◆磷及关联产业工艺创新◆

高效肥料级聚磷酸铵研究进展

羊　炀[1,2]，万清花[1,2]，杨晶旭[1,2]，严正娟[1,2]，许德华[1,2]，王辛龙[1,2]

（1. 四川大学 化学工程学院，四川 成都　610065；2. 教育部磷资源综合利用与清洁加工工程研究中心，四川 成都　610065）

［摘　要］聚磷酸铵（APP）作为水溶性氮磷复合肥，通过热缩合反应形成具有P—O—P交替结构的寡聚混合物，其数均聚合度通常低于20。相较于传统磷酸盐，APP凭借高水溶性和缓释特性，可在土壤中有效解吸金属离子形成扩散性螯合体，减少磷固定，并通过根际酸性环境逐步水解释放正磷酸盐供植物吸收，显著提高磷利用率。系统综述APP的全球产业现状、主流生产工艺（过磷酸氨化法与磷酸铵-尿素缩合法）及成本结构，指出其发展受限于原料成本高、聚合度调控难及土壤传质动力学机制不明等问题。当前需建立全周期质量监测体系，并深入探究其土壤固定动力学机制，以精准调控关键生育期磷素供应。未来研究方向应聚焦生产工艺优化与多场景肥效评价，推动该肥料在农业中的规模化应用。

［关键词］聚磷酸铵；产业现状；制备工艺；发展前景；磷肥增效；聚合度分布；缓释肥料

［中图分类号］TQ126.3+5　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）01-0038-06

Research progress of high-efficiency fertilizer grade ammonium polyphosphate

YANG Yang[1,2], WAN Qinghua[1,2], YANG Jingxu[1,2], YAN Zhengjuan[1,2], XU Dehua[1,2], WANG Xinlong[1,2]

（1. *School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu* 610065, *China*; 2. *Ministry of Education Research Center for Comprehensive Utilization and Clean Processing Engineering of Phosphorus Resources, Chengdu* 610065, *China*）

Abstract: Ammonium polyphosphate (APP), as a water-soluble nitrogen-phosphorus compound fertilizer, is formed through thermal condensation reactions to produce an oligomeric mixture with an alternating P—O—P structure, typically exhibiting a number-average polymerization degree below 20. Compared to traditional phosphates, APP leverages its high water solubility and slow-release properties to effectively desorb metal ions in the soil, forming diffusible chelates that reduce phosphorus fixation. It gradually hydrolyzes in the rhizosphere's acidic environment to release orthophosphate for plant uptake, significantly enhancing phosphorus utilization efficiency. A comprehensive overview of the global industry status, mainstream production processes (ammonium phosphate ammonification method and ammonium phosphate urea condensation method), and cost structure of APP is provided. It is pointed out that its development is limited by high raw material costs, difficulty in controlling polymerization degree, and unclear mass transfer kinetic mechanisms in soil. Currently, there is a need to establish a comprehensive quality monitoring system and further investigate its soil fixation kinetics to precisely regulate phosphorus supply during key growth stages. Future research should focus on optimizing production processes and evaluating fertilizer efficiency across diverse scenarios to facilitate the large-scale application of APP in agriculture.

Key words: ammonium polyphosphate; industrial status; preparation process; development prospects; efficiency increase of phosphate fertilizer; distribution of aggregation degree; slow-release fertilizer

磷酸盐受热发生分子间脱水，聚合形成具有P—O—P交替结构的聚磷酸盐（见图1）[1]。用于肥料的聚磷酸铵（APP，$(NH_4)_{n+2}P_nO_{3n+1}$）往往是不同链长的寡聚物混合体，是因为热缩合反应得到APP的过程中铵不可控挥发为氨气[2]。数均聚合度（n）在20以下的APP是一类水溶性氮磷复合肥，施用于土壤后，能够在土壤溶液和团粒的界面处解吸、螯合金属元素，从而使磷与中微量元素扩散得更远[3]。不同于传统磷酸盐肥料更多地吸附和固定于土壤胶体表面，聚磷酸根-金属离子螯合体能较

