

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.01.010

骆妍妃, 覃潇敏, 农玉琴, 等. 不同磷水平下玉米-大豆间作对红壤无机磷组分及有效磷的影响. 土壤, 2022, 54(1): 72–79.

不同磷水平下玉米-大豆间作对红壤无机磷组分及有效磷的影响^①

骆妍妃, 覃潇敏, 农玉琴, 陆金梅, 覃宏宇, 阳景阳, 李金婷, 韦锦坚*

(广西南亚热带农业科学研究所, 广西龙州 532415)

摘要: 通过 2 年盆栽试验, 探讨不同磷水平下玉米-大豆间作根际土壤无机磷组分、土壤有效磷含量及作物磷吸收的差异, 明确土壤无机磷组分、土壤有效磷与作物磷吸收之间的相互关系。试验设置玉米单作、大豆单作、玉米-大豆间作 3 种植方式以及 3 个 P₂O₅ 施用水平(0、50、100 mg/kg, 分别记作 P0、P50、P100), 共 9 个处理。结果表明: 与单作相比, 2018 年和 2019 年在 P0、P50 和 P100 水平下, 间作显著提高玉米和大豆的籽粒产量, 并显著提高玉米和大豆植株的磷素吸收量。与常规施磷水平(P100)下的单作处理相比, 玉米-大豆间作在磷肥减少 50%(P50) 的条件下, 并未降低玉米和大豆的磷吸收量与籽粒产量。3 个磷水平下, 间作提高了玉米和大豆根际土壤有效磷含量, 而降低了根际土壤总无机磷以及 Fe-P、Al-P、Ca-P、O-P 的含量; 同时适当增施磷肥显著提高了玉米和大豆根际土壤总无机磷及各无机磷组分的含量。本试验条件下, 间作促进土壤中 Fe-P、Al-P、Ca-P 和 O-P 的活化(尤其是 Fe-P), 是低磷胁迫下间作土壤有效磷含量与作物磷吸收量增加的重要原因。玉米-大豆间作具有节约磷肥、维持作物产量及根际土壤有效磷与作物磷吸收的潜力。

关键词: 玉米-大豆间作; 磷水平; 无机磷组分; 土壤有效磷; 磷吸收

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Effects of Maize and Soybean Intercropping on Inorganic Phosphorus Forms and Available Phosphorus in Red Soil Under Different Phosphorus Levels

LUO Yanfei, QIN Xiaomin, NONG Yuqin, LU Jinmei, QIN Hongyu, YANG Jingyang, LI Jinting, WEI Jinjian*
(Guangxi South Subtropical Agricultural Science Research Institute, Longzhou, Guangxi 532415, China)

Abstract: A 2-year pot experiment was conducted to study the differences and relationship of inorganic phosphorus forms, available phosphorus in rhizosphere soil and phosphorus uptake in maize and soybean intercropping system under different phosphorus levels, in which 9 treatments, three cropping patterns (maize monocropping, soybean monocropping and maize-soybean intercropping) × three P₂O₅ levels (0, 50 and 100 mg/kg, labelled P0, P50 and P100). The results showed that compared with monocropping, intercropping significantly increased grain yields and phosphorus uptake of maize and soybean under P0, P50 and P100 levels in 2018 and 2019. Phosphorus uptake and grain yields of intercropped maize and soybean were not declined in the P50 level compared to corresponding monocropped plants in P100 level. Intercropping increased available phosphorus content in rhizosphere soil of maize and soybean under P0, P50 and P100 levels, but decreased the contents of total inorganic phosphorus, Fe-P, Al-P, Ca-P and O-P. Meanwhile, appropriate application of phosphorus fertilizer significantly increased the contents of total inorganic phosphorus and inorganic phosphorus forms in rhizosphere soil of maize and soybean. Under this experimental condition, the activation of Fe-P, Al-P, Ca-P and O-P in soil (especially Fe-P) induced by intercropping was an important source for the increase of soil available phosphorus content and phosphorus uptake in intercropping under low phosphorus condition. Maize-soybean intercropping has the potential to save phosphorus fertilizer while maintain crop yields, rhizosphere available phosphorus and phosphorus uptake.

Key words: Maize-soybean intercropping; Phosphorus levels; Inorganic phosphorus forms; Soil available phosphorus; Phosphorus uptake

①基金项目: 广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA281128; 2018JJB130065)资助。

* 通讯作者(18378151635@163.com)

作者简介: 骆妍妃(1989—), 女, 广西南宁人, 硕士, 助理研究员, 主要从事间作系统养分利用与病害控制研究。E-mail: qinxm_nys@163.com

磷(P)在植物生长发育、生理代谢以及维持产量等方面发挥着不可替代的作用^[1-2]，而土壤中磷有效性偏低已成为制约农作物生产的主要因素之一，因此农业生产上主要通过外施磷肥来保障农作物的产量^[3]。在农田土壤中，土壤无机磷通常被认为是作物磷营养的主要来源，一般占土壤全磷含量的60%~80%，故无机磷形态是决定土壤中磷有效性的关键^[4]。红壤作为我国南方主要的耕作土壤，因其独特的理化性质使得施入的磷肥极易被固定，主要以闭蓄态磷(O-P)、铁磷(Fe-P)、铝磷(Al-P)与钙磷(Ca-P)等难溶性无机磷组分积存在土壤中，导致红壤中磷有效性极低，磷素当季利用率仅有10%~25%^[5]。因此，研究土壤无机磷形态及其有效性对提高红壤磷有效性和供磷能力具有重要的现实意义。

