

不同品种磷肥施用对玉米根际土壤磷组分的影响*

张璐¹, 肖靖秀¹, 郑毅^{1,2**}, 汤利¹

(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2. 云南开放大学, 云南 昆明 650500)

摘要:【目的】研究不同品种磷肥施用对玉米根际土壤不同磷组分的影响。【方法】以玉米大豆间作为研究对象, 通过盆栽试验和田间试验, 采用 Tiessen-Moir 磷分级方法, 研究施用磷酸二铵 (DAP)、磷酸一铵 (MAP) 和过磷酸钙 (SSP) 3 种不同品种磷肥 (盆栽 100 mg/kg, 田间 90 kg/hm²) 下间作玉米根际红壤全磷和磷组分的变化。【结果】施用磷肥提高了玉米根际土壤全磷含量, 不同磷肥品种的作用顺序为 DAP>MAP>SSP。综合田间试验及盆栽试验结果显示: 相比于不施磷处理 (CK), 磷肥施用提高了玉米根际土壤中活性态磷 (NaOH-Pi、NaOH-Po 和 D.HCl-Pi) 占比 (5%~42%), 降低了活性态磷 (Resin-P、NaHCO₃-Pi 和 NaHCO₃-Po) 占比 (2%~16%) 和稳定态磷 (C.HCl-Pi、C.HCl-Po 和 Residual-Pt) 占比 (3%~9%); 间作增加了活性态磷和稳定态磷占比 (分别为 3% 和 4%), 降低了中活性态磷占比 (6%)。盆栽试验中, 除 NaHCO₃-Po 和 Residual-Pt 外, 施用不同品种磷肥均可使玉米根际其他土壤磷组分含量增加; 相比于单作, 间作显著降低了 NaOH-Pi 和 NaOH-Po 的含量 ($P<0.05$), 显著增加了 NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po、C.HCl-Pi 和 Residual-Pt 的含量 ($P<0.05$), 对其他磷组分含量无显著影响 ($P>0.05$)。【结论】不同品种磷肥施用下间作对玉米根际不同磷组分的影响不同, 其中, 施用 DAP 对玉米根际中活性态磷的活化和全磷的提高均有显著正效应。

关键词: 磷肥品种; 玉米; 间作; 磷组分; 红壤

中图分类号: S 513.062

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2021) 06-1076-07

Effect of Different Varieties of Phosphorus Fertilizer Application on the Phosphorus Component of Maize Rhizosphere Soil

ZHANG Lu¹, XIAO Jingxiu¹, ZHENG Yi^{1,2}, TANG Li¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Yunnan Open University, Kunming 650500, China)

Abstract: [Purpose] To study the effects of intercropping on different phosphorus (P) components in maize rhizosphere soil. [Method] Taking maize soybean intercropping as the research object, pot (100 mg/kg) and field (90 kg/hm²) experiment were used to study the effects of diammonium phosphate (DAP), monoammonium phosphate (MAP) and calcium superphosphate (SSP) application on the changes of total P and P components in maize rhizosphere red soil, by Tiessen-Moir phosphorus classification method. [Result] The application of P fertilizer increased the total P content of maize rhizosphere soil, and the order of the effect of different P fertilizer varieties was DAP>MAP>SSP. Synthesized the results of field experiment and pot experiment, compared with no P application (CK), the application of P fertilizer increased the proportion of middle active P (NaOH-Pi, NaOH-Po

收稿日期: 2020-06-17

修回日期: 2021-05-03

网络首发时间: 2021-11-20 08:40:37

*基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0200207); 云南省科技人才与平台计划 (2019IC029)。

作者简介: 张璐 (1994—), 女, 内蒙古四子王旗人, 硕士, 主要从事养分吸收与高效利用研究。

E-mail: 3293815931@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 郑毅 (1964—), 男, 广东梅州人, 博士, 教授, 主要从事间作养分吸收利用研究。E-mail: zhengyi-64@163.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20211118.1633.002.html>



and D.HCl-Pi)(5%-42%), decreased the proportions of active P (Resin-P, $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$, and $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$)(2%-16%) and stable P (C.HCl-Pi, C.HCl-Po, and Residual-Pt)(3%-9%); intercropping increased the proportion of active P and stable P (3% and 4%, respectively), decreased the proportion of middle active P (6%). In pot experiment, the application of different varieties of P fertilizer could increase the content of P components in maize rhizosphere soil except $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ and Residual-Pt. Compared with monoculture, intercropping significantly reduced the contents of NaOH-Pi and NaOH-Po ($P<0.05$), significantly increased the contents of $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$, $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$, C.HCl-Pi and Residual-Pt ($P<0.05$), but had no significant difference on the contents of other phosphorus components ($P>0.05$).

[**Conclusion**] Different varieties of P fertilizer had different effects on different P components in maize rhizosphere. Among them, DAP had significant positive effects on the activation of middle active P and the increase of total P in maize rhizosphere.

