况仍能维持作物磷吸收量, 与前人研究一致^[24-25]。

总体来看,小麦蚕豆间作在减磷条件下可以维持作物产量和磷吸收量,说明在土壤有效磷含量中等的条件下,小麦-蚕豆间作存在节约施磷的空间,但具体磷肥减施量还需进一步研究。此外,磷肥施用方式可能也影响磷肥的吸收和利用,因此,今后在间作体系中还应考虑施肥量和施肥方法相结合,以进一步提高磷肥利用效率。

本试验表明,不同种植模式对磷肥农学利用率并无显著影响,这与孙宝茹^[26]研究结果有相似之处。易均等^[27]试验提出,降低 10%~20% 的磷肥施用量可以提高磷肥农学利用率,这与本试验 2016 年减磷 1/2 处理趋势一致,减磷处理下小麦磷肥农学利用率显著高于当地常规施磷,说明该地区适当减磷可以提高磷肥的农学利用率。2017 年小麦磷肥农学利用率在减磷 1/2 水平下低于常规施磷,这是由于 2017 年减磷 1/2 水平与 P_0 水平相比,并没有显著提高小麦产量, P_{90} 水平下小麦增产更显著造成的,这或许与两年的气候差异有关。关于不同磷水平下豆科-禾本科间作对磷肥农学利用率的影响,尚需进一步深入研究,探明具体的作用机制。

本研究发现,当地小麦-蚕豆间作条件下,减磷 1/2 (P_{45}) 与常规施磷 (P_{90}) 水平相比,间作可以维持根际有效磷含量及磷吸收量,为间作在减磷下维持产量提供了条件。以往一些文章旨在研究如何提高根际土壤中有有效磷的含量,但从本研究来看,在维持作物产量、土壤有效磷含量、作物磷吸收量的前提下,适当降低供磷水平,提高磷肥的利用效率,应作为今后研究的重点。此外,本研究虽然系统分析了小麦-蚕豆间作系统中的根际有效磷-作物磷吸收-作物产量,但是小麦-蚕豆间作系统中三者之间的关系尚不能清楚地解析,需更多地深入研究探讨。

4 结论

不同磷肥施用水平下,小麦蚕豆间作具有产量优势,土施利用当量介于 0.95~1.18,单位面积的产量高于小麦、蚕豆单作。

小麦蚕豆间作主要是改变了蚕豆生育前期根际有效磷含量,而对小麦根际有效磷含量几乎没有影响。小麦的磷吸收及磷肥农学利用率主要受不同磷水平的调控,而不受种植模式的影响。小麦-蚕豆间作具有减磷并能维持作物产量和根际土壤有效磷含量的潜力。

参 考 文 献:

- [1] Cordell D, White S. Life's bottleneck: Sustaining the world's phosphorus for a food secure future[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2014, 39: 161-88.
- [2] 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, (5): 712-720.
Lu J W, Ren T, Cong R H, *et al.* Prospect of research on fertilization status and fertilization technology of rapeseed in China[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2018, (5): 712-720.
- [3] Shen J, Yuan L, Zhang J, *et al.* Phosphorus dynamics: from soil to plant[J]. *Plant Physiology*, 2011, 156(3): 997-1005.
- [4] 夏海勇,李隆,张正. 间套作体系土壤磷素吸收优势和机理研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2015, (1): 1-6.
Xia H Y, Li L, Zhang Z. Advances in soil phosphorus uptake and mechanism in intercropping system[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015, (1): 1-6.
- [5] Li L, Tilman D, Lambers H, *et al.* Plant diversity and over yielding: insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture[J]. *New Phytologist*, 2014, 203(1): 63-69.
- [6] Horst W J, Waschkies C. Phosphorus nutrition of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in mixed culture with white lupin (*Lupinus albus* L.)[J]. *Z. Pflanzenernähr Bodenkd*, 1987, 150: 1-8.
- [7] 焦念元,侯连涛,宁堂原,等. 玉米花生间作氮磷营养间作优势分析[J]. *作物杂志*, 2007, (4): 50-52.
Jiao N Y, Hou L T, Ning T Y, *et al.* Analysis on intercropping advantage of N and P nutrients in maize and peanut intercropping[J]. *Crops*, 2007, (4): 50-52.
- [8] Li L, Zhang F S, Li X L, *et al.* Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65: 61-71.
- [9] Li L, Li S M, Sun J H, *et al.* Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. *PNAS*, 2007, 104: 11192-11196.
- [10] 肖靖秀,周桂凤,汤利,等. 小麦/蚕豆间作条件下小麦的氮、钾营养对小麦白粉病的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 517-522.
Xiao J X, Zhou G S, Tang L, *et al.* Effects of nitrogen and potassium nutrition on wheat powdery mildew under wheat/faba bean intercropping[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(4): 517-522.
- [11] 郑毅,汤利. 间作作物的养分吸收利用与病害控制关系研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2008.
Zheng Y, Tang L. Study on the relationship between nutrient uptake and disease control of intercropping crops[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2008.
- [12] 董艳,汤利,郑毅,等. 小麦蚕豆间作条件下氮素营养水平对根际微生物区系的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1559-1566.
Dong Y, Tang L, Zheng Y, *et al.* Effect of nitrogen nutrition level on rhizosphere microflora under intercropping of wheat and broad bean[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(7): 1559-1566.
- [13] 王宇蕴,任家兵,郑毅,汤利. 间作小麦根际和土体磷养分的动态变化[J]. *云南农业大学学报*, 2011, 26(6): 851-855.

