高效磷铵的供肥特性及肥效研究

林杨杰，廖宗文，李　沛，毛小云

（华南农业大学 资源环境学院，广东 广州　510642）

［摘　要］为缓解资源压力并减少环境风险，通过对常规磷铵添加增效剂进行增效改性，开发高效磷铵产品。采用盆栽试验、土壤培养试验，比较高效磷铵与普通磷铵在供肥特性、肥料利用率及作物增产效果上的差异。结果表明：（1）高效磷铵能显著增强磷素养分的抗土壤固定和抗淋溶流失能力，在水溶液和土壤中的有效磷含量均显著高于普通磷铵，且持续性更长；（2）盆栽及田间试验证实，在磷养分施用量减少10%的条件下，高效磷铵处理的玉米和甘蔗等农作物其生物量和产量均显著高于全量施用普通磷铵的对照；（3）增效机制在于增效剂对养分的吸附、络合作用，使供磷曲线更符合农作物吸磷规律，从而提高了利用率。未来需在增效剂复配、工艺优化及评价标准建立等方面进行深入研究。

［关键词］高效磷铵；供肥特性；肥效；增效机制

［中图分类号］S147.2　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2025）10-0114-06

Study on fertilizer supply characteristics and efficiency of high-efficiency ammonium phosphate

LIN Yangjie, LIAO Zongwen, LI Pei, MAO Xiaoyun

（*College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*）

Abstract: In order to alleviate resource pressure and reduce environmental risks, high-efficiency ammonium phosphate products are developed by adding synergists to conventional ammonium phosphate for efficiency modification. Using pot experiments and soil culture experiments, the differences in fertilizer supply characteristics, fertilizer utilization efficiency and crop yield increase between high-efficiency ammonium phosphate and ordinary ammonium phosphate are systematically compared. The results show that: (1) High-efficiency ammonium phosphate can significantly enhance the soil fixation and leaching resistance of phosphorus nutrients, and its effective phosphorus content in aqueous solution and soil is significantly higher than that of common ammonium phosphate, with longer persistence; (2) Potted and field experiments have confirmed that under the condition of a 10% reduction in phosphorus nutrient application, crops such as corn and sugarcane treated with high-efficiency ammonium phosphate have significantly higher biomass and yield than the control treated with full application of ordinary ammonium phosphate; (3) The mechanism of enhancing efficiency lies in the adsorption and chelation of nutrients by the enhancing agent, which makes the phosphorus supply curve more in line with the phosphorus absorption law of crops, thereby improving utilization efficiency. The efficient ammonium phosphate has significant effects on weight loss, yield increase, high quality and environmental protection. In the future, in-depth research is needed on the formulation of synergists, process optimization and establishment of evaluation standards.

Key words: high-efficiency ammonium phosphate; fertilizer supply characteristics; fertilizer efficiency; efficiency enhancing mechanism

我国磷肥产业面临三大挑战。首先，我国磷资源短缺的形势严峻。我国磷矿资源虽然储量丰富，但高品位磷矿资源有限，磷矿大部分是中低品位矿，在现有技术体系中难以利用，且采矿和选矿成本较高。另外，磷矿资源过度开采和效率低下等问题导致磷资源浪费严重，进一步加剧了磷资源短缺的严峻形势。国土资源部20世纪90年代已把磷矿列为我国2010年后不能满足国民经济发展需要的20种

［收稿日期］2025-02-18

［作者简介］林杨杰（2000-），男，广东揭阳人，在读硕士研究生，主要研究有机废物资源化功能化和新型肥料。

［通信作者］毛小云，教授。

［基金项目］广东省科技计划项目“利用巴基斯坦磷矿研发促释型磷肥及其应用”（2017A050501029）；科技部“促释型磷肥的生产与产业化示范”（2009GB2E000278）