Keywords: phosphorus fertilizer varieties; maize; intercropping; phosphorus component; red soil

磷素不仅是植物生长所需的大量元素之一,也是限制其生产力的重要因子^[1]。酸性土壤的低pH环境固定了更多的磷^[2],致使大部分磷素残留在土壤中,阻碍了作物对磷素的吸收利用。中国酸性土壤分布广泛,区域覆盖面积大,占全国耕地面积的21%,遍及15个省区,总面积约 $2.04\times 10^8\text{ hm}^2$ ^[3];另外,磷肥为不可再生资源,中国农田磷肥年施入量显著增加但并没有显著提高作物产量,造成磷肥施用的浪费^[1,4]。

红壤中含有大量无定型的氧化铁和氧化铝,固磷能力强^[2,5-7],磷肥利用率低下。现有研究大多关注磷肥施用量与磷肥利用率的关系,而忽略了磷肥品种问题。生产中磷肥品种多而杂,但很少有研究关注如何选择适宜的磷肥品种。张连娅等^[8]研究表明:在红壤上施用不同的磷肥品种,玉米产量和磷肥利用效率等有显著差异,但其具体作用机制并不清楚。不同磷肥品种施用后土壤磷组分如何变化尚需明确。间作可以提高土壤磷的有效性并促进磷的吸收利用效率,且相关机制研究较多^[5-7]。但在间作条件下,施用不同磷肥品种对土壤磷组分的影响尚不明确。现阶段,对作物根际土壤中磷组分的研究已经十分广泛,但大多是对中国北方石灰性土壤以及中性土壤的研究,而对酸性土壤中间套作玉米根际土磷组分的研究还较少。

中国土壤无机磷组分测定普遍采用张守敬—杰克森法^[9]和改进的蒋柏藩—顾益初法^[10]。近年来,经过Tiessen和Moir改进的Hedley磷分级方法(以下简称Tiessen-Moir磷分级方法)^[11-12]将土

壤无机磷和有机磷形态同时兼顾,全面评价了土壤磷形态,是目前采用较多的一种方法。该方法根据磷在土壤中的状态,将磷分为植物可直接间接利用的活性态磷(Resin-P、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$)、中活性态磷(NaOH-Pi 、 NaOH-Po 和D.HCl-Pi)和稳定态磷(C.HCl-Pi、C.HCl-Po和Residual-Pt)^[13-16]。

本研究通过田间和盆栽试验,利用Tiessen-Moir磷分级方法,探讨不同磷肥品种和间作条件下玉米根际全磷和磷组分的变化;定量评价不同磷肥品种对红壤各磷组分含量的影响,揭示间作对红壤中各磷组分占比的调控作用。研究结果对红壤地区磷肥的合理施用及磷肥品种的选择具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验地与供试材料

1.1.1 试验地

试验地位于云南省昆明市官渡区小哨村云南农业职业技术学院试验地(N $24^{\circ}54'$ ~ $25^{\circ}13'$, E $102^{\circ}41'$ ~ $103^{\circ}03'$,海拔1 820 m),土壤为旱地红壤,属粘土,基本理化性状为:pH 4.53,容重 1.73 g/cm^3 ,有机质含量 4.49 g/kg ,土壤全磷含量 0.194 g/kg ,有效磷含量 4.02 mg/kg 。盆栽试验在云南农业大学资源与环境学院植物营养学系大棚进行,盆栽试验用土取自田间试验田。

1.1.2 供试材料

供试玉米(*Zea mays* L.)品种为云瑞88,大豆(*Glycine max*)品种为开育12;供试肥料氮肥为

尿素 (46%), 钾肥为硫酸钾 (51%), 磷肥为过磷酸钙 (SSP, 16%)、磷酸一铵 (MAP, 49%) 和磷酸二铵 (DAP, 46%)。

1.2 试验设计

田间试验种植方式为玉米单作, 设不施磷肥 (CK)、施用 SSP、施用 MAP 和施用 DAP 共 4 个处理, 每个处理 3 次重复, 共计 12 个小区。肥料在播种前施入, 每个小区面积 12 m², 玉米行距 50 cm、株距 25 cm。每穴播种 3~4 粒, 长至两叶一心时每穴留苗 1 株。

盆栽试验为两因素设计, 因素 1 为玉米大豆间作和玉米单作 2 种植模式, 因素 2 为 4 个磷肥施用处理 (CK、SSP、MAP 和 DAP)。每个处理 3 次重复, 仅在成熟期采样, 1 次采样共计 24 盆。玉米 N、K₂O 和 P₂O₅ 的施用量分别为 150、100 和 150 mg/kg。尿素 60% 做基肥, 40% 于玉米 7 叶期做追肥。

