

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

张皓禹, 张君, 张凤麟, 刘地, 危常州

(石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003)

摘要: 通过模拟试验及田间试验研究不同磷肥施用后对土壤磷有效性的动态变化和分布特点, 以及玉米磷吸收和产量响应的影响。田间和模拟试验包括4个处理, 分别为对照(不施磷肥)、MAP(磷酸一铵)、UP(磷酸脲)和AAP(水溶性聚磷酸铵)。模拟试验中, 不同磷肥均提高土壤中有效磷含量, APP处理10—15 cm土层有效磷含量增加最多。在均匀的养分投入和管理水平下, 3种磷肥品种均有土壤酸化效果, 其中UP处理最为显著。田间试验中, 玉米生长后期, APP处理的土壤有效磷含量在深层土壤分布较高, UP处理土壤pH较低, 均有利于改善土壤的供磷能力, 提高土壤有效磷含量; APP处理对根系发育有显著的促进作用, 玉米组织磷含量和磷吸收量最大, 产量最高(14.40 t/hm²)。3种磷肥中, APP处理移动性较好, 土壤深层有效磷含量增加, 利于根系生长和养分的吸收, 提高产量。水溶性聚磷酸铵(APP)是一种适合于玉米灌溉施肥的肥料。

关键词: 玉米; 磷肥品种; 产量; 植株吸磷量; 磷肥利用率

中图分类号: S143; S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0189-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.030

Effects of Different Phosphorus Fertilizers on Soil Phosphorus Availability and Maize Yield Under Drip Irrigation

ZHANG Haoyu, ZHANG Jun, ZHANG Fenglin, LIU Di, WEI Changzhou

(Agricultural College of Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003)

Abstract: The effects of different phosphorus (P) fertilizers on the dynamics and distribution of soil P availability and the maize P uptake and yield were studied by the simulation experiments and field experiments. Both experiments included 4 P fertilizers application treatments respectively, which were control (no phosphate fertilizer), MAP (monoammonium phosphate), UP (urea phosphate), and AAP (water-soluble ammonium polyphosphate). In the simulation experiments, the available P contents in soil were increased by different P fertilizers, and the highest P content was observed in the APP applied soil of 10—15 cm. Under the general nutrient input and management level, soil acidification was found in all three P fertilizers treatments, of which UP gave the most significance. In the field experiment, the available P content in soil treated by APP was higher in deep soil at the late growing period of maize, and the pH value of soil treated by UP was lower, both of which were conducive to improving soil P supply capacity and improving soil available P content. The APP application had a significant promoting effect on root development, resulting in the highest P content and P absorption in maize tissues and the highest yield (14.40 t/hm²). Among the three P fertilizers, APP mobility was relatively better, resulting in the increased contents of available P in the deep soil, which could be conducive to root growth and nutrient absorption, and improving maize yield. Therefore, APP is a kind of P fertilizer suitable for maize water and fertilizer management.

Keywords: maize; P fertilizer varieties; yield; phosphorus uptake by plants; phosphorus fertilizer use efficiency

水肥一体化在新疆广泛应用,表现出显著的节水节肥和增产效应^[1]。氮肥水肥一体化已证明可提高氮肥利用率和增加作物产量^[2]。新疆大部分土壤为石灰性土壤,由于大量重碳酸盐的存在,至少有70%~90%

的磷在当季被土壤固定^[3],传统上磷肥多作基肥施用,但由于磷在土壤中移动性较弱,易被固定,导致磷肥当季利用率较低,仅为10%~25%^[4-5]。在土壤中迁移距离近,其水肥一体化的效果与传统基施相比并

收稿日期:2018-10-17

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0201808)

第一作者:张皓禹(1995—),男,硕士研究生,主要从事植物营养研究。E-mail:849592583@qq.com

通信作者:危常州(1966—),男,教授,主要从事植物营养研究。E-mail:changzhouwei@126.com

不确切。生产中越来越多的二元复合肥如滴灌一铵、滴灌二铵、全水溶性三元复合肥通过灌溉施肥方式使用^[6]。然而不同形态磷肥在水肥一体化中的效果研究较少,因此,选择合适磷肥品种是磷肥用于灌溉施肥的重要前提^[7]。

相关研究^[8]表明,在石灰性土壤上,磷酸或硫酸滴灌施肥能够局部降低土壤 pH 并提高土壤有效磷含量。生理酸性肥料如硫酸铵利用植物代谢产生的分泌酸间接使根际土壤酸化,也能显著提高氮肥和磷肥的利用率^[9]。相关研究^[10]也指出,固体磷肥易被土壤固定,其移动性很差,而液体磷肥随水施用过程中磷的扩散范围较大,施入的磷在土壤中分布较为均匀,具有较好的移动性。低聚合度聚磷酸铵溶解度大,被土壤固定的比例较小,且具有较好的螯合和缓释作用^[11-12],在石灰性土壤上移动距离长,可能是一种适合于滴灌的新型磷肥^[7]。

