

石灰性土壤施用不同磷肥对玉米苗期生长和土壤无机磷组分的影响

郭大勇^{1,2,3}, 袁玉玉¹, 曾祥¹, 陈彬¹, 韦文敬¹, 崔毅¹, 原梦¹, 孙丽蓉^{1,2}

(1.河南科技大学农学院,河南 洛阳 471003;2.洛阳市植物营养与环境生态重点实验室,河南 洛阳 471003;3.洛阳市共生微生物与绿色发展重点实验室,河南 洛阳 471003)

摘要: 研究旨在探讨不同磷肥品种对玉米生长发育和土壤无机磷组分的影响, 以为磷肥高效利用提供参考。采用盆栽试验, 设置 6 个处理: 磷酸一铵(MAP)、过磷酸钙(SSP)、聚磷酸铵(APP)、氮磷复合肥硝酸磷肥(NiP)、硫酸铵+过磷酸钙混施(SA+P), 试验 60 天后测定了玉米的生物学指标和玉米植株磷素含量, 同时测定了土壤有效磷与土壤无机磷组分含量状况。结果表明: 玉米生物学性状、磷素积累量和磷肥利用效率均表现出 APP>MAP、NiP>SSP、SA+P>CK 的趋势。相较于对照, APP、MAP、NiP 处理显著提高玉米植株的株高、叶面积、地上部和根系干重, 株高增幅在 23.3~35.1 cm, 叶面积增加 57.1~89.0 cm², 地上部和根系干重分别增加 265%~420%和 171%~218%。APP 处理植株磷素积累量达到 49.02 mg/盆, 磷肥利用效率达到 36.75%, 显著高于 NiP 和 MAP 的 21.43%和 19.42%。相较于对照, APP 和 MAP 处理的 Ca₂-P、Ca₈-P 和 Fe-P 呈显著性增加, 上述 3 种无机磷组分含量与玉米植株磷素积累量呈极显著正相关关系($p<0.001$)。北方石灰性土壤聚磷酸铵(APP)是一种表现良好的磷肥类型, 这对减磷增效背景下的粮食安全和磷肥高效利用有重要应用价值。

关键词: 石灰性土壤; 玉米; 磷肥品种; 无机磷组分; 磷效率

中图分类号: S143.2; S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0243-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.034

Effect of Phosphorus Fertilizer on Maize Growth and Inorganic Phosphorus Fractions in a Calcareous Soil

GUO Dayong^{1,2,3}, YUAN Yuyu¹, ZENG Xiang¹, CHEN Bin¹,

WEI Wenjing¹, CUI Yi¹, YUAN Meng¹, SUN Lirong^{1,2}

(1.Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003;

2.Luoyang Key Laboratory of Plant Nutrition and Environmental Ecology, Luoyang, Henan 471003;

3.Luoyang Key Laboratory of Symbiotic Microorganism and Green Development, Luoyang, Henan 471003)

Abstract: High fixation and low shifting ability of phosphorus in calcareous soil often caused low use efficiency of phosphorus fertilizer in North China. This study examined the effect of different kinds of phosphorus fertilizer on maize growth and soil inorganic fractions in order to improve the utilization efficiency of P fertilizer. Pot experiment was carried out with 6 treatments of monammonium phosphate (MAP), superphosphate (SSP), ammonium polyphosphate (APP), nitrophosphate (NiP) and ammonia sulfate + superphosphate (SA+P). The biological characteristics and phosphorus uptake of maize were measured after 60 days, soil available phosphorus contents and inorganic fractions were measured as well. The results showed that biological performance, phosphorus accumulation and phosphorus use efficiency of maize performed as the trend of APP>MAP, NiP>SSP, SA+P>CK; APP, MAP and NiP significantly increased maize height, leaf area, ground and root biomass compared with the control (CK) by 23.3~35.1 cm, 57.1~89.0 cm², 265%~420% and 171%~218%, respectively. Maize in APP treatment accumulated P 49.02 mg/pot in total with 36.75% of phosphorus recovery efficiency, which significantly different from 21.43% of NiP and 19.42% of MAP.

收稿日期: 2021-01-14

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200202); 国家自然科学基金联合基金项目(U1904121)

第一作者: 郭大勇(1979—), 男, 安徽宣城人, 博士, 副教授, 主要从事养分资源管理研究。E-mail: pancywang@163.com

通信作者: 郭大勇(1979—), 男, 安徽宣城人, 博士, 副教授, 主要从事养分资源管理研究。E-mail: pancywang@163.com

$\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ and Fe-P contents significantly increased in APP and MAP treatments compared with the control, which had significant relationships with plant uptake ($p < 0.001$). APP is a kind of suitable phosphorus fertilizer for maize in calcareous soils, which is important for securing food safety and achieving high phosphorus use efficiency under background of reducing phosphorus fertilizer input in farmland.

