

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

杨旭, 张承林*, 胡义熬, 邓兰生

(华南农业大学, 广东 广州 510642)

摘要:近年来, 农用聚磷酸铵作为一种新型肥料逐渐进入我国化肥领域, 常用作高浓度液体复合肥料的基础磷肥。聚磷酸铵 pH 值近中性, 结晶温度低, 具有螯合性、缓释性, 有着很大发展空间。本文综述了聚磷酸铵在土壤中的有效性(溶解性与移动性)的影响因素, 重点分析水解速率、土壤矿物、土壤质地与水分对聚磷酸铵在土壤中的有效性, 并分析聚磷酸铵在农业上的应用与发展前景。

关键词:聚磷酸铵; 土壤有效性; 农业应用

中图分类号: S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257(2018)03-0001-06

聚磷酸铵是一种含氮和磷的聚磷酸盐, 简称 APP, 其通式为 $(\text{NH}_4)_{n+2}\text{P}_n\text{O}_{3n+1}$ 。按其聚合度大小, 可分为低聚、中聚和高聚 3 种。聚合度越高, 水溶性越小。通常, 当 $n < 20$ 为水溶性, $n > 20$ 为水不溶性, 而作为肥料用的聚磷酸铵聚合度通常为 5~18^[1-3]。APP 最早由美国田纳西流域管理局在 20 世纪向世人介绍^[4], 而我国聚磷酸铵的研制与生产起步于 20 世纪 80 年代^[5]。在国外, 液体聚磷酸铵肥料已得到广泛使用, 可用作配制高浓度液体复合肥料的基础磷肥。固体聚磷酸铵产品一般由 41% 正磷酸盐 (PO_4^{3-})、54% 焦磷酸盐 ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$)、4% 三聚磷酸盐 ($\text{P}_3\text{O}_{10}^{5-}$) 与 1% 的四聚及四聚以上的多聚磷酸盐组成, 不同厂家生产的产品存在聚合度比例的差异。液体聚磷酸铵产品一般比颗粒产品含更高的三聚磷酸盐与正磷酸盐, 并且组分是变化的, 常见的范围是 30%~40% 正磷酸盐, 50%~55% 焦磷酸盐, 以及一部分三聚与四聚磷酸盐。国外常用液体 APP 配比有: 8-24-0、10-34-0、11-37-0、11-44-0、8-28-0 等, 固体为 12-57-0^[6-8]。利用上述液体 APP 与氮溶液、钾肥混合可生产液体混合肥。固体 APP 也可用于颗粒复合

肥的生产, 代替一部分磷铵。目前我国专业生产聚磷酸铵肥料的企业尚少, 其性状、组成及生产方法尚在研发阶段, 产量估计 3 万 t 左右^[3]。而美国现有 130 家工厂生产农用 APP, 年产量可达 200 万 t。与国外相比, 在产品质量、数量和应用方法上都存在较大的差距^[9]。作为新型磷肥, APP 在我国有着广阔的发展空间。

磷主要以扩散的方式从施肥点开始向四周移动, 因此土壤的吸附与沉淀反应会严重影响和限制磷的移动, 并影响植物对磷的吸收^[10]。如果磷在土壤中可以保持相对长久的溶解性与移动性, 则可以大大提高磷肥的利用率。本文将从水解速率、土壤矿物、土壤质地与水分等直接或间接影响聚磷酸铵有效性的因素进行综述, 以期对聚磷酸铵在我国的生产和应用提供理论依据。

1 聚磷酸铵在土壤中有有效性的影响因素

1.1 水解速率对聚磷酸铵有效性的影响

聚磷酸盐不能直接被植物吸收(少数研究表明焦磷酸盐可以直接被植物吸收), 只有水解为正磷酸盐后才能被植物吸收利用, 因此水解反应直接影响了植物吸收聚磷酸盐^[11-12]。当施入到土壤中后, 聚磷酸盐会逐渐水解为正磷酸盐; 聚磷酸盐在土壤中的水解速率决定着它们在土壤中移动的形式与距离, 从而影响作物对其的吸收。由于与土壤固相反应不同, 当添加到土壤中时, 聚磷酸盐离子可能比正磷酸盐离子有着更好的移动性^[7,13-14]。但当聚磷酸盐离子水解后, 移动性则降低。因此, 聚磷酸盐的移动性很大程度取决于其水解速率。如果水解速