矿产之一，磷矿资源的供需矛盾日益尖锐[1-2]。近10多年来，磷酸铁锂电池等新技术对磷的需求量日益增长进一步加剧了供求矛盾。其次，磷肥生产过程中产生的废水、废气和废渣，如果处理不当，会对环境造成严重污染。同时，磷肥的过量使用导致土壤板结、水体富营养化等环境问题，对生态系统造成负面影响[3]。在环保要求日益严格的背景下，磷肥产业亟须通过技术创新和工艺改进，减少生产和使用过程中的环境污染。最后，市场竞争压力日益加剧。国内磷肥企业数量众多，产能过剩问题突出，市场竞争激烈，部分企业技术水平较低，产品同质化严重，难以形成差异化竞争优势。如何在激烈的市场竞争中脱颖而出，成为国内磷肥企业面临的重大挑战。

现有国内外磷矿加工技术体系，需要用强酸或高温，是一种激烈反应的高能耗体系[4]。在环保日益严格、能源成本日益上升的大背景下，企业困境日益加深，亟须开发低碳高效的绿色加工技术。

现有过磷酸钙、磷铵等磷肥产品利用率在NPK三要素中最低，加剧了资源的消耗，也不利于实施农业农村部的减肥增产政策。提高磷肥利用率，成为一个重大课题。

针对该课题的技术对策有开源和节流两方面。开源方面，直接利用低品位磷矿的无酸活化技术已开发成功，且对磷矿的镁、硅、钙等杂质含量没有特殊要求，因而无需选矿。这样，大量低品位“废矿”可成为新原料，极大地扩展了磷资源库，磷矿的耗竭期可延长100年[5]。节流方面，在保证肥效的前提下，提高肥料利用率，减少肥料施用量，达到减量增产优质的效果，也取得了新成果。笔者以磷铵为例，重点介绍常规磷肥的增效技术。

1　常规磷肥产品的增效技术

磷肥产品增效技术有两途径：

一是对原磷肥产品进行二次再加工，如图1所示。

为了把常规磷肥进行增效，可将过磷酸钙、钙镁磷肥和磷铵作为半成品，加入一定量（3%～10%）的固体或液体增效剂进行搅拌，充分混合并反应。搅拌时，由于磷肥和液体增效剂混合会产生黏壁问题，影响搅拌。为此，需要选用处理湿料的专用机械，或者用行星研磨机与环链式组合。

二是原生产线在线加工。原磷肥生产线无需特别改动，仅加一增效处理即可。例如，在过磷酸钙原生产线的化成阶段加入活化剂即可生产活化过磷酸钙。磷铵原生产线在喷浆之前加入增效剂进行在线增效处理，即可生产高效磷铵：

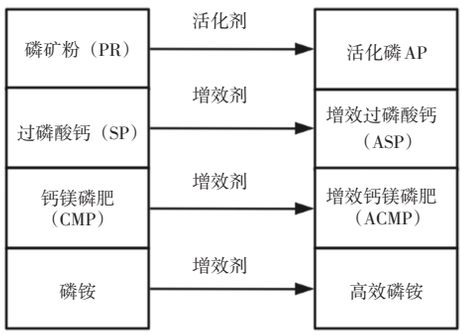

图1　磷矿粉、磷肥产品的增效加工示意

Fig. 1　Schematic diagram of the efficiency enhancing processing of phosphate ore powder and phosphate fertilizer products

原生产线：磷矿+硫酸→磷酸+氨→磷铵料浆→喷浆造粒→普通磷铵出厂。

新生产线：磷矿+硫酸→磷酸+氨→磷铵料浆+增效剂→喷浆造粒→高效磷铵出厂。

高效磷铵常用增效剂的原料可以从有机物和无机物中选用：风化煤、泥炭、腐植酸、有机酸、无机酸、碱、微生物及其代谢产物、大比表面积矿物和聚合物，根据各种原料的理化性质，按照一定的比例混合加工成混合物。如果是用于水溶性磷铵产品，需要选用全水溶性的原料。如果磷铵用于复合肥的制造，也可以选用水溶性较差的原料制造增效剂。