本文以玉米为研究对象,选用滴灌一铵、磷酸脲和水溶性低聚磷酸铵 3 种磷肥为试验材料,通过盆栽试验模拟滴灌,分析 3 种磷肥土壤有效磷含量及磷素在不同土层的分布,以及通过田间试验研究磷肥对玉米根系形态和磷素吸收的影响,探讨不同种类磷肥在石灰性土壤上对玉米的生长及产量的影响,为实际生产中玉米磷肥的选择及其增产原理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017 年在新疆石河子大学农学院试验站进

行,属大陆干旱气候,年均气温 6.5~7.2℃,年降水量 125.2~207.6 mm,无霜期 168~171 天。供试土壤为灌耕灰漠土,质地为壤土,供试土壤养分情况为:碱解氮含量 42.63 mg/kg,速效磷含量 10.46 mg/kg,速效钾含量 138.84 mg/kg,有机质含量 15.74 g/kg,pH 7.81。

1.2 供试材料

玉米品种为“SC 704”(Zea mays L.),氮肥使用尿素(N 46%),磷肥用滴灌磷酸一铵(N 12%,P₂O₅ 61%)、磷酸脲(N 17%,P₂O₅ 44%)和水溶性聚磷酸铵(APP,N 18%,P₂O₅ 60%),钾肥用硫酸钾(K₂O 54%)。

1.3 试验设计

1.3.1 田间试验 本试验旨在研究不同品种磷肥对土壤 pH、土壤有效磷和玉米产量的影响研究。设计 4 种处理,分别为:(1) CK,不施磷肥处理,施氮钾肥;(2) MAP,磷肥选用磷酸一铵;(3) UP,磷肥选用磷酸脲;(4) APP,磷肥选用水溶性聚磷酸铵。小区面积 14 m²,区组随机排列,各处理重复 3 次,共计 12 小区。各处理氮磷钾施肥量相同,磷(P₂O₅)量 120 kg/hm²,施氮(N)量为 300 kg/hm²,施钾(K₂O)量为 90 kg/hm²。

试验田统一采用覆膜种植,机械点播,1 膜 4 行,膜上间距为 30—60—30 cm,株距 25 cm,理论株数 8.3×10⁴ 株/hm²。总灌水量 4 425 m³/hm²,灌水 8 次。试验区田间管理措施同其他大田一致。基肥中氮肥占 20%。不同种类的磷肥所含氮素定量计算后在各期氮肥施肥量中加以扣除(如基肥施肥在 20%的尿素用量中扣除相应的氮量)。各处理按相同比例追施氮磷肥,试验灌溉施肥方法见表 1。

表 1 灌水施肥设计

项目	灌水日期(月-日)									合计
	04-15	06-05	06-17	06-27	07-07	07-17	07-27	08-04	08-14	
灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)	—	645	605	605	605	605	605	450	300	4425
N/(kg·hm ⁻²)	60	30	20	20	20	60	60	15	15	300
氮追肥/%	20	10	—	20	—	20	20	5	5	—
P ₂ O ₅ /(kg·hm ⁻²)	—	18	12	12	12	36	18	6	6	120
磷追肥/%	—	15	10	10	10	30	15	5	5	—

1.3.2 模拟试验 本研究旨在明确不同磷肥在石灰性土壤中如何影响土壤磷的移动性和土壤 pH。该试验包含 4 种处理:(1) CK,不施磷肥处理,施氮钾肥;(2) MAP,磷肥选用磷酸一铵;(3) UP,磷肥选用磷酸脲;(4) APP,磷肥选用水溶性聚磷酸铵。每个处理重复 3 次,每个处理施同等磷量。

该试验与田间试验同时进行,采用直径 15 cm,深度 25 cm 的盆钵进行酸化模拟试验。取耕地的 0—20 cm 的土壤风干,过 5 mm 筛充分混匀以消除土壤的空间变异。每盆装土 5 kg,分层装土压实。装盆完成后按 20%土壤含水量灌水使土壤沉降(田间持水量为 25%),使土壤含水量为田间持水量的

80%。稳定后进行施肥处理。

各处理磷肥施肥方式均在第 1 次灌水时随水施入土壤,用量相当于大田施用量的 3 倍。大田试验施磷(P₂O₅)量为 120 kg/hm²,按土重 2 250 t 换算后每盆(5 kg)施磷量为 0.8 g。按等磷量原则,根据各肥料 P₂O₅ 的含量计算各处理施肥量为磷酸一铵 1.311 4 g/盆,磷酸脲 1.818 2 g/盆,水溶性聚磷酸铵 1.333 3 g/盆。模拟滴灌施肥,利用吊瓶将肥料溶于水中将滴头置于土盆中心,当土盆底部开始渗水时停止滴灌,平衡 5 h 开始取样,通过称重量法,每隔 3 天称重补水 1 次,培养期间所有处理土壤含水量维持在田间持水量的 70%。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 土壤取样 在试验 1 中灌溉后 2 天,以滴头为圆心,在距滴头 10 cm 处不同土层深度(0—10,10—20,20—40 cm)进行取样测定,风干后过 1 mm 筛。并且在试验 2 中施肥后 1 天收集土壤样品,分别在培养 1,7,15,30 天进行取样,土层深度为 0—5,5—10,10—15 cm。

