

磷肥的创新与应用

马航¹, 匡家灵², 籍婷婷³, 严文辉³, 王洋³, 向赛男³, 祝园园³,
刘青林³, 聂素杰³, 陈月舞², 鲁振亚³

(1. 云南云天化股份有限公司, 云南 昆明 650228; 2. 云南云天化以化磷业研究技术有限公司, 云南 昆明 650228;
3. 中国农业大学, 北京 100083)

[摘要] 概述全球磷肥产业发展现状, 特别关注我国作为全球最大的磷矿石和磷化学品生产国面临的挑战和机遇。深入分析磷肥与其他营养元素的协同作用、物理和化学形态增效及添加生物刺激剂对作物提升磷肥利用率的影响, 阐述了磷肥创新在提高土壤磷利用率和减少环境影响中的关键作用及机制。特别指出, 磷肥产品的创新和应用应满足农业绿色发展要求, 减少磷养分在土壤中的固定、提高肥效、配合其他元素提高利用率将是磷肥产品未来的发展方向。

[关键词] 磷肥创新; 协同; 增效; 缓控释技术; 生物刺激剂

[中图分类号] TQ44 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2024) 06-0033-08

Innovation and application of phosphate fertilizer

MA Hang¹, KUANG Jialing², JI Tingting³, YAN Wenhui³, WANG Yang³, XIANG Sainan³,
ZHU Yuanyuan³, LIU Qinglin³, NIE Sujie³, CHEN Yuewu², LU Zhenya³

(1. Yunnan Yuntianhua Co., Ltd., Kunming 650228, China; 2. Yunnan ICL YTH Phosphate Research and
Technology Co., Ltd., Kunming 650228, China; 3. China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Overview of the current development status of the global phosphate fertilizer industry is provided, the challenges and opportunities faced by China as the world's largest producer of phosphate rock and phosphate chemicals have got special attention. The synergistic effect with other nutrients, the effect of the physical and chemical forms of phosphate fertilizer, and the effect of adding biostimulants on improving phosphorus utilization efficiency are analyzed in depth. The key role and mechanism of phosphate fertilizer innovation in improving soil phosphorus utilization efficiency and reducing environmental impact are elucidated. It is particularly pointed out that the innovation and application of phosphate fertilizer products should meet the requirements of green agricultural development, reducing the fixation of phosphorus nutrients in soil, improving fertilizer efficiency and cooperating with other elements to improve utilization efficiency will be the future development directions of phosphate fertilizer products.

Key words: phosphate fertilizer innovation; synergistic; efficiency enhancement; slow-release and controlled-release technology; biostimulants

0 引言

磷是植物生长发育不可缺少的营养元素之一, 具有增加作物产量、改善作物品质的效果^[1]。不同土壤类型和作物品种直接影响磷肥施用的有效性, 因此, 磷肥产品的选用是农业生产中不可或缺的环节。

全球磷矿资源丰富, 2022年全球磷矿储量为720亿t左右, 但磷矿资源分布存在极大差异, 摩洛哥磷矿储量500亿t, 约占全球储量的70%, 而我国磷矿储量为36.9亿t, 仅占全球储量的5.0%^[2]。

我国磷矿总体特征是贫矿多、富矿少、难选矿多、易选矿少, 高品位磷矿 ($w(\text{P}_2\text{O}_5) > 30\%$) 仅占

[收稿日期] 2024-05-15

[作者简介] 马航(1981-), 男, 云南昆明人, 化工博士, 正高级工程师, 长期从事新型肥料、精细化工方向的技术研发及产业化工作。
E-mail: hang.ma@yprtec.com

[通信作者] 匡家灵(1983-), 男, 云南保山人, 高级工程师, 主要从事磷化工及新型肥料的技术研发工作。E-mail: jialing.kuang@yprtec.com

[基金项目] 云南省张福锁院士工作站(202305AF150055); 云南(昆明)张福锁高原特色现代农业院士工作站(YSZJGZZ-2022034); 云南现代农业绿色关键技术创新与平台建设(202102AE090053)

9.2%，中低品位磷矿占比达到90%以上，磷矿石平均品位仅为16.85%，远低于摩洛哥（33%）和美国（30%）^[3]。从产量数据上看，我国磷矿石产量稳居全球第一，国家统计局数据显示，2022年我国磷矿石产量达10 811万t，我国以5%的资源供应了全球50%左右的需求^[2, 4]。

我国磷肥产业经过20多年的快速发展，已经进入成熟期的深度调整阶段，产能在2016年达到顶峰，为 P_2O_5 2 470万t/a，近几年产能呈连续下降趋势。在国家减肥增效与化肥使用量零增长政策的推动下，化肥施用量也逐年下降，表观消费量从最高峰2012年的1 449.7万t，下降到2021年的1 133.0万t，年均递减2.22%。预计未来一段时期我国磷肥的表观消费量将维持在1 100万t/a左右^[5]。磷肥产品目前主要是磷酸二铵和磷酸一铵，其次是NPK复合肥与重过磷酸钙，高浓度磷肥产量占磷肥总产量的95%以上^[6]。

从20世纪90年代起，我国农业生产中持续过量施用高浓度的速效磷肥产品，肥料养分释放规律与作物养分吸收规律严重不匹配，使得大量速效磷养分被土壤固定、进入水体环境，造成肥料利用率低、土壤磷盈余、磷资源浪费、水体富营养化等一系列问题^[7]。2015年农业部贯彻落实党中央、国务院决策部署，印发了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》，组织开展全国化肥减量增效工作，取得了积极成效。目前磷肥生产总量稳定，但仍以传统高浓度磷肥为主体，新型肥料技术滞后，推广应用覆盖面不够，化肥绿色智能增效的基础理论与技术创新严重不足，政策法规仍有待完善^[8]。