Keywords: calcareous soil; maize; P fertilizer types; inorganic phosphorus fractions; phosphorus use efficiency

磷是构成细胞膜、细胞核的核心元素,参与植物细胞的光合作用、光合产物转移和积累过程及能量和物质转化过程等^[1],是生命系统运作中不可缺少的元素^[2]。近年来,磷肥在我国农业生产中被广泛应用,一方面,自 1954—2007 年间我国农田中累积态磷达到 1.31 亿 t,平均年累积量高达 242 kg/hm²,土壤根层速效磷浓度提高到 20 mg/kg 左右^[3];另一方面,磷肥当季的利用率只有 10%~15%^[4],远低于发达国家 40%的水平^[4-5],肥料利用率低下不仅造成肥料的浪费,还引起一系列农业面源污染方面的问题^[6]。因此,合理选择磷肥品种和提高磷肥利用效率是当前我国磷肥施用亟待解决的问题。

石灰性土壤广泛分布于我国北方地区,也是我国玉米生产的主要农业土壤,玉米是典型的磷敏感型作物,玉米苗期的磷素供应状况对产量和生长发育进程至关重要^[7]。有研究^[8]表明,玉米六叶期土壤适宜供磷水平临界值为 11.6 mg/kg,远高于玉米生育后期大喇叭口期的 6.2 mg/kg,磷肥施用和土壤供磷水平直接影响玉米的干物质累积、磷素吸收以及根系构建等诸多方面^[9-10]。石灰性土壤磷肥移动性极差,其每天的移动距离仅为 1 mm 左右,钙、镁离子的大量存在导致磷素极易被固定,高固定性和低移动性的特点导致玉米磷素吸收利用效率低下^[7,11]。有研究^[12-14]表明,70%~90%的磷肥施入土壤后形成作物难以吸收利用的固定形态,转化为各种形态无机磷在土壤中累积,无机磷组分在土壤全磷中占比高达 75%~85%,其有效性也不尽相同,进而导致土壤在供磷能力水平上的差异,同时无机磷组分在根际和非根际的含量、形态和转化等也直接影响作物对磷素吸收利用过程。前人在石灰性土壤上根据磷肥品种的特性做了较多的研究,李阿荣等^[15]的试验表明,石灰性土壤玉米磷肥施用效果以磷酸二铵类最佳,其次是过磷酸钙和钙镁磷肥;刘世亮等^[16]在石灰性土壤也得出相同的结论,即玉米磷素营养与磷肥种类密切相关,同时土壤中的无机磷组分变化有较大差异,不施磷肥的条件下, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 是作物磷素营养的主要来源,施磷条件下根际和非根际则以 Fe-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 增加为主。近几年改善根际微域环境如 pH 在北方石灰性土壤上多有报道,采用生理酸性肥

料硫酸铵替代尿素与过磷酸钙混施,可以显著促进根系发育,增加作物对磷素的吸收利用^[17-19];同时新型磷肥品种聚磷酸铵在石灰性土壤上表现不俗,由于其水溶性好且逐步水解的特点,在滴灌条件下和灰漠土上磷肥效率显著高于其他磷肥品种^[20-22]。然而,石灰性土壤定量比较不同磷肥品种肥效的研究依然不足。本试验旨在通过研究玉米苗期生长发育对磷肥品种响应及土壤根际、非根际无机磷含量的变化,为玉米磷肥的合理施用提供实践参考和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

玉米供试品种为“郑单 958”(Zeamays L. cv. Zhengdan 958);供试石灰性土壤取自河南省偃师市高龙镇(34°36′06″N,112°41′49″E),土壤基本理化性状为:pH 8.06,有机质含量 13.15g/kg,全磷含量 0.68 g/kg,速效磷含量 5.04 mg/kg,碱解氮含量 71.26 mg/kg,速效钾含量 223.61 mg/kg;土壤无机磷组分 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 4.90 mg/kg, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 144.80 mg/kg, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 260.86 mg/kg,Al-P 60.60 mg/kg, Fe-P 36.28 mg/kg,O-P 95.45 mg/kg。

供试肥料:聚磷酸铵(APP)磷肥为粉末状白色晶体,由云天化股份有限公司提供,平均聚合度 5,聚合率 68%~75%(N 18.3%, P_2O_5 59.1%);硝酸磷肥(NiP)由山西天脊煤化工集团有限公司提供,颗粒状(N 26.5%, P_2O_5 11.5%);磷酸一铵(MAP)(N 12.1%, P_2O_5 61.8%,分析纯,白色晶体)、硫酸铵(SA)(N 21.0%,分析纯,白色晶体)、过磷酸钙(SSP)(P_2O_5 16.0%,分析纯,灰色粉末)、尿素(Urea, N 46.7%,分析纯,白色颗粒),钾肥为硫酸钾(K_2SO_4 , K_2O 53.5%,分析纯,白色粉末)。

