

# 三种不同聚合度组成的聚磷酸铵对玉米苗期生长的影响

陈小娟<sup>1</sup>, 杨依彬<sup>2</sup>, 龚林<sup>3</sup>, 张承林<sup>1\*</sup>

(1 华南农业大学资源环境学院, 广东广州 510642; 2 广州一翔农业技术有限公司, 广东广州 510650;  
3 东莞一翔液体肥料有限公司, 广东东莞 523135)

**摘要:**【目的】了解不同聚合度组成的聚磷酸铵 (APP) 作种肥对玉米苗期生长的影响。【方法】以磷酸一铵 (简称 MAP) 作对照, 比较了 3 种 APP [(简称 APP1, 低中聚成分为主)、APP2 (中高聚成分为主)、APP3 (低中高聚成分均匀分布)] 及 APP 与 MAP 配施 (APP : MAP = 1 : 1, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 质量比) 在砖红壤上作玉米种肥的效果。试验设置了 CK (不施磷肥)、MAP、APP1、APP2、APP3、APP1 : MAP、APP2 : MAP 和 APP3 : MAP 共 8 个处理。播种 40 d 后, 收取玉米苗期植株, 采集土壤样品, 分别测定玉米植株株高、茎粗、地上和地下部干重、土壤全磷及有效磷含量、植株磷吸收量和磷利用率等指标。【结果】不同聚合度组成 APP 对玉米苗期生长具有显著影响。单独施用 APP 时, 以 APP3 的肥效最好, MAP 和 APP1 居中, APP2 最差。APP3 可以稳定供磷, 玉米株高、干重、磷吸收量均最高, 表明聚合度组成均匀分布的 APP 作种肥效果最佳。与单独施用 APP 相比, APP 配施 MAP 后, 显著提高玉米生物产量和磷吸收量, 其中以 APP3 配施 MAP 效果最好, 与 MAP 相比, APP3 : MAP 处理的干物质量和磷利用率分别提高了 21.3%、81.6%。【结论】APP 作为种肥施用, 聚合度组成会显著影响肥效, 以聚合度组成分布均匀的 APP 效果最佳。此外, 配施 MAP 对中高聚 APP 的肥效有显著的促进作用。

**关键词:** 聚磷酸铵; 聚合度组成; 玉米; 种肥

## Effect of ammonium polyphosphates with various degree of polymerization on growth of maize seedlings

CHEN Xiao-juan<sup>1</sup>, YANG Yi-bin<sup>2</sup>, GONG Lin<sup>3</sup>, ZHANG Cheng-lin<sup>1\*</sup>

(1 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China;  
2 Guangzhou Yixiang Agricultural Technology Co. Ltd., Guangzhou, Guangdong 510650, China;  
3 Dongguan Yixiang Liquid Fertilizer Co. Ltd., Dongguan, Guangdong 523135, China)

**Abstract:** 【Objectives】The purpose of this study is to evaluate the effect of three kinds of ammonium polyphosphates (APP) with various polymerization degree (PD) as seed fertilizer on maize seedling growth. 【Methods】With mono-ammonium phosphate (MAP) as control, three ammonium polyphosphates were APP1 (mainly low to medium PD), APP2 (mainly medium to high PD) and APP3 (uniform PD distribution) and combinations of APP with MAP (APP : MAP = 1 : 1, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mass ratio) to compare the effect on maize seedlings when all APPs were used as seed fertilizer on laterite soil. There were 8 treatments including CK (no phosphate fertilizer), MAP, APP1, APP2, APP3, APP1 : MAP, APP2 : MAP, and APP3 : MAP. At 40 days after sowing, corn seedling plants and soil samples were collected, and plant height, stem diameter, dry matter weight of aboveground and underground parts, soil total phosphorus, soil available phosphorus, phosphorus uptake of plant and phosphorus use efficiency were determined or calculated. 【Results】The seedling growth was significantly different among the 8 treatments. When APPs was applied individually, the best corn growth was in APP3, followed by MAP and APP1 and the worst was in APP2. This information indicated that APP with uniform PD