- Wang Y Y, Ren J B, Zheng Y, Tang L. Dynamic changes of phosphorus nutrients in intercropping wheat rhizosphere and soil[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2011, 26(6): 851–855.
- [14] 张德闪, 王宇蕴, 汤利, 等. 小麦蚕豆间作对红壤有效磷的影响及其与根际pH值的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 127–133.
- Zhang D S, Wang Y Y, Tang L, *et al.* Effect of wheat and faba bean intercropping on effective phosphorus in red soil and its relationship with the pH value of rhizosphere[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(1): 127–133.
- [15] Tang X Y, Laetitia B, Alain B, *et al.* Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 75: 86–93.
- [16] Tang X Y, Sarah A, Placella, *et al.* Phosphorus availability and microbial community in the rhizosphere of intercropped cereal and legume along a P-fertilizer gradient[J]. *Plant and Soil*, 2016, 407(1): 119–134.
- [17] Willey R W. Resource use in intercropping systems[J]. *Agricultural Water Management*, 1990, 17: 215–231.
- [18] 高慧敏. 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用与根系分布关系[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2006.
- Gao H M. Relationship between interspecific interaction and root distribution in wheat / broad bean intercropping system[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2006.
- [19] 胡雨彤, 郝明德, 付威, 等. 不同降水年型和施磷水平对小麦产量的效应[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(2): 299–309.
- Hu Y T, Hao M D, Fu W, *et al.* Effect of different precipitation year type and phosphorus application level on wheat yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(2): 299–309.
- [20] 丁娇. 长期施肥对大豆固氮能力的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学博士学位论文, 2013.
- Ding J. Effect of long-term fertilization on nitrogen fixation ability of soybean[D]. Haerbin: PhD Dissertation of Northeast Agricultural University, 2013.
- [21] 姚玉波, 吴冬婷, 龚振平, 马春梅. 磷素水平对大豆氮素积累及产量的影响[J]. *核农学报*, 2012, 26(6): 947–951.
- Yao Y B, Wu D T, Gong Z P, Ma C M. Effect of phosphorus level on nitrogen accumulation and yield of soybean[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(6): 947–951.
- [22] 张丽, 柳勇, 谷林静, 等. 外源磷与AMF对间作玉米种植红壤无机磷形态的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016, (1): 26–33.
- Zhang L, Liu Y, Gu L J, *et al.* Effects of exogenous phosphorus and AMF on the form of inorganic phosphorus in intercropping red soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016, (1): 26–33.
- [23] Maltais-Landry G. Legumes have a greater effect on rhizosphere properties (pH, organic acids and enzyme activity) but a smaller impact on soil P compared to other cover crops[J]. *Plant and Soil*, 2015, 394: 139–154.
- [24] Zhang D, Zhang C, Tang X, *et al.* Increased soil phosphorus availability induced by faba bean root exudation stimulates root growth and phosphorus uptake in neighboring maize[J]. *New Phytologist*, 2016, 209(2): 823–831.
- [25] Li C, Dong Y, Li H, *et al.* Shift from complementarity to facilitation on P uptake by intercropped wheat neighboring with faba bean when available soil P is depleted[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 18663.
- [26] 孙宝茹. 玉米/紫花苜蓿间作磷素高效吸收利用的根系—土壤互作机理[D]. 长春: 东北师范大学博士学位论文, 2017.
- Sun B R. Mechanism of root-soil reciprocation for high phosphorus absorption and utilization of intercropping of maize/alfalfa[D]. Changchun: PhD Dissertation of Northeast Normal University, 2017.
- [27] 易均, 谢桂先, 刘强, 等. 磷肥减施对双季稻生长和产量及磷肥利用率的影响[J]. *湖南农业大学学报*, 2016, 42(2): 197–201.
- Yi J, Xie G X, Liu Q, *et al.* Effect of phosphate fertilizer on growth and yield of double - season rice and utilization of phosphate fertilizer[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 2016, 42(2): 197–201.