1.2 试验设计

试验设置 6 个处理,每个处理 4 次重复,试验过程中盆栽位置完全随机排列。6 个处理分别为:(1)不施磷肥 CK;(2)磷酸一铵 MAP;(3)聚磷酸铵 APP;(4)过磷酸钙 SSP;(5)硝酸磷肥 NiP;(6)硫酸铵加过磷酸钙 SA+P。试验设置磷浓度为 100 mg/kg 土,氮浓度为 200 mg/kg 土,钾浓度为 100 mg/kg 土,硫酸铵加过磷酸钙 SA+SSP 和硝酸磷肥 NiP 的处理氮素不够的部分由尿素补齐。

1.3 测定项目与统计分析

盆栽试验开始于2019年6月18日,收获于2019年8月17日,为期60天,试验地点在河南科技大学开元校区。土壤风干后过2 mm筛,与磷肥充分混匀后平衡2天,试验用盆口直径和高为22 cm×16 cm,每盆装入3.7 kg土,称重法选择大小一致的玉米种在恒温箱中避光催芽24 h,种子萌发1 cm左右每盆定植2株玉米,试验期间采用称重法保持盆中含水量为其田间持水量的70%,每周随机挪动盆栽位置以避免光温影响。

试验结束后采用卷尺测量地表到植株最高点的高度为株高;叶面积测定参考Francis等^[23],叶面积=叶长×叶宽×0.75(每株玉米最大展开叶);SPAD值测定每株玉米最大展开叶不同部位5次求平均值为测量值;拔出玉米植株后抖动分离,用细毛刷取出根际土壤,获得根际土,非根系部分土样作为非根际土,用剪刀从玉米的茎基部剪断,地上部在105℃条件下杀青30 min,75℃烘干至恒重,获得地上部生物量。根系在清水中仔细冲洗并挑出细根,利用WinRHIZO根系扫描系统(Regent Instruments Inc.,加拿大)扫描玉米根系,获得数字化图像后对图像进行分析,得到根系生长参数(根长、根体积、根表面积)。扫根结束后烘干至恒重获得根系生物量。

玉米植株磷含量、土壤速效磷、无机磷组分及试验前土壤基础指标测定均参照《土壤农化分析(3版)》^[24]。

1.4 数据处理

$$\text{磷吸收量(g)} = (\text{地上部磷含量} \times \text{地上部干重} + \text{地下部磷含量} \times \text{根系干重}) / 1000$$

$$\text{磷利用率} = (\text{施磷植株吸磷总量} - \text{不施磷植株吸磷总量}) / \text{施磷量} \times 100\%$$

试验数据采用Microsoft Excel 2016和SPSS(V24.0)软件进行处理和统计分析,Sigmaplot 12.0软件作图,LSD法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 玉米生物学性状

盆栽试验结果(表1)表明,石灰性土壤无论是株高、叶面积还是地上部和根系干重,均表现出APP>MAP、NiP>SSP、NiP>CK的趋势。相较于对照,APP、MAP、NiP处理显著提高玉米植株的株高、叶面积、地上部和根系干重,株高增幅为23.3~35.1 cm,最大展开叶叶面积增加57.1~89.0 cm²,地上部和根系干重分别增加265%~420%和171%~218%。SSP和SA+P处理虽然在株高、最大叶面积、SPAD指标上与对照差异较小,但显著增加地上部干重,其中SSP增加3.1 g/盆,SA+P增加3.5 g/盆,根系干重SA+P处理显著高于对照,增加1.61 g/盆。根冠比与地上部生长趋势呈相反趋势,生物量累积最高的APP处理根冠比显著低于除MAP外的其他处理,SA+P最高为0.45,CK和SSP分别为0.42和0.36,上述3个处理根冠比显著高于APP和MAP。

表1 不同磷肥品种对玉米生物学性状的影响

处理	株高/cm	叶面积/cm ²	SPAD	地上部干重/g	根系干重/g	根冠比
CK	46.8±1.6d	122.6±2.9d	15.2±0.9c	7.9±0.7e	3.16±0.48d	0.42±0.05ab
MAP	77.0±0.9b	179.7±12.8b	18.6±0.8a	33.1±2.2b	9.51±0.72ab	0.28±0.02de
APP	81.9±2.0a	211.6±21.6a	16.7±2.4ab	41.1±0.5a	10.07±0.57a	0.24±0.01e
SSP	48.8±2.0d	123.0±6.8d	12.7±1.0d	11.0±1.0d	4.39±0.84cd	0.36±0.04bc
NiP	70.1±5.9c	199.1±15.2ab	16.8±1.6bc	28.8±4.3c	8.57±2.06b	0.34±0.04cd
SA+P	46.9±3.2d	152.5±14.8c	15.1±1.0cd	11.4±1.0d	4.77±0.69c	0.45±0.04a

注:同列数据后不同小写字母表示同一指标各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

根系分析结果(表2)表明,与对照相比,施磷不同程度增加根长和根比表面积,显著增加根体积,但处理间根粗无显著性差异。MAP、APP和NiP处理间根长无显著性差异,但显著高于对照、SSP和SA+P处理,MAP和APP处理根长是对照的2.84、2.74倍。SSP和SA+P处理与对照相比,无论是根长还是根比表面积,均无显著性差异。