试验用盆上部直径 29 cm, 下部直径 18.6 cm, 高 23 cm, 底部有 3 孔, 每盆装土 10 kg。装盆时, 将土壤与肥料混合均匀装入盆中, 待所有盆栽装土完毕, 加适量水, 待稳定 1 周后播种。玉米和大豆种子在播种前进行催芽^[17], 用 1% 的双氧水表面消毒 1 h, 清洗后浸泡, 吸水过夜后保持湿润, 置于 25℃ 恒温箱培养, 芽长约 1 cm 时播种。玉米单作每盆种植 4 株玉米, 玉米||大豆处理分别种植 2 株玉米和 2 株大豆。玉米和大豆生长发育过程中各盆栽和田间处理的管理保持一致。

1.3 样品采集与测定

田间试验和盆栽试验均在玉米成熟期采集玉米根际土。根际土的采集采用抖土法^[18], 从根上抖下来的土为根区土, 粘附在根系表面的土为根际土。根际土壤全磷含量采用 NaOH 熔融—钼锑抗法测定。根际土壤磷组分采用 Tiessen-Moir 磷分级方法^[11-12,19], 具体操作步骤如下:

先将待测土样研磨后过 100 目筛, 称取 0.500 g 加入 50 mL 离心瓶中, 加蒸馏水 30 mL, 树脂膜 1 条, 常温振荡 16 h, 8 000 r/min 离心 3 min, 倒出蒸馏水, 树脂条浸于 20 mL 0.5 mol/L HCl 溶液中, 常温振荡 16 h, 8 000 r/min 离心 3 min, 采用钼蓝比色法测定 Resin-P 含量。将上一步土壤残渣加 30 mL 0.5 mol/L NaHCO₃ 溶液浸提, 常温振

荡 16 h, 8 000 r/min 离心 3 min, 采用钼蓝比色法测定 NaHCO₃-Pi 含量; 高温消煮后, 采用钼蓝比色法测定 NaHCO₃-Pt 含量, NaHCO₃-Pt 与 NaHCO₃-Pi 含量的差值即为 NaHCO₃-Po 含量。将上一步土壤残渣加 30 mL 0.1 mol/L NaOH 溶液浸提, 常温振荡 16 h, 8 000 r/min 离心 3 min, 采用钼蓝比色法测定 NaOH-Pi 含量; 高温消煮后, 采用钼蓝比色法测定 NaOH-Pt 含量, NaOH-Pt 与 NaOH-Pi 含量的差值即为 NaOH-Po 含量。将上一步土壤残渣加 20 mL 1 mol/L HCl 溶液浸提, 常温振荡 16 h, 8 000 r/min 离心 3 min, 采用钼蓝比色法测定 D.HCl-Pi 含量。将上一步土壤残渣加 10 mL 浓盐酸 80℃ 消煮 10 min 后, 补加 5 mL 浓盐酸, 常温后 8 000 r/min 离心 3 min, 定容至 50 mL 容量瓶中, 采用钼蓝比色法测定 C.HCl-Pi 含量; 高温消煮后, 采用钼蓝比色法测定 C.HCl-Pt 含量, C.HCl-Pt 与 C.HCl-Pi 含量的差值即为 C.HCl-Po 含量。将上一步土壤残渣转移至消煮管, 加 5 mL 浓硫酸 380℃ 消煮至乳白色, 常温定容至 50 mL, 过滤, 采用钼蓝比色法测定 Residual-Pt 含量。

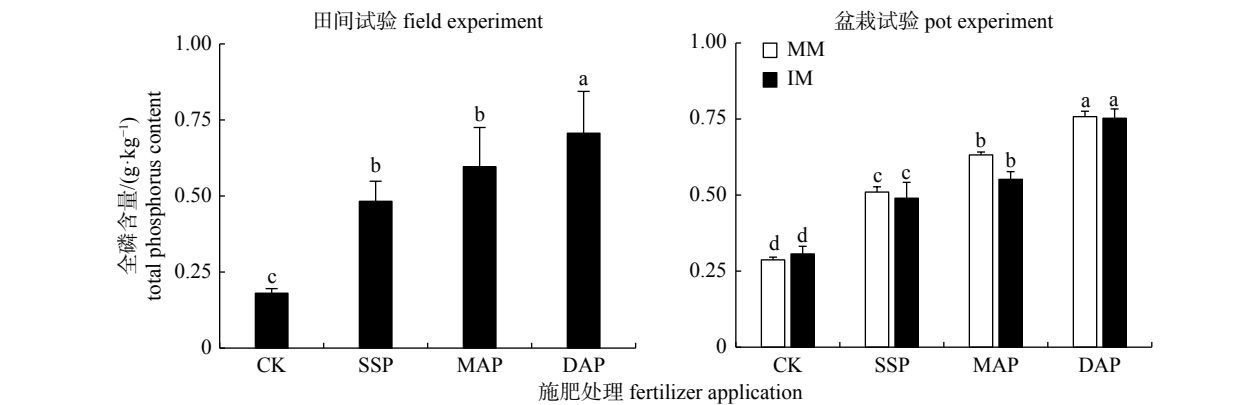
1.4 数据分析及处理

数据分析采用 Microsoft Excel 和 SPSS Statistics 20 进行处理, 田间试验按照单因素处理进行方差分析, 盆栽试验按照两因素处理进行交互作用分析。