土壤有效磷:采用 pH=8.5 的 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提土样,钼锑抗比色法测定。

土壤 pH:采用 1:2.5 的土水比,振荡 3 min,静置,用 pH 仪测定。

1.4.2 植株样品采集与测试指标 分别于拔节期、大喇叭口期、抽雄期、吐丝期、灌浆期和成熟期取各小区代表性植株 3 株;分茎、叶、穗轴、籽粒、苞叶 5 个部分,植株鲜样于 105 ℃ 杀青 30 min 后在 70 ℃ 烘干 72 h 后称重,记录干物质重。留小样粉碎后,分析不同部位养分吸收量(浓 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮)。

根系生长发育状况:分别于吐丝期、灌浆期取样 0—20,20—40,40—60 cm 分层取样,进行分层捡根收集在自封袋里。采用冲根法将根系清洗后放置在玻璃板上,用根系扫描仪获取根系 3000 dpi 的图像,用 WinRhizo 2004a 根系分析系统处理图像、获取总根长、根系直径、根密度、根体积等参数。

产量和产量结构:在玉米成熟后,选取一定面积对各处理进行测产,测定其穗行数、行粒数、穗粒数、千粒重、理论产量和实测产量。

1.5 相关参数计算

作物磷素积累量(kg/hm²)=植株磷含量(%)×单位面积干物质重(kg/hm²) (1)

磷肥利用率(%)=(施肥后春玉米成熟期收获时地上部吸收养分总量—未施肥处理玉米收获时地上部吸收养分总量)/磷肥施入量 (2)

磷肥偏生产力(kg/kg)=施肥后在成熟期收获的籽粒产量/磷肥施入量 (3)

磷肥农学效率(kg/kg)=(施肥后所获得玉米籽粒

产量—不施肥条件下的玉米籽粒产量)/磷肥施入量 (4)

1.6 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理和绘图,采用 SPSS 17.0 软件对数据进行差异显著性检验。

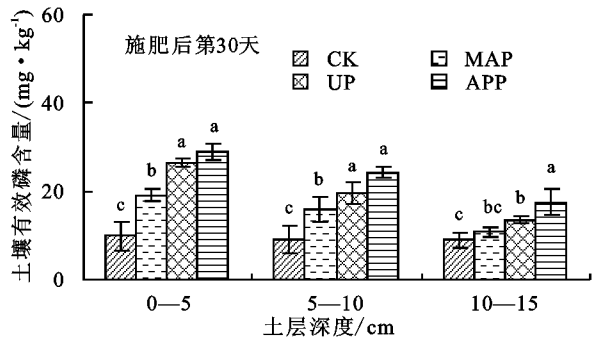
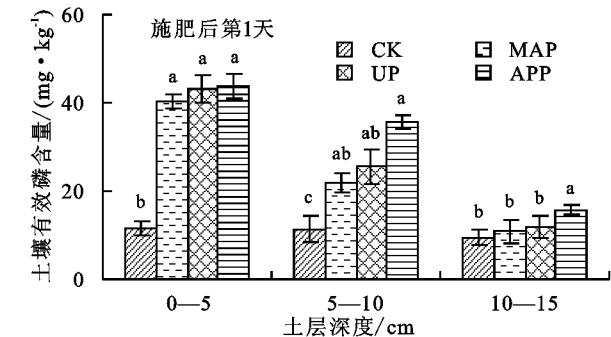
2 结果与分析

2.1 不同磷肥对土壤有效磷移动性和 pH 动态的影响

图 1 为模拟试验中不同磷肥施用后,第 1 天和培养 30 天后的不同土层深度土壤有效磷含量动态变化。与 CK 相比,施用不同磷肥后,土壤中有有效磷含量显著增加,但随着土层深度的增加呈现降低趋势。随着施肥时间的延长,0—10 cm 土层的土壤有效磷含量处于较高水平。

在施肥后第 1 天,不同土层深度的土壤有效磷含量均高于 CK,其中在 0—5 cm 土层中 MAP、UP 和 APP 处理中土壤有效磷含量均显著增加,分别是 CK 处理的 2.5,2.7,2.8 倍。在 5—10 cm 土层中,APP 处理的土壤有效磷最高,是 CK 处理的 2.1 倍(P<0.05),随着土层深度的增加,在 10—15 cm 土层中,MAP 和 UP 处理与 CK 相比,土壤有效磷含量差异不显著,但 APP 处理土壤有效磷含量显著升高,且是 CK 处理的 0.7 倍。

随着施肥后时间的延长,土壤有效磷含量有所降低,在施肥后的第 30 天,施用磷肥处理的土壤有效磷含量均高于 CK。在 0—5 cm 土层中,UP 和 APP 处理的土壤有效磷保持较高的水平,MAP 处理的有效磷含量有所降低,与初始值相比,降低显著(P<0.05)。在 5—10 cm 土层中,MAP、UP 和 APP 处理中土壤有效磷含量均显著高于 CK,而对于 10—15 cm 土层而言,APP 处理土壤有效磷含量高于其他各处理,施用磷肥后各土层的有效磷含量有一定的差异,尤其是在 10—15 cm 土层,APP 处理土壤有效磷含量最高,说明水溶性磷肥具有较好的水溶性,螯合性及缓释作用性不易被土壤吸附固定,磷素趋于向深层土壤移动。



