

张 慧,伍昌维,程化鹏,等. 肥料增效剂的研究进展:分类、应用效果和检测技术[J]. 江苏农业科学,2026,54(7):27-35.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2026.07.004

肥料增效剂的研究进展:分类、应用效果和检测技术

张 慧¹,伍昌维¹,程化鹏¹,陈 泉¹,潘红艳²

(1. 贵州省产品质量检验检测院/贵州省市场监管局磷精细化高效利用及产品质量安全重点实验室,贵州贵阳 550016;
2. 贵州大学化学与化工学院,贵州贵阳 550025)

摘要:肥料对于保障粮食安全高效生产具有重要作用,但由于肥料利用率低,长期过量施用造成的农产品安全、资源浪费、环境污染等问题日益凸显。肥料增效剂具有改善肥料养分供应、促进植物养分吸收、调节土壤微生物等作用,可有效提高肥料的利用率,具有良好的农学效益和环境效益,为实现农业节本增效提供了重要途径。本文综述了肥料增效剂的研究进展,在化学合成物脲酶抑制剂、硝化抑制剂的基础上,新增了天然/植物源提取物(腐殖酸、海藻酸、氨基酸、寡糖)和微生物代谢产物(γ -聚谷氨酸、 γ -氨基丁酸)的分类,并介绍其作用机制和应用效果。针对目前市场上肥料增效剂种类繁多、安全性和有效性评估缺乏等问题,本文综述了肥料增效剂的检测技术,并对其应用前景和发展趋势进行了展望,为此类产品的科学施用、质量监督、智慧农业与绿色肥料的发展提供了理论参考。

关键词:肥料增效剂;脲酶抑制剂;硝化抑制剂;腐殖酸;海藻酸;寡糖;氨基酸; γ -聚谷氨酸; γ -氨基丁酸

中图分类号:S145.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2026)07-0027-09

我国是世界上最大的化肥生产和消费国,化肥施用量接近世界总量的 1/3,但氮肥的利用率仅在 30% 左右,磷肥的利用率不足 20%,钾肥的利用率约为 50%^[1-2]。我国氮肥去向比例中,氨挥发、硝

化-反硝化、淋洗、径流等损失极高^[2]。肥料的利用率低造成了资源浪费、环境污染、土壤生态恶化等一系列问题。我国 70% 的河流、湖泊存在不同程度的水体富营养化,其中约 60% 来源于化肥^[3],淋洗和径流不仅会污染水源,还会导致土壤酸化、盐渍化,增加重金属污染的风险,还有土壤板结和有机质减少,微生物活性降低,进一步降低肥力,形成恶性循环。

肥料增效剂是指在肥料生产或应用过程中,添加至肥料中,通过改善肥料养分供应、促进植物养分吸收或调节土壤微生物及酶活性等,能够提高肥料利用率的一类非植物矿质养分、非激素类物质的

收稿日期:2025-11-17

基金项目:黔科合支撑项目(编号:[2023]一般403);贵州省优秀青年科技创新人才/黔科合平台人才(编号:YQK[2023]007)。

作者简介:张 慧(1989—),女,山东菏泽人,硕士,工程师,从事化工、肥料、土壤的检验检测相关工作。E-mail:775085162@qq.com。

通信作者:伍昌维,硕士,高级工程师,从事化工、肥料、土壤的检验检测与质量管理。E-mail:281445145@qq.com。

农村经济,2015(4):98-103.

[25]孔东菊,朱 力. 论环境合同在农村面源污染治理中的应用[J]. 广西社会科学,2019(1):119-124.

[26]毕淑娜. 耕地轮作休耕制度中美比较分析:基于生态补偿效率的思考[J]. 地方财政研究,2018(9):108-112.

[27]郭 武,刘聪聪. 在环境政策与环境法律之间:反思中国环境保护的制度工具[J]. 兰州大学学报(社会科学版),2016,44(2):134-140.