2 结果与分析

2.1 不同磷肥品种施用对单间作玉米根际土全磷含量的影响

由图 1 可知: 与 CK 相比, 施肥处理均可显著提高玉米根际全磷含量。田间试验和盆栽试验中, 施肥处理可分别提高 167.43%~291.48% 和 68.41%~154.46% 的玉米根际土壤全磷含量。田间条件下, SSP 和 MAP 处理间根际土壤全磷含量无显著差异。盆栽条件下, 不同施肥处理间玉米根际土壤全磷含量则有显著差异, 各磷肥品种对玉米根际土壤全磷的作用为 DAP>MAP>SSP。进一步比较单作和间作玉米根际全磷含量发现: 与玉米单作相比, 玉米大豆间作对玉米根际全磷含量无影响, 说明玉米根际全磷含量受施磷处理调控, 但不受种植模式的影响。3 个磷肥品种中, DAP 对提高根际全磷含量的作用最显著。



注: CK. 不施磷肥; SSP. 施用过磷酸钙; MAP. 施用磷酸一铵; DAP. 施用磷酸二铵; MM. 单作玉米; IM. 玉米大豆间作; 不同小写字母表示不同品种磷肥处理间在 $P<0.05$ 水平差异的显著水平; 下同。
Note: CK. no phosphate application; SSP. calcium superphosphate; MAP. monoammonium phosphate; DAP. diammonium phosphate; MM. monocropping maize; IM. maize soybean intercropping; different small letters above the bars mean significant different treatments for every period of duration at the $P<0.05$ level; the same as below.

图 1 不同磷肥施用下玉米根际土壤中全磷含量

Fig. 1 Total phosphorus content of monoculture maize rhizosphere soil under different phosphorus fertilizer application

2.2 不同磷肥品种施用对玉米根际土壤磷组分含量的影响

由表 1、2 可知: 田间条件下, 与 CK 相比, 所有施肥处理均可显著提高 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、 NaOH-Pi 、 NaOH-Po 和 C.HCl-Po 含量; 盆栽条件下, 与 CK 相比, 所有施肥处理均可显著提高 Resin-P 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、 NaOH-Pi 、 D.HCl-Pi 和 C.HCl-Po 含量。与 CK 相比, 施 MAP 肥可降低田间 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 、 D.HCl-Pi 和 Residual-Pt 含量, 但差异不显著; 而所有施肥处理均可显著降低盆栽条件下

$\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 和 Residual-Pt 含量。与单作相比, 玉米||大豆可显著提高玉米根际 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 、 C.HCl-Pi 和 Residual-Pt 含量, 可显著降低 NaOH-Po 和 NaOH-Pi 含量, 对其他磷组分无显著影响。

分析磷肥品种、种植方式及两者互作对各磷组分含量的影响 (表 2) 可知: 施用的磷肥品种及磷肥品种×种植方式对所有磷组分含量均有极显著的影响; 而种植方式对除 Resin-P 、 D.HCl-Pi 和 C.HCl-Po 外的其他磷组分有极显著的影响。

表 1 不同磷肥品种施用下成熟期单作玉米根际土壤磷组分含量 (田间试验)

Tab. 1 The phosphorus component in rhizosphere soil of mono-cropped maize in harvest under different phosphorus fertilizer (field experiment)

磷肥品种 phosphorus fertilizer	活性态磷 active phosphorus			中活性态磷 middle active phosphorus			稳定态磷 stable phosphorus		
	Resin-P	$\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$	$\text{NaHCO}_3\text{-Po}$	NaOH-Pi	NaOH-Po	D.HCl-Pi	C.HCl-Pi	C.HCl-Po	Residual-Pt
CK	4.72±0.28 b	87.67±4.74 c	22.08±9.35 b	85.42±6.45 d	16.62±1.87 c	9.93±1.15 bc	183.42±6.65 b	25.00±1.93 c	95.33±5.82 b
SSP	13.31±0.40 a	118.44±1.46 b	25.18±1.15 b	130.32±8.23 c	67.06±8.42 b	23.50±4.43 a	231.36±19.36 a	91.18±5.99 b	151.86±4.51 a
MAP	5.99±0.23 b	134.47±1.24 a	14.47±1.40 b	126.42±0.40 c	76.79±2.09 a	4.94±2.90 c	207.01±22.54 ab	137.09±22.48 a	92.83±7.84 b
DAP	14.08±0.49 a	130.34±2.91 ab	20.02±3.77 b	194.42±2.13 a	60.17±1.74 b	7.97±0.39 c	201.79±4.27 ab	166.50±1.16 a	103.32±7.84 b

注: CK. 不施磷肥; SSP. 施用过磷酸钙; MAP. 施用磷酸一铵; DAP. 施用磷酸二铵; 不同小写字母表示不同品种磷肥处理间在 $P<0.05$ 水平差异的显著水平; 下同。
Note: CK. no phosphate application; SSP. calcium superphosphate; MAP. monoammonium phosphate; DAP. diammonium phosphate; MM. monocropping maize; IM. intercropping maize; different small letters above the bars mean significant different treatments for every period of duration at the $P<0.05$ level; the same as below.