间作在提高土壤磷有效性、磷高效吸收方面发挥着重要作用^[6-8]，其中禾本科/豆科间作体系是比较典型的代表^[9-10]。在小麦-蚕豆间作模式中，间作根际分泌物可以促进根际红壤中磷的活化，提高小麦根际土壤有效磷含量，尤其在低磷条件下间作具有更明显的资源利用优势^[11-12]。Li 等^[13]也发现在低磷的土壤上，蚕豆通过质子释放和有机酸分泌活化了土壤难溶性磷，提高了间作玉米的磷吸收。这些现象表明间作能显著改善土壤磷有效性与作物磷吸收。

玉米与大豆间作是我国农业生产上应用比较广泛的一种种植模式，具有高产高效、控病等优势^[14-16]。已有研究表明，玉米与大豆能够通过根系交互作用以及种间促进作用来促进土壤磷的活化，提高土壤磷有效性，促进作物对磷素的吸收利用^[17-18]。但是，间作如何影响无机磷组分？不同磷水平下，间作无机磷组分、土壤有效磷与作物磷吸收之间的相互关系，目前仍不清楚。因此，本研究以广西地区磷有效性偏低的旱地红壤为研究对象，通过2年盆栽试验，探讨不同磷水平下玉米与大豆间作土壤无机磷各组分含量、土壤有效磷及作物磷吸收的差异，及其之间的相互关系，揭示玉米-大豆间作提高土壤磷有效性的机制，以期利用间作模式促进红壤磷的高效利用、磷肥合理施用提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

盆栽试验于2018年和2019年在广西南亚热带农业科学研究所格林温室大棚中实施，并且2019年试验土壤为2018年收获后的土壤。供试土壤为旱地红壤，基本理化性状如下：有机质含量7.88 g/kg，碱

解氮含量44.67 mg/kg，有效磷含量6.36 mg/kg，速效钾含量119.54 mg/kg，pH 5.12。

供试玉米(*Zea mays* L.)品种为桂单-165，大豆(*Glycine max* L.)品种为桂春-15。

1.2 试验设计

盆栽试验包含施磷水平和种植模式两因素，施磷水平设P₂O₅施用量为0、50和100 mg/kg(干土)，记为P0、P50和P100，其中P100为常规用量(7.14 g/盆)，P50为常规用量减少50%(3.57 g/盆)。种植模式设玉米单作、大豆单作与玉米-大豆间作3种，间作处理按照1:1种植即每盆种植玉米与大豆各2株，单作处理每盆种植玉米或大豆4株，每盆行株距保持一致。试验共9个处理，每个处理3个重复，随机排列。氮肥用量N 150 mg/kg(干土)，钾肥用量K₂O 150 mg/kg(干土)，均按照纯养分换算。

试验所用塑料花盆规格：外口直径340 mm×高度240 mm，每盆装红壤(过2 mm筛)10 kg。供试肥料：尿素(含N 460 g/kg)、普通过磷酸钙(含P₂O₅ 140 g/kg)、硫酸钾(含K₂O 500 g/kg)。氮肥分2次施用，50%作基肥，50%在拔节期追施。氮肥追施时只施在单作玉米处理和间作处理的玉米一侧，且兑水等体积追施于玉米的根系，大豆均不进行追肥；磷肥与钾肥均作为基肥施入。整个生育期定期浇水及人工除草，并定期调换塑料盆的摆放位置。

1.3 样品采集

在作物成熟期进行采样，先剪取地上部，然后将整个植株根系从土壤中完整挖出，接着用抖土法轻轻抖掉松散结合的土壤，最后将与根系紧密贴合的土壤刷下来作为根际样品。单作每盆4株玉米或者大豆，间作每盆玉米和大豆各2株，最后将根际土壤均匀混合为1个土壤样品。土壤晾干、磨碎及过筛，待分析。

1.4 测定项目和方法

土壤有效磷：0.5 mol/L NaHCO₃溶液浸提，用钼锑抗比色法测定；土壤无机磷形态根据张守敬和Jackson^[19]的方法进行分析测定。

1.5 数据统计分析

试验数据利用Microsoft Excel 2010 软件进行平均值和标准误的计算，并绘制柱状图。数据差异性采用SPSS 20.0 统计分析软件做单因素分析(LSD法， $\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同磷水平下玉米-大豆间作对作物产量的影响

从表1可以看出，玉米和大豆的籽粒产量在年际

间均有一定的变化, 表现为 2019 年的籽粒产量高于 2018 年。间作显著提高了玉米和大豆的籽粒产量, 2018 年 P0、P50 和 P100 水平下玉米和大豆籽粒产量较单作分别显著提高 78.34%、61.69%、87.49% 和 96.19%、72.07%、34.11%;

2019 年玉米和大豆籽粒产量较单作分别显著提高 86.22%、71.71%、84.27% 和 99.19%、67.77%、38.92%。从两年的数据来看, 适当增施磷肥均显著提高了玉米和大豆的籽粒产量, 并且两年的增加趋势一致。