笔者系统梳理了国内外主要磷肥产品的发展现状，重点介绍磷肥产品创新的研究方向，以期为提高磷肥产品优势和推进磷肥产品创新提供思路。

1 磷肥产品技术创新现状

1.1 磷肥和中微量元素协同对磷吸收的影响

在磷酸一铵和磷酸二铵中添加硫、锌、镁和硼，能显著提高磷的利用率。硫帮助降低土壤pH，有利于活化土壤中的磷；锌可促进作物根系发育，增强磷吸收；镁在作物光合作用中起关键作用，优化磷运输；硼提高作物繁殖效率。这种元素协同方式，可有效提升作物生产力和农业可持续性。

硫作为第四大必需营养元素，参与作物蛋白质合成、光合作用调节等一系列生理生化反应^[9-10]。

在肥料领域，硫作为营养元素添加到肥料产品以解决日益严重的土壤硫缺乏问题^[11]。此外，硫能通过影响土壤微生物群落结构、土壤pH等因素，提高解磷菌的丰度，抑制脲酶活性，以提高氮、磷利用效率^[12-13]，因此也常被作为肥料增效材料使用。磷肥中硫的添加常以化合硫（ SO_4^{2-} ）和单质硫（S）形式进行。目前国际上主流含硫磷肥产品包括：增硫过磷酸钙、化合硫/单质硫/混合硫源磷酸铵、硫包衣重过磷酸钙、硫包衣磷酸铵等^[14]。从含硫磷肥生产技术上看，当前磷肥中硫主要以均匀分布与外包裹形式添加。CALDWELL等^[15]研究表明含硫磷铵大幅度提高了磷素的利用效率；YASMIN等^[16]研究发现，施用硫包裹磷酸二铵、硫包裹重过磷酸钙较未加硫对照，水稻干物质质量提高了98%，根系干质量提高了11.4%。此外，磷肥中添加硫也可通过提高籽粒半胱氨酸、蛋氨酸等浓度，实现小麦、大豆等作物品质的提升^[17]。

锌是植物不可或缺的微量元素之一，不仅作为酶和蛋白质的组成部分，还参与大量植物的关键生理过程^[18-20]。有研究发现，磷锌之间表现为协同作用，其主要机制为磷肥施入后降低了土壤中锌离子的吸附，促进锌在土壤中的解吸，进而提高土壤中锌的有效性^[21]。在磷锌配施条件下，可以促进玉米根系对锌的吸收，增强锌由根部向地上部运输的能力；促进小麦生长，提高锌元素从植株向籽粒的运输能力，增加小麦籽粒干质量和锌累积量^[22-23]。为减少肥料运输和施用成本，中航化肥有限公司直接将锌肥加入磷酸二铵中，水稻产量较常规磷酸二铵增加5.2%~7.5%^[24]。美盛公司改变了锌加入磷酸二铵中的工艺，使锌均匀地层层分布于氮磷养分之间，不仅能够实现磷与锌的协同，还实现了养分缓释，满足作物全生育期的养分需求，与磷酸二铵处理相比，水稻和玉米的增产率分别达到14.63%和7.20%^[25-26]。

镁作为植物生长所必需的中量营养元素之一，参与作物体内的叶绿素合成、光合作用、蛋白质合成等。我国有54%的土壤需要补充镁素肥料，特别是南方酸性土壤^[27]。以往的许多研究表明，在缺镁土壤上施用镁肥可以提高作物产量和品质^[28-29]。但实际生产中，单独施用纯镁肥需要额外的劳动力成本，导致农民不施镁肥的现状普遍存在。将镁与大量元素肥料混配也存在问题，在复合肥中添加时磷与镁会发生拮抗反应，在复混肥中添加时会导致养分分布不均匀。有研究表明，在磷酸一铵中添加

镁不会降低磷的溶解度，而镁的溶解度与添加的原料溶解度有关^[30]。因此，在磷酸一铵中添加镁肥，可以实现均匀造粒，同时为作物供应磷和镁两种养分。

硼是植物生长所必需的微量元素之一，缺硼会导致作物花而不实、实而不果、果而不良、蕾铃脱落、落果缩果、果实畸形等现象。我国南方或东南区域为低硼或缺硼区，受硼制约最严重^[31]。一般来说，大多数作物生长前期对硼的需求量较少，而中后期需求量大。硼在土壤中的移动性强且不易被土壤吸附，在一些高度淋溶土壤和酸性砂质土壤地区，施用水溶性硼肥可能会在早期对植物幼苗产生毒害，并在后期因土壤供硼能力下降导致作物硼缺乏。农效评价发现，对比其他含硼肥料，施用磷酸硼肥料时，作物未出现硼中毒现象，符合未来农业发展需求，具有较大的应用潜力^[32]。

1.2 化学形态对磷吸收的影响

正磷酸盐、聚磷酸盐和亚磷酸盐作为磷的不同化学形态，在土壤中的行为和作物吸收效率上有显著差异。正磷酸盐作为植物可直接利用的磷形态，在土壤中较易被作物吸收，但也容易与土壤中的钙、铁和铝等金属离子反应，形成不溶性化合物而被固定。相比之下，聚磷酸盐通过其分子结构中的多磷酸基团与金属离子形成稳定的络合物，从而减少磷的固定并提高其在土壤中的迁移性和可利用性。亚磷酸盐在土壤中转化为正磷酸盐的速率较慢，因此表现出缓释特性；同时亚磷酸盐可以通过生物或非生物途径逐渐转变成正磷酸盐，在一定条件下可以实现控释特性。综合这些磷形态的特点，可以通过合理的组合策略，实现磷肥效率最大化并减少环境影响。