2.3 不同磷肥品种施用对玉米成熟期根际土壤磷组分占比的影响

由图 2 可知: 与 CK 相比, 田间试验中, SSP、MAP 和 DAP 处理下根际土壤活性态磷含

量分别降低 15%、10% 和 16%, 稳定态磷含量分别降低 3%、5% 和 9%, 而中活性态磷含量分别增加 23%、23% 和 42%; 盆栽试验中, SSP、MAP 和 DAP 处理下根际土壤活性态磷含量降幅

分别为 10%、12% 和 2%，SSP 和 MAP 处理下根 和 DAP 处理下中活性态磷含量增幅分别为
际稳定态磷含量降幅分别为 7% 和 6%，而 SSP 5% 和 8%。与玉米单作相比，间作显著增加了活

表 2 不同磷肥品种施用下成熟期玉米根际土壤磷组分含量 (盆栽试验)
Tab. 2 The phosphorus component in rhizosphere soil of maize in harvest under different phosphorus
fertilizer (pot experiment)

磷肥品种 phosphorus fertilizer	种植方式 planting pattern	活性态磷 active phosphorus			中活性态磷 middle active phosphorus			稳定态磷 stable phosphorus		
		Resin-P	NaHCO ₃ -Pi	NaHCO ₃ -Po	NaOH-Pi	NaOH-Po	D.HCl-Pi	C.HCl-Pi	C.HCl-Po	Residual-Pt
CK	MM	9.06±0.61 d	27.18±0.91 d	67.39±0.85 d	163.96±0.40 g	12.23±0.80 cd	4.20±0.28 c	137.75±2.01 d	38.90±4.40 c	115.39±0.56 a
	IM	10.44±0.20 c	24.76±0.59 e	101.70±1.29 a	215.02±1.05 e	9.39±0.00 d	3.15±0.25 d	165.50±0.28 c	25.62±1.16 d	83.73±0.00 d
SSP	MM	21.68±0.61 a	31.55±0.34 b	46.80±0.75 f	285.41±3.88 a	15.07±2.64 c	5.52±0.25 b	193.25±2.01 a	78.27±5.06 b	85.31±2.44 d
	IM	13.59±0.40 b	42.60±0.30 a	59.52±0.05 e	232.51±0.00 c	8.96±1.05 d	3.02±0.14 d	193.25±1.16 a	90.37±0.58 a	103.32±0.48 b
MAP	MM	6.31±0.40 f	31.80±0.34 b	43.71±0.84 g	264.08±6.07 b	23.89±3.19 a	7.16±0.12 a	187.09±2.68 b	81.59±5.85 ab	68.29±0.97 f
	IM	6.96±0.23 f	29.13±1.19 c	94.48±0.25 b	221.42±0.70 d	11.66±0.80 cd	6.70±0.74 a	165.74±3.74 c	81.12±4.19 ab	97.18±0.56 c
DAP	MM	7.93±0.61 e	26.46±0.34 d	88.33±2.47 c	203.50±0.70 f	14.79±1.06 c	2.99±0.22 d	126.84±2.92 e	83.01±4.08 ab	77.00±1.12 e
	IM	13.11±0.40 b	31.55±0.34 b	67.86±0.75 d	203.21±2.13 f	19.91±2.13 b	5.89±0.15 b	169.54±3.35 c	80.64±4.08 b	77.00±0.56 e
平均值 average										
CK		9.75 c	25.97 d	84.54 a	189.49 d	10.81 b	3.67 c	151.63 c	32.26 b	99.56 a
SSP		17.64 a	37.08 a	53.16 d	258.96 a	12.02 b	4.27 b	193.26 a	84.32 a	94.32 b
MAP		6.64 d	30.46 b	69.10 c	242.75 b	17.78 a	6.93 a	176.42 b	81.35 a	82.74 c
DAP		10.52 b	29.00 c	78.10 b	203.36 c	17.35 a	4.44 b	148.19 c	81.83 a	77.00 d
MM		11.25 a	29.25 b	61.56 b	229.24 a	16.50 a	4.97 a	161.24 b	70.44 a	86.50 b
IM		11.02 a	32.01 a	80.89 a	218.04 b	12.48 b	4.69 a	173.51 a	69.44 a	90.31 a
显著性 significance										
磷肥品种× 种植方式 phosphorus fertilizer× planting patterns		**	**	**	**	**	**	**	*	**
磷肥品种 phosphorus fertilizer		**	**	**	**	**	**	**	**	**
种植方式 planting patterns		ns	**	**	**	**	ns	**	ns	**

注: MM. 单作玉米, IM. 间作玉米; *, 有显著性差异 ($P<0.05$), **, 有极显著性差异 ($P<0.01$), ns. 无显著性差异 ($P>0.05$).
Note: MM. monocropping maize, IM. intercropping maize; *, significant difference ($P<0.05$), **, extremely significant difference ($P<0.01$), ns. no significance ($P>0.05$).