收稿日期: 2017-08-23; 最后修订日期: 2018-03-18

基金项目: 国家重点研发计划《高效水溶肥料原料创制与产业化》子课题: 作物专用水溶肥研制与产业化(课题编号: 2016YFD0200404)。

作者简介: 杨旭(1990-), 女, 广东高州人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事液体肥料的研发工作。E-mail: jeneryang819@163.com。

通讯作者: 张承林, E-mail: clzhang@scau.edu.cn。

率大于扩散速率,磷的移动主要以正磷酸盐的形式进行,这样聚磷酸盐的移动与正磷酸盐相差不大。如果水解速率缓慢,比如在强碱性或钙质土壤中(且微生物活性较低),磷主要以聚磷酸盐的形式移动,这时螯合反应将决定磷的扩散、磷的反应产物以及作物的磷吸收效率^[15]。

在酸性土壤中,Sample等^[16]的研究发现正磷酸铵与聚磷酸铵的施用没有显著的差异,可能是由于该试验中APP溶液50%的磷是正磷酸盐;同时,焦磷酸酶在土壤、微生物以及植物中广泛存在,很容易就使聚磷酸盐水解^[17-18]。APP一经与中性、酸性土壤接触,大部分聚磷酸盐在几天或几周内就被水解为正磷酸盐^[19]。Khasawneh等^[14]在砂壤土柱试验(pH值=6.0)中表施磷酸氢二铵(DAP)、焦磷酸三铵盐(TPP)、APP以观察它们的移动性,结果发现,DAP、TPP、APP的移动伴随着以下两种反应:(1)焦磷酸盐与聚磷酸盐逐渐水解为正磷酸盐;(2)磷酸盐阴离子与土壤的沉淀反应。该试验中,水溶性部分的聚合态磷水解很快,水解一半的时间为9~16 d。焦磷酸盐与聚磷酸盐的沉淀反应基本在1周就完成,并且是不可逆的,集中于一个明确区域;但正磷酸盐的沉淀反应却可以延续4周,沉淀速度随着时间与水溶性正磷酸盐浓度的增加而增加,且沉淀是分散的而不是聚集某一个点,并具有可逆性。在4周后,TPP、APP、DAP水不溶性磷的比例分别是58%、63%、45%。整体而言,聚磷酸铵水解速率的快慢,与土壤质地、酶活性、有机质含量、金属离子、pH值、温度等有关^[7,20-22],但随着粘粒含量和土壤可交换性铝、镁含量的增加,水解速率可能会有所下降^[23]。其中,焦磷酸盐的水解关键酶是磷酸酶,它可以快速催化APP水解,水解速率可比无酶催化快 10^6 倍^[18]。其它物理条件,如温度也是影响APP水解的重要因素,温度越高,聚磷酸盐水解越快。在15℃或低于15℃,水解速率很小。在27℃,会发生轻微水解;但是在30~40℃时,水解速度加快,并会在2~3个月内基本完成水解^[23]。pH值越低,APP水解得越快。在温度低于25℃,pH值近中性(pH值=6.4)时,APP是非常稳定的^[2,24-25]。

在钙质土壤中,不少田间和实验室研究结果发现,聚磷酸铵的肥效显著高于磷铵^[26-28],这可能是因为聚磷酸盐在碱性土壤中具有更好的稳定性。其中,焦磷酸盐、三聚磷酸盐较高的肥效可能与这

些聚磷酸盐螯合钙、镁的能力有关。由于焦磷酸钙(固相)的溶解度比磷酸钙大得多,因此焦磷酸盐离子持续存在时,可溶性磷酸钙盐变成不溶性磷酸钙盐的过程可能被抑制。Amer等^[29]的研究发现,当正磷酸盐与聚磷酸盐同时施入钙质土壤中时,聚磷酸盐离子可以使土壤溶液中正磷酸根离子的浓度更高。