[28]周小平,柴 铎,卢艳霞,等. 耕地保护补偿的经济学解释[J]. 中国土地科学,2010,24(10):30-35.

[29]吴 萍. 我国耕地休养生息生态补偿机制的构建[J]. 江西社会科学,2016,36(4):158-163.

[30]刘嘉尧,吕志祥. 美国土地休耕保护计划及借鉴[J]. 商业研究,2009(8):134-136.

[31]Mackenzie B F. Supporting environmental stewardship and livelihood benefits in Ontario's greenbelt: Assessing the potential contribution of the alternative land use services program [D]. Waterloo: University of Waterloo, 2008: 1-7.

[32]李武艳,徐保根,赵建强,等. 加拿大农地保护补偿机制及其启示[J]. 中国土地科学,2013,27(7):74-78.

[33]牛海鹏,杨小爱,张安录,等. 国内外耕地保护的经济补偿研究进展述评[J]. 资源开发与市场,2010,26(1):24-27,83.

[34]陈 军. 变化与回应:公私合作的行政法研究[M]. 北京:中国政法大学出版社,2014:193-197.

[35]苏 畅,杨子生. 日本环境保全型耕地农业系统对中国耕地保护的启示[J]. 中国农学通报,2020,36(31):86-91.

[36]车东晟. 论我国生态补偿法律化的原理与规范路径[J]. 甘肃政法学院学报,2018(3):146-156.

统称。根据肥料增效剂的原料和制备方法,将其分为天然/植物源材料提取物、微生物代谢产物和化学合成物质3个类型。天然/植物源材料提取物、微生物代谢产物这类物质主要是指腐殖酸类、海藻酸类、寡糖、氨基酸类等。化学合成物质主要是指脲酶抑制剂、硝化抑制剂,可提高氮肥的利用率,减少氮损失^[4-9]。研究表明,脲酶抑制剂、硝化抑制剂及其两者混合施用,可以分别显著减少总活性氮损失24%、22%、43%,农作物增产率为5%~16%,氮肥农学利用率增幅为21%~54%^[10]。

欧盟肥料产品法规(EC) No 2019/1009 将抑制剂单独列为一类,包括脲酶抑制剂、硝化抑制剂和反硝化抑制剂。德国从2020年2月1日开始禁用常规尿素,规定必须添加硝化或脲酶抑制剂,或者深施。中华人民共和国农业农村部在2014年发布了NY/T 2543—2014《肥料增效剂 效果试验和评价要求》,首次将脲酶抑制剂、硝化抑制剂统称为肥料增效剂,并规定了其效果试验和评价;2019年,同时发布了NY/T 3504—2019《肥料增效剂 硝化抑制剂及使用规程》和NY/T 3505—2019《肥料增效剂

脲酶抑制剂及使用规程》,规定了其相关试验方法和规程;2025年,发布了NY/T 4541—2025《肥料增效剂通用技术要求》,重新定义了肥料增效剂,增加了天然/植物源材料提取物和微生物代谢产物等种类。这些标准的发布和实施为肥料增效剂的备案登记提供了有效的依据和技术支撑。

本研究通过探讨肥料增效剂的分类、作用机制、应用及其检测方法,为此类产品生产控制、质量监督、市场监管,尤其是科学施用等工作提供检测手段,并在一定程度上为推动肥料产业健康发展提供技术支撑。

1 肥料增效剂的分类和应用效果

1.1 化学合成物

1.1.1 脲酶抑制剂 尿素直接施入土壤,仅15 d其分解率就达到了98%,肥效持续时间较短,50%左右的氮素通过氨挥发损失。尿素中的酰胺态氮与土壤脲酶作用,水解生成铵态氮,脲酶抑制剂可以抑制脲酶的活性,减缓尿素的水解,抑制酰胺态氮转化成铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)的速度,进而减少氨挥发导致的氮损失。大部分专家学者认为,该抑制过程的作用机制有3种^[11]。第一,醌类抑制剂可以将脲酶中的巯基($-\text{SH}$)氧化脱氢形成 $\text{S}-\text{S}$,使脲酶