表 1 不同磷水平下玉米-大豆间作对作物籽粒产量的影响(g/株)
Table 1 Effects of maize-soybean intercropping on grain yields under different phosphorus levels

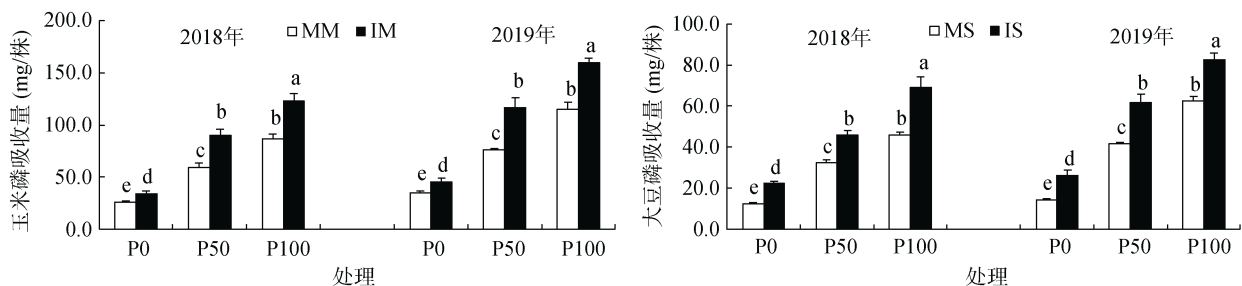
磷水平	种植模式	玉米		大豆	
		2018 年	2019 年	2018 年	2019 年
P0	单作	2.77 ± 0.20 e	3.12 ± 0.17 e	1.05 ± 0.05 e	1.23 ± 0.04 e
	间作	4.94 ± 0.21 d	5.81 ± 0.51 d	2.06 ± 0.08 d	2.45 ± 0.16 d
P50	单作	8.85 ± 0.56 c	10.04 ± 0.44 c	3.33 ± 0.23 c	4.59 ± 0.17 c
	间作	14.31 ± 1.65 b	17.24 ± 1.42 b	5.73 ± 0.40 b	7.70 ± 0.27 b
P100	单作	13.35 ± 1.12 b	16.27 ± 1.27 b	6.01 ± 0.28 b	7.94 ± 0.56 b
	间作	25.03 ± 0.65 a	29.98 ± 1.37 a	8.06 ± 0.71 a	11.03 ± 0.81 a

注: 表中同列不同小写字母表示同一年度处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 不同磷水平下玉米-大豆间作对作物磷吸收的影响

如图 1 所示, 间作显著影响玉米和大豆植株对磷素的吸收。与单作玉米相比, P0、P50 和 P100 水平下, 2018 年间作玉米植株磷吸收量分别显著提高 31.24%、50.82% 和 42.37%; 2019 年间作玉米植株磷吸收量分别显著提高 30.60%、53.40% 和 38.07%。

同样, P0、P50 和 P100 水平下, 2018 年间作大豆植株磷吸收量较单作大豆分别显著增加 79.12%、42.20% 和 50.06%, 2019 年间作大豆植株磷吸收量较单作大豆分别显著增加 83.18%、48.31% 和 32.01%。无论间作还是单作, 适当增施磷肥均显著提高玉米和大豆植株的磷素吸收量, 且两年的变化趋势一致。



(图中 MM: 单作玉米, IM: 间作玉米, MS: 单作大豆, IS: 间作大豆; 图中不同小写字母表示同一年度处理间差异显著($P < 0.05$); 下同)

图 1 不同磷水平下玉米-大豆间作对作物磷吸收量的影响

Fig. 1 Effects of maize-soybean intercropping on phosphorus uptake under different phosphorus levels

2.3 不同磷水平下玉米-大豆间作对根际土壤有效磷含量的影响

由图 2 可以看出, 间作提高了玉米根际土壤有效磷含量, 在 P50 和 P100 水平下, 2018 年间作玉米根际土壤有效磷含量较单作显著增加 30.26% 和 24.97%, 2019 年分别显著增加 26.50% 和 28.53%, 而在 P0 水平下单作、间作之间差异不显著。无论间作还是单作, 适当增施磷肥显著提高了玉米根际土壤中有效磷的含量, 且两年的增加趋势一致。

与玉米一样, 间作种植提高了大豆根际土壤有效磷含量, 2018 年间作大豆根际土壤有效磷含量在 P0、P50 和 P100 水平下较单作大豆分别显著增加 43.08%、36.61% 和 29.76%, 2019 年在 P50 和 P100 水平下分别显著增加 30.21% 和 26.34%(图 2)。从两年的试验数据来看, 无论单作还是间作, P50 和 P100 水平下玉米和大豆根际土壤有效磷含量显著高于 P0 水平, 且 P100 > P50。此外, 大豆根际土壤有效磷含量高于玉米。