1.2 土壤矿物对聚磷酸铵有效性的影响

聚磷酸盐与土壤矿物的反应速度、程度都与正磷酸盐不同。正磷酸盐与土壤矿物反应速度快,而聚磷酸铵相对较慢。正磷酸盐与土壤接触后几乎在数小时内即反应完成,但焦磷酸盐与矿物反应需要几天并持续几周,三聚磷酸盐则至少一周并可能持续数月^[13]。碳酸钙和碳酸镁与所有形态的磷酸盐反应都非常迅速。常温下,焦磷酸铵、三聚磷酸铵溶液与碳酸钙和碳酸镁反应迅速,但与黏土矿物、铁铝氧化物反应缓慢。黏土矿物的结构与组成会影响它们与聚磷酸盐的反应,黏土矿物所含有的少量其它矿物杂质也会影响反应产物。高岭石不受二聚或三聚磷酸盐的影响,蒙脱石会与之慢慢反应,硅镁石与之的反应会比较迅速^[30-32]。

聚磷酸盐与常用的正磷酸盐不同,它带有更多的磷原子,并有着更低的磷/氧比。这些特点给予聚磷酸铵更高的水溶性,且可以与金属离子(铁、铝、铜、锌等)形成稳定可溶的混合物。同时,这种混合物在土壤中可能保持更长时间的溶解状态。因此,磷酸盐沉淀之前,水溶性聚磷酸盐在土壤中可能比正磷酸盐移动得更远^[4,12]。Lindsay等^[33]的研究发现,在溶液中,焦磷酸盐可与钙、镁、铁、铝等螯合。将酸性砂壤土放在焦磷酸铵(pH值=6.25,含有50%磷)的饱和溶液中,摇动后,过滤酸性土壤中提取的聚磷酸盐时,发现没有沉淀产生,说明其生成了可溶性的聚磷酸铁及聚磷酸铝螯合物。用钙质粘壤土进行的相似试验表明,发现生成较少的铁和铝螯合物,但在过滤物中发现了 $\text{CaNH}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 沉淀。

中国地域辽阔,南北土壤类型各有不同,包括砖红壤、赤红壤、红壤、黄壤、黄棕壤、棕壤、黑钙土、栗钙土、棕钙土等^[34]。由于各土壤所含矿物质不同,它们对聚磷酸铵有效性的影响也不同。根据聚磷酸铵与土壤矿物反应的情况可知,在含铁、铝较多的土壤,聚磷酸铵有效性相对较高;在钙、镁含量高的土壤,其有效性则降低。虽然酸性

土壤的铁、铝含量高,碱性土壤的钙、镁含量高,但由于 pH 值的影响,聚磷酸铵在酸性土壤中的水解更容易发生。因此,聚磷酸铵在不同土壤类型的有效性表现很可能是土壤矿物质与水解速率综合影响的结果。