活性降低,从而减缓了尿素的水解。第二,酰胺类脲酶抑制剂通过抢夺脲酶的活性点位,阻断了尿素与脲酶的接触,抑制了尿素的水解。第三,通过抑制微生物的活性,抑制或延缓脲酶的形成,减少土壤中的脲酶含量,进而减缓尿素的水解进程。

脲酶抑制剂的种类繁多,无机脲酶抑制剂类主要有重金属类和硼酸及其衍生物等;有机类脲酶抑制剂分为磷胺类、酚类、醌类、杂环类等。目前,主流的脲酶抑制剂主要有氢醌(HQ)、*P*-苯醌、苯基磷酰二胺(PPD)、磷酰三胺(PT)、硫代磷酰三胺(TPT)、*N*-正丁基硫代磷酸三胺(NBPT)和正丙基硫代磷酰三胺(NPPT)。脲酶抑制剂HQ具有致畸性,因此,很少在农业生产中应用。NBPT以其高效、低毒的特点在农业领域得到广泛应用,与NPPT配施效果更好。研究表明,与单施尿素相比,尿素配施NBPT可以显著降低80%~93%的氨挥发量,氮肥利用率提高5.3%~10%^[12];在尿素中添加1%的NBPT,氮肥施用量减少25%的情况下,水稻增产12.87%^[13]。

在脲酶抑制剂的实际应用中,其添加量和加工工艺是非常关键的环节。脲酶抑制剂的最佳用量需要根据土壤pH值、气温、脲酶活性、施肥方式和植物类型的不同而调整。加工工艺直接影响脲酶抑制剂的有效性,例如稳定性尿素,一般通过高塔熔体造粒工艺进行生产,在此过程中将NBPT与熔融状态下的尿素混匀,通过造粒喷头,即可生产出含NBPT的稳定性尿素颗粒,但高温熔融条件下,NBPT容易分解,从而造成一定的损失。德国巴斯夫公司采用外包涂法进行添加,将NBPT溶液喷涂至已成型的尿素颗粒表面,但该方法对溶解NBPT的溶剂有较高要求^[14]。

1.1.2 硝化抑制剂 在土壤中,铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)均可直接被植物吸收,但硝态氮 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 更容易淋失。硝化抑制剂可以抑制铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)转化成硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$),从而降低氮淋失,提高氮肥的利用率。硝化作用主要分为氨氧化和亚硝酸盐氧化2个步骤^[15],第1步,通过氨氧化细菌、氨氧化古菌、全程氨氧化细菌,在氨单加氧酶的作用下,将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化成羟氨(NH_2OH),在氧化还原酶的作用下,将 NH_2OH 氧化为 NO_2^- 。第2步,通过硝化细菌,在亚硝酸氧化还原酶、氧化氮还原酶的作用下,将 NO_2^- 氧化为 NO_3^- 。硝化抑制剂的作用机制主要有4种^[16],第

一,通过竞争 NH_4^+ 在氨单加氧酶的活性位点,抑制硝化作用;第二,通过对 Cu_2^+ 的螯合作用,降低氨单加氧酶的活性;第三,改变呼吸作用过程中的电子传递以及影响细胞色素氧化酶的功能;第四,通过改变土壤微环境,抑制细菌的繁殖,比如酸性土壤可抑制硝化细菌的生长。

