

不同磷水平下玉米-大豆间作对根系有机酸分泌特征及磷吸收的影响

农玉琴, 陆金梅, 骆妍妃, 覃宏宇, 陈远权, 韦锦坚, 韦持章, 覃潇敏*

(广西南亚热带农业科学研究所, 广西 龙州 532415)

摘要: 通过盆栽试验, 探讨不同磷水平下玉米-大豆间作根系分泌物中有机酸以及磷吸收的变化特征。结果表明: 与单作相比, 在 P50 和 P100 水平下, 间作种植显著提高了玉米和大豆籽粒产量 70.82%、52.67% 和 22.46%、16.62%。2 个磷水平下, 玉米-大豆间作具有明显的磷吸收优势, 磷吸收土地当量比 (LER_p) 为 1.32 ~ 1.56, 且 LER_p 不受磷水平调控。与常规磷水平 (P100) 下的单作相比, 玉米-大豆间作在磷肥减施 1/2 (P50) 的条件下, 并未降低玉米和大豆的磷素吸收量。间作改变了玉米和大豆根系有机酸分泌的种类, 显著提高了有机酸的分泌速率, 并且在 P50 水平下间作处理有机酸的分泌速率最大。因此, 间作诱导根系有机酸分泌增加是驱动不同磷水平下玉米和大豆磷高效吸收的重要机制之一, 玉米-大豆间作具有减施磷肥并维持作物产量和磷吸收的潜力。

关键词: 磷水平; 玉米-大豆间作; 有机酸; 磷吸收

磷是植物生长发育必需的营养元素之一, 在植物生理代谢、产量形成等方面发挥着不可替代的作用^[1]。施磷肥是提高土壤供磷能力、保证农作物高产稳产的重要措施之一^[2]。当前, 我国部分耕作土壤由于长期过量施磷, 磷肥的当季利用率只有 10% ~ 25%^[3], 农田已经形成了一个巨大的潜在磷库^[4]。因此, 充分利用作物自身的生物学潜力去挖掘现有土壤磷库资源, 已成为当前乃至今后的重要研究方向。

在长期缺磷的环境中, 植物根系会形成一系列包括形态、结构和生理上的可塑性反应来提高养分的利用^[5-7], 其中根系低分子量有机酸分泌增加是植物适应低磷胁迫的重要策略之一^[8]。间作是我国集约化农业生产上的一种典型种植模式, 在养分资源高效利用方面发挥着重要作用^[9-10]。研究表明, 在玉米-蚕豆^[11]、小麦-白羽扇豆^[12]等间作体系中, 蚕豆和鹰嘴豆根际分泌大量的柠檬酸活化土壤中的难溶性磷, 从而提高了与之间作的玉米和小麦的磷吸收。Li 等^[13]在低磷土壤上的研究还发现, 间作促进了蚕豆分泌更多的有机酸来活化土壤

中难溶性磷, 提高了与之间作玉米的磷吸收。这些现象表明合理间作能通过改变根系有机酸分泌而促进间作群体的磷素吸收。

玉米与大豆间作是集约化农业生产上比较广泛的一种立体栽培模式, 在养分高效、产量提高及病害控制等方面具有明显优势^[14-15]。已有研究表明, 在玉米-大豆间作体系中, 根系交互作用促进了玉米和大豆双方对磷的吸收和利用, 具有明显的磷吸收优势^[16]。陈利等^[17]研究结果还发现, 玉米-大豆间作改变了根系有机酸分泌种类, 提高玉米和大豆根系有机酸分泌速率。但在不同磷水平下, 玉米-大豆间作根系有机酸的分泌特性会产生哪些变化及是否能促进间作群体磷吸收尚不清楚。因此, 本研究以玉米-大豆间作为研究对象, 通过盆栽试验, 探讨不同磷水平下玉米-大豆间作对根系分泌物中有机酸分泌特性和作物磷吸收量的影响, 为进一步揭示玉米-大豆间作促进红壤磷高效利用的机制及磷肥合理施用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2020 年 5 月在广西南亚热带农业科学研究所格林温室大棚中进行。该区属典型的南亚热带季风气候, 年平均温度在 22℃ 以上, 年降水量在 1273.6 mm 以上。土壤为典型的旱地红壤, 基

收稿日期: 2021-03-22; 录用日期: 2021-07-17

基金项目: 广西自然科学基金项目 (2018GXNSFBA281128)。

作者简介: 农玉琴 (1986-), 助理研究员, 硕士, 主要从事间作系统养分利用与生理调控方面的研究。E-mail: 18378151635@163.com。