聚磷酸盐，由磷分子间通过共价缩合而成的直链或支链型结构聚合物，即磷酸盐的聚合态形式，当聚合度小于20时其水溶性较好^[33]，可作为磷肥单独施用，也可作为基础肥源与其他NPK肥料复合形成复合肥施用。聚磷酸盐多以不同聚合度和聚合率的无机磷混合物形式存在^[34]，聚磷酸铵是目前常见的聚磷酸盐肥料。作为聚合物，其释放需要逐步水解，水解速率受温度、浓度、pH等因素影响，具备缓释性能；同时，聚磷酸盐对 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 等易与磷拮抗的离子具有螯合作用，可以有效缓解磷在土壤中的固定反应^[35-37]。已有大量研究表明，与传统磷铵产品相比，聚磷酸铵在土壤中有更好的移动性，能减少磷与钙的反应，减少磷的固

定，具有促进作物磷吸收、缓慢水解、环境友好、提供多形态磷源的优势^[38-39]。

亚磷酸盐是缓释态磷，由于植物不能直接代谢亚磷酸盐，所以其作为肥料磷源的有效性存在争议^[40]。但亚磷酸盐在植物体内通过酶转化为正磷酸盐，被作物利用，参与作物代谢，只是时间相对较长。研究发现，叶面喷施后亚磷酸盐转化为正磷酸盐^[41]。因此，亚磷酸盐是缓释态磷，且缓释时间较长，利用其特性，大量亚磷酸盐在短时间内积累，不被作物利用，抑制其生长，从而达到控旺或除草的目的。

同时，亚磷酸盐可以作为生物刺激剂提高作物品质，增加作物产量。杜安齐研究发现，施入亚磷酸钾有利于增强细胞基质多糖间相互作用，增加新梢细胞壁强度，提升桃树新梢的茎秆强度^[42]，当磷供应充足时，亚磷酸钾可作为缓释磷肥供作物吸收利用^[43]；亚磷酸盐的施用有助于提高马铃薯、草莓等作物的产量、开花数量、果实大小等^[44]；任士伟等研究表明，亚磷酸盐的供磷量占总磷量的15%时，对辣椒叶片光合作用、地上部生物量及根系活力有促进作用^[45]；基施25%亚磷酸钾可显著增加作物的磷积累量，基施75%和100%的亚磷酸钾处理与不施亚磷酸钾处理差异不明显，说明施用少量亚磷酸钾能增加作物磷积累量^[46]。

1.3 生物刺激剂对磷吸收的影响

除了元素协同与形态改变的手段外，一些生物刺激剂能通过竞争螯合金属阳离子，缓解磷肥在土壤中的固定，或者通过促进植物根系生长，刺激土壤中微生物活性，从而提高磷肥利用效率。竞争性阴离子主要有钼酸根、硫酸根、硅酸根和有机酸根^[47]。天然有机高分子（如黄腐酸、腐植酸和聚谷氨酸等）表面带有大量负电荷的化合物能够在肥料颗粒周围竞争阳离子，显著提高磷的扩散效率^[48-49]，例如腐植酸类物质中羧基和芳香族基团的存在有利于络合土壤中的金属离子，并通过形成磷酸盐复合物提高植物磷吸收效率^[50-52]。

生物刺激剂与磷肥的协同作用已被多项研究证明：AZIZ等^[53]以海藻酸为载体制备具有微生物包裹的磷酸二铵，可促进小麦的生长和产量增加，相较于磷酸二铵处理，海藻酸处理和海藻酸为载体的微生物包裹磷酸二铵处理的小麦根生物量分别增加了15%和29%；刘博等^[54]研究发现，与单施磷肥相比，施用5%的氨基酸磷肥可提高土壤磷酸二酯酶和碱性磷酸酶活性，使土壤 w (速效磷)增加8%。

此外,生物刺激剂提高土壤微生物活性也被认为是提高磷肥效率的机制^[55]。WANG等^[56]发现海藻提取物不仅促进了番茄根系和幼苗的生长,使产量提升1.48~1.83倍,而且改变了土壤微生物多样性,使土壤蛋白酶、多酚氧化酶和脲酶活性显著提高。海藻提取物还可使土壤脲酶和磷酸酶活性增加,增强土壤养分矿化过程^[57]。

1.4 缓释对磷吸收的影响

磷肥的效率不仅取决于其水溶性,也受其在土壤中的溶解度影响,如枸溶磷和难溶磷较难被作物直接吸收。因此,磷本身需要缓释来提高利用率,它也可以作为缓释材料的组成部分,通过改进其释放特性,与其他养分协同作用,从而优化作物的营养吸收,提高肥料的利用效率。这种缓控释技术的应用有助于精确调控磷的供给,匹配作物的生长需求,结合包膜技术,有效提升磷肥利用效率,减少环境负担。

按照磷肥内所含磷酸盐的溶解度可以将磷肥划分为水溶性磷肥、难溶性磷肥及弱酸溶性磷肥3种。目前农业生产中主要根据不同作物、不同土壤采用不同的磷肥产品和不同施肥策略、作物间套作来提高肥料利用率。如磷酸一铵和过磷酸钙适宜北方碱性土壤地区,磷酸二铵和钙镁磷肥适宜南方酸性土壤地区^[58-59];这主要是通过调节土壤酸碱度提高氮、磷利用效率。