硝化抑制剂主要分为烃类、含硫化合物、含氮杂环类等,例如硫脲(TU)、2-磺胺噻唑、2-巯基-苯并噻唑(ST)、2-氨基-4-氯-9-甲基吡唑(AM)、4-氨基-1,2,4-三唑盐酸盐(ATC)、双氰胺(DCD)、3-甲基吡唑(MP)、3,5-二甲基吡唑(DMP)、3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)、2-氯-6-三氯甲基吡啶(CP)。在农业方面应用较为广泛的硝化抑制剂主要有硫脲、双氰胺(DCD)、3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)、2-氯-6-三氯甲基吡啶(CP)。2-(3,4-二甲基-1*H*-吡唑-1-基)琥珀酸(DMPA)是巴斯夫公司研发的硝化抑制剂,具有稳定、低毒和高效的特点^[17-18],在国内暂未推广使用。杨勇等的研究表明,肥料中添加 DCD,肥料利用率可提高至 64.21%^[19];沈远鹏等研究发现,在保证甜玉米产量的情况下,添加 0.8%~1.2% (氮含量)的 DMPA,氮肥施用量可降低 66.8%~76.8%^[20];李学红等研究发现,与普通尿素相比,添加 NBPT+CP 处理的玉米籽粒产量增加 2.18 倍,氮素表观利用率提高 3.34 倍,添加 DMPP+CP 处理的籽粒产量增加 1.41 倍,氮素表观利用率提高 4.98 倍^[21];王雪薇等对比 CP、DCD、DMPP 的硝化作用,发现硝化抑制效果表现为 $\text{CP} \geq \text{DMPP} \geq \text{DCD}$,且 CP 的添加量为 0.25%~0.50% (氮含量)时,硝化抑制率可高达 98.9%~99.9%^[22]。

与其他硝化抑制剂相比,CP 的稳定性较差,易光解,且用量过多时,会毒害植物,对作物根系造成伤害。DCD 的稳定性较好,但其添加量较高,且会在土壤和农作物中残留和累积,尤其是在牧草和乳制品中检出过双氰胺事件,引发消费者担忧。DMPP 兼具低毒、高效、稳定的特点,但其作用效果受环境、气候、土壤、农作物种类等各方面影响^[23]。

1.2 天然/植物源材料提取物

1.2.1 腐殖酸

腐殖酸是一种含碳、氢、氧、氮、硫等元素的天然有机高分子混合物,由动植物残体经过微生物作用转化,并经过长期生物化学过程后形成,主要从泥炭、褐煤和风化煤等热值较低天然有机矿物中提取,按照其溶解性差异可分为黄腐酸

(富里酸)、棕腐酸(胡敏素)、黑腐酸(胡敏酸)等^[24]。腐殖酸以其资源丰富和价格低廉的优点而广泛应用于我国农业生产中。大量研究证明,腐殖酸在改善土壤、提高化肥利用率、增强作物品质及抗逆性等方面有明显的效果。腐殖酸能使土壤形成团粒结构,增加土壤的保水、透水、透气性,并在土壤修复中起到固定重金属和降解有机污染物的作用^[25],还可以调控土壤的微生物菌群,改善作物根系生态环境,通过生物机制调控土壤氮素转化^[26]。腐殖酸的大分子结构较为复杂,其外层的羧基可提高土壤对铵根、钾、钙、镁等各种阳离子的吸附能力。李伟等研究发现,腐殖酸可降低土壤对可溶性磷的固定,使土壤中速效磷的含量显著提高,延长肥效,促进植物对养分的吸收利用^[27]。腐殖酸还可以刺激植物发育,其酚醌结构可促进植物呼吸作用,且含有天然植物生长激素,可刺激和促进根系和植物的生长发育^[28];腐殖酸可提高作物体内多种酶的活性,增加作物含糖量,提高作物的抗逆能力^[29]。李小玉等研究发现,适量腐殖酸肥料的施用可改善番茄的品质和提高产量^[30]。