注:图中不同字母表示各处理间差异显著(P<0.05)。

图 1 不同磷肥施用后土壤有效磷含量的变化

图 2 为模拟试验中土壤 pH 的动态变化。CK 处理的土壤 pH 保持上升的趋势,施肥 30 天后的 pH

与初始 pH 相比,增加了 0.17 个单位。不同磷肥施用后,土壤 pH 均有所降低,但由于土壤缓冲能力较

强,MAP 和 APP 处理在施肥 30 天后土壤 pH 分别增加 0.18,0.09 个单位。相反,对于 UP 处理而言,随着施入时间的延长,土壤中 pH 逐渐降低。在施用 UP 磷肥 30 天后,土壤 pH 比初始值降低了 0.04 个单位,与 CK 相比,土壤 pH 下降了 0.41 个单位。

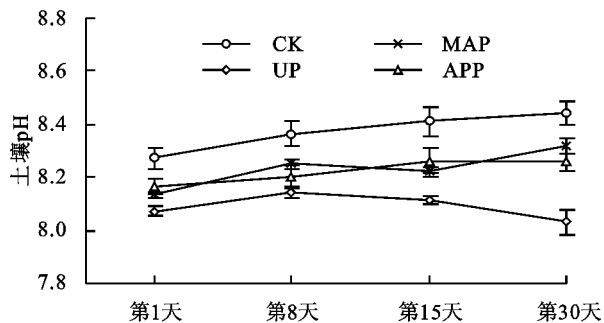


图 2 不同磷肥施用后土壤 pH 的动态变化

2.2 不同磷肥对玉米各时期土壤有效磷含量的影响

不同磷肥处理后,玉米不同时期土壤中有有效磷含量随着土层深度的增加呈降低趋势(图 3),各生育期中以 0—10 cm 土层的土壤有效磷含量较其他土层相比较,其中 APP 处理在各土层深度土壤的有效磷含量均高于其他处理。

在玉米吐丝期,不同土层深度,施用磷肥处理的土壤有效磷含量均高于对照,其中在 0—10 cm 土层,MAP、UP 和 APP 处理中土壤有效磷含量均显著增加,分别提高了 48%,62%和 60%,但 3 种施肥处理间各土层深度土壤有效磷含量差异并不显著。

在玉米灌浆期,土壤有效磷含量的变化趋势同吐丝期一致,但施肥处理间有一定差异。在 0—10 cm 土层,施磷肥处理有效磷含量均显著增加,且 UP 和 APP 处理的效果显著高于 MAP,分别升高 16%和 20%。在 20—30 cm 土层,APP 处理的土壤有效磷含量最高,显著高于 UP 和 CK 处理。与 CK 相比,随着土层深度增加,在 30—40 cm 土层 MAP 和 UP 处理土壤有效磷含量差异不显著,但 APP 处理显著增加。

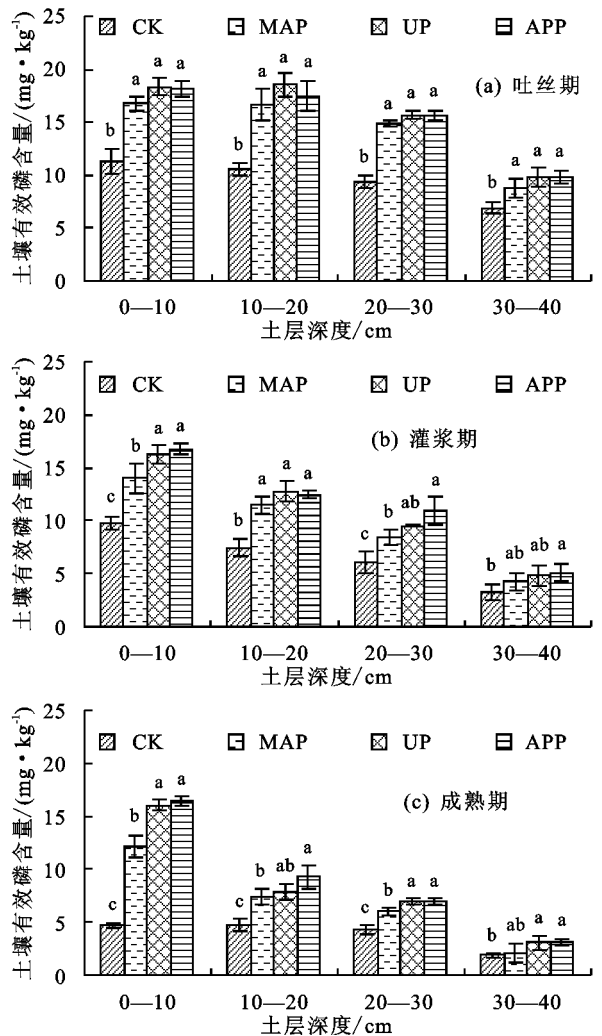
在玉米成熟期不同土层深度中,除 30—40 cm MAP 处理的土壤有效磷含量与 CK 相比差异不显著外,其他处理均显著升高。其中 UP 和 APP 的土壤有效磷含量较高,说明 UP 和 APP 的磷肥施用效果优于 MAP 处理。