收稿日期：2025-11-18

作者简介：羊　炀（1999—　），男，四川绵阳人，在读硕士研究生，研究方向为磷化工。

通信作者：杨晶旭（1993—　），男，助理研究员，研究方向为磷化工。

基金项目：国家自然科学基金（32502829）

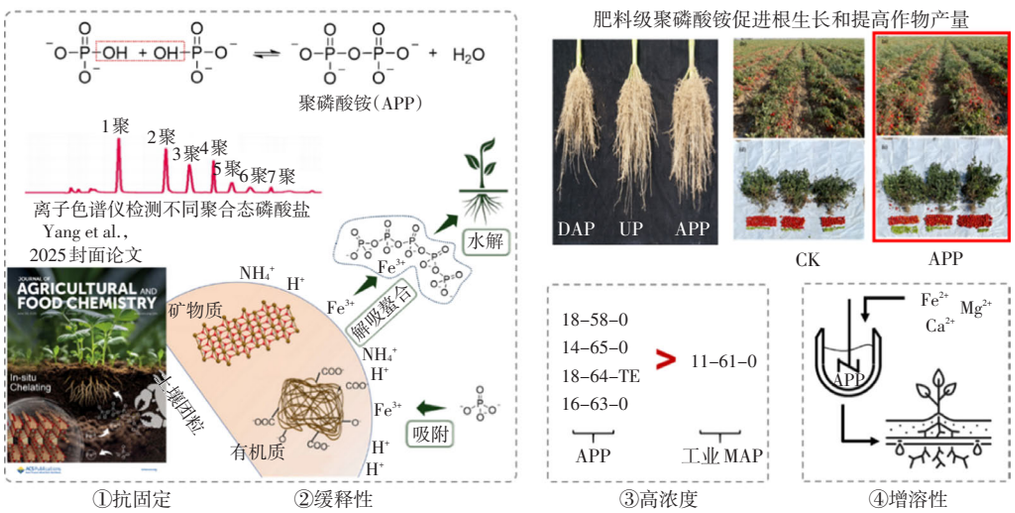


图1　肥料级聚磷酸铵及其农业增效原理

Fig. 1　Fertilizer grade APP and its agricultural efficiency enhancement principles

自由地扩散至根际，在根分泌弱酸的作用下逐步水解断链成正磷酸盐进而被植物吸收。正是APP这种高水溶性（抗固定）和缓释性的统一，使得APP比等量正磷酸盐（如磷酸一铵和磷酸二铵）磷利用率更高[4]。再加上APP粉体较高的养分浓度和液体肥配肥过程对中微量营养元素的螯合与增溶，近年来有关APP促进根生长和提高作物产量的报道不断涌现[5-6]。

1　肥料级聚磷酸铵产品与市场

肥料级APP产业目前存在两大类产品，即液体产品和固体产品。过磷酸氨化法制液体APP技术由1965年美国TVA（田纳西河流域管理局）开发，自那时起APP逐渐进入液体配方肥料的生产领域并实现了农用APP的工业化生产[7]，特别是在美国和欧洲得到广泛应用，产量达200万t/a（见图2）[8]。20世纪70年代，美国TVA通过料幕法生产规格为11–56–0的APP产品，双轴造粒技术生产规格为12–57–0的APP产品。印度RCF公司通过料幕法生产规格为12–56–0的APP产品。料幕法本质上是将磷酸氨化制得的液体APP造粒成固体产品。然而，这些液体APP技术传入我国以后出现“水土不服”。因为我国磷矿杂质含量高，湿法磷酸浓缩为过磷酸（$w(H_3PO_4)$105%或115%）的成本高，且我国磷肥产地（云南省、贵州省、四川省、湖北省）与北方广阔的种植市场相距甚远（距西北种植区2 500 km，距华北种植区1 500 km，距东北种植区2 500 km），所以液体APP高昂的原料和运输成本限制了其在国内的发展。固体APP通过磷酸铵盐（或磷酸）与尿素热缩合反应制得，国内已经生产了18–58–0和14–65–0等牌号，目前已经成为肥料级APP主流产品；2019年金正大生态工程集团股份有限公司20万t/a固体APP项目正式投产，带动了国内一批肥料级APP项目建设（见图3a.）。然而，目前我国量产的APP要么聚合度太高水溶性欠佳、引入危险的P_2O_5带压生产成本高，要么以焦磷酸铵（二聚体）为主，螯合能力差。同时，为了保证较为理想的水溶性，固体APP往往采用昂贵的工业级磷酸一铵作为原料，反而缺少植物所需的中微量元素。