1.2.2 海藻酸

海藻酸是一种广泛存在于海生植物体内的天然多糖聚合物,又称褐藻酸,由单糖醛酸线性聚合而成,单体为 β -D-甘露醛酸(M)和 α -L-古罗糖醛酸(G),这 2 种单糖由 M-M、M-G、G-G 等不同形式组合,通过 β -(1,4)糖苷键聚合成嵌段共聚物,成为具有广泛生物活性的天然生物有机大分子^[31]。近几年,含海藻酸的肥料产品层出不穷。含海藻酸的肥料具有改良土壤、提高肥料利用率、增强植物抗病抗逆性的优良作用。海藻酸分子中的羟基和羧基可与土壤中的阳离子络合,有较强的吸水性,易形成凝胶物质和团粒结构,增大土壤的总孔隙度,增强土壤的保水性、透气性。在喷施叶面肥时,海藻酸易与水分子结合,可降低肥液的表面张力,使得肥液与叶面充分接触,更容易通过茎叶表面进行传递和吸收水溶性营养物质。张静等研究尿素在土壤中的转化时,发现海藻酸增效剂可以减缓尿素水解,降低氨挥发速率^[32];李金鑫等研究发现,海藻酸增效复混肥料在小麦上施用,增产效果显著,氮、磷、钾肥料的利用率和农学效率均有提高,土壤表层铵态氮、有效磷和速效钾的含量升高^[33]。海藻酸的降解产物海藻寡糖可调解细胞渗透压,促进植物体内营养物质的输送,增强植物细胞抗氧化酶系的活力,增强植物抗病、抗

逆性,促进植物生长^[34-35]。

1.2.3 氨基酸 氨基酸是蛋白质的基本组成单位,主要来源于动植物蛋白和微生物的水解产物等,也是动植物生长必不可少的物质。氨基酸还具备直接调节植物生理活动和合成激素的特殊功能。例如,天冬氨酸可以促进发芽和蛋白质合成,为植物的生长提供氮源;丝氨酸可以参与细胞组织分化,促进种子发芽;谷氨酸、赖氨酸和甘氨酸可以促进光合作用,增加叶绿素合成;脯氨酸可以增强植物对渗透胁迫的耐性,提高抗逆性;精氨酸、色氨酸和甲硫氨酸是植物激素或生长促进物质的合成前体^[36]。目前,我国的氨基酸肥料主要为水溶肥,添加了氨基酸和中微量元素成分,在作物生长周期内,需要配施其他大量元素肥料。现今有很多学者在研究氨基酸复合产品,如氨基酸有机肥、氨基酸增值氮肥、氨基酸复合肥等,在作物生产上也取得了良好的效果。向德明等研究发现,氨基酸有机肥可促进大田烤烟个体与群体的中部叶生长发育,提高烟叶产量与产值^[37]。程林等研究发现,氨基酸增值尿素不仅可以促进作物根系生长和建成,还可以增加根际细菌总量和细菌群落多样性,有利于水稻氮素吸收^[38]。许猛等研究发现,在 25 ~ 75 mmol/L NaCl 胁迫条件下,低浓度(0.05 g/L)复合氨基酸肥料可明显促进小白菜幼苗生长,提高叶片抗氧化酶活性,维持渗透调节物质脯氨酸(Pro)含量,增强光合作用等^[39]。

1.2.4 寡糖 寡糖是由 2 ~ 20 个相同或不同的单糖单位连接起来的糖类化合物,也叫低聚糖。目前,在农业领域应用的主要有海藻寡糖、壳寡糖、牛蒡寡糖等。海藻寡糖是海藻酸降解得到的聚合度在 2 ~ 10 的直链或支链化合物,来源于海生藻类等生物。主要有褐藻寡糖、琼胶寡糖、卡拉胶寡糖、岩藻寡糖等,以褐藻寡糖为主,具有调节植物生长、提高植物抗逆性、提高肥料利用率等作用^[40]。壳寡糖是由氨基葡萄糖和(或)N-乙酰氨基葡萄糖经 β -(1,4)糖苷连接而成的聚合度不高于 20 的低聚糖,主要来源于虾蟹壳,是自然界中唯一带正电荷的阳离子碱性氨基低聚糖,具有抑制病菌、增强作物抗逆性、促进植物生长发育等特性^[41]。牛蒡寡糖是从牛蒡根中提取的聚合度为 13 的菊糖型低聚果糖,具有抗病害、抗逆性、促进根系增长、增产等作用^[42]。代中旭等研究发现,叶面喷施 200,300 mg/kg 海藻寡糖溶液,能显著提高菜心经济产量,并且提