通讯作者: 覃潇敏, E-mail: qinxiaomin89@163.com。

本理化性状如下: 碱解氮 $34.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $6.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $122.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机质 $7.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 4.72。

供试材料: 玉米 (*Zea mays* L.) 品种为桂单-165, 大豆 [*Glycine max* (Linn.) Merr.] 品种为桂春-15。种子由广西农业科学院经济作物研究所提供。

1.2 试验设计

盆栽模拟试验设施磷水平和种植制度两因素, 种植模式包括玉米单作 (MM)、大豆单作 (MS) 与玉米、大豆间作 (I), 间作处理按照 1:1 种植即每盆玉米与大豆各 2 株, 单作处理每盆种植玉米或大豆 4 株。施磷水平设 P_2O_5 施用量为 50 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (干土), 分别记为 P50、P100, 其中 P100 为常规用量, P50 为减施 50% 用量。试验设 2 个磷肥水平、3 种种植模式, 共 6 个处理, 每个处理 3 次重复, 随机排列。氮肥施用量为 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 钾肥 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 按照纯养分换算。试验所用塑料盆规格大小为: 高度 230 mm, 底部直径 190 mm。土壤风干过 2 mm 筛, 每盆装土 10 kg。

供试肥料: 尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P_2O_5 14%)、硫酸钾 (K_2O 50%)。氮肥分 2 次施用, 50% 作基肥, 剩下 50% 在玉米拔节期追施; 大豆不追氮肥。磷肥以及钾肥全部作为基肥。整个生育过程中, 定期浇水、除草以及防治病虫害等。

1.3 样品采集与分析

在玉米大喇叭口期、成熟期及大豆开花期、成熟期进行采样, 植株地上部和根系样品于 105°C 杀青 30 min, 75°C 烘干至恒重称干重, 计算生物量; 粉碎后用于植株全磷含量的测定; 在玉米、大豆成熟期测定单、间作玉米、大豆的籽粒产量。

根系分泌物收集: 在玉米大喇叭口期 / 大豆开花期, 采用“抖土法”去除非根际土, 用自来水反复多次清洗植株根系, 再用蒸馏水清洗根系几遍, 清洗过程中尽量避免根系损伤。将清洗好的整株根系转入盛有 200 mL $0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 溶液的收集瓶中, 在补光灯照射下, 通气收集根系分泌物 2 h。收集液在 40°C 下旋转蒸发、浓缩至 10 mL, 用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 置于 -20°C 冰箱中保存, 用于有机酸分析。

有机酸的测定: 采用 HPLC 法用 LC-100 高效液相色谱仪 (LC-P100 型高压恒流泵, LC-UV100 紫

外检测器, 自动进样器、控温箱) 进行测定。试验色谱条件: 色谱柱为 C18 反相色谱柱 ($150 \text{ mm} \times 4.6 \text{ mm}$, $5 \mu\text{m}$), 流动相为 A 甲醇和 B 磷酸二氢钾 (A:B=5:95), 柱温 30°C , 流速 $0.7 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 进样量 $10 \mu\text{L}$, 检测波长 214 nm, 进样时间 25 min。

植株全氮: 采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 钒钼黄比色法测定^[18]。

1.4 数据统计与分析

数据采用 Excel 2016 进行初步处理、作图。用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析 (LSD 法, $\alpha=0.05$)、双因素方差分析、多重比较分析和 t 检验。

1.5 参数计算

分泌速率为单位时间 (h) 内单位干根重量 (g) 分泌的有机酸含量。

磷素吸收土地当量比: $\text{LER}_p = Y_{\text{IM}}/Y_{\text{MM}} + Y_{\text{IS}}/Y_{\text{MS}}$, 式中, Y_{IM} 和 Y_{IS} 分别表示间作玉米和间作大豆的磷素吸收量; Y_{MM} 和 Y_{MS} 分别表示单作玉米和单作大豆的磷素吸收量。当 $\text{LER}_p > 1$ 时, 间作磷吸收为优势; $\text{LER}_p < 1$ 时, 间作磷吸收处于劣势。

2 结果与分析

2.1 不同磷水平下玉米-大豆间作对作物生长和籽粒产量的影响

由图 1 可以看出, 玉米-大豆间作具有明显的产量优势。在 P50 和 P100 水平下, 与单作种植相比, 间作使玉米籽粒产量分别显著提高 70.82% 和 52.67%; 使大豆籽粒产量分别显著增加 22.46% 和 16.62%。此外, 与 P50 相比, P100 水平下单、间作玉米籽粒产量分别提高 32.21% 和 31.67%; 单、间作大豆籽粒产量同样分别显著提高 26.67% 和 20.63%。