2　高效磷肥的肥效及供肥特性

2.1　高效磷铵和普通磷铵在红壤中的水溶性比较

取饱和磷酸一铵溶液10 mL加入锥形瓶，将增效剂（有机物，来源于食品发酵废渣，LM）溶液1 mL加入磷酸一铵溶液中，搅拌5 min，同时设置对照组（以蒸馏水代替活化剂）。并取30 g过0.25 mm（60目）筛的红壤，分别加入处理和对照锥形瓶中，再加水70 mL至没过土壤，充分搅拌并震荡25 min，静置30 min后过滤取上清液，测定水溶性磷含量，以比较高效磷铵与对照磷铵的持续性，结果见表1。

表1显示，增效处理的上清液磷浓度高于对照处理，尤其是当天测定的数据最为明显，与对照处理相比增加53.7%。在30～50 d内，水溶磷高于对照处理的幅度稳定在8%～10%。增效处理与对照处理后期两次测定值均高于相应的当天测定值，是土壤的铁铝钙沉淀或吸附作用和解吸作用的综合反映。对照处理当天的测定值明显低于增效处理，

表1　对照处理与增效处理的水溶性磷含量动态测定

Table 1　Dynamic determination of water-soluble phosphorus content in the contrast and enhanced treatment

测定时间/d	处理	ρ(水溶性磷)/(g·L⁻¹)	与对照处理相比P增加/%
0	对照	68.40	
	增效	105.13	53.70
30	对照	109.81	
	增效	118.82	8.21
50	对照	102.96	
	增效	113.48	10.22

表明对照处理的吸附、沉淀作用很强烈，也反映了增效处理有较长的持续供肥能力。后两次（30 d与50 d）测定值的提高，与解吸作用有关。表1的3次测定结果显示，增效处理的水溶性磷含量始终高于对照处理。这一持久供肥的优越性，在相关的盆栽肥效试验中也进一步得到了验证。

2.2　*高效磷铵的盆栽试验及其供肥特点*

设置了2个盆栽肥效试验，同时做对应的土壤培养试验以分析肥效与供肥特点的关系。

试验1：供试土壤为旱地赤红壤，*w*（有效磷）16.76 mg/kg（碳酸氢钠浸提–钼锑抗分光光度法测定），供试作物为玉米。试验设4个处理，每个处理重复3次。每盆装土4 kg，每千克土壤中N、P_2O_5、K_2O用量分别为150、100、120 mg，即每盆施氯化钾0.80 g、尿素1.104 g，在磷铵中分别加入10%的3种不同加工方式的褐煤（碱化后调至中性的褐煤、食品厂泥浆与褐煤混合物、木质素褐煤混合物）作增效剂，制成3种高效磷铵，分别记为高效磷铵1、高效磷铵2、高效磷铵3。各处理加入量与对照磷铵相同，均为每盆0.769 g，但养分质量为普通磷铵的90%。收获期玉米株高及干质量结果见图2。数据显示3个高效磷铵处理组的玉米株高和干质量均高于普通磷铵处理。其中，高效磷铵1处理比对照处理增产约6.7%，节肥增产的效果最好。说明该处理的加工方式最优。

上述盆栽同时设4个相应土壤培养试验，研究各处理的土壤有效磷变化。取红壤500 g，按*w*（P_2O_5）500 mg/kg，在土壤中加入普通磷铵。高效磷铵的用量为等养分含量，各处理重复3次，土肥混合均匀，然后浇水，保持土湿润，室温下培养。在培养的第3、10、30天取出部分土壤样，测定土壤有效磷，结果如图3所示。3个高效磷铵处理组的有效磷水平始终高于普通磷铵处理。其中，高效磷铵1组的有效磷在所有处理中最高。这与高效磷铵1组在上述盆栽试验中产量最高是一致的。