收稿日期: 2018-01-16 接受日期: 2018-04-07

基金项目: 科技部国家重点研发项目 (2016YFD0200404) 资助。

联系方式: 陈小娟 E-mail: xjchen318@163.com; \* 通信作者 张承林 E-mail: clzhang@scau.edu.cn

distribution had the best effect as seed fertilizer. Compared with the individual APP treatments, combination of APP with MAP could significantly increase seedling growth and phosphorus uptake. The best combination was APP3 with MAP, which resulted in 21.3% and 81.6% more plant dry matter weight and phosphorus use efficiency over the treatment of MAP alone, respectively. **【 Conclusions 】** Ammonium polyphosphate with homogeneous distribution of polymerization degree (APP3) could steadily supply phosphorus, resulting in maximum plant height, dry weight and phosphorus uptake. Combined application of MAP with APP3 is proved to be capable of promote nutrient availability and corn growth significantly, which is a proper application way.

**Key words:** ammonium polyphosphate; polymerization degree composition; maize; seed fertilizer

聚磷酸铵 (ammonium polyphosphate, 简称 APP), 是一种富含氮、磷的无机聚合物, 分子通式为  $(\text{NH}_4)_{n+2}\text{P}_n\text{O}_{3n+1}$ 。根据其聚合度  $n$  的大小, 分为低、中、高聚合度 3 大类, 其聚合度越高, 水溶性越小, 当  $n < 20$  时, 为水溶性 APP。近年来, 由于低聚合度 APP 富含氮磷营养、水溶性好、具有一定的螯合能力等特点, 作为一种新型磷源进入化肥领域, 用于生产高浓度液体复合肥料<sup>[1]</sup>。另外, APP 需要逐步水解为正磷酸盐才能被作物吸收利用, 因此被认为是一种长效缓释型肥料<sup>[2]</sup>。

国内 APP 合成方法多样, 各个厂家的生产工艺及反应控制条件不同, 得到的 APP 聚合度及组分差异大, APP 聚合度的高低影响其水解速度<sup>[3]</sup>, 水解的速度快慢与 APP 在某一时间的供磷能力有密切关系。苗期是磷的营养临界期, 当 APP 作为种肥或底肥施用, 不同聚合度组成的 APP 可能存在供磷时间上的差别, 从而影响苗期的生长。本研究比较了三种不同聚合度的 APP 对玉米苗期生长的影响, 旨在为 APP 作为种肥或底肥施用提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

玉米品种为郑单 958, 供试土壤为砖红壤, 取自广东省徐闻县。土壤基本性质: pH 值 4.98、EC 值 68.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、有机质 13.6 g/kg、碱解氮 65.8 mg/kg、有效磷 1.60 mg/kg、速效钾 27.4 mg/kg、有效锰 41.4 mg/kg、有效锌 0.70 mg/kg、有效铁 7.0 mg/kg、有效铜 1.0 mg/kg、交换性钙 2.10 cmol (1/2Ca<sup>2+</sup>)/kg、交换性镁 1.48 cmol (1/2Mg<sup>2+</sup>)/kg, 属严重缺磷土壤。

供试肥料: 工业级磷酸一铵 (12-60-0, 简称 MAP), 所有 APP 样品由四川大学化工学院提供。在本试验中, 以不同聚合度的聚磷酸铵制备了三个种肥, 简称 APP1、APP2、APP3。一般来说, 正磷酸和焦磷酸为低聚成分, 三聚和四聚磷酸为中聚成

分, 五聚以上为高聚成分。APP1 为 (含 N 22%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%) 以中低聚组成为主, 低聚: 中聚: 高聚 = 55.5% : 43.7% : 0.8%, APP2 (含 N 21%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 53%) 以中高聚组成为主, 低聚: 中聚: 高聚 = 20% : 72% : 8%, APP3 (含 N 13%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 70%) 聚合度组成分布均匀, 低聚: 中聚: 高聚 = 23% : 43% : 34%, 具体聚磷酸铵组成成分及其提供的磷量见表 1。

### 1.2 试验设计

试验于华南农业大学作物营养与施肥研究室温室中进行。取过 2 mm 的风干土壤, 装入塑料盆中, 盆口直径 20 cm、高 18 cm、盆底直径 15 cm, 每盆装 4.5 kg 土, 播一粒种子。