高叶片可溶性糖、维生素 C、可溶性蛋白和可溶固形物的含量;淋根施用可提高菜心产量 22.17% ~ 53.04%^[43]。董梓慧等研究发现,海藻酸寡糖通过激发水杨酸信号转导,提高植株体内防御相关酶活性,增加植株抗病性^[44]。崔晓霞等研究发现,壳寡糖可有效减轻 10% 聚乙二醇模拟的干旱胁迫对种子萌发和幼苗生长的抑制,提高大豆的抗旱能力^[41]。张玉凤等研究发现,牛蒡寡糖能显著促进西瓜苗生长,降低枯萎病的发生^[45]。

1.3 微生物代谢产物

1.3.1 γ -聚谷氨酸(γ -PGA) γ -PGA 是一种多聚氨基酸,由 D-谷氨酸和 L-谷氨酸通过 γ -酰胺键聚合而成。最早发现于炭疽芽孢菌的荚膜,随后被发现于枯草芽孢杆菌和纳豆杆菌中,随着研究的深入,目前可通过化学合成、提取、酶转化法、微生物发酵法等技术制备 γ -PGA。随着聚谷氨酸肥料产品的有效推广,2021 年聚谷氨酸增效复合肥的产量合计高达 500 万 t,其 γ -PGA 的添加量一般在 5% 以内。 γ -PGA 分子链中含有大量的氢键、羧基、氨基、羟基等,可以吸持大量的水分子,并与氮、磷、钾和微量元素等形成稳定的络合物和螯合物,具有保水保肥、提高肥料利用率的作用; γ -PGA 可以为土壤微生物提供丰富的营养源,促进土壤微生物群落的多元化,对于修复和改良土壤具有一定的效果; γ -PGA 可激发植物体内抗病相关基因表达,诱导植物积累抗病生理活性物质,抑制病原菌,提高植物的自身免疫能力; γ -PGA 可促进氨基酸同工酶和脯氨酸合成酶等的表达,提高蛋白质和脯氨酸等物质的积累,从而增强植物的抗逆性^[46]。魏全全等研究发现,施用聚谷氨酸增效肥料,可提高茄子产量 3.65% ~ 13.76%,同时提高茄子中维生素 C 和可溶性糖的含量,改善作物品质^[47]。Bai 等研究发现, γ -PGA 可提高作物产量和肥料利用率^[48]。

1.3.2 γ -氨基丁酸(GABA) GABA 是一种广泛分布于动植物和微生物体内的非蛋白质氨基酸,在生物体内,主要由 GABA 支路途径(谷氨酸脱羧)或多胺降解代谢产生,可通过化学合成、微生物发酵、植物富集等途径获得。GABA 在植物体内不仅能储存氮源,还可调节植物生长发育,在多种胁迫条件下积累,激活植物防御反应,增强植物的抗逆能力^[49-50]。黄科文等研究发现,GABA 可通过提高氧化酶活性和渗透调节物质含量来缓解枇杷幼果的

冻害,增强枇杷幼果的耐寒性^[51]。Nayyar 等研究发现,GABA 可以提高细胞渗透液中脯氨酸和海藻糖的含量,减少水稻在高温胁迫下的氧化损伤^[52]。刘阳等研究发现,GABA 的施用显著增加了芥蓝的株高、茎粗和质量,还有可溶性糖、维生素 C、可溶性蛋白质、游离氨基酸、总硫代葡萄糖苷、总酚及类黄酮的含量,提高了芥蓝产量和品质^[53]。

2 肥料增效剂及其相关肥料产品的登记管理

目前,肥料增效剂已在农业农村部种植业管理司单独分类登记管理,但只有硝化抑制剂、脲酶抑制剂 2 类,截至 2025 年 11 月 14 日,在官网查询到的已登记的肥料增效剂主要有 CP、NBPT、NPPT、DMPP、DMPSA - K₂,详见表 1。