1.3 土壤质地与水分对聚磷酸铵有效性的影响

土壤中磷的移动性很低,扩散距离仅有 1 ~ 2 mm,且扩散速度很慢。而土壤养分只有到达根表后才可能被植物吸收。因此,提高磷的移动距离在一定程度上提高作物对磷的吸收^[35]。但大量研究表明,土壤质地的改变或水分的增加并不能显著改变聚磷酸铵的移动性。Lauer^[36]的研究发现,在不同土壤质地上,土表淋施聚磷酸铵时,其移动性较小,能向下移动距离约为 5 cm。其在砂土中移动最远,平均 6.2 cm。非钙质砂壤土次之(平均 5.1 cm),移动性最差的是钙质砂壤土,平均移动距离仅为 3.4 cm。增加灌溉量后(增加 3 倍),发现 APP 的移动不会出现大幅度的增加,在砂质土移动距离增加最大,为 25%;非钙质砂壤土增加了 18.6%;钙质砂壤土增加了 9.68%。Hashimoto 等^[7]用土柱表施磷肥的试验发现,在砂壤土上,所有测定的正磷酸盐(MAP 和 DAP)与聚磷酸盐的移动距离相似,约 4 ~ 5 cm,但水溶性磷含量最高值的所在位置略有不同。正磷酸盐的水溶性磷含量随着深度增加而逐渐减少,但聚磷酸盐的水溶性磷的最高值保留在距离表面 1 cm 处,且与聚磷酸盐的聚合度没有任何直接关系^[7,37]。但也有研究发现,施于土壤表面的聚磷酸铵液体肥料,有效磷向土壤迁移深度可达 15 cm^[38]。整体而言,聚磷酸铵中磷的移动也是有限的,不同质地土壤之间磷的移动无明显差别,而增加灌溉量也不能明显提高聚磷酸铵的移动。但灌溉量的增加会影响聚磷酸盐的水解,从而影响其有效性。研究表明,焦磷酸盐在有氧土壤系统中的水解随着土壤状况的改变而改变,水解一半的焦磷酸盐需要 4 ~ 100 d^[39-40]。当土壤淹水后,厌氧微生物的活性将大大提高。研究表明,淹水情况下可以提高聚磷酸盐的水解速率,其中液体 APP 比固体 APP 水解得更快。液体 APP 聚合态磷的半衰期值在厌氧条件下是 1.6 ~ 2.0 d;在有氧条件下是 5.2 ~ 8.7 d。固体 APP 聚合态磷的半衰期值在厌氧条件下是 3.9 ~ 9.2 d;在有氧条件下是 12.5 ~ 27.0 d^[41-42]。但也有研究表明,淹水或干旱情况下,聚磷酸盐的水解无差异^[43]。

2 聚磷酸铵在农业生产中的应用

固体化肥利用率一般为 30% 左右,而液体肥料可达 80%,利用率大大提升。在机械化施肥中,液体肥料发挥着更大优势^[3,44]。同时随着我国节水农业的发展与化肥农药零增长的趋势,农用聚磷酸铵作为高浓度液体复合肥料的基础磷肥去推广与应用,定位更为准确;也将为液体肥料的发展提供更为广阔的空间^[45]。目前,我国生产方式多以热法磷酸(磷酸铵)/尿素为主,产品的性状和组成还很不稳定^[46]。但已有少量的聚磷酸铵开始用于我国液体肥料的生产。聚磷酸铵液体肥在欧美等地早已普及,且是美国主流的磷肥品种^[3,10,45]。聚磷酸铵作为液体肥原料有两个重要优势:首先它比正磷酸盐水溶性更好,其次它可以在湿法生产过程中螯合(在溶液中)大部分杂质,同时还可以加入一些微量元素^[47]。聚磷酸铵本身有着很好的溶解度,与微量元素反应可以保持更长的溶解状态^[4],且 pH 值近中性,缓冲性好,有很好的复配性^[2]。总体而言,农用聚磷酸铵在我国发展潜力巨大,近年内市场规模有望达到 100 万 t。但需要考虑温度和土壤 pH 值等因素对聚磷酸铵水解的影响,且国内受制于运输条件,产品的推广也存在一定难度^[45]。

农用聚磷酸铵在美国等发达国家常用于液体肥料生产(清液型与悬浮型),主要应用于大田,最常用且使用数量最多的是液体 APP:11-37-0 与 10-34-0。田纳西流域管理局在 20 世纪 80 年代初开发了一套用聚磷酸盐代替正磷酸盐来生产悬浮肥料的工艺,在悬浮肥料中加入聚磷酸盐(P_2O_5 25% ~ 35%),改善了悬浮肥料的低温贮藏性能,并降低了生产成本^[48]。聚磷酸铵一方面可以用于种肥(启动肥),另一方面则用于作物整个生长期(追肥)。用于种肥时通常是施入犁沟或播种时侧施;用于追肥时可以条施、撒施,也可以灌溉施肥^[49]。在种肥上,常用的聚磷酸盐配比为 11-34-0,施肥点位于种子旁边 5.0 cm 与下方 5.0 cm 的位置(5 cm × 5 cm),可以促进苗期种子根系形成与出苗^[50]。