从表 1 可知, 间作种植能显著促进玉米与大豆的生长。在 P50 和 P100 水平下, 与单作玉米相比, 间作种植使大喇叭口期玉米地上部和根系生物量分别显著增加 61.31%、70.56% 和 42.79%、63.36%, 成熟期玉米地上部和根系生物量分别显著增加 51.52%、38.95% 和 74.79%、52.67%。同样, 在大豆开花期和成熟期, P50 和 P100 水平下间作大豆地上部生物量较单作大豆分别显著提高 26.06%、21.85% 和 46.13%、35.79%; 间作大豆根系生物量较单作大豆分别显著提高 31.49%、32.33% 和 29.79%、39.06%。无论单作还是间作种

植条件下, P100 水平下玉米、大豆地上部和根系生物量均高于 P50, 适当增施磷肥表现出明显的促进效应。此外, 玉米的根冠比不受种植模式和磷肥

施用水平的调控; 大豆的根冠比同样不受种植模式的调控, 但适当施磷则提高了开花期大豆的根冠比。

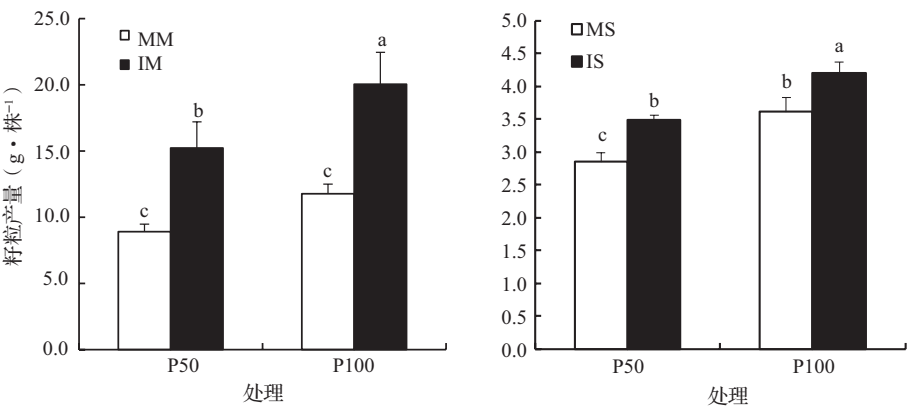


图 1 不同磷水平下玉米 – 大豆间作对作物籽粒产量的影响

注: MM 为单作玉米, IM 为间作玉米, MS 为单作大豆, IS 为间作大豆。柱上不同小写字母表示不同施磷水平及不同种植模式下玉米或者大豆籽粒的产量差异显著 ($P<0.05$)。

表 1 不同磷水平下玉米 – 大豆间作对作物生物量的影响

磷水平	种植模式	玉米大喇叭口期 / 大豆开花期			成熟期		
		地上部 ($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$)	根系 ($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$)	根冠比	地上部 ($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$)	根系 ($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$)	根冠比
P50	MM	$21.84 \pm 1.43\text{d}$	$4.58 \pm 0.29\text{d}$	0.21a	$35.21 \pm 1.45\text{b}$	$9.48 \pm 0.84\text{b}$	0.27a
	IM	$35.23 \pm 0.26\text{b}$	$6.54 \pm 0.62\text{b}$	0.19a	$53.35 \pm 3.39\text{a}$	$16.57 \pm 1.18\text{a}$	0.32a
P100	MM	$26.43 \pm 1.42\text{c}$	$5.54 \pm 0.49\text{c}$	0.21a	$39.64 \pm 1.01\text{b}$	$11.98 \pm 1.14\text{b}$	0.30a
	IM	$45.08 \pm 0.79\text{a}$	$9.05 \pm 0.44\text{a}$	0.20a	$55.08 \pm 4.31\text{a}$	$18.29 \pm 2.18\text{a}$	0.34a
P50	MS	$11.55 \pm 0.81\text{c}$	$2.35 \pm 0.21\text{c}$	0.20b	$3.75 \pm 0.31\text{c}$	$0.94 \pm 0.09\text{c}$	0.25a
	IS	$14.56 \pm 0.49\text{b}$	$3.09 \pm 0.16\text{b}$	0.21b	$5.48 \pm 0.07\text{b}$	$1.22 \pm 0.14\text{b}$	0.23a
P100	MS	$14.28 \pm 0.14\text{b}$	$3.65 \pm 0.25\text{b}$	0.26a	$6.23 \pm 0.14\text{b}$	$1.28 \pm 0.07\text{b}$	0.21a
	IS	$17.40 \pm 1.31\text{a}$	$4.83 \pm 0.49\text{a}$	0.28a	$8.46 \pm 0.79\text{a}$	$1.78 \pm 0.23\text{a}$	0.21a