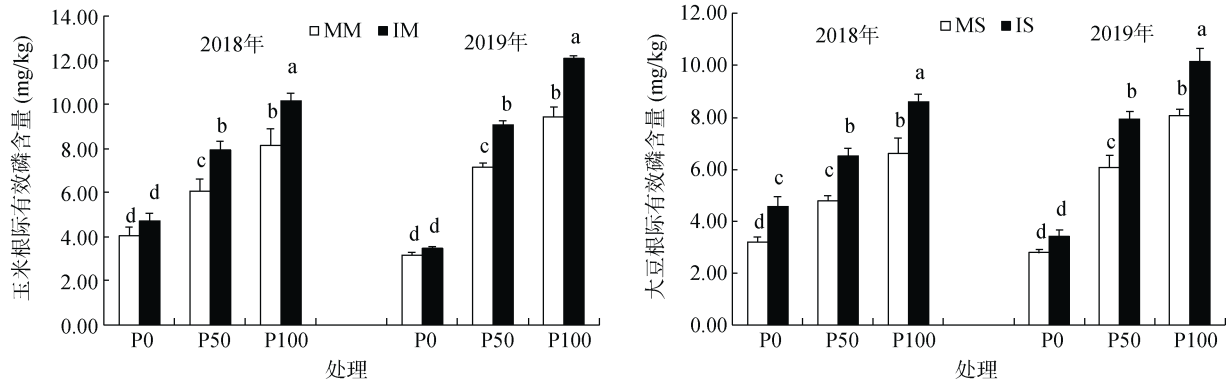


图 2 不同磷水平下玉米-大豆间作对根际土壤有效磷含量的影响

Fig. 2 Effects of maize-soybean intercropping on soil available phosphorus contents under different phosphorus levels

2.4 不同磷水平下玉米-大豆间作对根际土壤无机磷组分的影响

2.4.1 土壤无机磷各组分的含量 如图 3 所示，间作种植显著降低了 P50 和 P100 水平下玉米根际土壤总无机磷含量，2018 年分别显著降低 9.56% 和 9.19%，2019 年分别显著降低 8.31% 和 7.31%；而 P0 水平下单作、间作之间差异不明显。与单作玉米相比，间作显著降低了 P50 和 P100 水平下玉米根际土壤中 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 含量，其中 2018 年和 2019 年 Fe-P 含量分别显著降低 12.46%、11.72% 和 10.54%、9.71%，Al-P 含量分别显著降低 13.45%、12.14% 和 13.10%、10.08%，Ca-P 含量分别显著降低 17.51%、18.04% 和 14.73%、13.43%；而间作对 O-P 无明显影响(图 4)。另外，与 P0 水平相比，适当增施磷肥均显著增加了单作、间作玉米根际土壤无机磷各组分及总无机磷的含量。

间作种植显著降低了 P0、P50 和 P100 水平下大豆根际土壤总无机磷含量，2018 年分别显著降低 6.59%、7.77% 和 7.95%，2019 年分别显著降低 7.29%、8.06% 和 8.82%(图 3)。在 2018 年和 2019 年，与单作大豆相比，间作显著降低了 P50 和 P100 水平下大豆

根际土壤中 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 含量，其中 Fe-P 含量分别显著降低 9.76%、9.74% 和 10.35%、10.80%，Al-P 含量分别显著降低 13.36%、14.20% 和 13.17%、12.32%，Ca-P 含量分别显著降低 17.33%、15.74% 和 17.09%、19.40%；而间作对 O-P 无明显影响(图 5)。同样，P50 和 P100 水平下大豆根际土壤无机磷各组分及总无机磷的含量显著高于 P0 水平，且 P100>P50。

2.4.2 土壤无机磷各组分的比例 从表 2 和表 3 可以看出，O-P 与 Fe-P 是土壤中无机磷的主体，其次是 Al-P 与 Ca-P，其含量表现为：O-P>Fe-P>Al-P>Ca-P。从 2 年试验结果来看，间作种植显著提高了玉米根际土壤无机磷中 O-P 的比例 2.03% 和 1.96%(表 3)，显著提高了 2019 年大豆根际土壤无机磷中 O-P 的比例 2.00%(表 3)，而对玉米和大豆根际土壤中 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 的比例无明显影响。施磷显著提高了 2018 年玉米根际土壤无机磷中 Al-P 和 Ca-P 的比例和 2019 年 Al-P 的比例，显著提高了 2018 年大豆根际土壤无机磷中 Ca-P 的比例，而同时显著降低了玉米和大豆根际土壤无机磷中 O-P 的比例。另外，土壤中 Ca-P 在无机磷中的比例在年际间出现上升趋势，而 Fe-P、Al-P 和 O-P 在土壤无机磷中的比例较稳定，变化不大。