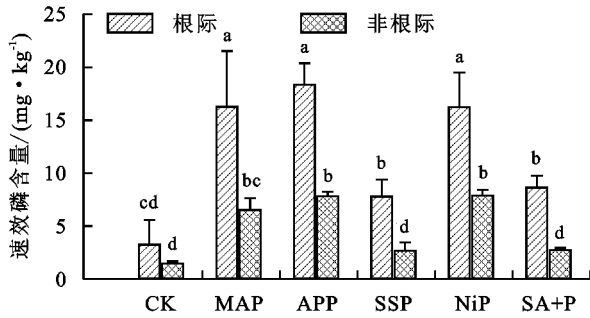
2.2 根际、非根际土壤速效磷含量

从图1可以看出,施磷后根际和非根际土壤速效磷含量均有不同程度上升,根际土壤速效磷含量显著高于非根际土壤,相较对照,5种磷肥均显著提高根际土壤速效磷含量,其中APP处理根际土壤速效磷含量最高,达到18.35 mg/kg,APP、MAP和NiP 3

种磷肥处理土壤根际速效磷含量无显著性差异,但显著高于SSP和SA+P处理;SSP和SA+P处理较对照显著提高土壤根际速效磷含量,分别达到7.78、8.62 mg/kg,分别提高140%和166%。SSP和SA+P处理与对照非根际土壤速效磷含量无显著性差异。

表2 不同磷肥品种对玉米根系生长发育的影响

处理	单盆根长/ 10 ³ cm	单盆根比表面积/ 10 ² cm ²	单盆根体积/ cm ³	根粗/ mm
CK	23.91±3.84b	24.39±3.69c	20.25±3.1e	0.33±0.01a
MAP	67.96±10.25a	67.30±9.64a	54.11±7.57c	0.32±0a
APP	65.48±15.64a	57.94±10.31a	88.90±5.55a	0.33±0.02a
SSP	35.34±7.24b	34.04±6.64c	26.44±4.92e	0.31±0.02a
NiP	55.55±10.34a	47.82±8.78b	76.15±15.88b	0.32±0.03a
SA+P	31.99±4.45b	28.24±2.88c	37.46±2.99d	0.33±0.02a



注:不同小写字母表示根际和非根际土壤速效磷含量差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 不同磷肥品种对根际和非根际土壤速效磷含量的影响

2.3 磷肥利用效率

玉米盆栽试验结果(表 3)表明,无论地上部和根

表 3 玉米磷含量、累积量及磷肥利用效率

处理	地上部		根系		单盆总 累积量/mg	磷肥利用 效率/%
	磷含量/ ($g \cdot kg^{-1}$)	单盆磷 累积量/mg	磷含量/ ($g \cdot kg^{-1}$)	单盆磷 累积量/mg		
CK	$1.14 \pm 0.07c$	$8.98 \pm 0.84d$	$0.83 \pm 0.05b$	$2.71 \pm 0.40d$	$11.55 \pm 0.98d$	
MAP	$0.84 \pm 0.05e$	$27.93 \pm 3.27b$	$0.51 \pm 0.01d$	$4.92 \pm 0.36b$	$33.23 \pm 3.97b$	$19.42 \pm 0.68b$
APP	$1.02 \pm 0.04d$	$42.01 \pm 1.81a$	$0.66 \pm 0.05c$	$6.49 \pm 0.45a$	$49.02 \pm 2.09a$	$36.75 \pm 2.17a$
SSP	$1.54 \pm 0.11a$	$17.09 \pm 2.57c$	$1.01 \pm 0.05a$	$4.05 \pm 0.30c$	$21.40 \pm 2.54c$	$10.94 \pm 2.28c$
NiP	$1.01 \pm 0.12d$	$28.67 \pm 1.38b$	$0.55 \pm 0.09d$	$4.84 \pm 0.16b$	$33.74 \pm 1.31b$	$21.43 \pm 1.64b$
SA+P	$1.30 \pm 0.06b$	$14.85 \pm 0.78c$	$0.81 \pm 0.05b$	$3.71 \pm 0.66c$	$18.88 \pm 1.18c$	$7.92 \pm 1.56c$

2.4 无机磷组分

石灰性土壤 $Ca-P$ 是无机磷存在的主要形式,本试验中 $Ca-P$ 占无机磷比例为 $68.70\% \sim 70.72\%$ 。从图 2 可以看出,施用不同磷肥品种后土壤无机磷组分比例呈现不同的变化特征。施用 MAP、APP 和 NiP 处理相较于对照 Ca_2-P 分别提高 0.53% 、 0.69% 和 0.66% 、 Ca_8-P 分别提高 0.74% 、 0.86% 和 3.69% 、 $Ca_{10}-P$ 、 $Al-P$ 、 $Fe-P$ 和 $O-P$ 虽然较对照绝对值有所上升,但由于无机磷总量增加,相对比例有不同程度下降。SSP 和 SA+P 处理相较于对照, $O-P$ 比例分别上升 0.81% 和 1.37% ,SSP 处理 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 比例与对照间变幅不明显,但 SA+P 处理 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 比例较对照分别下降 1.72% 和 0.73% 。