注: MM 为单作玉米, IM 为间作玉米, MS 为单作大豆, IS 为间作大豆。同列数据后不同小写字母表示不同施磷水平及不同种植模式下玉米或者大豆生物量差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 不同磷水平下玉米 – 大豆间作对作物磷吸收的影响

由图 2 可以看出, 在玉米大喇叭口期 / 大豆开花期, P50 和 P100 水平下 LER_p 分别为 1.56 和 1.32, 成熟期分别为 1.45 和 1.34, 说明玉米 – 大豆间作具有明显的磷素吸收优势。从两个生育期的结果来看, 磷吸收间作优势 (LER_p) 受磷肥水平的影响较小, 但数值大小表现为 $\text{P50}>\text{P100}$ 。

从表 2 可以得出, 间作种植分别显著提高了大喇叭口期和成熟期玉米地上部和根系磷素吸收量 41.44%、73.01% 和 39.35%、44.33%, 分别显著提

高了开花期和成熟期大豆地上部和根系磷素吸收量 40.75%、70.15% 和 36.64%、69.15%。在两个生育期, P100 水平下玉米和大豆地上部和根系磷素吸收量均显著高于 P50。此外, 由于种植模式和磷肥水平对大喇叭口期玉米和成熟期大豆地上部磷吸收量的交互作用显著, 在 P50 和 P100 水平下, 大喇叭口期间作玉米地上部磷素吸收量较单作玉米分别显著增加 61.18% 和 28.61%; 成熟期间作大豆地上部磷素吸收量较单作大豆分别显著增加 39.07% 和 35.15%。

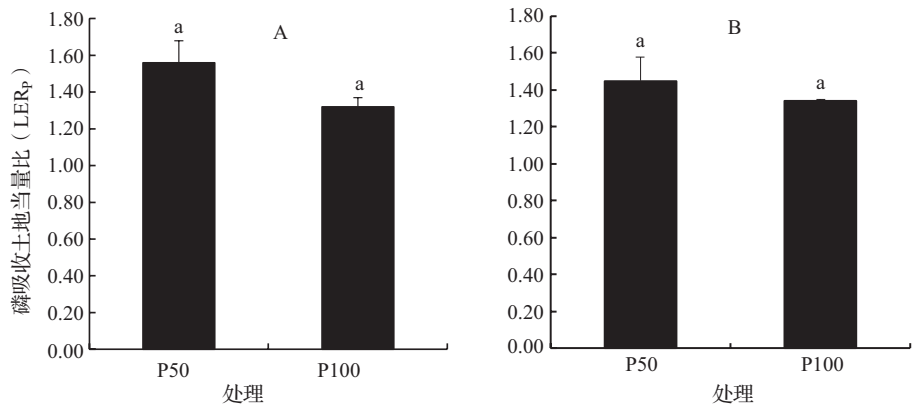


图2 不同磷水平下玉米-大豆间作体系的磷素吸收土地当量比 (LER_p)

注: A 为玉米大喇叭口期 / 大豆开花期; B 为成熟期。柱上不同小写字母表示不同磷水平间 LER_p 的差异显著 ($P<0.05$)。

表2 不同磷水平下玉米-大豆间作对磷素吸收量的影响 (mg·株⁻¹)

磷水平	种植模式	大喇叭口期		成熟期		开花期		成熟期	
		地上部	根系	地上部	根系	地上部	根系	地上部	根系
P50	M	57.21c	6.02a	87.97a	3.43a	41.16a	3.24a	58.77d	2.27a
	I	92.21b	10.12a	131.46a	5.81a	61.49a	6.22a	81.73c	4.19a
P100	M	88.07b	8.29a	125.27a	6.10a	62.55a	7.68a	97.18b	3.63a
	I	113.27a	14.62a	165.68a	7.93a	84.47a	12.35a	131.34a	5.78a
平均值									
	M	72.64b	7.15b	106.62b	4.76b	51.85b	5.46b	77.97b	2.95b
	I	102.74a	12.37a	148.57a	6.87a	72.98a	9.29a	106.54a	4.99a
平均值									
P50		74.71b	8.07b	109.72b	4.62b	51.32b	4.73b	70.25b	3.23b
P100		100.67a	11.45a	145.48a	7.01a	73.51a	10.02a	114.26a	4.71a
显著性									
种植模式		**	**	**	**	**	**	**	**
磷水平		**	**	**	**	**	**	**	**
种植模式 × 磷水平		*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns