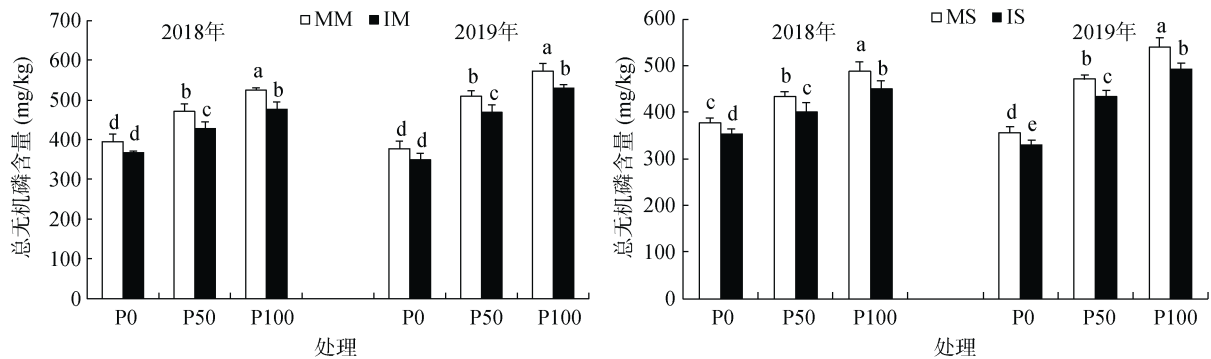


图 3 不同磷水平下玉米-大豆间作对根际土壤总无机磷含量的影响

Fig. 3 Effects of maize-soybean intercropping on soil total inorganic phosphorus contents under different phosphorus levels

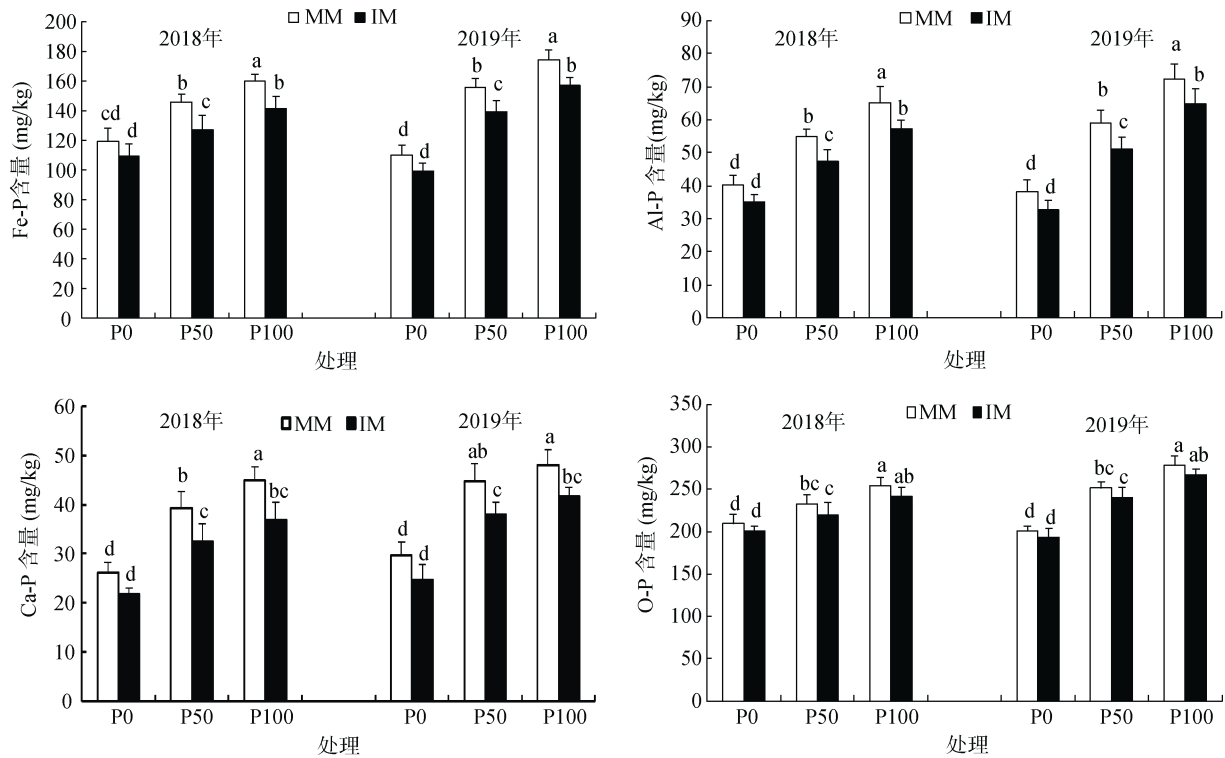


图 4 不同磷水平下间作对玉米根际土壤无机磷组分的影响

Fig. 4 Effects of intercropping on inorganic phosphorus forms in maize rhizosphere soils under different phosphorus levels