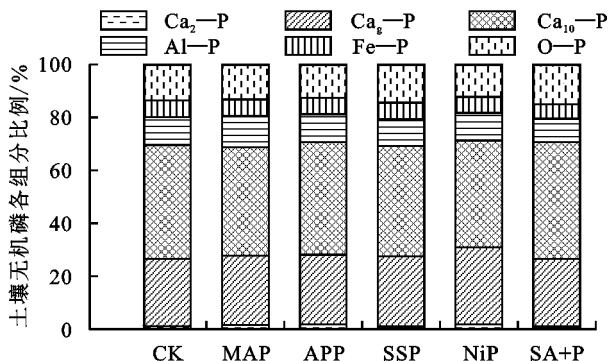


图 2 不同磷肥品种对非根际土壤无机磷组分比例的影响

由图 3 可知,施用不同磷肥后,无机磷组分 Ca_2-P 、 Ca_8-P 、 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 含量出现较大变

系磷累积量、总累积量还是磷肥利用效率,均表现出相同的规律,即 APP 处理显著高于 MAP 和 NiP 处理,MAP、NiP 处理显著高于 SSP 和 SA+P 处理,SSP、SA+P 处理显著高于对照(CK)。由于地上部和根系生物量的增加,MAP、APP 和 NiP 处理的地上部和根系磷含量存在一定的稀释下降,相较于对照,地上部和根系磷含量下降幅度分别为 $10.5\% \sim 23.3\%$ 、 $20.5\% \sim 38.6\%$ 。APP 处理表现出相当可观的磷素累积量和磷肥回收利用效率,其总 P 累积量达到 49.02 mg/盆 ,较对照高 37.47 mg/盆 ,磷肥回收利用效率达到 36.75% ,比 MAP 和 NiP 处理高出 17.33% 和 15.32% 。

化, $Ca_{10}-P$ 和 $O-P$ 含量的变化幅度相对较小。相较于对照,MAP 和 APP 处理显著增加根际、非根际土壤的 Ca_2-P 、 Ca_8-P 和 $Fe-P$ 含量,NiP 处理显著增加非根际的 Ca_2-P 和 Ca_8-P 含量,且根际 Ca_2-P 和 Ca_8-P 含量显著低于非根际土壤,表现出与 MAP 和 APP 处理不同的磷组分含量特征。相较于对照,SSP 与 SA+P 处理 Ca_2-P 、 Ca_8-P 、 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 含量基本维持在相同水平上,但 SA+P 处理的非根际 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 含量较根际出现显著下降。

3 讨论

3.1 不同磷肥品种对玉米生长发育的影响

本试验结果表明,聚磷酸铵 APP 在石灰性土壤上效果最好,其株高、叶面积、地上部干重均显著高于其他处理。由于石灰性土壤磷移动性差和易固定的特点,容易限制作物吸收磷素^[16],而 APP 的移动性优于其他肥料处理,有研究^[20]表明,在玉米的灌浆期和收获期,0—10 cm 土层中 APP 处理的有效磷含量显著高于 MAP 处理,在灌浆期的 20—30 cm 土层和收获时期的 10—20 cm 土层,APP 处理的速效磷含量显著高于磷酸脲;同时由于 APP 为聚合态的磷酸盐,其在土壤中逐步水解,水解产物正磷酸根可以被作物直接吸收利用,这也能降低磷在土壤中的固定,某种程度上同步植株发育进程^[25]。高艳菊等^[26]的研究结果表明,APP 的聚合度对土壤磷的有效性影

响显著高于聚合率,聚合度越高,磷酸盐的水解断链速率越缓慢^[27],玉米苗期应用 APP 作为种肥时,肥料效应对聚合度组成的反应有较大不同^[28]。因此进一步探讨、明确聚磷酸铵磷素在土壤中的转化过程与作物的生物学匹配规律可能在未来的研究中至关重要。磷酸一铵和硝酸磷肥肥效虽然不及聚磷酸铵,但在提高土壤的供磷水平方面和影响玉米生长发育进程方面来看,与 CK 相比,提高幅度依然很大。以往有类似的研究^[29],基于石灰性土壤的性质,通常认为酸性磷肥效果更为明显,但同时亦需要考虑磷肥中的磷酸盐形态与有效性,本试验中所用磷肥除聚磷酸铵

为中性磷肥(pH=7.14)外,其他几种磷肥均为酸性磷肥。但从本试验的效果看,过磷酸钙(SSP)与硫酸铵+过磷酸钙(SA+P)处理效果并不显著,虽然有研究^[17,19]表明,硫酸铵+过磷酸钙(SA+P)在石灰性土壤可以局部降低土壤根际 pH,进而促进磷素吸收利用,但在玉米季施肥方式上宜采用条施或点施的模式才能达到磷效率提升的效果。本试验条件下,SA+P 处理与土壤充分混匀的模式可能对磷肥肥效有所影响,混施相对于条施或点施的方式铵根离子浓度下降,根际分泌 H⁺ 有限,局部酸化活化磷素能力减弱,进而影响玉米对磷素的吸收利用。