注: M- 单作玉米 / 单作大豆, I- 间作玉米 / 间作大豆。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。* 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$; ns 表示不显著。表3 同。

2.3 不同磷水平下玉米-大豆间作对根系有机酸分泌速率的影响

从表3可以看出, 间作种植显著提高了玉米与大豆根系有机酸分泌速率 40.17% 和 22.27%, 且大豆根系有机酸的分泌速率大于玉米根系。由于种植模式和磷肥水平的交互作用显著, 在 P50 和 P100 水平下, 间作玉米根系有机酸分泌速率较单作玉米分别显著提高 44.98% 和 34.30%, 间作大豆根系有机酸分泌速率较单作大豆分别显著增加 21.70% 和 22.97% (图3)。此外, 与 P100 相比, P50 水平下玉米和大豆根系有机酸分泌速率分别显著增加 27.52% 和 22.86%, 并且在 P50 间作处理根系有机酸分泌速率最大。

表3 种植模式和磷肥水平及其交互作用对根系有机酸分泌速率的影响

磷水平	种植模式	玉米大喇叭口期	大豆开花期
平均值			
	M	269.80b	525.91b
	I	378.18a	643.03a
平均值			
P50		363.18a	644.43a
P100		284.81b	524.51b
显著性			
种植模式		**	**
磷水平		**	**
种植模式 × 磷水平		*	*

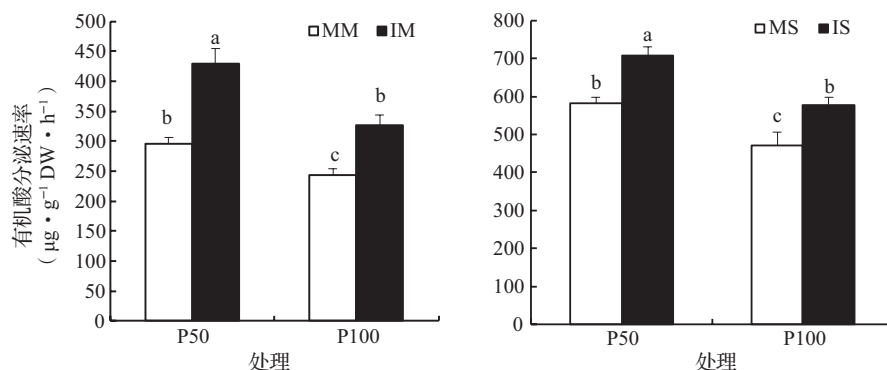


图3 不同磷水平下玉米-大豆间作对根系有机酸分泌速率的影响

注: MM 为单作玉米, IM 为间作玉米, MS 为单作大豆, IS 为间作大豆。柱上不同小写字母表示不同施磷水平及不同种植模式下玉米或者大豆有机酸分泌量的差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 不同磷水平下玉米-大豆间作对根系有机酸分泌种类和分泌速率的影响

从表4可以看出,玉米-大豆间作改变了玉米根系有机酸分泌种类和分泌速率。单作玉米根系分泌物中检测出柠檬酸、草酸、乳酸和琥珀酸4种有机酸,间作玉米根系分泌物中则检测出柠檬酸、苹果酸、草酸、乳酸、琥珀酸和莽草酸6种有机酸,其中草酸、乳酸、柠檬酸的分泌量相对较高,均未检测到酒石酸。与单作玉米相比,在P50和P100水平下,间作种植使草酸分泌速率分别显

著增加27.24%和18.16%,乳酸分泌速率分别显著增加32.23%和15.57%,柠檬酸分泌速率分别显著增加57.92%和73.07%,琥珀酸分泌速率分别显著增加129.54%和260.29%,而苹果酸和莽草酸在单作条件下均未检测到。此外,在P50水平下,单、间作玉米根系草酸、乳酸、柠檬酸、琥珀酸的分泌速率均显著高于P100水平21.88%和31.24%、10.91%和26.89%、54.59%和41.07%、87.68%和19.76%,间作玉米根系苹果酸分泌速率高于P100水平42.29%。

表4 不同磷水平下间作对玉米大喇叭口期根系有机酸分泌的影响 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW} \cdot \text{h}^{-1}$)