在田间应用上,农用聚磷酸铵表现出了较好的优势。Holloway 等^[51]研究发现,在澳大利亚石灰性土壤上,相同化学组分的液体 APP 的磷利用率是颗粒磷肥的 15 倍。Venugopalan 等^[52]通过对比重钙(TSP)、磷酸氢二铵(DAP)、硝酸磷肥(NP)、固

体 APP 和液体 APP 等肥料的小麦肥效试验, 表明施用固体 APP 的小麦产量高于 DAP 和 NP。章守陶等^[53]以等养分含量的固体磷酸一铵 (MAP) 为对照, 发现液体 APP 可使哈密瓜增产 3.0% ~ 8.4%。Holloway 等^[54]在小麦试验中发现液态 APP 效果优于其它颗粒固体肥料, 第一年施用使小麦增产 14.0%, 第二年残留的肥效使小麦增产 15.0%。但 Engelstad 等^[55]研究表明, 在低温情况下, APP 的水解速度慢, 很可能比正磷酸盐的有效性低。但也有研究表明, 作为作物的氮源与磷源, APP 与正磷酸盐无明显差别^[49]。而最近的研究发现, 在高 pH 值的钙质土壤上, 将 MAP 与 APP 以一定比例 (80%:20%) 混合, 可以使土壤中磷的有效性显著提高, 从而减少磷的投入^[56]。而在本课题组的研究中, 在玉米苗期盆栽试验中 (等养分的条件下), 发现与工业级 MAP 相比, 聚磷酸铵在酸性砖红壤上的肥效较差; 而在碱性石灰性土壤中的肥效更好。

3 展望

随着节水农业与现代化农业的发展, 水肥一体化技术将有巨大的发展空间。而水溶性肥料是水肥一体化技术的配套产品。氮肥和钾肥一般都是水溶的。单从溶解性来讲, 磷肥原料是决定水溶性肥料质量的关键因素。聚磷酸铵具备优良的溶解性、缓释性与螯合性, 是液体肥料生产中很好的磷源, 也可以用于复合肥的磷原料, 在我国化肥市场中有着巨大发展潜力。

目前, 我国对聚磷酸铵在液体肥料中使用的研究还处于起步阶段。为了能让聚磷酸铵在我国农业生产中发挥更大作用, 可以着手以下几方面的工作: (1) 吸收和借鉴发达国家在聚磷酸铵应用中已有的技术和经验, 开展田间试验示范, 验证聚磷酸铵在不同土壤类型、不同作物下的效果, 并找出适用于田间生产的规律; (2) 结合我国国情和生产实践, 开展有针对性的研究, 包括聚磷酸铵配方、剂型、水解、移动等规律、机理的探索, 以此根据不同作物、土壤作出相应的聚磷酸铵配方与施肥方案; (3) 结合我国现代农业生产需求, 研发多种以聚磷酸铵为基础原料的功能肥料, 如利用农用聚磷酸铵混配性能, 搭配除草剂、杀虫剂等使用。同时加大技术培训和推广力度, 以满足农业现代化的需求。

参考文献:

- [1] 张悦, 李洋. 聚磷酸铵合成方法的研究进展 [J]. 磷肥与复肥, 2014, 29 (3): 39-43.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Slack A V, Hardesty J O. Fertilizers manufactured from ammonia [J]. Agricultural Anhydrous Ammonia Technology and Use, 1966 (agriculturalanh): 32-72.
- [5] 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]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [6] Slack A V, Potts J M, Shaffer Jr H B. Fertilizer solubility, effect of polyphosphate content on properties and use of liquid fertilizers [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1965, 13 (2): 165-171.
- [7] Hashimoto I, Lehr J R. Mobility of polyphosphates in soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1973, 37 (1): 36-41.
- [8] McBeath T M, Lombi E, McLaughlin M J, et al. Polyphosphate - fertilizer solution stability with time, temperature, and pH [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2007, 170 (3): 387-391.
- [9] 林明, 印华亮. 谈聚磷酸铵水溶液在液体肥料发展中的重要作用 [J]. 企业科技与发展, 2014, (5): 12-14.
- [10] Degryse F, McLaughlin M J. Phosphorus diffusion from fertilizer: visualization, chemical measurements, and modeling [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78 (3): 832-842.
- [11] Mcbeath T M, Smernik R J, Lombi E, et al. Hydrolysis of pyrophosphate in a highly calcareous soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70 (3): 856-862.
- [12] Gilliam J W. Hydrolysis and uptake of pyrophosphate by plant roots [J]. Soil Science Society of America Journal, 1970, 34 (1): 83-86.
- [13] Philen O D, Lehr J R. Reactions of ammonium polyphosphates with soil minerals [J]. Soil Science Society of America Journal, 1967, 31 (2): 196-199.
- [14] Khasawneh F E, Hashimoto I, Sample E C. Reactions of ammonium ortho - and polyphosphate fertilizers in soil: II. Hydrolysis and reactions with soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1979, 43 (1): 52-58.
- [15] Hedley M, McLaughlin M. Reactions of phosphate fertilizers and by - products in soils [M]. // Phosphorus: Agriculture and the Environment, Madison: American Society of Agronomy, 2005 (phosphorusaric): 181-252.
- [16] Sample E C, Akin G W, Mikkelsen R. TVA fluid fertilizers chapter two - agronomic aspects [M]. International Plant Nutrition Institute, 1984.
- [17] Tabatabai M A, Dick W A. Distribution and stability of pyrophosphatase in soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1979,