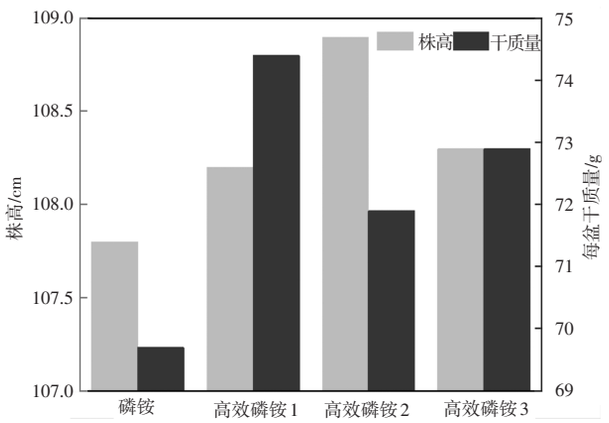

图2　高效磷铵与普通磷铵处理收获期玉米株高和干质量对比

Fig. 2　Comparison of plant height and dry weight of corn at harvesting stage between high-efficiency and common ammonium phosphate treatment

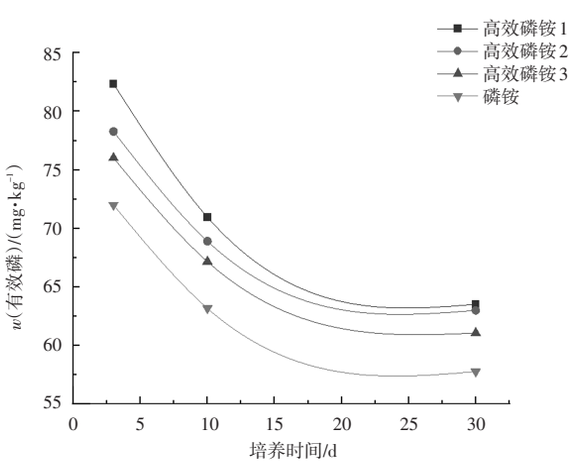

图3　高效磷铵与普通磷铵在土壤中的有效磷动态变化

Fig. 3　Dynamic changes of available phosphorus in soil between high-efficiency and common ammonium phosphate

试验2：在盆栽肥效试验的同时，收集各土壤渗漏水测定磷含量用于分析与肥效的关系。

试验土为旱地红壤，土壤*w*(有效磷）为19 mg/kg（碳酸氢钠浸提–钼锑抗分光光度法测定），处于中等水平。试验作物为玉米。试验设过磷酸钙（SP）和普通磷铵两个对照，记为CK1和CK2。4种增效剂，1是褐煤粉，2是碱化褐煤粉（碱化后调至中性），3、4为两种聚丙烯酸铵（PAM）分别与褐煤粉混合搅拌而成，对应处理分别记为T1、T2、T3、T4。PAM使养分在网状结构中较长时间存留，能减少淋溶损失。其中，高效磷铵1和2按10%比例加

入增效剂。高效磷3和4在褐煤粉10%基础上，分别再加入5%的PAM（来自不同工厂，做质量比较）。每个处理设置4个平行实验，每盆装土4 kg，各处理的N、K用量均相同，分别为N 150 mg/kg、K_2O 120 mg/kg。两个常规磷肥（CK1、CK2）P_2O_5用量为100 mg/kg，各高效磷铵处理用量与对照磷铵用量均相同，为0.769 g/盆。但养分含量因加入增效剂而降低为普通磷铵的90%或85%。全部肥料都作基肥一次施用。生长期83 d，收获前拍照（见图4）并测定鲜质量和干质量（见图5）。



图4　高效磷铵与普通磷铵处理玉米的生长对比

Fig. 4　Comparison of corn growth between high-efficiency and common ammonium phosphate treatment