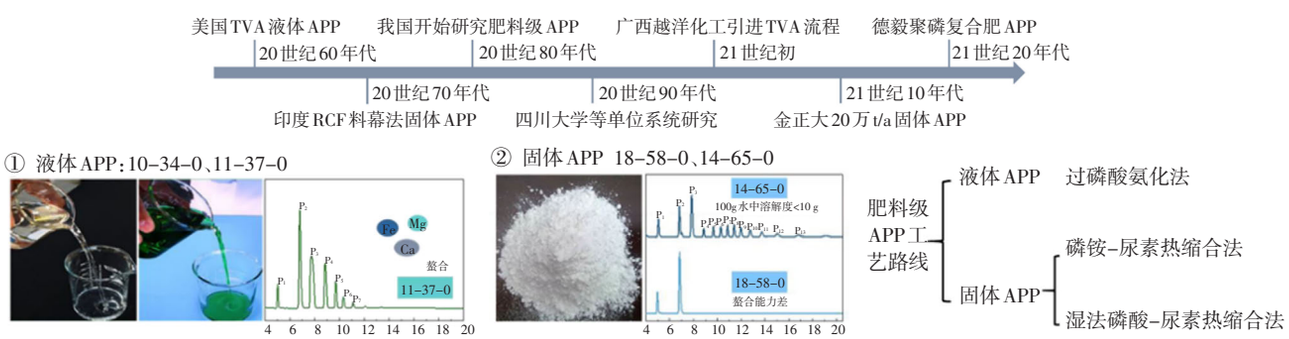


图2　我国全水溶聚磷酸铵市场现状

Fig. 2　Current status of the fully water-soluble ammonium polyphosphate market in China

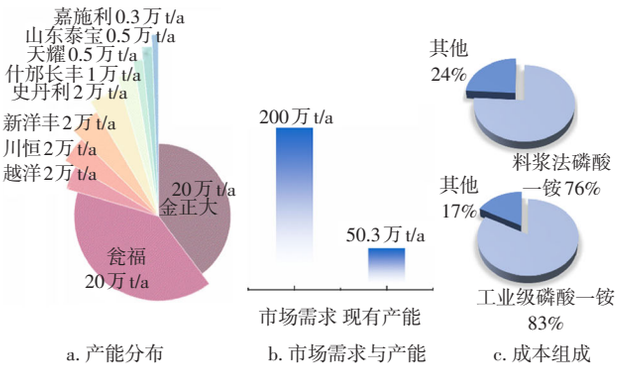


图 3　我国全水溶聚磷酸铵产业现状（截至 2021 年）

Fig. 3　Current status of fully water-soluble ammonium polyphosphate industry in China（as of 2021）