磷水平	种植模式	有机酸种类						
		柠檬酸	苹果酸	草酸	酒石酸	乳酸	琥珀酸	莽草酸
P50	MM	42.28 ± 3.59b	—	153.81 ± 8.29b	—	97.81 ± 7.04c	2.59 ± 0.49c	—
	IM	66.77 ± 4.53a	31.49 ± 2.93a	195.71 ± 8.41a	—	129.33 ± 10.68a	5.94 ± 0.52a	0.63 ± 0.12a
P100	MM	27.35 ± 3.82c	—	126.20 ± 7.20c	—	88.19 ± 7.29c	1.38 ± 0.28d	—
	IM	47.33 ± 4.28b	22.10 ± 2.67b	149.12 ± 12.64b	—	101.92 ± 5.53b	4.96 ± 0.34b	1.07 ± 0.16a

注: MM 为单作玉米, IM 为间作玉米。同列数据后不同小写字母表示不同施磷水平及不同种植模式下玉米根系有机酸分泌种类的差异显著 ($P < 0.05$)。

与玉米一样,玉米-大豆间作改变了大豆根系分泌物中有机酸的种类和分泌速率(表5)。单作大豆根系分泌物中检测出苹果酸、草酸、柠檬酸和琥珀酸4种有机酸,间作大豆根系分泌物中检测出苹果酸、草酸、柠檬酸、乳酸、琥珀酸、莽草酸和酒石酸7种有机酸,其中苹果酸、草酸和柠檬酸的分泌速率相对较大。在P50和P100水平下,间作大豆根系苹果酸、草酸、柠檬酸、琥珀酸的分泌

速率较单作大豆分别显著提高13.98%和14.13%、15.32%和16.31%、22.47%和30.08%、93.37%和309.71%,而乳酸、莽草酸和酒石酸在单作条件下未检测到。同样,与P100水平相比,P50水平单、间作大豆根系苹果酸、草酸、柠檬酸分泌速率分别显著提高15.32%和15.17%、32.62%和31.49%、37.48%和29.43%,而乳酸、琥珀酸、酒石酸和莽草酸分泌速率受磷水平的影响均较小。

表 5 不同磷水平下间作对大豆开花期根系有机酸分泌的影响

($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW} \cdot \text{h}^{-1}$)

磷水平	种植模式	有机酸种类						
		柠檬酸	苹果酸	草酸	酒石酸	乳酸	琥珀酸	莽草酸
P50	MS	74.94 ± 4.53b	309.92 ± 16.12b	193.70 ± 9.04b	—	—	2.79 ± 0.44b	—
	IS	91.78 ± 2.26a	353.24 ± 20.28a	223.38 ± 10.30a	0.21 ± 0.07a	32.03 ± 2.19a	5.51 ± 0.51a	1.13 ± 0.22a
P100	MS	54.51 ± 5.75c	268.74 ± 19.08c	146.06 ± 14.42d	—	—	1.17 ± 0.23c	—
	IS	70.91 ± 2.11b	306.71 ± 12.06b	169.88 ± 15.39c	0.43 ± 0.09a	26.07 ± 2.70a	4.78 ± 0.32a	—

注: MS 为单作大豆, IS 为间作大豆。同列数据后不同小写字母表示不同施磷水平及不同种植模式下大豆根系有机酸分泌种类的差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论

研究表明, 间作种植会改变作物根系有机酸的分泌特性, 从而改善间作群体的磷素吸收^[19-20]。Cu 等^[21]在小麦-白羽扇豆间作中的结果表明, 间作白羽扇豆分泌更多的柠檬酸促使土壤中难溶性 Ca-P 活化出来, 提高了与之间作的小麦磷吸收量。Zhang 等^[22]在玉米-蚕豆间作体系中同样发现, 间作促进蚕豆根系分泌大量的有机酸活化了土壤中的难溶性磷, 提高了根际的供磷能力, 从而增加了玉米对磷养分的吸收。本试验的结果也表明, 不同磷水平下, 玉米-大豆间作不仅能够改变根系有机酸的分泌种类, 也显著提高了根系有机酸的分泌速率, 尤其以玉米根系分泌物中草酸、乳酸和柠檬酸以及大豆根系分泌物中苹果酸、草酸和柠檬酸的分泌速率相对较大, 这与肖靖秀等^[23]在小麦-蚕豆间作系统的结果基本一致, 这可能是因为玉米-大豆间作可以促进作物氮和磷养分的吸收与利用^[24], 提高了作物碳、氮同化能力, 改善了植物体内的有机酸代谢, 最终改变了间作作物根系低分子量有机酸的分泌特性。本试验还发现, P50 条件下, 玉米与大豆根系有机酸的分泌速率均显著高于 P100 水平, 且在 P50 间作处理有机酸的分泌速率最大。这些结果可能为揭示玉米-大豆间作体系磷素高效吸收的根系应答机制提供有利的科学依据。