共设 8 个处理, 具体为: 对照 (CK, 不施磷肥)、MAP、APP1、APP2、APP3、APP1 : MAP (1 : 1)、APP2 : MAP (1 : 1) 及 APP3 : MAP (1 : 1), 每个处理 4 次重复, 每盆施用 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.74 g, 则每盆施用 MAP、APP1、APP2、APP3、APP1 : MAP (1 : 1)、APP2 : MAP (1 : 1)、APP3 : MAP (1 : 1) 分别为 1.22 g、1.61 g、1.40 g、1.06 g、0.80 g : 0.62 g、0.70 g : 0.62 g、0.53 g : 0.62 g。通过上述磷肥每盆施用的氮分别为 0.15 g、0.35 g、0.29 g、0.14 g、

表 1 供试聚磷酸铵组成成分及 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 总含量 (%)  
Table 1 Contents of components and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in the tested ammonium polyphosphates

组成成分 Component	APP1	APP2	APP3
正磷酸 Ortho-phosphoric acid	4.04	1.31	4.95
焦磷酸 Pyrophosphate	21.69	9.37	11.39
三聚磷酸 Tri-phosphate	15.12	17.20	10.05
四聚磷酸 Tetra-phosphoric acid	5.14	20.73	19.88
五聚磷酸 Penta-phosphoric acid	0.00	3.29	7.27
多聚磷酸 Poly-phosphoric acid	0.34	0.99	16.80
总磷 Total phosphorus	46.33	52.89	70.34

0.25 g、0.22 g、0.14 g。氮用量为 N 0.35 g/盆, 不足的氮用硫酸铵 (N 21%) 补足。供试钾肥为氯化钾 (K<sub>2</sub>O 60%), 按 K<sub>2</sub>O 0.15 g/kg 土施用, 装盆时与土壤混匀。依据前期试验, APP 种肥位置为距种子横向 4 cm 处再垂直向下 4 cm (图 1)。

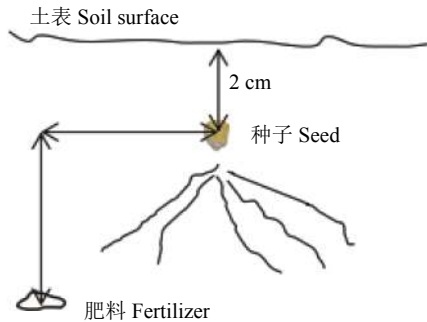


图 1 肥料与种子放置示意图

Fig. 1 Fertilizer and seed placement diagram

2017 年 7 月 10 日播种。先在盆中装入一定量的土, 在盆中央插上有刻度的玻璃棒 (底部为 0 cm), 肥料集中放置于 0 cm 处, 然后每盆分别覆土至玻璃棒的 4 cm 处, 以玻璃棒为基点, 距离水平方向 4 cm 处播 1 粒催芽种子, 然后覆土 2 cm。播种 40 d 后收获植株。

### 1.3 测定项目及方法

株高和茎基部直径: 用卷尺测量地表到植株最高点的高度为株高, 游标卡尺测量茎基部直径。

土壤及植株取样方法: 拔出植株后, 抖动分离根际土壤, 其根际土用四分法取土, 风干后研磨, 分别过 2.0 mm 筛和 0.15 mm 筛备用; 沿土面剪下地上部, 洗净根系, 烘干后称干重, 粉碎后测定总磷, 用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮, 钼锑抗比色法进行测定; 土壤有效磷用 NH<sub>4</sub>F-HCl 浸提—钼锑抗比色法, 土壤全磷用 HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消煮—钼锑抗比色法<sup>[4]</sup>。

磷吸收量 (g) = (地上部磷含量 × 地上部干重 + 地下部磷含量 × 地下部干重) / 1000

磷利用率 = (施磷植株吸磷总量 - 不施磷植株吸磷总量) / 施磷量 × 100%

## 2 结果与分析

### 2.1 不同聚磷酸铵处理对玉米苗期株高和茎粗的影响

由表 2 可知, 播种 40 d 后, 所有磷肥处理都可以显著促进玉米苗期的生长, 株高和茎粗都比不施磷处理显著增加。各种 APP 单独施用时, 三种

表 2 不同聚磷酸铵对玉米苗期株高和茎粗的影响  
Table 2 Plant height and stem diameter of maize seedling affected by ammonium polyphosphates