聚磷酸铵首先在欧美等发达国家得到广泛应用。当前全球液体肥料市场的整体规模已突破 1 000 亿美元，而 APP 肥料的市场体量约为 100 亿美元，全球年需求量大致为 500 万 t，表明其未来具有广阔的增长空间。北美、西欧以及亚太地区构成了肥料级 APP 的主要消费区域。2005 年，北美与西欧的消费量分别为全球总量的 37.99% 和 33.06%；2014 年，这两个地区的占比分别下降为 28.19% 和 22.07%。与此同时，亚太地区的需求增速远超传统发达国家，已成为世界上最大的肥料级 APP 消费区域[9]。我国肥料级 APP 总产能约 50 万 t/a，随着水肥一体化的发展，其市场需求还在不断扩张，供不应求的局面使水溶肥产品价格稳定在 8 000 元/t 高位小幅度波动[10-11]。因此，具有适当聚合度的低成本 APP 粉体产品依然是十分缺乏的（见图 3b.）。采用工业级磷铵或磷酸制备的全水溶 APP 已经越来越成为水肥一体化不可或缺的基础磷肥；而作物的生长发育离不开钙、镁、铁、锰等中微量营养元素[12]，采用廉价磷源（如料浆法磷酸一铵、白肥、萃余酸等）制备构溶性复合肥 APP，APP 在聚合过程原位螯合利用中微量元素杂质，从而提高这些废弃磷资源的水有比（水溶磷占有效磷比例）和农业增产潜力。湖北德毅聚磷科技有限公司将萃余酸、工铵渣等“磷化工边角料”作为原料生产水溶–构溶磷结合的 APP 肥料，一期 2 万 t/a 装置已于 2025 年投产[13]。该工艺的一个隐患是，提高的水有比可能不是磷聚合导致的，更像是引入大量硫酸提高 APP 酸性导致的。同时，氮、磷养分被引入的硫酸根稀释了，储运成本提高。为此，及时对肥料级 APP 的肥效进行评价就显得尤为重要。除了迎合市场的水有比、养分浓度等指标，需要更多大田试验的数据，以证明磷形态调控的重要性。因为来自农业的大量研究表明具有更高 PDI 值（重均聚合度与数均聚合度的比值，为聚合物的多分散性指数）的 APP 在土壤中的磷释放更能与植物的整个生长周期同步[14]，而当 APP 水溶性过高、聚合度分布过于宽泛而在土壤中扩散能力过强时，又会存在被淋失的风险。

2　肥料级聚磷酸铵设备与工艺

目前我国水溶性聚磷酸铵主流生产工艺有聚磷酸氨化法和磷酸铵–尿素缩合法[15]。

（1）液体工艺：如图 4，液氨通过两段氨蒸发

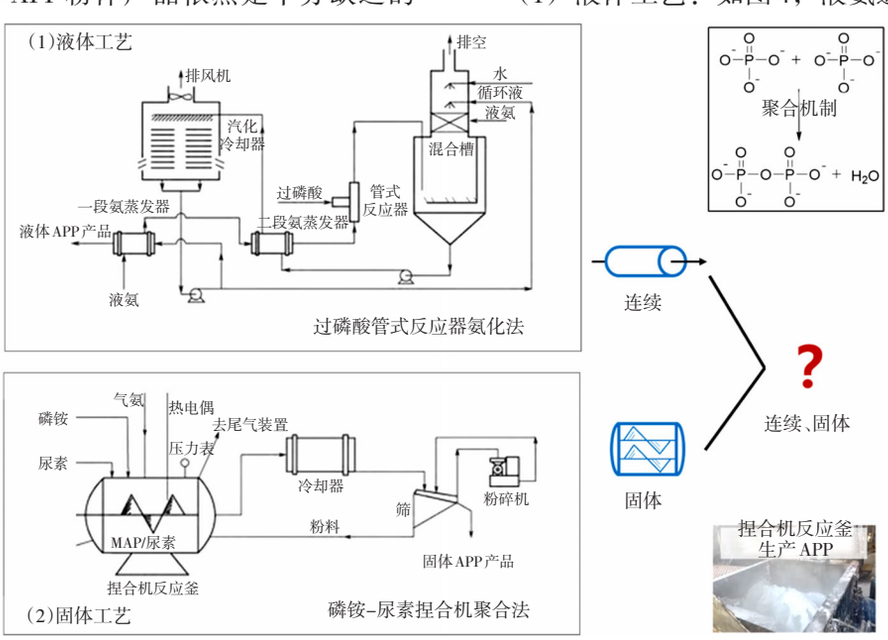


图 4　肥料级聚磷酸铵的主流生产工艺

Fig. 4　Mainstream production processes for fertilizer grade ammonium polyphosphate

器气化，热源来自过磷酸氨化放热。氨气在管式反应器中与过磷酸接触，发生中和与聚合反应，同时蒸发部分水分。浆体产物在混合槽与水混合，并补充液氨。混合槽液体大部分循环预热液氨，少部分经空气冷却后作为液体APP产品。该路线涉及的主要设备有一段氨蒸发器、二段氨蒸发器、汽化冷却器、混合槽、管式反应器、排风机等。