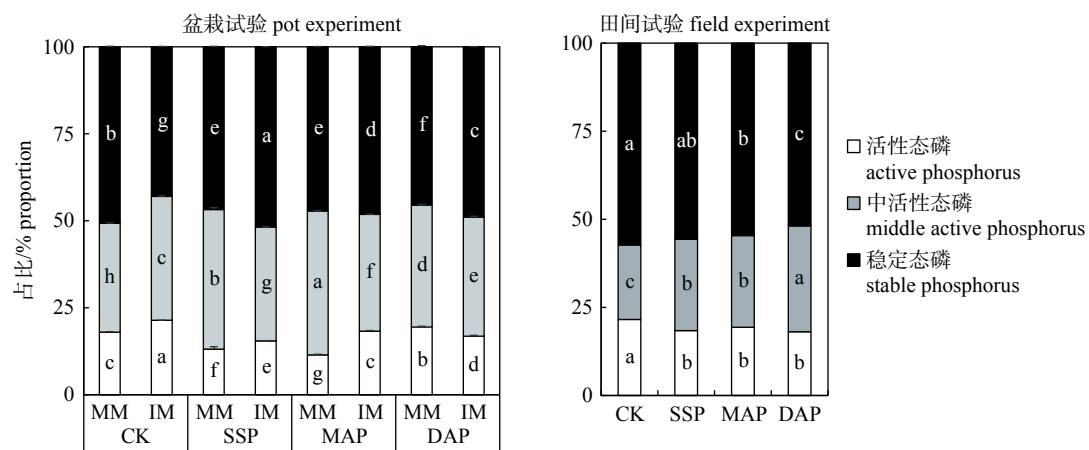


图 2 不同磷肥品种施用下玉米根际土壤磷形态占比
Fig. 2 Phosphorus form proportion of rhizosphere soil of maize under different P varieties fertilizer

性态磷占比,增幅为3%,但DAP处理下活性态磷占比降低3%;间作显著降低了中活性态磷占比,降幅为6%,但CK条件下中活性态磷占比提高4%;间作普遍增加稳定态磷占比,但CK条件下稳定态磷占比降低7%。

3 讨论

本试验土壤pH为4.53,容重为1.73 g/cm³,粘度高,酸性强,淋溶彻底,属于高度盐基不饱和、铁铝富集土壤,土壤中的磷大部分为铁铝吸附态或稳定态,可利用部分较少^[5]。磷肥施入后,极易被固定为铁铝结合态或稳定态,这也是本研究中中活性态磷含量增加的原因。磷肥的施用可普遍提高作物各生育期根际有效磷含量,磷肥中普遍含有部分水溶性磷,且大部分可以作为有效磷源(过磷酸钙、磷酸二铵和磷酸一铵)或缓效磷源(过磷酸钙)进入土壤,提高微域内有效磷含量,供给植物生长。过磷酸钙为水溶性有效磷肥,但其肥效较低;磷酸一铵为生理酸性肥料,适用于碱性土壤;磷酸二铵为生理碱性肥料^[20]。磷肥为作物提供充足磷源,促进磷素吸收,有助于作物细胞的生长和叶绿素的形成,进而提高作物生物量、产量及磷吸收累积量,磷素营养在蔬菜等作物的生长发育、产量和品质形成等过程中均产生重要影响^[21-27],适量的磷肥可有效提高土壤有效磷含量,使玉米或其他作物获得高产^[28-30]。作物在生长过程中所吸收的磷主要为活性态磷,磷肥的施入极大促进了作物的生长发育及吸收,并同时促进作物根系分泌。磷肥施用可改变土壤活性态磷、中活性态磷及稳定态磷组分的含量及占比,且不同品种磷肥对不同组分的含量影响存在差异^[30-34]。本研究中磷肥施用降低了作物根际活性态磷和稳定态磷占比,增加了中活性态磷占比;磷肥施入土壤后,会迅速增加土壤各形态磷含量,而到作物成熟期,由于磷肥施用显著促进作物生长,作物大量吸收活性态磷,导致施磷处理的活性态磷含量显著低于不施磷处理。而Residual-Pt含量的降低可能与磷肥施用促进作物生长进而促进作物根系磷酸酶、有机酸和质子的分泌有关^[35],但仍需进一步研究。