不同时期,施用磷肥后各土层的速效磷含量有一定的差异,到成熟期后,UP 和 APP 处理土壤有效磷含量显著高于 MAP 处理,尤其是 0—10 cm 土层。

2.3 不同磷肥品种对土壤 pH 的影响

施用磷肥后各土层的土壤 pH 有一定的差异(图 4),在 0—10 cm 土层深度,与 CK 处理相比,MAP 和 APP 处理施肥后对土壤 pH 无显著影响,但 UP 处理土壤 pH 显著降低,减少了 0.14 个单位;在 10—20

cm 土层深度,UP 处理土壤 pH 也显著降低,减少了 0.11 个单位,说明施入 UP 磷肥能够显著降低土壤的 pH;在 20—30,30—40 cm 土层中,不同磷肥品种土壤的 pH 差异不显著,各处理 pH 随着土层深度的增加有所增加。



注:图中不同字母表示各处理差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 3 不同磷肥品种对玉米不同生育期土壤有效磷含量的影响

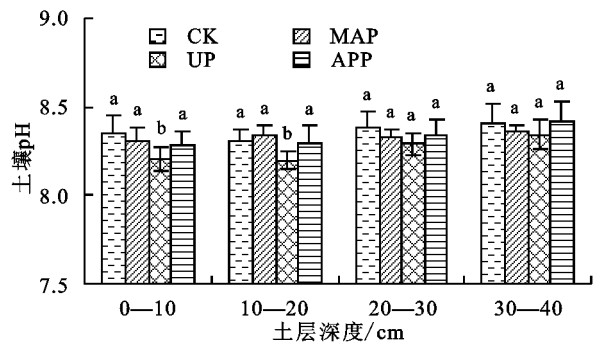


图 4 不同磷肥品种对土壤 pH 的影响

2.4 不同磷肥品种对玉米根系生长的影响

吐丝期和灌浆期是玉米根系生长发育最快的时期,因此针对这 2 个时期进行玉米根系生长发育的观测。从表 2 可以看出,不同磷肥处理对玉米根系生长发育具有显著影响。在玉米吐丝期,与 CK 相比,

MAP、UP 和 APP 处理的根重显著升高,分别增加 109%,129%和 169%。各处理间相比,APP 处理的玉米根重、根长和比表面积均显著高于 MAP 和 UP 处理;直径显著高于 MAP 处理,但与 UP 处理差异不显著;根体积则与 MAP 和 UP 处理无显著差异。

在玉米灌浆期,施用磷肥可有效提高根系的生长,尤其是 UP、APP 处理,与 CK 相比,UP、APP 处理显著升高,但 MAP 处理的玉米根系根重和根长较 CK 相比无显著差异;各处理间相比,APP 处理的根系各指标在灌浆期与 UP 处理无显著差异,长势基本一致,但除根系直径外其他指标均显著高于 MAP 处理。

2.5 不同磷肥对玉米生育期干物质积累量和磷素吸收积累动态的影响

从图 5 可以看出,玉米干物质积累量随着出苗后天数的增加逐渐增加,且呈现“S”形增长趋势。3 种磷肥均提高玉米干物质积累量,各磷肥处理干物质积累量大小分别为 APP>UP>MAP>CK,较 CK 分别增加 29.74%,36.65%和 43.48%;对比 3 种磷肥处理对玉米干物质积累的影响显示,APP 处理较 UP、MAP 处理干物质积累量分别增加 5.34%和 10.61%。

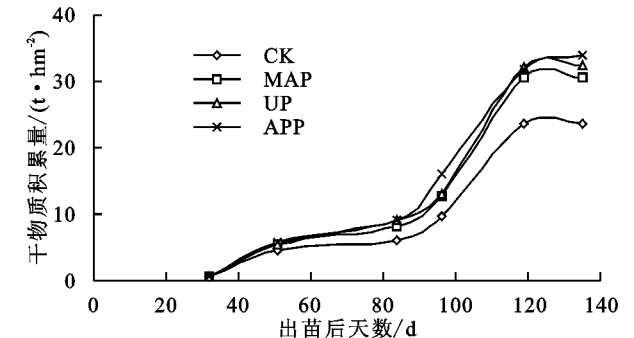


图 5 不同磷肥品种对玉米干物质积累量和玉米磷素积累的影响

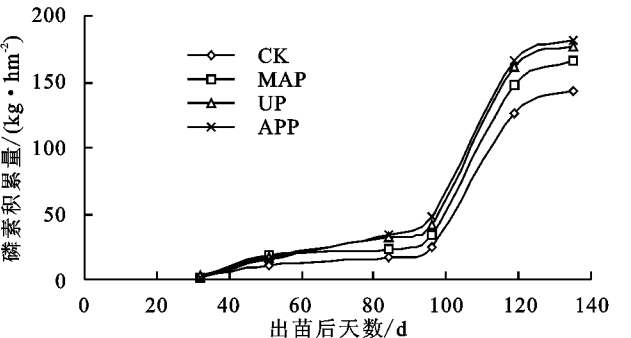
从表 3 可以看出,不同磷肥对玉米地上部磷素高速累积始期和氮素最大累积速率时间均不同,各处理玉米地上部磷素高速累积始期较 CK 相比均提前,且磷素快速积累高峰期也随之提前,其中 APP 处理玉