- 11 (6): 655 – 659.
- [18] Dick R P, Tabatabai M A. Hydrolysis of polyphosphates in soils [J]. *Soil Science*, 1986, 142 (3): 132 – 140.
- [19] Sutton C D, Larsen S. Pyrophosphate as a source of phosphorus for plants [J]. *Soil Science*, 1964, 97 (3): 196 – 201.
- [20] Busman L M, Tabatabai M A. Hydrolysis of trimetaphosphate in soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49 (3): 630 – 636.
- [21] 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 (6): 408 – 416.
- [22] Tomar N K, Gautam K. Effect of soil properties on hydrolysis of ammonium polyphosphate and tetrapotassium pyrophosphate in some arid and semiarid soils [J]. *Arid Land Research and Management*, 1996, 10 (1): 43 – 51.
- [23] Sample E C, Soper R J, Racz G J. Reactions of phosphate fertilizers in soils [J]. *The Role of Phosphorus in Agriculture*, 1980 (theroleofphosph): 263 – 310.
- [24] Subbarao Y V. Polyphosphate Hydrolysis and reaction products in soils and solutions [D]. America: Kansas State University, 1975. 95 – 95.
- [25] Halliwell D J, McKelvie I D, Hart B T, et al. Hydrolysis of triphosphate from detergents in a rural waste water system [J]. *Water Research*, 2001, 35 (2): 448 – 454.
- [26] Bertrand I M, McLaughlin C, Johnston R, et al. Determining the efficiency of fluid fertilizers in alkaline soils [J]. *Fluid Fertilizer Foundation*, 2002: 151 – 163.
- [27] McLaughlin M J E, Lombi R, Holloway C, et al. Reactions of granular and fluid products in calcareous soils [J]. *Fluid Fertilizer Foundation*, 2003: 143 – 151.
- [28] Holloway R E, Brace D M, Frischke B, et al. Fluid P fertilization advantages for wheat on highly calcareous soils [J]. *Fluid Fertilizer Foundation*, 2003: 129 – 143.
- [29] Amer F, Mostafa H E. Effect of pyrophosphate on orthophosphate reactions in calcareous soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45 (5): 842 – 847.
- [30] Coleman R. The mechanism of phosphate fixation by montmorillonitic and kaolinitic clays [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1945, 9 (C): 72 – 78.
- [31] Haseman J F, Brown E H, Whitt C D. Some reactions of phosphate with clays and hydrous oxides of iron and aluminum [J]. *Soil Science*, 1950, 70 (4): 257 – 272.
- [32] Taylor A W, Gurney E L. Precipitation of phosphate from concentrated fertilizer solution by soil clays [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1965, 29 (1): 94 – 95.
- [33] Lindsay W L, Frazier A W, Stephenson H F. Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1962, 26 (5): 446 – 452.
- [34] 吕贻忠. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. 248 – 251.
- [35] 李春俭. 高级植物营养学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008. 272 – 273.
- [36] Lauer D A. Vertical distribution in soil of unincorporated surface – applied phosphorus under sprinkler irrigation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52 (6): 1685 – 1692.
- [37] Khasawneh F E, Sample E C, Hashimoto I. Reactions of ammonium ortho – and polyphosphate fertilizers in soil: I. Mobility of phosphorus [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1974, 38 (3): 446 – 451.
- [38] Kovar J. Fall surface – applied fluid P movement into soil limits potential loss to erosion [J]. *Fluid Journal*, 2006, 14: 14 – 16.
- [39] Sutton C D, 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 (3): 199 – 209.
- [40] Blancher R W, Hossner L R. Hydrolysis, sorption, and plant uptake of phosphorus from 32 corn belt soils treated with ortho, pyro and trimetaphosphate [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33: 622 – 625.
- [41] Hossner L R, Phillips D P. Pyrophosphate hydrolysis in flooded soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1971, 35 (3): 379 – 383.
- [42] Venugopalan M V, Prasad R. Hydrolysis of ammonium polyphosphate in soils under aerobic and anaerobic conditions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1989, 8 (4): 325 – 327.
- [43] Giordano P M, Mortvedt J J. Response of corn to Zn in ortho – and pyrophosphate fertilizers, as affected by soil temperature and moisture [J]. *Agronomy Journal*, 1978, 70 (4): 531 – 534.
- [44] 黄燕, 汪春, 衣淑娟. 液体肥料的应用现状与发展前景 [J]. *农机化研究*, 2006, (2): 198 – 200.
- [45] 钟欣. 农用聚磷酸铵引领磷肥液体化新方向 [N]. *农民日报*, 2016 – 10 – 20 (007).
- [46] 龙平. 低聚磷酸铵制备技术及应用研究进展 [J]. *泸天化科技*, 2016, (4): 224 – 227.
- [47] Hignett T P. *Fertilizer manual* [M]. Alabama: International Fertilizer Development Center, 1985.
- [48] Mann H C, McGill K E, Jones T M. Production of ammonium polyphosphate suspension fertilizer. Phase I [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, 1982, 21 (3): 488 – 495.
- [49] Young R D, Westfall D G, Colliver G W. Production, marketing, and use of phosphorus fertilizers [J]. *Fertilizer Technology and Use*, 1985 (fertilizer techn): 323 – 376.
- [50] Douglas B B, Dwight D L. *Starter fertilizer* [M]. Penn State Extension, 2007. 1 – 4.
- [51] Holloway R E, Bertrand I, Frischke A J, et al. Improving fertilizer efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn [J]. *Plant and Soil*, 2001, 236 (2): 209 – 219.
- [52] Venugopalan M V, Prasad R. Relative efficiency of ammonium polyphosphate and orthophosphates for wheat and their residual effects on succeeding cowpea fodder [J]. *Nutrient Cycling in*

- Agroecosystems, 1989, 20 (2): 109–114.
- [53] 章守陶, 谢泰云, 周志英. 聚磷酸铵液体复合肥料的肥效简报 [J]. 土壤肥料, 1991, (3): 16.
- [54] Holloway R, Frischke B, Brace D, et al. APP fluid surpasses granular in Australian grain trials [J]. Fluid Journal, 2005, 13 (2): 14–16.
- [55] Engelstad O P, Allen S E. Ammonium pyrophosphate and ammonium orthophosphate as phosphorus sources: Effects of soil temperature, placement, and incubation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1971, 35 (6): 1002–1004.
- [56] Weeks J J, Hettiarachchi G M, Blending M A P. APP reduces fluid fertilizer input costs while mitigating environmental impact in high pH soils [J]. The Fluid Journal, 2017, 25: 12–14.