处理 Treatment	株高 (cm) Plant height	茎粗 (mm) Stem diameter
CK	54.2 ± 4.5 e	3.8 ± 0.3 d
MAP	136.0 ± 0.5 bc	14.0 ± 0.4 b
APP1	130.2 ± 1.4 c	13.9 ± 0.1 b
APP2	99.3 ± 2.7 d	9.5 ± 1.0 c
APP3	140.7 ± 1.5 b	15.8 ± 0.6 a
APP1 : MAP	139.1 ± 1.1 bc	15.4 ± 0.2 ab
APP2 : MAP	132.1 ± 1.8 bc	14.1 ± 0.1 b
APP3 : MAP	149.4 ± 1.4 a	16.3 ± 0.1 a

注 (Note): 同列数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters indicate significant difference among treatments at the 5% level.

APP 处理间株高和茎粗存在显著差异, 以 APP3 处理肥效最好, 其次是 APP1 处理, APP2 处理最差, MAP 处理与 APP1 处理和 APP3 处理效果相似。当各 APP 配施 MAP 后, 与单独施用 APP2 和 APP3 处理相比, APP2 : MAP 和 APP3 : MAP 处理株高均显著增加, 且 APP2 : MAP 处理茎粗显著增加, 而 APP1 : MAP 与 APP1 处理的株高和茎粗均无显著差异。与 MAP 处理相比, APP1 : MAP 和 APP2 : MAP 处理株高和茎粗无显著差异。在所有处理中, APP3 : MAP 处理株高和茎粗均达到最大值, 表明该处理效果最好。

### 2.2 不同聚磷酸铵处理对玉米苗期干重的影响

施磷处理显著提高了玉米干重, 但提高程度各不相同 (图 2)。单独施用 APP 时, APP3 处理地上部干重显著高于 APP1 和 APP2 处理, 而 APP3 处理地下部干重比 APP2 处理显著增加, 与 APP1 处理之间没有显著差别。当 APP 配施 MAP 后, 与 APP1 和 APP2 处理相比, APP1 : MAP 和 APP2 : MAP 处理地上部和地下部干重均得到显著提高; 与单独施用 APP3 比较, APP3 : MAP 处理地上部和地下部干重没有显著增加, 表明 APP3 可以单独施用。与 MAP 处理相比, APP1 : MAP 和 APP2 : MAP 处理地上部干重无显著差异, 但 APP3 : MAP 处理地上部和地下部干重均显著高于 MAP 处理。

### 2.3 不同聚磷酸铵处理对土壤全磷及有效磷含量的影响

各施肥处理间土壤全磷含量无显著差异, APP3 :

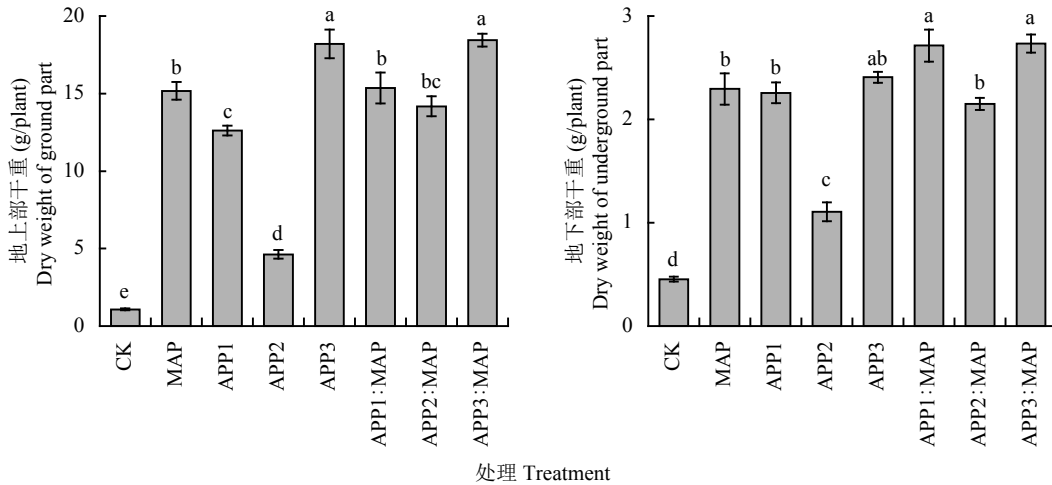


图 2 不同聚磷酸铵对玉米苗期地上部和地下部干重的影响

Fig. 2 Dry matter weight of above and underground parts of maize seedlings affected by ammonium polyphosphates

[注 (Note) : 柱上不同小写字母表示处理间差异显著

Different letters above the bars mean significant difference among treatments at the 5% level.]