不同作物拥有不同的磷获取机制,鹰嘴豆、蚕豆通过分泌质子、有机酸和酸性磷酸酶来活化土壤难溶态磷^[60],玉米通过改变根系形态和分布来协调和整合对氮、磷资源的响应^[61]。在充分考虑“作物营养五大规律”后,植物营养学者采取了不同施肥策略提高磷肥利用率,如局部供磷和均匀供磷、水溶枸溶养分搭配使用、玉米与矮的禾本科或豆科作物间作^[62]。但以上措施都是针对现有肥料产品进行的农业生产优化,肥料产品迫切需要升级以满足更高的农业需求和减少资源损耗。因此,面对土壤中严重磷盈余现状,磷肥中的主要产品高浓度磷肥需根据作物养分需求规律、作物生长发育特点,借鉴缓控释技术进行改进升级,有几点思考。

(1) 氮肥产品通过尿素与有机单体的合成反应来制备脲醛缓释肥,改变氮素溶解性以产生缓释效果^[63]。肥包肥工艺以尿素为核心,加入其他无机养分、难溶性肥料(钙镁磷肥)和不同黏结剂生产制备^[64]。高浓度的磷肥可以根据作物养分需求规律设计绿色智能肥料,利用脲醛反应液和磷铵预混合液

作黏结剂,结合肥包肥工艺在肥料生产中分层次合理搭配融入不同形态的多种大中微量养分元素。

(2) 包膜尿素主要通过无机物(硫、硅藻土、矿粉等)、改性天然产物(木质素、壳聚糖、纤维素等)和合成塑料(聚氨酯、醇酸树脂、苯丙乳液等)为包膜材料,在尿素表面构筑一层或多层膜以达到提高肥料颗粒疏水性的要求,从而实现化肥的缓释^[65]。高浓度磷肥可以参考美盛公司工艺在磷铵生产中加入硫、锌等元素实现养分分层释放和提高养分之间的活化作用。可以直接利用多种包膜材料对磷肥进行升级,使其养分缓慢释放,使用时配合种肥同播技术、深施技术提高肥料利用率。天然产物通常具有高度的亲水性和生物可降解性,其在缓控释技术上的应用还不成熟,可以作为吸水保水功能物质加入肥料产品。

(3) 生物基控释肥料是利用生物基材料作为膜层生产的新一代控释肥料。全生物基材料和生物可降解材料在缓控释肥料中的应用将成为研究热点,其可持续性的理念完全符合绿色农业的发展趋势和要求。2022年,以色列化工集团公司(ICL)推出控释肥料包衣快速生物降解释放技术^[66],该技术专为大田农业设计,通过包衣减少养分损失并将养分利用效率提高80%,同时控制对环境的影响,该释放技术还可以在降低肥料用量的情况下提高作物产量。国内在该方向的研究正处于探索阶段,还没有形成可以转化的技术成果。

1.5 物理形态对磷吸收的影响

磷肥的物理形态分为固体和液体。固体磷肥如粉末和颗粒容易与土壤中的 Ca^{2+} 结合形成难溶磷,而液体磷肥,尤其是悬浮肥和清液型肥料,能更有效地减少磷的固定,并提高其在土壤中的可用性。液体形态的磷肥,通过增加养分浓度和更均匀地分布,展示出较高的作物吸收率和生产力增长,可优化土壤磷利用和减少资源浪费。

悬浮肥养分含量可达清液型的3倍^[67],金正大生态工程集团股份有限公司^[68]、新洋丰农业科技股份有限公司^[69]、中盐安徽红四方股份有限公司、上海永通生态工程股份有限公司^[70]等均研发了以磷酸一铵、磷酸二铵、聚磷酸铵等为原料的高养分浓度悬浮肥料产品,在田间具有较好的增产增收效果^[71]。悬浮肥料还具有可使用非全水溶原料以及水含量高的废物来生产的重要优势。在当前的技术条件下,磷矿到磷肥的阶段仍有10%左右的磷资源未能被完全利用,而将其生产为悬浮肥料是实

现资源全量化利用的重要途径。例如,提取磷酸后的废污泥^[72],生产多元醇的废钠-磷酸钾^[73]等均可在黏土矿物等悬浮助剂的作用下生产悬浮肥料。悬浮型液体肥料由于其生产原料要求较低、产品复配性强、肥料利用率高、养分含量高、且能配合水肥一体化系统使用等,已成为当前水溶肥料产品发展的重要方向。

此外,土壤中的磷固定是限制其肥效的主要因素。磷肥形态和施用方式的改变显著影响磷的有效性和利用率^[74]。BERTRAND等^[75]利用³²P示踪技术比较了固体磷和液体磷的施用效果,发现液体磷肥在石灰性土壤上的有效性显著高于固体磷肥。褚贵新等^[76]研究发现,在石灰性土壤上,固体磷肥一次基施在施肥点极易与Ca²⁺形成难溶性磷,而液体磷肥可显著减少土壤对磷的固定,且液体磷肥可显著提高番茄叶片磷含量和果实产量。黄丽等^[77]研究模拟滴灌条件下磷酸二铵作为基肥一次施入和随水分施入两种不同配施方式下速效磷含量在土壤中的时空分布变化情况,发现在施加磷肥总量一致时,随水分施入土壤速效磷含量的最大值显著高于作为基肥施入的最大值。王静等^[78]研究发现,配合水肥一体化分次滴灌施用的磷肥相对于一次性基施的固体磷肥(重过磷酸钙),在0~30 cm土层中,w(有效磷)平均增加12.4%,且玉米生物量、磷吸收量及肥料利用率分别提高27.1%、34.6%和61.4%。