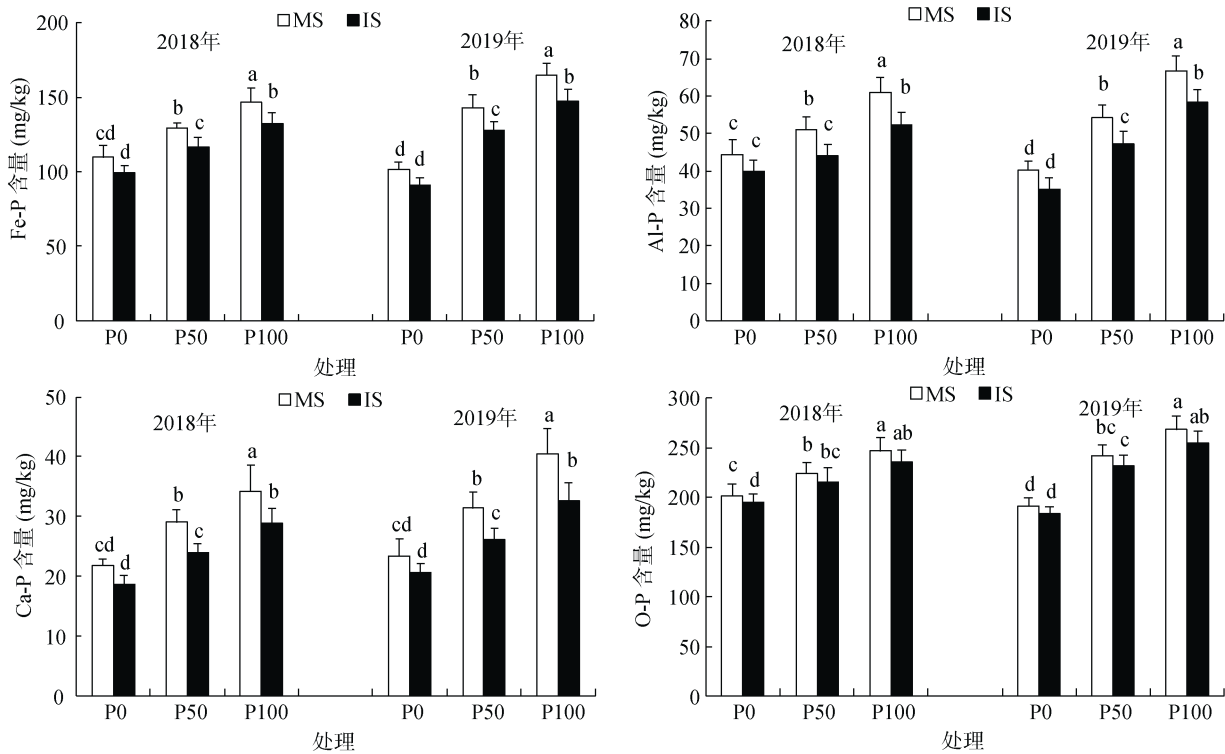


图 5 不同磷水平下间作对大豆根际土壤无机磷组分的影响

Fig. 5 Effects of intercropping on inorganic phosphorus forms in soybean rhizosphere soils under different phosphorus levels

2.4.3 土壤无机磷各组分的生物有效性 从表 4 中可以看出,玉米与大豆间作种植后,土壤中各形态无机磷含量均有不同程度的降低,在一定程度上可以

为玉米与大豆植株提供磷素营养。从 2018 年和 2019 年的试验结果来看,间作种植后,玉米土壤中无机磷减少量以 Fe-P 为主,分别平均占无机磷减少总量的

38.46%和 39.18%，其次是 O-P，分别平均占减少总量的 28.57% 和 26.32%；大豆土壤中无机磷减少量同样以 Fe-P 和 O-P 为主，分别平均占无机磷减少总

量的 38.25%、39.12% 和 27.70%、28.54%。另外，Al-P 和 Ca-P 减少量约占无机磷减少总量 13%~20% (表 4)。

表 2 玉米根际土壤中无机磷各组分占无机磷总量的比例(%)
Table 2 Proportions of inorganic phosphorus forms to total inorganic phosphorus in maize rhizosphere soil

处理	2018 年				2019 年			
	Fe-P	Al-P	Ca-P	O-P	Fe-P	Al-P	Ca-P	O-P
P0	30.00 a	9.89 b	6.28 b	53.84 a	28.76 a	9.76 c	7.44 a	54.05 a
P50	30.31 a	11.39 a	7.95 a	50.36 b	30.08 a	11.27 b	8.44 a	50.21 b
P100	30.10 a	12.21 a	8.16 a	49.53 b	30.04 a	12.43 a	8.13 a	49.40 b
MM	30.52 a	11.41 a	7.84 a	50.23 b	30.00 a	11.43 a	8.33 a	50.24 b
IM	29.75 a	10.91 a	7.09 a	52.26 a	29.25 a	10.88 a	7.67 a	52.20 a

表 3 大豆根际土壤中无机磷各组分占无机磷总量的比例(%)
Table 3 Proportions of inorganic phosphorus forms to total inorganic phosphorus in soybean rhizosphere soil

处理	2018 年				2019 年			
	Fe-P	Al-P	Ca-P	O-P	Fe-P	Al-P	Ca-P	O-P
P0	28.56 a	11.53 a	5.52 b	54.40 a	29.30 a	11.01 a	6.40 a	54.61 a
P50	29.43 a	11.39 a	6.34 a	52.83 b	29.97 a	11.23 a	6.34 a	52.47 b
P100	29.68 a	12.09 a	6.71 a	51.52 b	30.17 a	12.09 a	7.07 a	50.67 b
MS	29.56 a	12.01 a	6.48 a	51.95 a	29.77 a	11.74 a	6.91 a	51.58 b
IS	28.88 a	11.33 a	5.90 a	53.89 a	29.85 a	11.15 a	6.30 a	53.58 a

表 4 间作种植下无机磷各组分减少量占无机磷减少总量的百分比(%)
Table 4 Percentages of reduction of different inorganic phosphorus forms to total reduction of inorganic phosphorus in intercropping