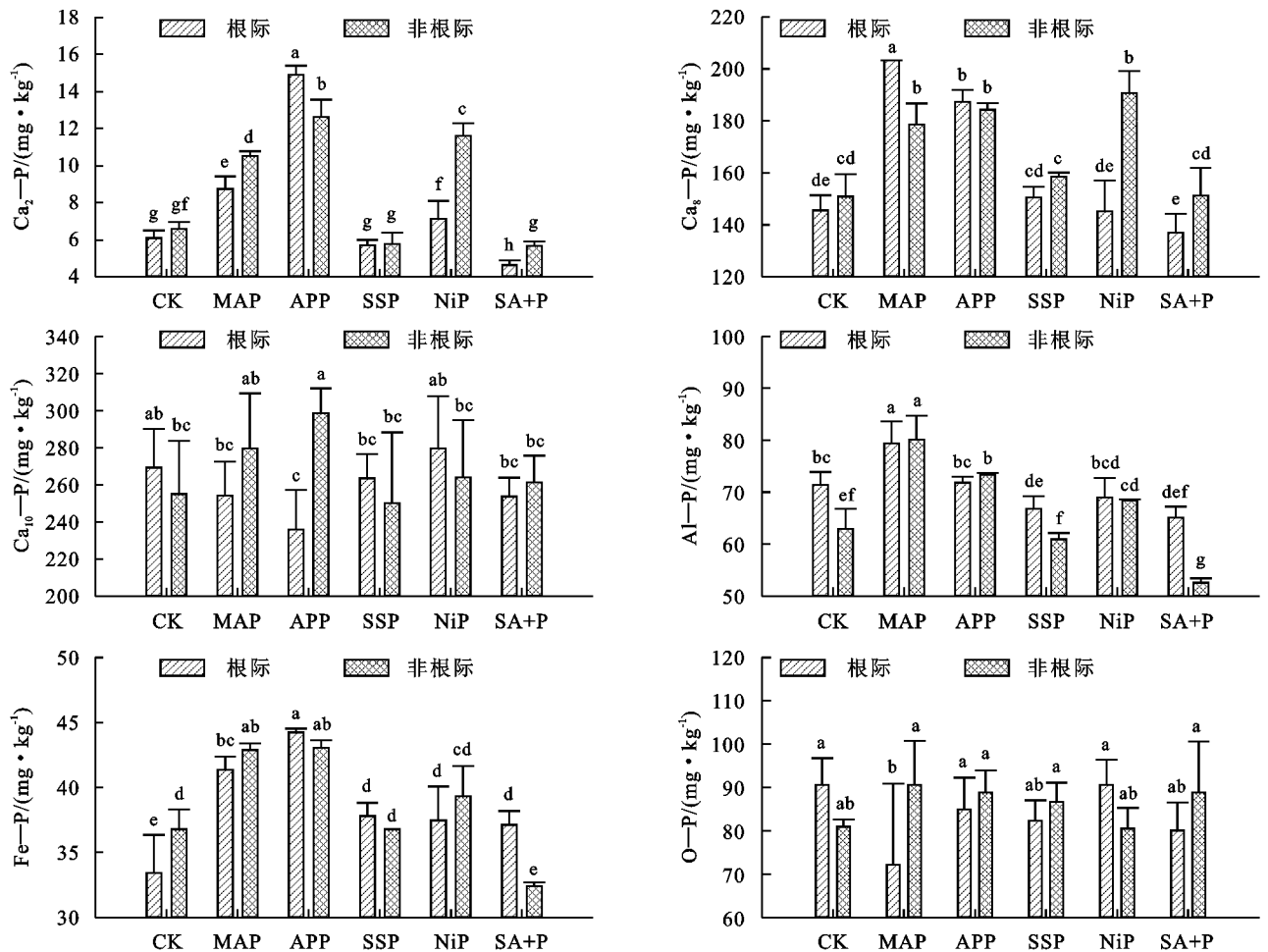


图 3 不同磷肥品种对土壤无机磷组分含量的影响

3.2 根际、非根际土壤无机磷组分对玉米磷素吸收利用的影响

磷肥施用可以在较短时间内增加土壤有效磷含量和各形态无机磷,在土壤—植物交互作用的体系中,磷肥引起的土壤无机磷浓度变化和作物吸收利用磷强度控制着土壤的磷平衡点。一方面,在磷肥无机磷供应充足的状态下,石灰性土壤的磷向 Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca₁₀-P 转化;另一方面,作物根际磷的吸收利用导致磷平衡点的变化,无机磷组分转化过程发生改变。从本试验的结果来看,短期内磷肥品种主要引起 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P