表 2 不同磷肥处理对玉米根系发育状况的影响

生育期	处理	根重/ g	根长/ cm	比表 面积/cm ²	直径/ mm	根体积/ cm ³
吐丝期	CK	4.56c	9751.5d	1593.4c	0.52c	21.3b
	MAP	9.54b	19157.5c	3653.4b	0.62b	54.9a
	UP	10.45b	22883.5b	4031.5b	0.65a	57.7a
	APP	13.51a	27986.1a	4862.0a	0.65a	67.3a
灌浆期	CK	7.99b	12423.8b	2173.2b	0.55b	30.7b
	MAP	10.27b	13763.5b	2519.5b	0.61a	37.0b
	UP	13.55a	22931.0a	4408.4a	0.61a	69.1a
	APP	14.15a	22794.7a	4610.6a	0.63a	75.6a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

不同肥料品种中玉米植株磷吸收量也不同(图 5),且与玉米干物质积累量变化趋势基本相同,在出苗后 96~119 天玉米磷素积累最快。3 种磷肥处理较 CK 玉米磷素积累量分别增加 16.56%,23.72%和 27.07%,说明磷肥的施用可以提高玉米对磷的吸收。APP 处理较 UP 和 MAP 处理分别增加 6.15%和 9.02%,表明水溶性聚磷酸铵与磷酸脲和磷酸一铵相比对玉米磷素积累更为明显。



米地上部磷素高速累积始期和氮素最大累积速率时间为 91.0,103.8 天,APP 处理磷素最大累积速率最高,说明施用水溶性聚磷酸铵肥料具有较高的磷素累积能力。

表 3 不同磷肥品种对玉米地上部磷素积累 Logistic 方程

处理	拟合方程	t_0	t_1	t_2	Δt	V_{max}	R^2
CK	$y=147.18/(1+\exp(14.18-0.13t))$	106.6	96.7	116.5	19.8	5.44	0.981
MAP	$y=173.37/(1+\exp(12.86-0.12t))$	105.4	94.6	116.2	21.6	5.19	0.984
UP	$y=186.98/(1+\exp(11.52-0.11t))$	104.8	92.8	116.7	23.9	5.36	0.985
APP	$y=193.27/(1+\exp(10.69-0.10t))$	103.8	91.0	116.6	25.6	5.50	0.981

2.6 不同磷肥品种对玉米产量的影响

从表 4 可以看出,与 CK 相比,各施磷处理产量均显著增加,以水溶性聚磷酸铵处理(APP)籽粒产量最高,达 14.40 t/hm²。3 个磷肥处理中单株穗数和千粒重均显著高于 CK,分别增加 17.0%,17.8%和 21.4%,但实收株数均无显著差异。且 APP 处理中

千粒重显著高于其他处理,较 UP、MAP 分别提高 3.8%和 3.1%。比较单株穗数,3 个施磷处理均显著高于 CK,APP 处理与 UP 处理差异不显著,但显著高于 MAP 处理及 CK,结果表明,不同磷肥通过穗粒数及千粒重来影响玉米产量。

2.7 不同磷肥品种磷素利用效率

磷肥利用率(Rep)反映了当季作物对施入土壤中的肥料磷的回收效率;磷肥偏生产力是指单位投入的肥料磷所能生产的作物籽粒产量;磷肥农学效率指特定施肥条件下,单位施肥量所增加的作物经济产量。通过这些参数从不同角度表征玉米的磷肥利用率(表 5),等施磷量情况下,APP 处理的磷肥农学效率最高,较 UP 和 MAP 处理分别增加 48.6%和 20.1%,磷素偏生产力和磷肥利用率变化也显著大于其他处理,较 UP 处理分别提高 5.1%和 14.1%,较 MAP 处理分别提高 10.5%和 63.4%。

表 4 不同磷肥品种下玉米产量及产量构成因素

处理	收获穗数/ (株·hm ⁻²)	穗粒数/ 粒	千粒重/ g	产量/ (t·hm ⁻²)
CK	67482a	567.87c	266.45c	10.21d
MAP	69867a	598.80b	311.68b	13.03c
UP	70105a	622.80a	313.92b	13.70b
APP	70582a	630.40a	323.54a	14.40a