（2）固体工艺：磷铵（或磷酸）和尿素在带加热的捏合机反应釜内混合并发生聚合反应，反应后的物料经冷却器冷却，再经过筛分，最终得到固体APP产品。该路线涉及的主要设备有捏合机反应釜、尾气（含二氧化碳、水和氨气）处理装置、冷却器、筛分装置、粉碎机等（见图4）[16]。

液体工艺尽管可连续生产，但仅能获得低养分浓度的液体肥，对磷酸品质要求较高；而现有的固体工艺为釜式反应器间歇生产，产品的批次差异较大，产能也有限。因此，未来需结合两种工艺的优点，实现固体APP的连续或者半连续生产[17]。

3　肥料级聚磷酸铵消耗与成本

水溶性聚磷酸铵（18–59–0）的成本测算见表1。如图3c.和表1所示，工业级磷酸一铵（11–61–0）制水溶性APP（18–59–0）的磷源成本占总成本的比例高达83%。新能源的发展使作为正极材料原料的工业级磷酸一铵溢价严重。因此，即使养分含量会有所降低，目前仍然主要以农用水溶性磷酸一铵替代工业级磷酸一铵生产全水溶APP。另外，尽管目前料浆法磷酸一铵（10–48–0）制复合肥APP（13–49–0）的磷源成本仅占76%（见图3c.和表2），但因复合肥APP含有枸溶性磷而价格远低于水溶性APP，所以更为迫切地需要寻找能够替代料浆法磷酸一铵的更廉价的磷源，以创造更具吸引力的利润空间。这两类肥料级APP产品的缩合剂尿素用量均远低于理论值（尿素与磷铵摩尔比1∶1），这是因为尿素促进聚合反应的同时转化为氨，氮养分发生贬值，其中大量的氨还因为挥发而损失。因此，在满足聚合需求的前提下，减少尿素用量能够有效降低原料成本。同时，在磷铵–尿素法制备肥料级APP过程中，尿素分解释放大量CO_2和NH_3气体会导致反应体系剧烈发泡，引发溢料、物料损失等问题。黄金龙等[18]通过在料浆中复配适量金属盐，在抑制聚合体系起泡同时制备出符合HG/T 5939—2021要求的APP产品。含氨尾气可通过园区湿法磷酸、萃余酸等廉价酸液吸收。另外，由于聚合过程中铵不可控挥发为氨气，所得水溶性APP实际上为聚磷酸铵的酸式盐，同时也是结晶度较差的分子晶体（点阵点上为随机的不同链长的聚磷分子），所以易

表1　水溶性聚磷酸铵（18–59–0）成本测算

Table 1　Cost estimation for water-soluble ammonium polyphosphate（18–59–0）

类别	项目	单价/(元·t^{-1})	单耗/(t·t^{-1})	成本/(元·t^{-1})	备注
原材料	工业级磷酸一铵	4 950.0	0.90	4 455.0	工业级磷酸一铵(11–61–0)含税出厂价
	尿素	1 970.0	0.25	492.5	尿素含税出厂价
	添加剂	2 650.0	0.09	238.5	
	副产氨水(w(NH_3)25.4%)	808.6	–0.60	–485.2	液氨含税出厂价3 183.5元/t
燃料动力	水、电、蒸汽等			301.0	700 kW总装机功率
固定成本	折旧费			250.0	建设投资1 250万元，产能0.5万t/a，按10年折旧
	人员工费			20.0	
	其他费用			80.0	
合计				5 351.8	

表2　复合肥聚磷酸铵（13–49–0）成本测算

Table 2　Cost estimation for compound fertilizer ammonium polyphosphate（13–49–0）

类别	项目	单价/(元·t^{-1})	单耗/(t·t^{-1})	成本/(元·t^{-1})	备注
原材料	料浆法磷酸一铵	3 000.0	0.93	2 790.0	料浆法磷酸一铵(10–48–0)含税出厂价
	尿素	1 970.0	0.20	394.0	尿素含税出厂价
	添加剂	2 650.0	0.09	238.5	
	副产氨水(w(NH_3)25.4%)	808.6	–0.48	–388.1	液氨含税出厂价3 183.5元/t
燃料动力	水、电、蒸汽等			301.0	700 kW总装机功率
固定成本	折旧费			250.0	建设投资1 250万元，产能0.5万t/a，按10年折旧
	人员工费			20.0	
	其他费用			80.0	
合计				3 685.4	