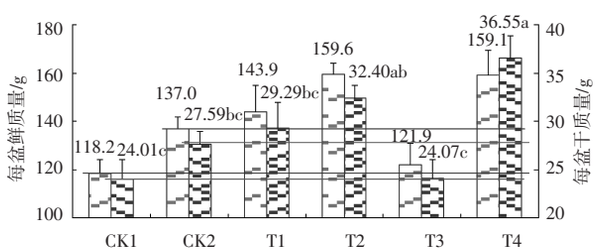

图5　高效磷铵与普通磷铵处理玉米的鲜质量和干质量

Fig. 5　Plant fresh and dry weight of corn in high-efficiency and common ammonium phosphate treatment

注：不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

由图5可知，3个高效磷铵处理组的鲜质量和干质量均高于普通磷铵。其中，增效磷铵4比对照增产幅度高达32%，节肥增产的效果最好。褐煤是腐植酸的原料，有活化养分的效果。聚丙烯酰胺（PAM）的网络结构具有防止磷流失的作用。把两者混合使用，效果叠加，肥效更好。但T3处理未能达到预期效果，产量低于CK2。T3、T4都加入了可以减少肥料淋溶损失的不同厂家的PAM。T3的PAM含杂质多，效果不好。T4的质量好，因而肥效较高。因此，对于不同工厂的PAM产品要注意进行比较，择优选用。

2.3　盆栽渗漏水分析

于盆栽玉米生长中期（46 d）每盆浇1 000 mL水淋洗，在盆底接取24 h内的淋溶液，分析其中的磷含量，作图比较磷的淋失量，如图6所示。除了T3，其他3个高效磷铵处理的淋溶损失都比CK1、CK2小。T3的P淋失率高与两个因素有关。一是作物对P的吸收可能受到该处理所用的PAM中的某些不利影响所致，二是通过保水性能的比较发现，该处理所用的PAM的保水效果较差。两个因素导致了作物吸收的磷较少而淋失较多。而T1、T2、T4处理的淋溶损失低，则反映了活化剂的效果好和作物对磷的吸收高。淋溶损失最低的T4，产量最高。而淋溶损失最高的T3，产量最低。可见，各处理生物产量的高低与磷的淋溶损失有密切关系。

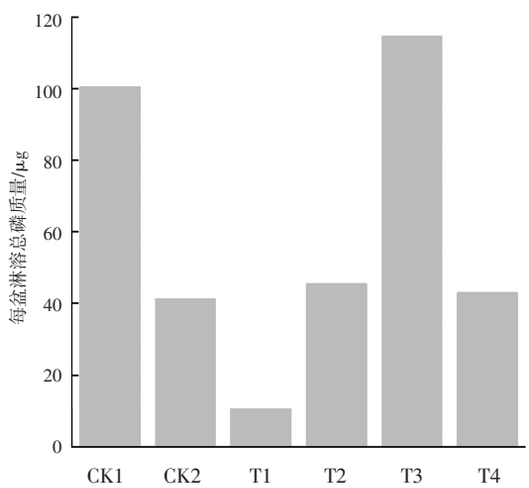

图6　高效磷铵与普通磷铵处理的盆栽渗漏液对比

Fig. 6　Comparison of leachate from pot experiments between high-efficiency and common ammonium phosphate treatment

3　大田肥效试验

试验主要在湛江雷州半岛地区进行。大部分土壤是发育于玄武岩的砖红壤，这类土壤与其他红壤的一个显著区别是：铁和锰的含量都很高。锰的含量超过了铁，而锰的固磷力明显超过铁。因此，磷的沉淀作用强烈而导致磷元素的有效性很低[6-7]。在这类土壤上，高效磷铵、活化磷矿粉等新型磷肥的抗固定作用尤为突出。以西瓜、甘蔗、辣椒、水稻等为供试作物，以过磷酸钙、磷铵为对照的田间试验表明，高效磷铵、活化磷矿粉等新型磷肥均有不同程度的增产作用，并能改善作物品质[8]。其中，高效磷铵对甘蔗的增产增糖效果尤为明显。与对照处理及其他3个普通磷肥处理相比，高效磷铵处理收获期糖锤度增幅达17.4%左右（见图7），按当时糖价计算，仅增糖一项，每667 m^2可增收200元左右。