磷水平	种植模式	2018 年				2019 年			
		Fe-P	Al-P	Ca-P	O-P	Fe-P	Al-P	Ca-P	O-P
P0	IM	36.30	18.64	15.49	29.57	37.57	18.67	13.32	26.20
	IS	40.65	18.62	12.19	28.55	41.03	19.90	10.40	28.66
P50	IM	40.13	16.33	15.21	28.33	39.53	18.64	15.82	26.00
	IS	37.37	20.20	14.91	27.52	39.01	18.87	14.14	27.98
P100	IM	38.94	16.38	16.85	27.82	40.43	17.39	15.42	26.76
	IS	36.73	22.37	13.86	27.03	37.33	17.21	16.49	28.97
平均值	IM	38.46	17.12	15.85	28.57	39.18	18.23	14.85	26.32
	IS	38.25	20.39	13.65	27.70	39.12	18.66	13.68	28.54

3 讨论

已有研究表明,禾本科与豆科间作能够显著改变土壤中无机磷组分^[20-22],尤其在低磷胁迫下,间作通过促进豆科植物根系释放质子^[10]、分泌有机酸^[23-24]、增强根际磷酸酶活性^[25]等方式促使土壤中难溶性磷(主要为 Ca-P、Al-P 与 Fe-P)的活化,增加土壤中磷有效性,促进作物对磷的吸收。本研究发现,间作改变了玉米和大豆根际土壤无机磷组分,显著降低了土壤中 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 的含量,而对 O-P 含量无明显影响(图 4 和图 5),说明间作主要通过促进土壤无机磷中 Fe-P、Al-P 和 Ca-P 的活化来增加土壤中磷素

有效性,提高了土壤的供磷能力,这可能与玉米-大豆间作诱导根系有机酸分泌增加^[26]、根际酸性磷酸酶活性增强^[27]有关,但是间作调控无机磷组分差异的机制尚需深入研究。同时,施磷显著增加了玉米和大豆根际土壤中总无机磷含量,并且显著提高了各无机磷组分的含量(图 3 ~ 图 5),这与前人^[28-29]在我国北方土壤上的研究结果一致,说明合理施用磷肥也是提高南方酸性红壤无机磷库的有效手段。此外,大豆根际红壤无机磷各组分含量低于玉米,说明大豆对这三种无机磷组分的耗竭能力强于玉米,这可能是相对于玉米,大豆根系分泌更丰富的有机酸,但大豆根系分泌物与土壤无机磷组分变化的关系

仍需进一步分析。

土壤中的无机磷以多种形态存在,且不同形态无机磷对植物的有效性存在差异^[30]。在本试验的酸性红壤中,无机磷组分以 O-P 为主,约占无机磷总量的 50%;其次是 Fe-P,占无机磷总量的 30% 左右,其余的 Al-P 与 Ca-P 含量相对较少(表 2 和表 3),这是由红壤的母质特性决定的,与苏利荣等^[31]在红壤中的研究结果基本一致。同时,在玉米与大豆间作条件下,间作玉米和大豆根际土壤中各无机磷组分均表现出不同程度的降低,其中土壤无机磷组分中以 Fe-P 减少量占无机磷减少总量的百分比最大,显示出玉米和大豆均对 Fe-P 有较强的活化利用能力;其次是 O-P、Al-P 和 Ca-P(表 4)。综合分析表明,在玉米与大豆间作模式中,间作通过活化利用土壤中的各无机磷组分来满足玉米和大豆的磷素营养需求,尤其是活化溶解酸性红壤中的 Fe-P。

研究表明,在禾本科-豆科间作模式中,由于豆科作物具有较强的生理特征,使得禾本科作物根际土壤有效磷含量增加,进而提高间作群体的磷吸收量^[18,32]。如在小麦-蚕豆间作体系中,蚕豆通过提高有机酸的分泌来活化土壤中的 Al-P 和 Fe-P,提高了红壤中磷的有效性^[6]。在玉米-蚕豆间作系统中,蚕豆通过分泌大量的有机酸和酸性磷酸酶活化了土壤中的 Fe-P 与 Al-P,提高了根际土壤磷的有效性,同时满足了蚕豆自身与间作玉米的磷素需求^[13]。本试验中,不同磷水平下,间作种植同时提高了玉米和大豆根际土壤有效磷含量,并显著增加了玉米和大豆植株的磷吸收量与产量,这说明在玉米-大豆间作系统中,玉米和大豆在土壤磷素吸收利用上是相互促进、互惠互利的,这可能是由于间作同时促进了玉米和大豆根际土壤中 Fe-P、Al-P、Ca-P 和 O-P(尤其是 Fe-P)的活化,提高了土壤有效磷含量,同时也为玉米和大豆的生长提供了充足的磷营养,进而提高了玉米和大豆的磷吸收量和产量。此外,施磷均显著提高了玉米和大豆根际土壤有效磷含量与磷吸收量,这可能是合理施磷提高了根际土壤无机磷库及各无机磷组分含量所致。

本研究还发现,在低磷条件下(即磷肥减少 50%),间作玉米和大豆的磷吸收量、籽粒产量与 P100 水平的单作处理相比并未降低(表 1 和图 1),同时间作降低了根际土壤中 Fe-P、Al-P、Ca-P 和 O-P 含量,进一步表明磷胁迫条件下玉米-大豆间作通过促进土壤中难溶性磷的活化,提高了根际土壤磷的有效性,促进了玉米和大豆对土壤磷的吸收利用,进而提高了玉米和大豆的产量,说明玉米-大豆间作具有节约磷