遭受水分子的进攻而吸潮。国内对水溶性APP的防结块技术主要依赖于物理造粒包裹和化学添加剂两种路径，其中化学添加剂为无机盐或表面活性剂类。杨旭东等[19]通过研究APP结块机制并在聚合后加入质量分数为0.5%的防结块剂有效改善产品结块现象。建设规模方面，应选择适当大的产能规划，如>5 000 t/a，以获得更低的设备折旧和更高的装置稳定性。

4 肥料级聚磷酸铵检测与研发

我国先后于2020年和2021年更新和制定了工业级聚磷酸铵（HG/T 2770—2020）和肥料级聚磷酸铵（HG/T 5939—2021）行业标准。现有标准涵盖了对肥料级APP氮磷含量、水不溶物、水分、pH和聚合度（APP分子量分布）等指标的测定规范。这些检测方法的特点与适用范围见表3。其中，有效磷与水溶磷的测定主要还是在经典的喹钼柠酮沉淀法基础上，用硝酸彻底水解聚磷后测定。同时，因为聚磷对金属杂质的螯合与活化，用较大孔的G_1砂芯过滤器已无法测定许多复合肥APP的水不溶物，这时可以采用较小滤孔的G_4砂芯坩埚

表3 肥料级聚磷酸铵的检测方法

Table 3 Testing methods of fertilizer grade ammonium polyphosphate

项目	方法	特点	适用范围	参考标准
有效磷与水溶磷	重量法	喹钼柠酮沉淀	沉淀前用20 mL HNO_3(1+1)/20 mg P_2O_5煮沸20 min以上	HG/T 5939—2021 GB/T 8573—2017
	容量法	用酸滴定溶解喹钼柠酮沉淀后剩余的碱	沉淀前用20 mL HNO_3(1+1)/20 mg P_2O_5煮沸20 min以上	HG/T 2770—2020 GB/T 8573—2017
总氮	蒸馏后滴定法			HG/T 5939—2021
水不溶物	溶解–过滤–称量法		须标明所用砂芯过滤器型号，水溶性APP可用G_4砂芯坩埚	HG/T 5939—2021
水分	真空烘箱法			HG/T 5939—2021
pH	pH计法			HG/T 5939—2021
聚合度	离子色谱法	快捷但昂贵	只能测APP水溶磷部分的聚合度分布	HG/T 5939—2021
	离子交换柱法	烦琐且耗时，成本低	EDTA碱煮后可测复合肥APP整体聚合度分布	HG/T 5939—2021
	端基滴定法	烦琐且误差大，成本低	只能测数均聚合度，无法测聚合度分布	HG/T 2770—2020
	核磁共振法	快捷但昂贵	只能测数均聚合度，无法测聚合度分布	HG/T 2770—2020
	钒钼酸铵比色法	利用聚合态磷无显色反应的特性，成本低	只能测聚合率，复合肥APP须配合EDTA碱煮	Q/DYJL 003—2005

（但需标明）。另外，需要强调的是，在众多的聚合度测定方法中，仅有离子色谱法和离子交换柱法可以测定分子量分布，即聚合度分布。鉴于目前行业标准（HG/T 5939—2021）仅限定了肥料级APP的聚合率，而对聚合度分布没有强制要求，所以如钒钼酸铵比色法这样的化学分析方法，因其廉价、便捷的优点，开始被相关行业人员尤其是企业采用。前已述及，APP一般为不同链长聚磷酸盐分子的混合物，所以涉及平均聚合度（分子量）的概念。以不同链长分子的质量权重加和可得重均聚合度，乘以单体分子量后对应聚合物术语中的重均分子量；以不同链长分子的数量（摩尔）权重加和可得数均聚合度，乘以单体分子量后对应数均分子量。PDI值越高，APP的聚合度分布越宽泛。目前也仅有离子色谱法和离子交换柱法可以测定PDI值，因为它们可以获得每种链长APP分子的质量和数量占比。端基滴定法由于操作烦琐，且用于测定低聚肥料级APP时误差大，基本不再应用。核磁共振法和端基滴定法测定的平均聚合度实际上是数均聚合度，且仅适用于直链线性APP测定。绝大部分肥料级APP均为I型直链APP。