MAP 处理土壤有效磷含量显著高于其他处理, 其他处理间差异不显著, 但均显著高于对照 (图 3)。

2.4 不同聚磷酸铵处理对玉米苗期磷吸收量的影响

不同磷肥处理对玉米磷吸收量的影响不同 (图 4)。APP1 与 MAP 无显著差异, APP2 显著低于 MAP 和其他所有处理, APP3 显著高于 MAP、APP1 和 APP2。当 APP1 配施 MAP 后, 效果显著好于 APP1 或 AMP 单施, APP2 与 MAP 配合效果与 MAP 相当, APP3 与 MAP 配合的效果显著好于二者单施, 且与单施 APP1、APP2 和 APP3 相比, APP1 : MAP、APP2 : MAP 和 APP3 : MAP 处理的磷吸收量分别提

高了 38.2%、259.3%、37.6%。

2.5 不同聚磷酸铵处理对磷利用率的影响

与磷吸收量相对应, 各处理的磷利用率存在显著差异 (表 3)。植株吸磷量最低的 APP2 处理, 磷利用率也最低。APP 配施 MAP 后, 磷的利用率均有一定程度的提高, 其中 APP2 配施 MAP 后, 提升幅度最大, 是单独施用 APP2 处理的 4.17 倍, 而 APP3 配施 MAP 后磷的利用率是最高的。

3 讨论

试验结果表明, 单独施用 APP 时, 不同聚合度

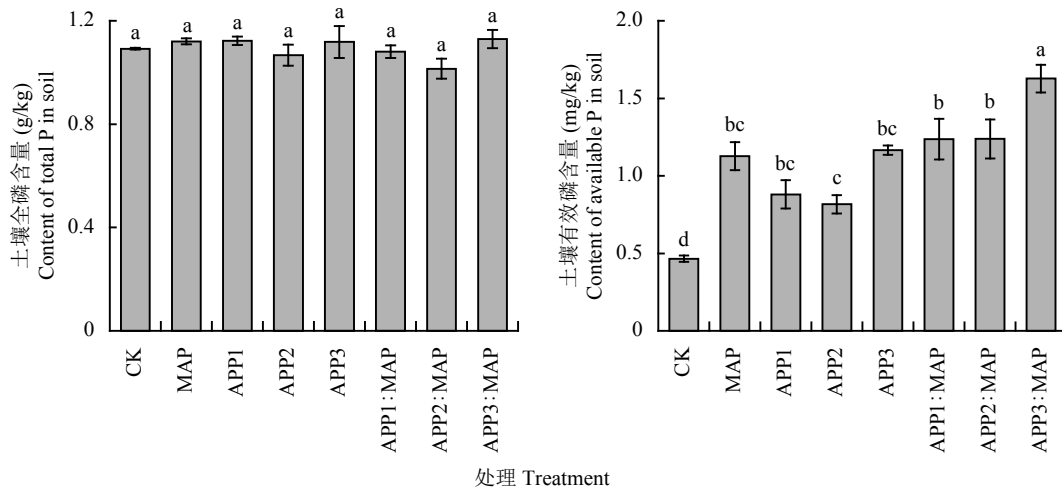


图 3 不同聚磷酸铵对土壤全磷及有效磷含量的影响

Fig. 3 Total and available P contents of soils affected by ammonium polyphosphates

[注 (Note) : 柱上不同小写字母表示处理间差异显著

Different letters above the bars mean significant difference among treatments at the 5% level.]