注:同列不同字母表示各处理差异显著($P<0.05$)。下同。

表 5 不同磷肥品种对玉米磷素利用效率的影响

处理	磷肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	磷肥农学效率/ (kg·kg ⁻¹)	磷肥 利用率/%
MAP	108.6c	23.50c	19.68c
UP	114.2b	29.08b	28.18b
APP	120.0a	34.92a	32.16a

3 讨论

石灰性土壤全磷含量一般较高,但磷的有效性较低。一方面是因为土壤中含有大量的碳酸盐会吸附和固定土壤溶液中的磷^[13];另一方面是因为磷在土壤中磷的移动方式主要为扩散,石灰性土壤含水量低限制磷的移动^[14]。在模拟试验中,3 种磷肥施入土壤后,均可改善土壤磷的有效性,但土壤有效磷的分布特点有所不同。施入后 1 天,在 0—5 cm 土层,磷酸一铵(MAP)、磷酸脲(UP)和水溶性聚磷酸铵(APP)处理中土壤有效磷含量均显著增加,随着土层深度的增加,在 10—15 cm 土层中,MAP 和 UP 处理与 CK 相比,土壤有效磷含量差异不显著,但 APP 处理土壤有效磷含量显著升高,是 CK 处理的 0.7 倍(图 1)。在培养 30 天后,MAP 处理的有效磷含量有所降低,与初始值相比,有效磷降低显著($P<0.05$)。但在 10—15 cm 土层,APP 处理土壤有效磷含量与初始值相比却有显著增加(图 1),说明 APP 不易被土壤固定,且比其他品种磷肥移动性强,也与 APP 后续水解释放出正磷酸有关。大量研究^[15]也表明,在石灰性土壤上由于其较高的土壤 pH 和碳酸钙含量,导致磷

在土壤中的移动性弱,易被固定^[16],并限制作物对磷的吸收。模拟试验结果还显示,不同磷肥施用后,土壤中 pH 均有所降低,但由于土壤缓冲能力较强,MAP 和 APP 处理在施肥 30 天后土壤 pH 分别增加 0.18,0.09 个单位。UP 处理施入 30 天后,土壤 pH 比初始值降低 0.04 个单位,与 CK 相比,土壤 pH 下降 0.41 个单位。说明在相同时期内,UP 磷肥相比 APP 和 MAP 处理具有更强的酸化土壤的效果。张莉等^[17]研究结果也显示,碱胁迫 6 天后灌溉磷酸脲(UP)溶液,土壤 pH 由 9.92 降至 7.14,显著降低土壤的碱化程度。主要由于 UP 易溶于水,当施于土壤时水解成尿素和磷酸^[18]。虽然 UP 的酸化效果优于 APP,但在 10—15 cm 土层中,土壤有效磷含量仍显著低于 APP 处理,其原因可能是 PPA(多聚磷酸)降低土壤低活性(HCl⁺—P、Residue—P)与中活性磷(NaOH—P),增加土壤高活性磷(Resin—P, NaH—CO₃—P)^[19],进而提高磷素在土壤中的有效性。

田间验证试验中,在玉米灌浆期和成熟期,APP 和 UP 处理在 0—10 cm 土层中土壤有效磷含量显著高于 MAP 处理,而在灌浆期,20—30 cm 土层和成熟期 10—20 cm 土层,APP 处理的土壤有效磷含量显著高于 UP 处理(图 3),进一步说明水溶性聚磷酸铵(APP)在土壤中的迁移能力是 3 种磷肥品种中最强的,与模拟试验结果一致。田间试验结果也显示,UP 处理的土壤 pH 有所降低,但土壤有效磷含量与 APP 无显著差异(图 4)。尽管灌溉磷酸脲溶液具有一定的消减作用,可以改善土壤微环境及活化土壤中的磷素^[20],但 APP 在土壤的水解作用下逐渐水解为正磷酸根,能更大程度地被作物吸收,从而降低沉淀机率^[9]。同时发现,APP 和 UP 处理在石灰性土壤上肥效优于磷酸一铵 MAP,尤其是在玉米生育后期,此阶段为根系生长旺盛期,APP 较 UP 处理更利于玉米的根系发育,是由于 APP 处理深层土壤有效磷含量较高,土壤中较为“均衡”的磷分布特征诱导玉米根系在较深土层分布,吸收较多的磷素养分,以满足玉米后期对磷素的需求。

植物对水分及养分的吸收主要依靠根系,根系的形态及土壤中的分布是影响作物对养分磷素吸收差异的主要原因^[21]。诸多学者^[22-23]通过低磷试验发现植物根系生长会受到影响,根系生长有一定的可塑性。田间试验结果显示,APP 和 UP 处理的根重较 CK 显著升高,增加了 169%和 129%(表 1),且对比 3 种磷肥施用后玉米干物质积累量的变化,显示 APP 处理较 UP 和 MAP 处理分别增加 5.34%和 10.61%