目前，对肥料级APP的土壤传递和植物营养研究还处在初级阶段。尽管国内不少学者已经对不同聚合度分布APP施用于不同种类的土壤的肥效进行了评价和探索[20-22]，但这些重要进展大体上都集中在APP的传质热力学上，即只回答了APP“容不容易固定”的问题，却很少关注“多久固定”的动力学问题。要知道，作物生长周期是有限的，如果当季作物在数周内的养分临界期得不到磷供给，APP磷活性再高也无意义。因此，需要搭建“生产–检测–应用–生产”的肥料级APP产品开发逻辑链条（见图5）。也就是说，通过检测各项指标特别是聚合度分布来实现对APP产品品质的监测；同时，又通过APP肥效评价和土壤传质验证，及时调整工艺条件获得真正符合作物养分时空需求的APP分子量和水溶性。在我们前期的工作中，发现聚合度分布较宽的肥料级APP在以针铁矿为主的土壤中更具有活化中微量元素的潜力[3]。所以我们将注意力集中

在生产聚合度宽分布的水溶性APP上，试图提高其螯合性和增溶中微量元素的能力，同时在土壤中也具有更好的表现，最终实现磷的高效利用。

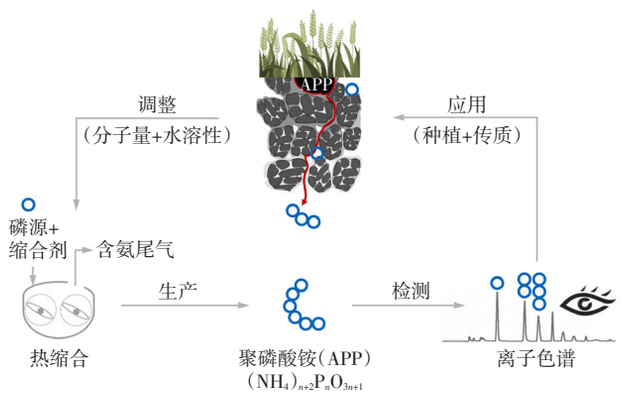


图5　肥料级聚磷酸铵“生产–检测–应用–生产”的开发逻辑

Fig. 5　The “production-testing-application-production” development logic for fertilizer grade ammonium polyphosphate

5　结论

肥料级APP具有优越的水溶性和螯合特性，使其在土壤中能够更有效地释放养分，提升植物对磷的利用率。这种特性使得APP相比传统磷酸盐肥料更具优势。聚合度的分布对APP的肥效有显著影响，较宽泛的聚合度分布能够在特定土壤中更有效地激活中微量元素，但要避免在水流较快的土壤中大量淋失。建议建立“生产–检测–应用–生产”的开发逻辑链条，以强化对APP产品的质量监测和肥效评价，从而满足作物在整个生长周期内的养分需求。采用廉价磷源（如渣酸等）制备复合肥APP，能够有效提高废弃磷资源的利用率，并在生产过程中实现中微量元素的螯合。当前对肥料级APP的研究仍处于初级阶段，未来需要更多关注其在土壤中的固定动力学特性，以确保作物在关键生长阶段获得足够的磷供给。

［参考文献］

［1］ SHEN C Y，STAHLHEBER N E，DYROFF D R，et al. Preparation and characterization of crystalline long-chain ammonium polyphosphates［J］. Journal of the American Chemical Society，1969，91（1）：62–67.

［2］ 杨荣杰，仪德启.聚磷酸铵［M］.北京：科学出版社，2015.
YANG R J，YI D Q. Ammonium Polyphosphate［M］. Beijing：Science Press，2015.