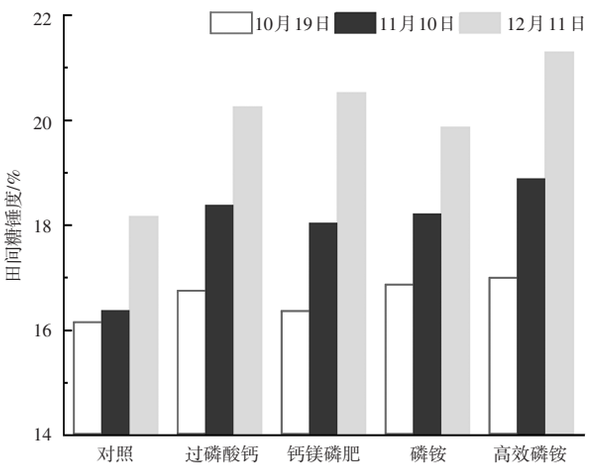

图7　不同磷肥处理的甘蔗田间糖锤度

Fig. 7　Field sugar weight of sugarcane treated with different phosphate fertilizers

4　讨论

4.1　高效磷铵的肥效机制及技术发展潜力

盆栽和大田试验都证明高效磷铵肥效优于普通磷铵。其增效的机制在于增效剂和磷铵加工过程中，产生对养分离子的吸附、络合作用，减少淋溶损失及磷的固定作用。因此可以提高肥效，实现肥料的减量增效。水溶性磷、有效磷和渗漏淋溶测定显示了高效磷铵的抗淋溶损失及抗固定作用。这一独特的供肥优势是普通磷铵所不具备的。高效磷铵等新型磷肥与常规磷肥的肥效差别与两者的养分释放曲线有密切关系。前者供磷浓度波动不大，较平稳，而磷铵等常规磷肥则是前高后低，波动太大，中后期往往有效性降幅大而导致供磷不足。农作物吸磷曲线基本为两头低中间高的抛物线形状。高效磷肥的供磷曲线与农作物吸磷曲线较匹配，但在土壤溶液中磷浓度又不过高，因而可减少因土壤中的钙、铝、铁、锰等沉淀而失效，既提高了利用率，又减少了淋溶流失[9]。因此，高效磷铵供肥更持久，利用率更高，可以获得比活化磷铵更高的产量。

对现有的磷肥产品进行增效加工生产高效磷铵和高效过磷酸钙，对于缓解磷资源短缺和节能降耗都有重要的意义。今后通过以下几方面的进一步研究，高效磷铵还有很大的技术提升空间：（1）增效剂成分的筛选和组合比例。目前所应用的增效剂多为单一成分，今后要加强对成分配比研究以进一步提高活化效果和降低用量。活化剂处理匹配条件（时间、温度等）的优化将进一步提升活化效果。（2）设备选型及改进。目前的增效加工设备从现有市场设备中选用，虽然能够满足加工的需要，但其材质、功率和体积大小并不是最适合的。今后优选或者改进后，活化加工的效果将进一步提高。

4.2　高效磷肥的发展前景

磷矿是一种不可再生资源，不仅是农业生产不可或缺的肥料来源，而且近年来磷酸铁锂电池新技术的发展对高品位磷矿原料的需求大增[10]，磷富矿资源短缺的趋势更加严峻。高效磷铵具有减量增效优点，可减少对高品位磷矿的消耗，对缓解我国磷资源短缺、保障粮食安全具有重大的战略意义。

多年来，笔者所在团队在多个省部级项目支持下的研究和多点试验表明，与普通磷铵高相比，高效磷铵可减少15%～20%（因为加入10%～15%活化剂）的磷肥施用量而保持增产。不仅可以减少磷矿消耗，还可以减少能耗、酸耗，实现低碳清洁生产，还能提高现有磷肥产品的利用率，进一步发展形成一个包括高效磷铵、高效过磷酸钙等在内的新型磷肥产业集群[11-12]。不仅有助于施肥增产的模式由增量增产向增效增产的新方向转换，还可为肥料产业发展新质生产力提供新动能。