2 磷复肥产品技术创新发展方向

磷肥产品的创新和应用应满足农业绿色发展的要求,减少磷养分在土壤中的固定、提高肥效、配合其他元素提高磷素利用率将是磷肥产品未来的发展方向。

2.1 资源端

磷矿是我国重要的战略资源,高品位磷矿储量日益匮乏,可持续的磷矿资源利用任重道远。通过对各种品级的磷矿进行分级利用,走磷资源可持续利用的新模式,可以有效延长我国磷资源的使用年限^[79]。同时对于当前磷酸生产过程中产生的沉淀渣酸及精制磷酸过程中产生的萃余酸,也必须考虑对其进行有效回收利用,例如用于生产包裹型缓释复合肥料。中低品位磷矿中通常含有铁、镁、钙等伴生资源,认真考虑各种养分的绿色全量化综合利用,不仅能够降低资源消耗和加工成本,还能够提升肥料施用效果,将为作物养分供应提供新的思路^[80]。

2.2 技术端

磷肥也可以随技术发展而创新。磷化工的技术创新,例如浮选技术创新、一步法磷肥生产等可以活化磷矿的中微量元素,有效提高磷矿利用效率。增效物质筛选和机制研究的方法创新,例如高通量表型筛选和多组学联用可以更准确阐明植物响应生物刺激剂的作用机制,提高生物刺激剂与磷肥的耦合度^[81]。生物刺激剂的精确制备技术创新,例如利用褐藻胶裂解酶分子修饰控制产物,制备具有特异性结构的褐藻寡糖^[82]。

2.3 产品端

磷肥产品多种多样,各具优势,在不同土壤上不同作物对磷肥的吸收利用策略也具有多样性。在实际应用中,要重视土壤性质的差异化和作物对不同养分的多元化需求。在现有农业生产条件下,根据不同磷肥产品特性,结合土壤-作物系统的特点,实现不同形态的磷肥产品-土壤-作物体系有效匹配,是实现磷肥资源高效利用的重要机制。

2.4 施用端

磷在土壤中的扩散及其有效性,与土壤水分密切相关。磷肥作为基肥施用,磷的扩散距离与水分运移规律基本保持一致。在石灰性土壤上施用固体磷肥,钙离子与磷酸根离子在颗粒肥料的表面会形成Ca-P沉淀,造成土壤中磷的有效性下降。随着水肥一体化技术不断发展,磷肥随水施用已成为可能。在碱性石灰性土壤上,与传统的颗粒状磷酸一铵相比,施用液态磷酸一铵的有效性可提高4~15倍,能够极大提高小麦产量^[83]。根据不同土壤类型特点,探索不同施用方式对磷肥利用率的影响,能最大程度提高磷肥的增产潜力。

2.5 政策端

我国磷肥产业正处于转型升级的关键时期。鉴于全球磷资源不均匀分布和国内高品质磷矿逐渐枯竭的现状,制定和实施针对性强的政策措施显得尤为迫切。政府应推动产业政策与环保政策的有效结合,鼓励技术创新和资源高效利用。具体来说,可以通过以下几个方面加强政策支持。

(1) 创新驱动政策:加大对磷肥创新技术研发的财政支持,特别是在缓控释肥料、高效肥料配方及生物刺激剂的开发上。建立磷肥创新研发基金,鼓励企业与高校、研究机构合作,攻关核心技术。

(2) 产业升级政策:推动磷肥产业结构调整,优化产品结构,减少高能耗、高污染的传统生产方式,转向绿色、低碳的生产技术。例如,支持利用

磷矿废渣的资源化利用项目,提高磷资源综合利用效率。

(3) 环境保护政策:制定严格的环境排放标准,引导磷肥生产企业减少对环境的负面影响。同时,通过政策倾斜,激励企业采用环境友好的生产过程和产品,如推广使用可生物降解的包膜材料来减少土壤和水体污染。

(4) 市场准入和监管政策:建立健全磷肥产品的市场准入机制和质量监管体系,确保市场上磷肥产品质量安全,提升整个行业的竞争力和可持续发展能力。

通过这些综合性政策的推动,不仅可以促进磷肥产业的健康发展,也有助于保障国家粮食安全和生态环境安全,推动农业向绿色、高效、智能方向发展。

3 结语

随着全球对磷肥需求不断增长和环境保护意识提升,未来的磷肥研发将更加重视提高肥效与环境友好。未来的研究应集中在开发多种提升磷利用率的新产品,以及通过生物技术和纳米技术改善磷的可用性和减少其环境影响。此外,跨学科的合作将是解锁磷肥创新潜力的关键,通过整合磷化工、农学、生物学和环境学等多学科的方法,可以创造出符合现代农业需求的高效、低影响的磷肥解决方案。这不仅能够提升作物产量和质量,还能为全球食品安全和农业绿色可持续发展做出贡献。

[参考文献]