［3］ YANG J X，JI L M，TAN Y，et al. Chain-Length-Selective Hydrolysis of Polyphosphate Fertilizer on Soil Goethite［J］. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2025，73（22）：13273–13282.

［4］ 袁太艳.水溶性聚磷酸铵对土壤磷素转化及有效性的影响机制［D］.成都：四川大学，2022.
YUAN T Y. Mechanism of soil phosphorus transformation and availability influenced by water-soluble ammonium polyphosphate［D］. Chengdu：Sichuan University，2022.

［5］ 彭晓云，魏亮.新型磷肥——农用聚磷酸铵发展现状及田间应用效果［J］.磷肥与复肥，2024，39（5）：49–52.
PENG X Y，WEI L. Development status and field application effects of a new type phosphate fertilizer—agricultural ammonium polyphosphate［J］. Phosphate & Compound Fertilizer，2024，39（5）：49–52.

［6］ 雷梅花.新型聚磷酸铵农化特性的研究［D］.贵阳：贵州大学，2024.
LEI M H. Study on the Agrochemical Characteristics of New Type Ammonium Polyphosphate［D］. Guiyang：Guizhou University，2024.

［7］ 罗澄源，林乐，钟本和，等.磷酸铵类肥料技术讲座　第八讲　含聚磷酸铵肥料的生产［J］.磷肥与复肥，2000，15（5）：74–78.
LUO C Y，LIN L，ZHONG B H，et al. Lectures on technology for ammonium phosphates-Lesson 8：production of containing fertilizers containing ammonium polyphosphate［J］. Phosphate & Compound Fertilizer，2000，15（5）：74–78.

［8］ 许德军，钟本和，张志业，等.水溶性聚磷酸铵的制备及应用研究进展［J］.化工进展，2021，40（1）：378–385.
XU D J，ZHONG B H，ZHANG Z Y，et al. Research progress of preparation and application of water-soluble ammonium polyphosphate［J］. Chemical Industry and Engineering Progress，2021，40（1）：378–385.

［9］ 吴磊，赵勇，杨俊.聚磷酸铵在我国的发展前景探讨［J］.磷肥与复肥，2023，38（9）：45–48.
WU L，ZHAO Y，YANG J. Development prospect of APP in China［J］. Phosphate & Compound Fertilizer，2023，38（9）：45–48.

［10］ 赵丹.我国液体肥发展“加速跑”［J］.营销界，2021（23）：34–37.

［11］ 生意社.聚磷酸铵价格［EB/OL］.（2025–12–11）［2025–12–11］.https://www.100ppi.com/mprice/plist-1-1853-1.html.

［12］ 杨晓丹，张宏波，魏婷婷，等.中微量元素肥料不同用量对水稻产量及品质的影响［J］.中国农学通报，2023，39（15）：76–84.
YANG X D，ZHANG H B，WEI T T，et al. Effects of Different Amounts of Medium and Microelement Fertilizers on Yield and Quality of Rice［J］. Chinese Agricultural Science Bulletin，2023，39（15）：76–84.

［13］ 黄忠，何俊，余双强，等.一种利用工业磷酸一铵渣制备含聚磷酸铵复合肥的方法：CN110357670A［P］. 2019–10–22.

［14］ WANG X W，GAO Y J，HU B W，et al. Comparison of the hydrolysis characteristics of three polyphosphates and their effects on soil phosphorus and micronutrient availability［J］. Soil Use Manage，2019，35（4）：664–674.

［15］ 周凌翔，杨晶旭，张志业，等.水溶性聚磷酸铵连续可控制备技术研究［J］.磷肥与复肥，2020，35（12）：9–12.
ZHOU L X，YANG J X，ZHANG Z Y，et al. Study on continuous controllable preparation technology of water-soluble APP［J］. Phosphate & Compound Fertilizer，2020，35（12）：9–12.

［16］ 王辛龙，杨升东，许德华，等.含螯合态中微量元素的水溶性聚磷酸铵及其制备方法：CN109503236A［P］. 2019–03–22.

［17］ 王辛龙，何福多，杨晶旭，等.一种连续生产水溶性固体聚磷酸铵的方法：CN118771924A［P］. 2024–10–15.

（下转第73页）