笔者所在团队通过开展高效磷肥的国际交流和合作，分析了斯里兰卡、印度、南非、乌干达、埃及、哈萨克斯坦、美国、巴基斯坦及哥伦比亚等国磷矿，筛选出相应的增效剂、活化剂，近年来在国外开展肥效试验也获得了预期成果。发展中国家磷肥多依赖进口，成本很高。因此，高效磷肥的效益更高。在国际合作中，尤其在一带一路中有很大的发展空间[13-14]。

4.3　技术创新必须克服思维定式

技术创新首先遇到的强大阻力是原有技术体系习以为常的概念、标准所造成的思维定式。它会导致对肥料的片面评价而堵塞创新方向，甚至还会对新成果产生片面的评价。例如，片面追求养分高浓度而忽略利用率，就是这样一种影响肥料创新的片面观点。肥料养分浓度高低并不是决定肥效的唯一因素，还同时取决于利用率。笔者所在团队的研究显示，高效磷铵的磷含量比普通磷铵低，但是肥效却更高。因为前者的供肥持久性强，利用率高。可见，肥料浓度越高并非越好。高浓度更应该注意高效率，否则高浓度会造成高污染[15]。如果困于固有的思维定式，仅着眼于水溶磷高低而忽略利用率，高效磷肥的研究思路很难产生，研究成功就更难了。

迄今为止，国内外磷肥产品的检测方法仅着眼于产品的浓度，但不能够反映进入土壤后的有效性

变化，它适用于普通磷肥。但是，对于高效磷铵、高效过磷酸钙这一类新型肥料，就需要增加检测其土壤有效性的新方法，才可能反映高效磷肥的持续供肥、利用率高的优点。在这方面控释氮肥就是一个很好的例子。控释氮肥和普通氮肥都需要测定并标注氮的含量。但是前者要增加控释性能的检测（初始溶出率、微分溶出率），这样才能显示前者控制性能的优点。新型磷肥在技术创新的同时，也需要注意检测方法上的创新，才能更好促进新型肥料的发展。

5　结论

（1）与普通磷铵溶液相比，高效磷铵有两点明显的供肥优势：抗土壤固定、抗水分淋溶损失，因此利用率高而供肥持久。

（2）与普通磷铵溶液相比，高效磷铵的肥效更高，在减量施肥的情况下，产量不减反增。

（3）发展高效磷铵可减少高品位磷矿的消耗，对缓解我国磷资源短缺、保障粮食安全具有重大的战略意义。

［参考文献］

［1］ 许秀成，汤建伟，刘丽，等.三论“人口·粮食·磷资源·肥料”[J].磷肥与复肥，2013，28(1)：1-8.
XU X C，TANG J W，LIU L，et al. Third discussion on “population，food，phosphorus resource and fertilizer” [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2013，28(1)：1-8.

［2］ 侯翠红，许秀成，苗俊艳，等.中国磷资源的分级可持续开发利用[J].武汉工程大学学报，2017，39(6)：629-632.
HOU C H，XU X C，MIAO J Y，et al. Hierarchical sustainable development and utilization of phosphorus resources in China [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology，2017，39(6)：629-632.

［3］ 李扬，王蔚然.磷回收工艺综述与展望[J].当代化工研究，2024(12)：14-16.
LI Y，WANG W R. Review and prospect of phosphorus recovery process [J]. Journal of Contemporary Chemical Research，2024(12)：14-16.

［4］ 王智娟，韦昌桃.工业级磷酸二氢铵生产工艺研究进展[J].无机盐工业，2021，53(6)：118-122，198.
WANG Z J，WEI C T. Research progress on the production process of industrial-grade ammonium dihydrogen phosphate [J]. Inorganic Chemicals Industry，2021，53(6)：118-122，198.