(图5和表3)。说明水溶性聚磷酸铵(APP)磷肥使土壤磷素向深层移动,促进玉米根系的生长,有利于玉米干物质质量的积累及养分吸收,从而提高产量。在本试验中,APP处理的玉米产量显著优于MAP和UP处理,分别提高10.5%和5.1%,且通过这些参数从不同角度表征玉米的磷肥利用率(表4)等施磷量情况下,APP处理的磷肥农学效率最高,较UP和MAP处理分别增加48.6%和20.1%。进一步说明在新疆石灰性土壤中,APP的施用有利于作物根系的生长和产量的构成。不同磷肥的性质不同,其空间分布的差异使玉米对磷素吸收量有一定差异,最终导致产量的差别。因此,水溶性聚磷酸铵(APP)是一种较为适合灌溉施肥的磷肥产品。

4 结论

对MAP、UP、APP在玉米田施用发现,不同品种磷肥施肥后磷素在土壤中分布存在较大空间分布差异,这种差异导致玉米对磷素吸收量的改变并影响产量。水溶性聚磷酸铵(APP)与其他磷肥产品相比,土壤对磷固定数量最低,移动性较好,在20—30 cm土层深度的含磷量最高,提高玉米干物质积累量和产量。3种滴灌常用的水溶性磷肥产品中,水溶性聚磷酸铵是一种最适合灌溉施肥的肥料。

参考文献:

[1] 王西和,刘骅,孙雪晴,等.大量元素水溶肥在棉花上的应用研究[J].新疆农业科学,2015,52(10):1836-1842.

[2] 高鹏,简红忠,魏样,等.水肥一体化技术的应用现状与发展前景[J].现代农业科技,2012(8):250-250.

[3] Wen Z H, Shen J B, Martin B, et al. Combined applications of nitrogen and phosphorus fertilizers with manure increase maize yield and nutrient uptake via stimulating root growth in a long-term experiment[J]. *Pedosphere*, 2016, 26(1): 62-73.

[4] 王莎莎.不同磷肥品种及表面活性剂对磷在土壤中移动性的影响[D].广州:华南农业大学,2016.

[5] 安迪,杨令,王冠达,等.磷在土壤中的固定机制和磷肥的高效利用[J].化工进展,2013,32(8):1967-1973.

[6] 李青军,张炎,哈丽哈什·依巴提,等.膜下滴灌棉花对3种水溶性磷肥的利用效率和产量响应[J].棉花学报,2018,30(2):172-179.

[7] 陈家杰,关钰,王静,等.新疆农田施磷量、磷肥效率及磷肥品种长期演变[J].新疆农业科学,2016,53(10):1858-1866.

[8] 赵红华,危常州,候建伟,等.滴灌下酸性物质对石灰性土壤磷有效性及作物吸收的影响[J].土壤通报,2015,47(5):847-852.

[9] 黄致华,王娟,李言言,等.复配酸化对滴灌条件下石灰性土壤pH、磷有效性及玉米吸收的影响[J].新疆农业科学,2017,54(4):660-666.

[10] 王静,叶壮,褚贵新.水磷一体化对磷素有效性与磷肥利用率的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(11):1377-1383.

[11] 王方进.低聚磷酸铵肥料的合成及其在土壤中的转化研究[D].山东泰安:山东农业大学,2014.

[12] 史建硕,张彦才,王丽英,等.聚磷酸铵水溶肥对设施番茄产量、品质、氮素吸收及利用的影响[J].华北学报,2015,30(增刊1):465-470.

[13] 王建军.山西晋中市石灰性土壤无机磷细菌的分离鉴定研究[D].山西晋中:西北师范大学,2015.

[14] 张宏伟,陈志泉.腐殖酸共聚物改良后土壤中磷肥有效性的研究[J].中国土壤与肥料,2002(6):39-40.

[15] 赵红华.滴灌条件下土壤酸化对石灰性土壤磷锌有效性影响及其生物效应[D].新疆石河子:石河子大学,2015.

[16] Leytem A B, Westermann D T, et al. Phosphate sorption by Pacific Northwest calcareous soils[J]. *Soil Science*, 2003, 168(5): 368-375.

[17] 张莉,王婧,逢焕成,等.碱胁迫下磷酸脲降低土壤pH值促进菠菜生长[J].农业工程学报,2016,32(2):148-154.

[18] 谢萍,李军,陈亮.磷酸脲生产中的相平衡研究[J].磷肥与复肥,2006,21(3):15-16.

[19] 王静.不同施磷策略对磷在土壤中移动、转化及磷肥利用率的影响[D].新疆石河子:石河子大学,2016.

[20] 高艳菊,刘腾,亢龙飞,等.聚磷酸铵肥料聚合度与聚合率测定方法比较[J].新疆农业科学,2017,54(10):1822-1831.

[21] 彭云峰,张吴平,李春俭.不同氮吸收效率玉米品种的根系构型差异比较:模拟与应用[J].中国农业科学,2009(3):843-853.

[22] 张瑜,刘海涛,周亚平,等.田间玉米和蚕豆对低磷胁迫响应的差异比较[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):911-919.

[23] 申婷婷,李金,苏贺,等.低磷胁迫对转基因抗虫玉米苗期Bt蛋白和磷利用效率的影响[J].中国农业大学学报,2015,20(3):15-23.