WANG等^[26]研究表明:豆科禾本科间作可促进根际土壤酸化,增加酸性磷酸酶活性,有效提高土壤磷有效性,活化土壤中被固定的磷。GUNES

等^[27]的鹰嘴豆大麦间作试验也证明:豆科禾本科间作可促进根际土壤酸化,增加酸性磷酸酶活性,显著提高土壤有效磷、铁(II)和DTPA-Fe的含量。赵建华等^[7]研究表明:合理间作可促进玉米根系分泌物中质子、总有机酸和磷酸酶分泌,并改变作物根系构型及菌根侵染率,有效活化土壤中被固定的铁铝中活性态磷(铁铝结合态和稳定态)。这也是作物生长发育对活性态磷的耗竭是导致玉米施磷处理成熟期根际土壤活性态磷低于不施磷处理的原因。豆科禾本科间作会对土壤不同组分的磷含量产生影响,尤其是活性态磷^[36]。有研究显示:豆科混交林下的土壤有效磷含量相比于纯非豆科林和纯豆科林均有提高^[25],且禾本科豆科间作会促进作物磷酸酶、有机酸及质子的分泌,进而影响根际微域效应下的微生物群落并提高其解磷作用,促进AM真菌的根系定植^[25-27,29]。

4 结论

(1)施用磷肥显著提高了玉米根际全磷含量,但是间作对玉米根际土壤全磷并没有影响,各品种磷肥作用顺序为DAP>MAP>SSP,这与作物地上部的生长状况吻合。

(2)施用磷肥会降低活性态磷和稳定态磷含量,增加中活性态磷含量。在不同品种磷肥施用下,玉米大豆间作对玉米根际土壤各磷组分含量的影响有差异,其中,磷酸二铵对稳定态磷的活化效果最好。此外,玉米大豆间作可以增加活性态磷和稳定态磷占比,降低中活性态磷占比。

[参考文献]

- [1] 展晓莹,任意,张淑香,等.中国主要土壤有效磷演变及其与磷平衡的响应关系[J].中国农业科学,2015,48(23):4728.DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2015.23.014.
- [2] 黎耀辉.陕西省关中地区石灰性土壤上影响磷肥肥效因素的探讨I.土壤的某些农化性质对磷肥肥效的影响[J].土壤学报,1965(1):39.
- [3] 赵其国.中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M].北京:科学出版社,2002.
- [4] RICHARD J S, ASTRID O, RICHARD A C, et al. Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems[J]. Plant and Soil, 2011, 349: 89. DOI: 10.1007/s11104-011-0880-1.
- [5] 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. DOI: 10.11674/zwyf.2013.0115.
- [6] 杜青峰,王党军,于翔宇,等.玉米间作夏季绿肥对当季植物养分吸收和土壤养分有效性的影响[J].草业学报,