［5］ 许秀成，侯翠红，赵秉强，等.我国磷矿资源开采的可持续性[J].化工矿物与加工，2014(4)：56.
XU X C，HOU C H，ZHAO B Q，et al. Sustainability of phosphate mining in China [J]. Chemical Minerals and Processing，2014(4)：56.

［6］ 卢瑛，卢维盛，刘远金，等.砖红壤磷的有效性及其与土壤化学元素关系研究[J].华南农业大学学报，1999，20(3)：90-93.
LU Y，LU W S，LIU Y J，et al. Study on the effectiveness of phosphorus in brick red soil and its relationship with soil chemical elements [J]. Journal of South China Agricultural University，1999，20(3)：90-93.

［7］ 冶赓康，俄胜哲，陈政宇，等.土壤中磷的存在形态及分级方法研究进展[J].中国农学通报，2023，39(1)：96-102.
YE G K，E S Z，CHEN Z Y，et al. Research progress on the presence and classification of phosphorus in soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2023，39(1)：96-102.

［8］ 郑超，杜建军，廖宗文，等.改性磷铵在砖红壤植蔗土上的施用效果[J].甘蔗，2004，11(1)：5-9.
ZHENG C，DU J J，LIAO Z W，et al. Efficiency of developed-ammonium phosphate application on lateritic sugarcane planting soil[J]. Sugarcane，2004，11(1)：5-9.

［9］ 廖宗文，卫尤明，毛小云.新型肥料的时代需求与技术创新[J].磷肥与复肥，2019，34(10)：5-8，13.
LIAO Z W，WEI Y M，MAO X Y. The demand of the times and technological innovation of new fertilizers [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2019，34(10)：5-8，13.

［10］ 卫尤明，廖宗文，毛小云.低品位磷矿的深度开发与磷肥的高效利用[J].磷肥与复肥，2020，35(1)：29-31，39.
WEI Y M，LIAO Z W，MAO X Y. In-depth development of low-grade phosphate rock and efficient utilization of phosphate fertilizer [J]. Phosphate & Compound Fertilizer，2020，35(1)：29-31，39.

［11］ 卫尤明，廖宗文，毛小云.无酸活化磷肥的原料、工艺、产品优势及应用[J].武汉工程大学学报，2021，43(3)：266-270.
WEI Y M，LIAO Z W，MAO X Y. Raw Materials，Process，Products Advantage and Applications of Acid-Free Activated Phosphate Fertilizer[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology，2021，43(3)：266-270.

［12］ 廖宗文，卫尤明，毛小云.中低品位磷矿的磷及中微量元素的无酸同步活化[J].肥料与健康，2024，51(6)：141-145，158.
LIAO Z W，WEI Y M，MAO X Y. Acid Free Synchronous Activation of Phosphorus，Medium and Trace Elements in Medium and Low Grade Phosphate Ore[J]. Fertilizer & Health，2024，51(6)：141-145，158.

［13］ MAO X Y，LU Q，MO W，et al. Phosphorus Availability and Release Pattern from Activated Dolomite Phosphate Rock in Central Florida[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry，2017，65 (23)：4589-4596 .

［14］ 熊金涛，张俊涛，毛小云，等.印度磷矿粉几种促释处理的动态释磷特点及肥效研究[J].土壤通报，2010，41(3)：660-663.
XIONG J T，ZHANG J T，MAO X Y，et al. Dynamic Release Characteristics and Fertilizer Effect of Several promoted-release Indian phosphate rocks [J]. Chinese Journal of Soil Science，2010，41(3)：660-663.

［15］ 孙克君，赵冰，卢其明，等.活化磷肥的磷素释放特性、肥效及活化机理研究[J].中国农业科学，2007(8)：1722-1729.
SUN K J，ZHAO B，LU Q M，et al. Study on Release Characteristics，Fertilizer Effect and Activated Mechanism of Activated Phosphoric Fertilizers[J]. Scientia Agricultura Sinica，2007(8)：1722-1729.