- [1] 胡霭堂.植物营养学:下册[M].2版.北京:中国农业大学出版社,2003.
- [2] 胡敏.我国磷矿产业现状与发展趋势[J].磷肥与复肥,2023,38(11):1-5.
- [3] 孙小虹,陈春琳,王高尚,等.中国磷矿资源需求预测[J].地球学报,2015,36(2):213-219.
- [4] 王莹,方俊文,李忠绪.2022年我国磷复肥行业运行情况及发展趋势[J].磷肥与复肥,2023,38(6):1-8.
- [5] 王臣.发展中的磷复肥行业面对的问题、挑战与机遇[J].硫酸工业,2022(10):1-4.
- [6] 王臣,王莹,方俊文,等.磷复肥行业运行现状与发展思考[J].磷肥与复肥,2020,35(5):1-4.
- [7] 张福锁,黄成东,申建波,等.绿色智能肥料:矿产资源养分全量利用的创新思路与产业化途径[J].土壤学报,2023,60(5):1203-1212.
- [8] 周卫,丁文成.新阶段化肥减量增效战略研究[J].植物营养与肥料学报,2023,29(1):1-7.
- [9] STANISLAV K, MARIO M, HIDEKI T. Sulfur nutrition: impacts on plant development, metabolism, and stress responses [J]. Journal of Experimental Botany, 2019, 70(16):4069-4073.
- [10] NARAYAN O P, KUMAR P, YADAV B, et al. Sulfur nutrition and its role in plant growth and development [J]. Plant Signaling & Behavior, 2023, 18(1):2030082.
- [11] HANEKLAUS S, BLOEM E, SCHNUG E. History of Sulfur Deficiency in Crops [M]. Massachusetts: ACESS, 2008.
- [12] STARKEY R L. Oxidation and reduction of sulfur compounds in soils [J]. Soil Science, 1966, 101(4):297-306.
- [13] 郑诗樟. 硫肥对土壤性质、重金属形态和作物生长的影响 [D]. 武汉:华中农业大学,2012.
- [14] 樊明究, MESSICK D L, BREY C D, 等. 世界硫需求及硫肥状况 [J]. 磷肥与复肥, 2005, 20(6):5-9.
- [15] CALDWELL M, NELSON K A, NATHAN M. Co-Granulated and Blended Zinc Fertilizer Comparison for Corn and Soybean [J]. Journal of Agricultural Science, 2016, 8(12):9.
- [16] YASMIN N, BLAIR G, TILL R. Effect of Elemental Sulfur, Gypsum, and Elemental Sulfur Coated Fertilizers, on the Availability of Sulfur to Rice [J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(1):79-91.
- [17] REIS A F D B, ROSSO L H M, DAVIDSON D, et al. Sulfur fertilization in soybean: A meta-analysis on yield and seed composition [J]. European Journal of Agronomy, 2021, 127:126285.
- [18] 李孟华,王朝辉,王建伟,等.低锌旱地施锌方式对小麦产量和锌利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(6):1346-1355.
- [19] CAKMAK I. Tansley Review No.111 Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species [J]. New Phytologist, 2000, 146(2):185-205.
- [20] 王景安,柴娜,梁晓华.缺锌对不同基因型玉米激素代谢的影响[J].华北农学报,2010,25(3):148-152.
- [21] 刘忠珍,介晓磊,刘世亮,等.石灰性褐土中磷锌交互作用及磷对锌吸附-解吸的影响[J].环境化学,2010,29(6):1079-1085.
- [22] 王岩.磷、锌拮抗影响玉米锌营养状况作用研究[D].重庆:西南大学,2018.
- [23] 刘世亮,刘忠珍,刘芳,等.石灰性土壤中磷锌对小麦生长及锌吸收分配的影响[J].生态环境,2008(1):363-367.
- [24] 李广茂.中航化肥磷福锌(磷酸二铵)大区展示[J].农民致富之友,2013(17):61.
- [25] 杨建和.美可辛复合肥在水稻上应用效果初报[J].北京农业,2009(30):41-42.
- [26] 王浩然,唐明玉.新型肥料美可辛在玉米上的应用初报[J].杂粮作物,2009,29(5):354-355.
- [27] 自由路,金继运,杨俐苹.我国土壤有效镁含量及分布状况与含镁肥料的应用前景研究[J].土壤肥料,2004(2):3-5.
- [28] SUN X, CHEN J H, LIU L S, et al. Effects of magnesium fertilizer on the forage crude protein content depend upon available soil nitrogen [J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(8):1743-1750.
- [29] WANG Z, HASSAN M U, NADEEM F, et al. Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: A meta-analysis [J]. Front Plant Sci, 2020, 10:1727.
- [30] LU Z Y, WANG Y Y, DEGRYSE F, et al. Magnesium-fortified phosphate fertilizers improve nutrient uptake and plant growth without reducing phosphorus availability [J]. Pedosphere, 2022, 32(5):744-751.
- [31] 姜润,连祎雯,朱希茹,等.基于农业生产需求的硼肥产品创新思路[J].现代化工,2021,41(6):17-21.