肥并维持作物磷吸收及产量的潜力。但是不同磷水平下,玉米-大豆间作系统中,根际土壤磷素形态变化与根际有效磷含量有怎样的联系,及其对间作作物磷吸收的贡献仍需要深入探究。

4 结论

不同磷水平下,间作提高了玉米与大豆根际土壤有效磷含量,显著提高了玉米和大豆的磷吸收量和籽粒产量。间作降低了玉米和大豆根际土壤总无机磷以及 Fe-P、Al-P、Ca-P 和 O-P 的含量,并且土壤总无机磷与各无机磷组分含量受施磷水平的显著调控。间作诱导的土壤中 Fe-P、Al-P、Ca-P 和 O-P 含量的降低(尤其是 Fe-P),是驱动不同磷水平下玉米-大豆间作根际土壤有效磷含量与作物磷吸收量增加的重要原因。在磷有效性偏低的红壤上,玉米-大豆间作具有维持土壤有效磷含量、作物产量以及节约磷肥的潜力。

参考文献:

- [1] Shen J B, Yuan L X, Zhang J L, et al. Phosphorus dynamics: From soil to plant[J]. *Plant Physiology*, 2011, 156(3): 997-1005.
- [2] 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(1): 161-188.
- [3] 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, 19(5): 2200-2211.
- [4] Guo S L, Dang T H, Hao M D. Phosphorus changes and sorption characteristics in a calcareous soil under long-term fertilization[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(2): 248-256.
- [5] 李杰, 石元亮, 陈智文. 我国南方红壤磷素研究概况[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 763-768.
- [6] 王宇蕴, 任家兵, 郑毅, 等. 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(自然科学版)*, 2011, 26(6): 851-855.
- [7] 代会会, 胡雪峰, 曹明阳, 等. 豆科间作对番茄产量、土壤养分及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 911-918.
- [8] 段媛媛, 刘晓洪, 吴佳奇, 等. 间作模式对黄连生理生长性状及根际土壤理化性质的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(11): 3676-3685.
- [9] 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.
- [10] 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.

- [11] Tang X Y, Bernard L, Brauman A, et al. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75: 86–93.
- [12] Tang X Y, Placella S A, Daydé F, 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(1/2): 119–134.
- [13] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(27): 11192–11196.
- [14] 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.
- [15] 王雪蓉, 张润芝, 李淑敏, 等. 不同供氮水平下玉米/大豆间作体系干物质积累和氮素吸收动态模拟[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(9): 1354–1363.
- [16] 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: 107661.
- [17] 宋春, 毛璐, 徐敏, 等. 玉米—大豆套作体系作物根际土壤磷素形态及有效性[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 226–230, 238.
- [18] Wang X C, Deng X Y, Pu T, et al. Contribution of interspecific interactions and phosphorus application to increasing soil phosphorus availability in relay intercropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2017, 204: 12–22.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 268–270.
- [20] Liao D, Zhang C C, Li H G, et al. Changes in soil phosphorus fractions following sole cropped and intercropped maize and *Faba* bean grown on calcareous soil[J]. *Plant and Soil*, 2020, 448(1/2): 587–601.
- [21] 张宇亭, 朱敏, 钱岩相注, 等. 接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(22): 7091–7101.
- [22] Li L, Tang C X, Rengel Z, et al. Chickpea facilitates phosphorus uptake by intercropped wheat from an organic phosphorus source[J]. *Plant and Soil*, 2003, 248(1/2): 297–303.
- [23] 柴博, 李隆, 杨思存, 等. 玉米/鹰嘴豆间作条件下不同施磷量对灌耕灰钙土无机磷组分的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(1): 85–90.
- [24] 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.
- [25] Inal A, Gunes A, Zhang F, et al. Peanut/maize intercropping induced changes in rhizosphere and nutrient concentrations in shoots[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2007, 45(5): 350–356.
- [26] 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.
- [27] 刘均霞, 陆引罡, 远红伟, 等. 玉米大豆间作条件下磷素的吸收利用[J]. *山地农业生物学报*, 2007, 26(4): 288–291.
- [28] 王海龙, 张民, 刘之广, 等. 多年定位试验条件下不同施磷水平对土壤无机磷分级的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 318–324.
- [29] 焦亚鹏, 齐鹏, 王晓娇, 等. 氮磷配施对黄土高原旱作农业区典型农田土壤无机磷形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(8): 1459–1472.
- [30] 赵靓, 侯振安, 柴颖, 等. 长期施磷对灰漠土无机磷形态的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 236–242.
- [31] 苏利荣, 何铁光, 苏天明, 等. 甘蔗 || 绿豆间作体系作物根围土壤无机磷变化特征[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(6): 73–78.
- [32] Zhang D S, Zhang C C, Tang X Y, et al. Increased soil phosphorus availability induced by *Faba* bean root exudation stimulates root growth and phosphorus uptake in neighbouring maize[J]. *The New Phytologist*, 2016, 209(2): 823–831.