的变化,O-P 和 Ca₁₀-P 含量变化不显著,这与张锡洲等^[30]和王海龙等^[31]的试验结果一致。磷肥—土壤—作物体系中根际、非根际无机磷组分含量上存在较大差异,根际、非根际的 APP、MAP 和 NiP 处理 Ca₂-P 含量均显著高于对照、SSP 和 SSP+SA 处理,但 APP 处理的根际土 Ca₂-P 显著高于非根际土,而 MAP 和 NiP 处理则表现出非根际土高于根际土,Ca₈-P 含量 NiP 处理也表现出相同的情况。蔡秋燕等^[14]研究发现,由于根际具有较强活化吸收磷素能力,Ca₂-P、Ca₈-P 含量有所降低,陈磊等^[32]的研究也有类似的结论。从本试验结果来看,可能归因

于 APP 处理可持续水解的能力强,其根际土壤的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量并没有产生下降的现象,而 MAP 和 NiP 处理在根际明显促进磷的吸收,继而形成 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的耗竭区, NiP 和 MAP 处理非根际根际 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量差分别为 4.46, 1.78 mg/kg, 达到显著水平, NiP 处理在 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的根际非根际差值甚至显著达到 45.36 mg/kg(图 3), 这表明 NP 复合能促进根际磷素的吸收, 而硝酸磷肥 NiP 处理比磷酸一铵 MAP 处理中氮浓度更高, 也可能是其比形成根际 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 耗竭更多的原因。

石灰性土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 作为植物磷吸收有效磷源, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Fe-P 和 Al-P 作为缓效磷源, O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 作为潜在磷源已得到较多研究者的证实^[5,16,22], 本试验结果表明, 植株吸磷量与非根际土壤除 O-P 以外的其他磷含量均呈正相关关系, 根际土壤中植株吸磷量则与 Olsen-P、 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、

Fe-P 和 Al-P 呈极显著正相关关系, 与 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、O-P 无相关关系; 从相关系数来看, 根际中各磷指标植株有效性为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ (0.655 5) > Olsen-P (0.569 4) > Fe-P (0.543 0) > $\text{Ca}_8\text{-P}$ (0.514 8) > Al-P (0.214 4), 其中无机磷组分中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、Fe-P 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 是植物吸收有效的 3 种磷源, 与土壤 Olsen-P 呈显著正相关关系 ($P < 0.01$) (表 4), 张英鹏等^[33] 的室内土柱模拟试验表明, 褐土耕层土壤中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、Fe-P 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 是速效磷的主要磷源, 焦亚鹏等^[34] 在黄土高原旱作农业区土壤中发现, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是土壤有效磷的主要磷源, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Fe-P 是主要的潜在磷源, 与本研究结果类似。本试验条件下, Al-P 与 Olsen-P 之间没有显著性关系, 但与植株磷吸收量呈显著正相关, 由于 Fe-P 和 Al-P 一般只能对 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 起作用, 间接影响植物磷素吸收利用过程, 其与土壤条件和根际环境密切相关, 尚需进一步研究和探讨。

表 4 根际和非根际土壤无机磷组分、有效磷与植株磷累积量的相关关系

土壤区	磷形态	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	Al-P	Fe-P	O-P	Olsen-P	植株磷累积量
根际	$\text{Ca}_2\text{-P}$	1	0.5242***	0.5066***	0.1948	0.3251**	0.0008	0.3924***	0.6555***
	$\text{Ca}_8\text{-P}$		1	0.0430	0.2164*	0.4966***	0.1584	0.3946**	0.5148***
	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$			1	0.0450	0.0276	0.1123*	0.0060	0.0993
	Al-P				1	0.1387	1.938×10^{-8}	0.0051	0.2144*
	Fe-P					1	0.0008	0.2863**	0.5430***
	O-P						1	0.0275	0.0025
	Olsen-P							1	0.5694***
非根际	$\text{Ca}_2\text{-P}$	1	0.7108***	0.1027	0.4869***	0.5468***	0.0006	0.4152***	0.6881***
	$\text{Ca}_8\text{-P}$		1	0.0429	0.3615**	0.3731**	0.0118	0.2923**	0.6318***
	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$			1	0.1402	0.2315*	0.1522	0.2860**	0.2887**
	Al-P				1	0.5475***	0.0262	0.4783***	0.3848**
	Fe-P					1	0.0286	0.5034***	0.6072***
	O-P						1	0.1976*	0.0490
	Olsen-P							1	0.5027***

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; *** 表示 $P < 0.001$ 。

4 结论

5 种肥料施用对比试验发现, 不同磷肥品种对玉米的生物学指标和土壤速效磷含量产生较大差异, 导致磷肥回收利用效率为 7.92%~36.75%。聚磷酸铵磷肥表现出最高的磷肥利用效率和根际非根际有效磷含量, 聚磷酸铵磷肥显著增加玉米的株高、叶面积、地上部和根系干重, 肥料效应表现出聚磷酸铵 (APP) > 硝酸一铵 (MAP)、硝酸磷肥 (NiP) > 过磷酸钙 (SSP)、硫酸铵+过磷酸钙 (SA+P) 的趋势, 石灰性土壤上聚磷酸铵是一种表现良好的玉米磷肥类型。

参考文献:

[1] 杨威, 李忠, 李仪琳, 等. 磷肥对农作物产量和品质的影响研究综述[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(20): 66-67.