- [32] 鲁振亚,贾冲冲,黄成东,等.基于ISEP的肥料产品研发思路[J].现代化工,2021,41(1):14-18.
- [33] 骆介禹,骆希明,孙才英,等.聚磷酸铵及应用[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [34] 刘续,汤建伟,刘咏,等.水溶性农用聚磷酸铵的研究与应用进展[J].无机盐工业,2020,52(12):7-11.
- [35] WEEKS J J, HETTIARACHCHI G M. A Review of the Latest in Phosphorus Fertilizer Technology: Possibilities and Pragmatism [J]. Journal of Environmental Quality, 2019, 48(3): 1300-1313.
- [36] 梁文,王辛龙,陈建钧,等.水溶性聚磷酸铵螯合锌的规律研究[J].无机盐工业,2019,51(11):20-22.
- [37] 谢汶级,王辛龙,许德华,等.不同pH对焦磷酸铵水解的影响[J].无机盐工业,2019,51(10):28-31.
- [38] TORRES-DORANTE L O, CLAASSEN N, STEINGROBE B, et al. 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.
- [39] 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 and Management, 2019, 35(4): 664-674.
- [40] GÓMEZ-MERINO F C, TREJO-TÉLLEZ L I. Biostimulant activity of phosphite in horticulture [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 196: 82-90.
- [41] LOVATT C J. Properly timing foliar-applied fertilizers increases efficacy: A review and update on timing foliar nutrient applications to citrus and avocado [J]. Horttechnology, 2013, 23(5): 536-541.
- [42] 杜安齐.亚磷酸钾对桃树控梢效果及其机理的研究[D].泰安:山东农业大学,2021.
- [43] SCHINK B, FRIEDRICH M. Phosphite oxidation by sulphate reduction [J]. Nature, 2000, 406(6791): 37.
- [44] 胡警匀,栗振义,王吉祥,等.紫花苜蓿对低磷酸盐和亚磷酸盐胁迫响应机制的比较分析[J].中国草地学报,2021,43(8): 26-33.
- [45] 任士伟,马存金,王亮亮,等.亚磷酸二氢钾对辣椒光合特性及根系生长的影响[J].磷肥与复肥,2018,33(4):41-43.
- [46] 雷菲,潘孝忠,吴宇佳,等.基施亚磷酸钾对‘琼辣3号’线椒养分吸收和土壤环境的影响[J].分子植物育种,2021,19(24): 8279-8286.
- [47] LYONS G, GENC Y. Commercial Humates in Agriculture: Real Substance or Smoke and Mirrors? [J]. Agronomy, 2016, 6(14): 50.
- [48] BORDES R, HOLMBERG K. Amino acid-based surfactants - do they deserve more attention? [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2015, 222: 79-91.
- [49] DEGRYSE F, AJIBOYE B, ARMSTRONG R D, et al. Sequestration of Phosphorus-Binding Cations by Complexing Compounds is not a Viable Mechanism to Increase Phosphorus Efficiency [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77 (6): 2050-2059.
- [50] GERKE J. Humic (Organic Matter) -Al (Fe) -Phosphate Complexes: An Underestimated Phosphate Form in soils and source of plant-A available Phosphate [J]. Soil Science, 2010, 175 (9): 417-425.
- [51] ZHU J, LI M, WHELAN M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review [J]. Science of the Total Environment, 2018, 612: 522-537.
- [52] DOYDORA S, HESTERBERG D, KLYSUBUN W. Phosphate Solubilization from Poorly Crystalline Iron and Aluminum Hydroxides by AVAIL Copolymer [J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(1): 20-28.
- [53] AZIZ M Z, YASEEN M, NAVEED M, et al. Polymer-Paraburkholderia phytofirmans PsJN Coated Diammonium Phosphate Enhanced Microbial Survival, Phosphorous Use Efficiency, and Production of Wheat [J]. Agronomy-Basel, 2020, 10 (9): 1344.
- [54] 刘博,雒沛文,齐永波,等.氨基酸增效磷肥对黄褐土磷有效性的影响[J].江苏农业科学,2019,47(4):269-272.
- [55] JING J Y, ZHANG S Q, YUAN L, et al. Synergistic effects of humic acid and phosphate fertilizer facilitate root proliferation and phosphorus uptake in low-fertility soil [J]. Plant and Soil, 2022, 478: 491-503.
- [56] WANG M P, CHEN L, LI Y T, et al. Responses of soil microbial communities to a short-term application of seaweed fertilizer revealed by deep amplicon sequencing [J]. Applied Soil Ecology, 2018, 125: 288-296.
- [57] WANG Y F, FU F Y, LI J J, et al. Effects of seaweed fertilizer on the growth of Malus hupehensis Rehd. seedlings, soil enzyme activities and fungal communities under replant condition [J]. European Journal of Soil Biology, 2016, 75: 1-7.
- [58] 赵晶,冯文强,秦鱼生,等.不同氮磷钾肥对土壤pH和镉有效性的影响[J].土壤学报,2010,47(5):953-961.
- [59] 吉冰洁,李文海,徐梦洋,等.不同磷肥品种在石灰性土壤中的磷形态差异[J].中国农业科学,2021,54(12):2581-2594.
- [60] WEN Z H, WHITE P J, SHEN J B, et al. Linking root exudation to belowground economic traits for resource acquisition [J]. New Phytol, 2022, 233(4): 1620-1635.
- [61] 王昕,唐宏亮,申建波.玉米根系对土壤氮、磷空间异质性分布的响应[J].植物营养与肥料学报,2013,19(5):1058-1064.
- [62] LI C J, HOFFLAND E, KUYPER T W, et al. Syndromes of production in intercropping impact yield gains [J]. Nature Plants, 2020, 6(6): 653-660.
- [63] 曲均峰.脲醛肥料研究现状[J].化肥工业,2013,40(5):24-27.
- [64] 侯翠红,苗俊艳,谷守玉,等.以钙镁磷肥产品创新促进产业发展[J].植物营养与肥料学报,2019,25(12):2162-2169.
- [65] 邹国元,曹兵,李丽霞,等.缓控释肥料研发需要长期坚持[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(8):1220-1229.
- [66] 佚名.ICL推出开创性生物降解包膜肥料技术——首创释放技术帮助农民满足2026年欧盟化肥标准[J].农药,2022,61(10):712.
- [67] RUSEK P, BISKUPSKI A, BOROWIK M, et al. Rozwoj technologii wytwarzania nawozow zawieszonych [J]. Przemysl Chemiczny, 2009, 88(12): 1332-1335.
- [68] 王亮亮,陈宏坤,宋涛,等.一种智能调控灌溉水pH的抗低温悬浮液体肥及其制备与应用:CN110790596A [P]. 2020-02-14.
- [69] 房福力,朱培祥,王雁峰,等.一种悬浮型水溶肥及其配肥方法:CN110396013A [P]. 2019-11-01.
- [70] 石称华,钱志红.一种平衡型悬浮液体肥及其制备方法:

- CN110590467A[P].2019-12-20.
- [71] 陈俊,原洪涛.高浓缩悬浮型水溶性肥料生产工艺及产业化研究[J].中国盐业,2020(17):34-38.
- [72] DANIEL M, KRYSZYNA H, JOZEF H. Production of suspension fertilizers as a potential way of managing industrial waste [J]. Polish Journal of Chemical Technology, 2007, 9(3):9-11.
- [73] BOGUSZ P. The Possibility of Using Waste Phosphates from the Production of Polyols for Fertilizing Purposes [J]. Molecules, 2022, 27(17):5632.
- [74] 李娟娟,孙明清,张辉,等.不同磷肥用量及施用方式对土壤有效磷分布和冬小麦产量的影响[J].农学学报,2021,11(9):28-32.
- [75] BERTRAND I, MCLAUGHLIN M J, HOLLOWAY R E, et al. Changes in P bioavailability induced by the application of liquid and powder sources of P, N and Zn fertilizers in alkaline soils[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 74(1):27-40.
- [76] 褚贵新,李明发,危常州,等.固体磷肥和液体磷肥对石灰性土壤不同形态无机磷及磷肥肥效影响的研究[J].植物营养与肥料学报,2009,15(2):358-365.
- [77] 黄丽,范兴科.磷肥和钾肥不同配施方式对其养分在土壤中迁移的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):184-190.
- [78] 王静,叶壮,褚贵新.水磷一体化对磷素有效性及磷肥利用率的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(11):1377-1383.
- [79] 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.
- [80] 赵鑫,蔡慢弟,董倩倩,等.中低品位磷矿资源高效利用机制与途径研究进展[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4):1121-1130.
- [81] FIORANI F, SCHURR U. Future Scenarios for Plant Phenotyping [J]. Annual Review of Plant Biology, 2013, 64(1):267-291.
- [82] LI Q, ZHENG L, GUO Z L, et al. Alginate degrading enzymes: an updated comprehensive review of the structure, catalytic mechanism, modification method and applications of alginate lyases[J]. Crit Rev Biotechnol, 2021, 41(6):11-16.
- [83] MCBEATH T M, ATMSTRONG R D, LOMBI E, et al. Responsiveness of wheat (*Triticum aestivum*) to liquid and granular phosphorus fertilisers in southern Australian soils [J]. Australian Journal of Soil Research, 2005, 43(2):203.

(上接第23页)

- [3] DENG X Y, LI Y P, LI L, et al. Sulfonated covalent organic framework modified separators suppress the shuttle effect in lithium-sulfur batteries [J]. Nanotechnology, 2021, 32(27):275708.
- [4] CAO Y, WANG M D, WANG H J, et al. Covalent organic framework for rechargeable batteries: mechanisms and properties of ionic conduction [J]. Advanced Energy Materials, 2022, 12(20):2200057.
- [5] PU Y C, ZHAO M G, LIANG X, et al. Growing ZIF-8 seeds on charged COF substrates toward efficient propylene-propane separation membranes [J]. Angewandte Chemie, 2023, 135(22):202302355.
- [6] TAN J, WENG W J, ZHU J Y, et al. A phosphine-amine-linked covalent organic framework with staggered stacking structure for lithium-ion conduction [J]. Angewandte Chemie, 2023, 135(52):202310972.
- [7] XU H L, SUN H, ZHANG J Y, et al. Construction and ReO_4^- -adsorption of ionic covalent organic frameworks by solvothermal synthesis based on Zincke reaction [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 333:125895.
- [8] MA L, HAN X, ZHANG S P, et al. Artificial monovalent metal ion-selective fluidic devices based on crown ether@metal-organic frameworks with subnanochannels [J]. ACS Applied & Materials Interfaces, 2022, 14(11):13611-13621.
- [9] LUO X, LU X B, ZHOU G Y, et al. Ion-selective polyamide acid nanofiber separators for high-rate and stable lithium-sulfur batteries [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(49):42198-42206.
- [10] LIN C E, ZHANG H, SONG Y Z, et al. Carboxylated polyimide separator with excellent lithium ion transport properties for a high-power density lithium-ion battery [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(3):991-998.
- [11] LU Y, GU S, GUO J, et al. Sulfonic groups originated dual-functional interlayer for high performance lithium-sulfur battery [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(17):14878-14888.
- [12] AN Q, WANG H E, ZHAO G F, et al. Understanding dual-polar group functionalized COFs for accelerating Li-ion transport and dendrite-free deposition in lithium metal anodes [J]. Energy Environmental Materials, 2023, 6(2):328-337.
- [13] LV Y J, DAI Z Q, CHEN Y, et al. Two-dimensional sulfonate-functionalized metal-organic framework membranes for efficient lithium-ion sieving [J]. Nano Letters, 2024, 24(9):2782-2788.
- [14] WU Z D, YI Y K, HAI F, et al. A metal-organic framework based quasi-solid-state electrolyte enabling continuous ion transport for high-safety and high-energy-density lithium metal batteries [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(18):22065-22074.
- [15] CHANG Z, QIAO Y, WANG J, et al. Fabricating better metal-organic frameworks separators for Li-S batteries: Pore sizes effects inspired channel modification strategy [J]. Energy Storage Materials, 2020, 25:164-171.
- [16] WENG Z, WU G, LI J Q, et al. Sulfonic group modified binder endows rapid lithium-ion diffusion for SiO_x microparticle anode [J]. Small Science, 2024, 4(1):2300133.
- [17] HAREENDRAKRISHNAKUMAR H, CHULLIYOTE R, JOSEPH M G, et al. Sulfonic groups stemmed ionic shield for polysulfides towards high performance Li-S batteries [J]. Electrochimica Acta, 2019, 321:134697.