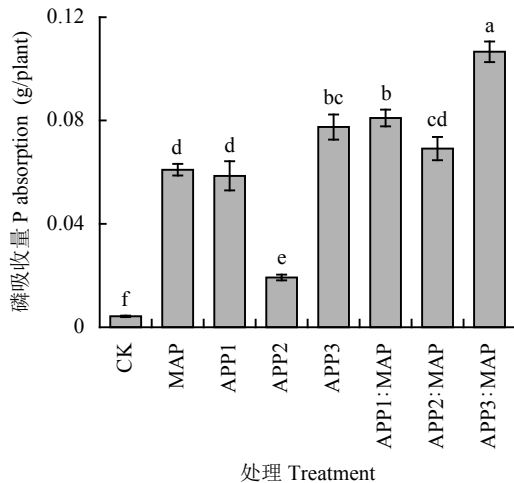


图 4 不同聚磷酸铵对玉米苗期磷吸收量的影响

Fig. 4 P uptake of maize seedling affected by ammonium polyphosphates

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示处理间差异显著 Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at the 5% level.]

表 3 不同聚磷酸铵对磷利用率的影响

Table 3 P use efficiency of seedlings affected by ammonium polyphosphates

处理 Treatment	磷利用率 (%) P use efficiency
MAP	7.67 ± 0.33 c
APP1	7.42 ± 0.82 c
APP2	2.09 ± 0.19 d
APP3	9.94 ± 0.68 b
APP1 : MAP	10.47 ± 0.32 b
APP2 : MAP	8.72 ± 0.67 bc
APP3 : MAP	13.93 ± 0.53 a

[注 (Note): 同列数值后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters indicate significant difference among treatments at the 5% level.]

组成的 APP 对玉米的株高、茎粗、干重及磷吸收量存在显著影响, 其中 APP1 处理玉米长势与 MAP 处理相近, APP2 处理显著低于 MAP 处理, 而 APP3 处理则显著高于 MAP 处理。由此可见, 单独施用 APP 时, 其肥效 APP3 > MAP ≈ APP1 > APP2 处理。通过比较土壤全磷含量、土壤有效磷含量及磷利用率可知, 单独施用 APP 时, 各施磷处理中磷的有效性也是 APP3 > MAP ≈ APP1 > APP2 处理。APP 一般包含正磷酸盐、焦磷酸盐、三聚磷酸盐和四聚磷酸盐等多种不同聚合态成分, APP 在土壤中只有水解为正磷酸盐后方能被植物吸收利用, 水解反应速度

控制着植物对磷的吸收速度<sup>[5]</sup>。APP 在土壤中的水解是酶促反应, 在磷酸酶的催化作用下分解为正磷酸盐<sup>[6]</sup>, 其聚合度越高, 链越长, 水解速率越慢。另外, APP 的水解还受到土壤质地、pH 值、温度、金属离子、土壤水分等因素的影响<sup>[7-9]</sup>, 也有研究指出, APP 的水解与其组分差异及分布水平有关<sup>[10]</sup>, 四聚磷酸盐水解为三聚磷酸盐约需要 1 天, 三聚磷酸盐水解为焦磷酸盐与正磷酸盐约需要 7 天, 而焦磷酸盐水解为正磷酸盐则需 4~100 天<sup>[11]</sup>。

通过分析发现, 以中低聚成分为主的 APP1, 在试验的 40 d 内, 基本满足了玉米生长对磷养分的需求。以中高聚成分为主的 APP2, 则表现为磷养分缺乏, 玉米苗期磷供应不足而影响其形态的建成<sup>[12]</sup>。而聚合度组成分布较均匀的 APP3, 在土壤中缓慢水解而将有效磷释放到土壤中, 从而减少了土壤对磷的固定作用, 提高了玉米植株对磷营养的利用, 供磷效果最优。因此, APP 的聚合度分布差异实际表现为水解速率的差异, 最终表现为供磷速率的差异。

本试验以砖红壤为供试土壤, pH 值 4.98, 属于酸性, 存在大量无定形氧化铁和氧化铝, 磷肥施入土壤后极易被固定而降低磷的利用率<sup>[13]</sup>, MAP 是一种速效磷肥, 施入土壤后容易被土壤固定而降低当季利用效率, 本试验也验证了 MAP 的利用率低于 APP3。APP 与 MAP 配施后, 三种 APP 在土壤中的有效磷含量有不同幅度的提升, APP3 : MAP 处理土壤有效磷含量最高, 可能是三种 APP 中以 APP3 的聚合度组成分布较均匀, 且高聚成分最多, 高聚逐渐水解为低聚, 促使土壤中有效磷含量增加; 而三种 APP 中磷利用率均得到显著提高。可见, APP 与 MAP 的配合施用, 弥补了聚磷酸铵分解慢、磷营养供应不足的缺点。不同磷肥的混配施用, 也有利于提高施用磷肥的利用效率<sup>[14]</sup>, 这与陈日远等<sup>[15]</sup>应用 APP 配比 DAP 提高作物磷的积累量的结果是一致的。