- 2016, 25(3): 225. DOI: [10.11686/cyxb2015483](https://doi.org/10.11686/cyxb2015483).
- [7] 赵建华, 孙建好, 陈亮之, 等. 玉米行距对大豆/玉米间作作物生长及种间竞争力的影响[J]. 大豆科学, 2019, 38(2): 229. DOI: [10.11861/j.issn.1000-9841.2019.02.0229](https://doi.org/10.11861/j.issn.1000-9841.2019.02.0229).
- [8] 张连娅, 王瑞雪, 郑毅, 等. 不同形态磷肥对红壤玉米磷素吸收利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2019, 27(5): 158. DOI: [10.13597/j.cnki.maize.science.20190523](https://doi.org/10.13597/j.cnki.maize.science.20190523).
- [9] CHANG S C, JACKSON M L. Fractionation of soil-P[J]. Soil Science, 1957, 84(2): 133. DOI: [10.1097/00010694-195708000-00005](https://doi.org/10.1097/00010694-195708000-00005).
- [10] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. 中国农业科学, 1989, 22(3): 58. DOI: [10.3321/j.issn:0578-1752.1989.03.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:0578-1752.1989.03.012).
- [11] TIESSEN H, MOIR J O. Characterization of available P by sequential extraction[J]. Soil Sampling and Methods of Analysis, 1993, 824: 75.
- [12] HEDLEY M J, STEWART J W B, CHAUHAN B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. Soil Science Society of American Journal, 1982, 46(5): 970. DOI: [10.2136/SSSAJ1982.03615995004600050017X](https://doi.org/10.2136/SSSAJ1982.03615995004600050017X).
- [13] HOU E Q, TAN X, HEENAN M, et al. A global dataset of plant available and unavailable phosphorus in natural soils derived by Hedley method[J]. Scientific Data, 2018, 5: 180166. DOI: [10.1038/sdata.2018.166](https://doi.org/10.1038/sdata.2018.166).
- [14] YANG X, POST W M. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: a synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method[J]. Biogeosciences, 2011, 8: 2907. DOI: [10.5194/bg-8-2907-2011](https://doi.org/10.5194/bg-8-2907-2011).
- [15] ANNE F CROSS, WILLIAM H S. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems[J]. Geoderma, 1995, 64(3): 197. DOI: [10.1016/0016-7061\(94\)00023-4](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00023-4).
- [16] HOU E Q, CHEN C G, KUANG Y W, et al. A structural equation model analysis of phosphorus transformations in global unfertilized and uncultivated soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2016, 30(9): 1300. DOI: [10.1002/2016GB005371](https://doi.org/10.1002/2016GB005371).
- [17] 肖靖秀. 小麦/蚕豆的根系分泌物特征及其对蚕豆枯萎病菌的响应研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2013.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [19] 金欣, 姚珊, JAVKHLAN B, 等. 冬小麦—夏休闲体系作物产量和土壤磷形态对长期施肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1660. DOI: [10.11674/zwylf.18260](https://doi.org/10.11674/zwylf.18260).
- [20] 胡霁堂. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [21] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915. DOI: [10.3321/j.issn:0564-3929.2008.05.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:0564-3929.2008.05.018).
- [22] DING Z L, AHMED M S K, MARWA G M A, et al. The integrated effect of salinity, organic amendments, phosphorus fertilizers, and deficit irrigation on soil properties, phosphorus fractionation and wheat productivity[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 2736. DOI: [10.1038/s41598-020-59650-8](https://doi.org/10.1038/s41598-020-59650-8).
- [23] 边秀芝, 盖嘉慧, 郭金瑞, 等. 玉米施磷肥的生物效应[J]. 玉米科学, 2008, 16(5): 120. DOI: [10.13597/j.cnki.maize.science.2008.05.035](https://doi.org/10.13597/j.cnki.maize.science.2008.05.035).
- [24] 鲁剑巍, 鲁君明, 陈防, 等. 江汉平原玉米施用磷肥效果研究[J]. 玉米科学, 2004, 12(2): 102. DOI: [10.13597/j.cnki.maize.science.2004.02.031](https://doi.org/10.13597/j.cnki.maize.science.2004.02.031).
- [25] ALEIXO S, GAMA-RODRIGUES A C, GAMA-RODRIGUES E F, et al. Can soil phosphorus availability in tropical forest systems be increased by nitrogen-fixing leguminous trees?[J]. Science of the Total Environment, 2020, 712: 136405. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.136405](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136405).
- [26] WANG X C, DENG X Y, TIAN P. Contribution of inter-specific interactions and phosphorus application to increasing soil phosphorus availability in relay intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2016, 204: 12. DOI: [10.1016/j.fcr.2016.12.020](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.020).
- [27] GUNES A, BAGCI E G, INAL A. Interspecific facilitative root interactions and rhizosphere effects on phosphorus and iron nutrition between mixed grown chickpea and barley[J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(9): 1455. DOI: [10.1080/01904160701555648](https://doi.org/10.1080/01904160701555648).
- [28] 赵靓, 侯振安, 李水仙, 等. 磷肥用量对土壤速效磷及玉米产量和养分吸收的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(2): 123. DOI: [10.13597/j.cnki.maize.science.2014.02.027](https://doi.org/10.13597/j.cnki.maize.science.2014.02.027).
- [29] 索炎炎, 张翔, 司贤宗, 等. 磷肥与有机肥配施对土壤-花生系统磷素及花生生产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(1): 119. DOI: [10.7505/j.issn.1007-9084.2018.01.015](https://doi.org/10.7505/j.issn.1007-9084.2018.01.015).
- [30] KHOSRAVI A, ZAREI M, RONAGHI A. Influence of biofertilizers and phosphate sources on the phosphorus uptake of lettuce and chemical forms of phosphorus in soil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2017, 48(22): 2701. DOI: [10.1080/00103624.2017.1416396](https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1416396).
- [31] 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. DOI: [10.13870/j.cnki.stbxb.2018.05.049](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2018.05.049).
- [32] 王斌, 刘骅, 马义兵, 等. 长期施肥对灰漠土无机磷组分的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 917. DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2017.04.21](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2017.04.21).
- [33] 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. DOI: [10.16302/j.cnki.1000-7601.2015.01.014](https://doi.org/10.16302/j.cnki.1000-7601.2015.01.014).
- [34] 柴立涛, 耿玉辉, 宋引弟, 等. 施磷对吉林省西部盐碱土水田土壤无机磷组分的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 197. DOI: [10.13870/j.cnki.stbxb.2015.06.035](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2015.06.035).
- [35] 刘金光, 李孝刚, 王兴祥. 连续施用有机肥对连作花生根际微生物种群和酶活性的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2): 305. DOI: [10.13758/j.cnki.tr.2018.02.012](https://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2018.02.012).
- [36] BLAKE L, JOHNSTON A E, POULTON P R, et al. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods[J]. Plant and Soil, 2003, 254(2): 245. DOI: [10.1023/A:1025544817872](https://doi.org/10.1023/A:1025544817872).

责任编辑: 何馨成