本试验结果也表明, 在磷有效性偏低 (Olsen-P $6.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的红壤上, 玉米-大豆间作产量同时受磷肥施用量和种植模式的调控。玉米-大豆间作显著提高了大喇叭口期与成熟期玉米的磷素吸收量, 同时也显著增加了开花期和成熟期大豆的磷素吸收量, 具有明显的磷吸收优势 ($\text{LER}_p > 1$), 这与人^[25-26]在小麦-蚕豆间作体系中得出的结果

基本一致, 这可能是由于玉米-大豆间作促进根系有机酸的分泌, 活化了红壤中难溶性 Fe-P、Al-P 等, 提高了土壤中的磷有效性, 为间作群体提供更多可利用的有效磷, 这可能是玉米-大豆间作群体磷高效吸收的重要机制之一。但是间作诱导根系有机酸分泌特性改变的机制及其在玉米-大豆间作体系磷高效吸收中发挥怎样的作用目前尚不清楚, 还需要进一步的深入研究。此外, 适当增施磷肥显著提高了玉米与大豆的磷素吸收量, 这与张立花等^[27]的研究结果相类似。同时, 本试验在 P50 水平下, LER_p 值最大。即在盆栽磷肥用量下, P50 水平间作玉米和间作大豆的磷素吸收量与 P100 水平的单作处理相比, 并未有降低的趋势, 说明玉米-大豆间作在减磷的条件下具有维持作物磷吸收的潜力。综上表明, 在缺磷或低磷条件下, 种间互作通过提高玉米和大豆根系有机酸的分泌, 促进了生长盛期磷的吸收, 为后期磷吸收间作优势的形成奠定了基础。

在本试验中还发现, 间作种植显著提高了玉米与大豆的籽粒产量, 具有明显的产量优势, 即使在 P50 水平下, 间作玉米和间作大豆籽粒产量与 P100 水平下的单作处理相比, 并未降低反而有增加的趋势, 这可能是由于适当减少磷肥施用后, 种间互作促进了玉米和大豆根系有机酸分泌的显著增加, 有助于活化土壤中的难溶性磷, 促进玉米与大豆对磷养分的吸收, 从而保障了产量不受影响。可见, 玉米-大豆间作在适当减磷的条件下仍能维持作物产量, 这与张梦瑶等^[28]在小麦-蚕豆间作体系中的试验结果一致。但是本研究基于盆栽试验研究间作系统施磷量与作物产量优势形成的关系仍具有一定的局限性, 还需要结合田间试验以及实际生产环境进行进一步的深入研究。

4 结论

在不同磷水平下,与单作相比,间作种植显著提高了玉米与大豆的籽粒产量和生物量。间作种植显著促进了玉米和大豆的磷素吸收,具有明显的磷吸收优势($LER_p > 1$)。玉米-大豆间作改变了根系有机酸分泌的种类,并显著提高了根系有机酸的分泌速率,说明根系有机酸分泌量增加是驱动不同磷水平下间作玉米与大豆磷素吸收显著提高的重要因子之一。玉米与大豆间作具有节约磷肥的空间以及维持作物产量和磷吸收的潜力。