## 4 结论

聚磷酸铵, 特别是以中、高度聚合磷酸铵为主时, 不能很好地满足作物苗期的磷素营养。将低、中、高度聚合的磷酸盐等比例配合可以有效提高聚磷酸铵供应苗期磷营养的能力。将聚合度均匀的聚磷酸铵与磷酸一铵等比例配合作种肥, 能发挥最好的苗期供磷效果。

## 参考文献:

[1] 汪家铭. 新型肥料聚磷酸铵的发展与应用[J]. 泸天化科技, 2010,



- (1): 6–10.  
Wang J M. Development and application of new fertilizer ammonium polyphosphate[J]. *Lutianhua Science and Technology*, 2010, (1): 6–10.
- [ 2 ] Dsutton C, Larsen S. Pyrophosphate as a source of phosphorus for plants[J]. *Soil Science*, 1964, 97(3): 196–201.
- [ 3 ] Rhue R D, Hense L R Y. Ammonium orthophosphate and ammonium polyphosphate as sources of phosphorus for potatoes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(6): 1229–1233.
- [ 4 ] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
Bao S D. Analysis of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [ 5 ] Torres-Dorante L O, Claassen N, Steingrobe B E A. Hydrolysis rates of inorganic polyphosphates in aqueous solution as well as in soils and effects on P availability[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168(3): 352–358.
- [ 6 ] Zinder B, Hertz J, Oswald H. Kinetic studies on the hydrolysis of sodium polyphosphate in sterile solution[J]. *Water Research*, 1984, 18(5): 509–512.
- [ 7 ] 王蕾, 龚林, 邓兰生, 等. 不同温度和pH对聚磷酸铵水解的影响[J]. *磷肥与复肥*, 2015, 30(12): 8–11.  
Wang L, Gong L, Deng L S, *et al.* Effects of temperature and pH on hydrolysis of ammonium polyphosphate[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2015, 30(12): 8–11.
- [ 8 ] Hons F M, Stewart W M, Hossner L R. Factor interactions and their influence on hydrolysis of condensed phosphates in soils[J]. *Soil Science*, 1986, 141: 408–416.
- [ 9 ] Dick R P, Tabatabai M A. Hydrolysis of polyphosphates in soils[J]. *Soil Science*, 1986, 142(3): 132–140.
- [10] 骆介禹, 骆希明, 孙才英, 等. 聚磷酸铵及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.  
Luo J Y, Luo X M, Sun C Y, *et al.* Ammonium polyphosphate and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [11] Sutton C P, Gunary D, Larsen S. Pyrophosphate as a source of phosphorus for plants. II. Hydrolysis and initial uptake by a barley crop[J]. *Soil Science*, 1966, 101: 199–204.
- [12] 王艳, 李晓林, 张福锁. 不同基因型植物低磷胁迫适应机理的研究进展[J]. *生态农业研究*, 2000, (4): 36–38.  
Wang Y, Li X L, Zhang F S. Research progress on adaptation mechanisms of low phosphorus stress in different genotypes of plants[J]. *Eco-agriculture Research*, 2000, (4): 36–38.
- [13] 张俊平, 朱峰, 张新明, 等. 酸性土壤固磷机理研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 229–233.  
Zhang J P, Zhu F, Zhang X M, *et al.* Recent advances in phosphorus fixation mechanism in acid soil[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2008, 16(1): 229–233.
- [14] 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, (8): 1967–1973.  
An D, Yang L, Wang G D, *et al.* Phosphorus fixation in soil and efficient utilization of phosphate fertilizer[J]. *Proceedings of Chemical Industry*, 2013, (8): 1967–1973.
- [15] 陈日远, 代明, 侯文通, 等. 聚磷酸铵对玉米幼苗吸收磷、锌养分及生长的影响[J]. *江苏农业科学*, 2014, (5): 104–106.  
Chen R Y, Dai M, Hou W T, *et al.* Effect of ammonium polyphosphate on uptake of phosphorus, zinc and growth of maize seedlings[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2014, (5): 104–106.