Research progress on the availability of ammonium polyphosphate in soil and its application in agriculture

YANG Xu, ZHANG Cheng-lin*, HU Yi-ao, DENG Lan-sheng (South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong 510642)

Abstract: The agricultural ammonium polyphosphates gradually enter the field of chemical fertilizers in China as a new fertilizer in recent years, and are commonly used as a basic phosphate for high concentration liquid composite fertilizer. The pH of ammonium polyphosphate is near neutral, with good properties of low crystallization temperature, chelating, and slow release, which has great potential as the new basic phosphate. In this paper, the factors influencing the availability (solubility and mobility) of ammonium polyphosphate in soil were reviewed. The effects of hydrolysis rate, soil mineral, soil texture and moisture on the availability of ammonium polyphosphate in soil were mainly illustrated. And we also analyzed the application and development prospect of ammonium polyphosphate in agriculture.

Key words: ammonium polyphosphate; soil availability; agricultural application

《中国土壤与肥料》征稿简则

《中国土壤与肥料》1964年创刊,是农业部主管、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所和中国植物营养与肥料学会主办的全国性专业科技期刊。为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国农业核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊。被中国科学引文数据库(CSCD)核心库、中国学术期刊综合评价数据库、CBST科学技术文献速报(日)、中国学术期刊文摘、CA化学文摘(美)、CABA农业与生物科学研究中心文摘(英)等收录。以促进土壤学科的发展为宗旨,加快成果转化、推动技术进步为目标。面向科研、教学和生产实践。主要刊登土壤资源与利用、植物营养与施肥、农业水资源利用、农业微生物、分析测试、环境保护、生态农业等方面的新理论、新技术、新产品的试验研究成果与动态。辟有专家论坛、专题综述、研究报告、分析方法、研究简报等栏目。读者对象为农业科研、教学、推广、环保及肥料生产、经营部门的科技、管理人员及农民技术员。

来稿要求和注意事项:

1. 文稿请按“科技论文编写格式”撰写。要求论点明确、层次分明、数据可靠、图表清晰、文字精炼、标点准确,有关数据进行统计分析。
 2. 研究论文要有中、英文摘要和关键词。摘要中要含有论文的重要数据。
 3. 量和单位及符号采用国家法定计量单位,符合国标对科技期刊的要求,不再使用N、M、ppm、rpm、亩、目等。土壤的磷、钾养分含量需用P、K计算,肥料的磷、钾养分含量用 P_2O_5 、 K_2O 计算。
 4. 图、表要有自明性,不要求英文标注。表格采用三线表格式,图一律为黑白图,不要边框、背景和网格线。
 5. 参考文献只列出直接引用并已公开发表的文章、著作等。按正文中出现的先后排序(顺序编码制)。文献序号加方括号,在引用处以上标方式标注。中文文献不要求列英文注释。文献作者只写前3人姓名,超过3人后面加“等”,3人之内全部列出。英文文献作者姓名姓前、名后,姓第1个字母大写,名用大写字母缩写(大写字母后不加点)。
 6. 在首页脚注位置,标注基金项目、第一作者简介以及通讯作者姓名和信箱。
- 作者简介:** 姓名(出生年-),性别,民族(汉族可省略),籍贯,学位,职称,研究方向。E-mail。
7. 以word格式、A4纸型排版,通过本刊网站远程稿件处理系统在线投稿,并可查看稿件处理进程及录用情况。
 8. 文稿著作权属于作者。文责作者自负,本编辑部为保证文稿的规范和精练,可对内容进行必要的修改、删节。作者如有不同意见可在来稿中注明。
 9. 文稿请勿一稿多投。论文经初审通过后收取审稿费并送专家评审。论文一经录用,确定刊期后收取稿件处理费;刊出后付给作者稿酬,并赠送2本当期期刊。论文刊出后同时以网络方式发布。

地址:北京市中关村南大街12号(100081)中国农业科学院农业资源与农业区划研究所《中国土壤与肥料》编辑部
电话:010-82108656 传真:010-82106225 网址: <http://chinatrfl.alljournal.net.cn> E-mail: trfl@caas.cn