[2] 丁玉川, 陈明昌, 程滨, 等. 作物磷营养效率生理生化基础研究进展[J]. 山西农业科学, 2004, 23(3): 25-29.

[3] Li H G, Huang G Q, Meng Q F, et al. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review[J]. Plant and Soil, 2011, 349: 157-167.

[4] 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): 915-924.

[5] Shen J B, Yuan L X, Zhang J L, et al. Phosphorus dynamics: From soil to plant[J]. Plant Physiology, 2011, 156: 997-1005.

[6] Ju X T, Kou C L, Christie P, et al. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems

- on the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(2): 497-506.
- [7] Blake L, Mercik S, Koerschens M, et al. Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three European long-term field experiments[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 56(3): 263-275.
- [8] 邓燕. 集约化条件下小麦和玉米基于根际过程的根层磷素调控[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [9] 彭正萍, 张家铜, 袁硕, 等. 不同供磷水平对玉米干物质和磷动态积累及分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 793-798.
- [10] 米国华, 邢建平, 陈范骏, 等. 玉米苗期根系生长与耐低磷的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(5): 468-472.
- [11] 张玉斌, 曹庆军, 张铭, 等. 施磷水平对春玉米叶绿素荧光特性及品质的影响[J]. *玉米科学*, 2009, 17(4): 79-81.
- [12] 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): 58-66.
- [13] 刘建玲, 张福锁. 小麦—玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化 II. 土壤 Olsen—P 及各种形态无机磷的动态变化[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 360-364.
- [14] 蔡秋燕, 张锡洲, 李廷轩, 等. 不同磷源对磷高效利用野生大麦根际土壤磷组分的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(11): 3207-3214.
- [15] 李阿荣, 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤适用磷肥品种的研究[J]. *土壤*, 1985, 17(6): 319-322.
- [16] 刘世亮, 介晓磊, 翟东明, 等. 不同磷源在玉米根际的形态转化及有效性研究[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2003, 24(2): 54-58.
- [17] 马琴, 刘小雨, 冉瑾怡, 等. 磷肥减量结合硫酸铵配施提高西北地区旱地春玉米磷素利用效率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(6): 1047-1058.
- [18] 张少民, 白灯莎·买买提艾力, 刘盛林, 等. 根际启动肥能够提高棉花磷效率和产量[J]. *棉花学报*, 2020, 32(2): 121-132.
- [19] Ma Q, Zhang F, Rengel Z, et al. Localized application of NH_4^+ -N plus P at the seedling and later growth stages enhances nutrient uptake and maize yield by inducing lateral root proliferation[J]. *Plant and Soil*, 2013, 372: 65-80.
- [20] 张皓禹, 张君, 张凤麟, 等. 滴灌条件下不同磷肥品种对土壤磷有效性及玉米产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 189-195.
- [21] 杨旭, 张承林, 胡义熬, 等. 农用聚磷酸铵在土壤中的有效性研究进展及在农业上的应用[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(3): 1-6.
- [22] 亢龙飞, 王静, 朱丽娜, 等. 不同形态磷酸盐及施用方式对石灰性土壤磷移动性和有效性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(7): 1179-1187.
- [23] Francis C A, Rutger J N, Palmer A F E. A rapid method for plant leaf area estimation in maize (*Zea mays* L.) 1[J]. *Crop Science*, 1969, 9(5): 537-539.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] Leytem A B, Westermann D T. Phosphate sorption by Pacific Northwest Calcareous soils[J]. *Soil Science*, 2003, 168(5): 368-375.
- [26] 高艳菊, 亢龙飞, 褚贵新. 不同聚合度和聚合率的聚磷酸磷肥对石灰性土壤磷与微量元素有效性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1294-1302.
- [27] 王蕾, 邓兰生, 涂攀峰, 等. 聚磷酸铵水解因素研究进展及在肥料中的应用[J]. *磷肥与复肥*, 2015, 30(4): 25-27.
- [28] 陈小娟, 杨依彬, 龚林, 等. 三种不同聚合度组成的聚磷酸铵对玉米苗期生长的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(2): 337-342.
- [29] Khurana H S, Saroa G S, Vig A C. Nitrophosphates and DAP are equally effective as P fertilizers for various crop species grown in rotation on a Typic Haplustept[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 68(3): 273-281.
- [30] 张锡洲, 阳显斌, 李廷轩, 等. 不同磷效率小麦对磷的吸收及根际土壤磷组分特征差异[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(15): 3083-3092.
- [31] 王海龙, 张民, 刘之广, 等. 温度和施磷对石灰性潮土小麦苗期生长及磷形态的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4135-4142.
- [32] 陈磊, 云鹏, 高翔, 等. 磷肥减施对玉米根系生长及根际土壤磷组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1548-1557.
- [33] 张英鹏, 陈清, 李彦, 等. 不同磷水平对山东褐土耕层无机磷形态及磷有效性的影响[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(7): 245-248.
- [34] 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.