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] Yang Q L, Liu P, Dong S T, et al. Effects of fertilizer type and rate on summer maize grain yield and ammonia volatilization loss in northern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 27 (4): 1-12.
- [3] 赵伟, 宋春, 周攀, 等. 施磷量与施磷深度对玉米-大豆套作系统磷素利用率及磷流失风险的影响 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29 (4): 1205-1214.
- [4] Shen J B, Yuan L X, Zhang J L. Phosphorus dynamics: From soil to plant [J]. *Plant Physiology*, 2011, 156: 997-1005.
- [5] Wen Z H, Li H B, Shen J B, et al. Trade-offs among root morphology, exudation and mycorrhizal symbioses for phosphorus-acquisition strategies of 16 crop species [J]. *New Phytologist*, 2019, 223: 882-895.
- [6] Adnane B, Noyce G L, Carlsson G, et al. Species interactions enhance root allocation, microbial diversity and P acquisition in intercropped wheat and soybean under P deficiency [J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 120 (C): 179-188.
- [7] 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.
- [8] 刘春花, 谢富, 宋岩, 等. 植物生长及生理生化特性对低磷胁迫的响应研究进展 [J]. *江西农业学报*, 2020, 32 (2): 71-75.
- [9] Gao H X, Meng W W, Zhang C C, et al. Yield and nitrogen uptake of sole and intercropped maize and peanut in response to N fertilizer input [J]. *Food and Energy Security*, 2019, 8: 1112.
- [10] Xiao J X, Yin X H, Ren J B, et al. Complementarity drives higher growth rate and yield of wheat and saves nitrogen fertilizer in wheat and faba bean intercropping [J]. *Field Crops Research*, 2018, 221: 1191129.
- [11] Hinsinger P, Betencourt E, Bernard L, et al. P for two, sharing a scarce resource: soil phosphorus acquisition in the rhizosphere of intercropped species [J]. *Plant Physiology*, 2011, 156: 1078-1086.
- [12] 李淑敏. 间作作物吸收磷的种间促进作用机制研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [13] 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.
- [14] Xu Z, Li C J, Zhang C C, et al. Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use: a meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2020, 246: 1-10.
- [15] 代真林, 汪娅婷, 姚秀英, 等. 玉米大豆间作模式对玉米根际土壤微生物群落特征、玉米产量及病害的影响 [J]. *云南农业大学学报 (自然科学版)*, 2020, 35 (5): 756-764.
- [16] 张雷昌, 汤利, 郑毅. 根系互作对玉米大豆间作作物磷吸收的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (5): 1142-1149.
- [17] 陈利, 肖靖秀, 郑毅. 间作玉米大豆根系分泌物中有机酸的变化特征 [J]. *西南林业大学学报*, 2016, 36 (5): 78-83.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 268-270.
- [19] Ae N, Arihara J, Okada K, et al. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian subcontinent [J]. *Science*, 1990, 248 (4954): 477-480.
- [20] Li L, Tang C Y, Renge Z, et al. Chickpea facilitates phosphorus uptake by intercropped wheat from an organic phosphorus source [J]. *Plant and Soil*, 2003, 248: 297-303.
- [21] Cu S T T, Huntson J, Schuller K A. Mixed culture of wheat (*Triticum aestivum* L.) with white lupin (*Lupinus albus* L.) improves the growth and phosphorus nutrition of the wheat [J]. *Plant and Soil*, 2005, 272: 143-151.
- [22] 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 neighbouring maize [J]. *New Phytologist*, 2016, 209 (2): 823-831.
- [23] 肖靖秀, 郑毅, 汤利. 小麦-蚕豆间作对根系分泌低分子量有机酸的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25 (6): 1739-1744.
- [24] 张雷昌, 汤利, 董艳, 等. 根系互作对间作玉米大豆氮和磷吸收利用的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2016, 39 (4): 611-618.
- [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] 王宇蕴, 李兰, 郑毅, 等. 基于根系形态对磷吸收的贡献解析小麦蚕豆间作促进磷吸收的作用 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2020, 28 (7): 954-959.

- [27] 张立花, 张辉, 黄玉芳, 等. 施磷对玉米吸磷量、产量和土壤磷含量的影响及其相关性 [J]. 中国生态农业学报, 2013, 21 (7): 801–809.
- [28] 张梦瑶, 肖靖秀, 汤利, 等. 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 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (7): 1157–1165.

Effects of maize and soybean intercropping on root exudation of organic acids and phosphorus uptake under different phosphorus rates

NONG Yu-qin, LU Jin-mei, LUO Yan-fei, QIN Hong-yu, CHEN Yuan-quan, WEI Jin-jian, WEI Chi-zhang, QIN Xiao-min* (Guangxi South Subtropical Agricultural Science Research Institute, Longzhou Guangxi 532415)

Abstract: A pot experiment was conducted to investigate the changes of organic acids in root exudates and phosphorus uptake in maize and soybean intercropping under different phosphorus rates. The results showed that compared to monocropping, intercropping increased the grain yield of maize and soybean under P50 and P100 rates by 70.82%, 52.67% and 22.46%, 16.62%, respectively. Under the two phosphorus rates, maize and soybean intercropping had an obvious phosphorus uptake advantage with land equivalent ratio (LER_p) of P uptake ranged from 1.32 to 1.56, and the LER_p was not affected by phosphorus rates. The phosphorus uptake of intercropped maize and soybean were not declined in the P50 rate, compared with monocropping at conventional phosphorus level (P100). Intercropping altered the types of organic acids exuded by maize and soybean roots, and significantly increased the exudation rate of organic acids, and the highest exudation rate was attained in intercropping under P50 rate. Therefore, the increase of organic acids exudation induced by intercropping is one of the important mechanisms driving the efficient phosphorus uptake of maize and soybean under different phosphorus rates. Maize and soybean intercropping has the potential to reduce phosphorus fertilizer application while maintain crop yield and phosphorus uptake.

Key words: phosphorus rates; maize and soybean intercropping; organic acids; phosphorus uptake