表 1 肥料增效剂登记情况

企业名称	肥料登记证号	主要指标
巴斯夫欧洲公司	农肥(2018)准字 10265 号	3,4 - 二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)含量 420 ~ 518 g/L
陕西上格之格生物科学有限公司	农肥(2018)准字 9531 号	2 - 氯 - 6 - 三氯甲基吡啶含量 230 ~ 250 g/L
浙江金晖新材料股份有限公司	农肥(2018)准字 12249 号	正丁基硫代磷酸三胺(NBPT)含量 ≥97.0%
巴斯夫欧洲公司	农肥(2022)准字 18268 号	NBPT 含量 325 ~ 359 g/L,正丙基硫代磷酸三胺(NPPT)含量 107 ~ 121 g/L
巴斯夫欧洲公司	农肥(2023)准字 19273 号	NBPT 含量 199 ~ 224 g/L,NPPT 含量 4 ~ 78 g/L
武威金仓生物科技有限公司	农肥(2025)准字 21053 号	NBPT 含量 ≥97.0%
巴斯夫欧洲公司	农肥(2025)准字 21054 号	二甲基吡啶丁二酸钾盐(DMPSA - K ₂)含量 580 ~ 630 g/L

在农业农村部已登记的含氨基酸水溶肥料产品共 3 574 个,腐殖酸水溶肥料产品共 3 421 个。由国家市场监督管理总局、工业和信息化部、农业农村部批准,已发布实施的相关标准中,腐殖酸类的肥料标准 17 项、氨基酸类肥料产品标准 1 项、海藻酸类肥料产品标准 4 项,详见表 2。

3 肥料中增效剂的检测技术

2017 年,国家发布了 GB/T 35113—2017《稳定性肥料》,将加入了脲酶抑制剂或硝化抑制剂的肥料统称为稳定性肥料,并对其性能指标尿素残留差异率和硝化抑制率进行了有效规定。但其功能性评价方法检测周期较长,试验过程中,脲酶活性和土壤等因素对试验效果影响较大。对于肥料中添加的其他增效剂(如腐殖酸、海藻酸、氨基酸等),并没有相关的功能性评价方法,因此,市场上出现了非常多类型的腐殖酸肥料、氨基酸肥料和海藻酸肥料,尤其是腐殖酸和海藻酸的添加量差异较大。除有效性外,应从保障消费者权益、安全性、生态环境等多方面进行考量,2013 年新西兰的乳制样品中检测出微量双氰胺,引发了各界广泛关注,原因是牧场中喷洒了含有双氰胺的化肥,因此,肥料中增效剂的评价方法和检测技术尤为重要。

3.1 肥料中脲酶抑制剂、硝化抑制剂的检测方法

肥料中脲酶抑制剂、硝化抑制剂的检测方法主要为液相色谱法,目前国内外已经有检测方法的抑制剂主要包括 DCD、DMPP、CP、DMPSA、PPD、HQ、

NBPT、NPPT、2 - NPT、3 - MP、1H - 1,2,4 - 三氮唑等,其检测方法均为高效液相色谱法,一般通过水、乙腈/甲醇水提取,利用反相色谱柱 C18、RP8、RP18 柱进行分离,紫外(UV)、光电二极管阵列(PDA)、电化学(ED)检测器进行检测,但只能同时检测其中 1 种或 2 种抑制剂,详见表 3。

3.2 肥料中腐殖酸的检测方法

肥料中腐殖酸类的分类和名称较杂,目前国内标准中有总腐殖酸、可溶性腐殖酸、活化棕黑腐殖酸、活化黄腐酸、活性腐殖酸、生物腐殖酸、矿物质黄腐酸钾、生物源黄腐酸钾等名词分类。其主要的检测方法为重量法、容量法、分光光度法,采用不同介质提取样品中的腐殖酸,酸化沉淀后用重量法进行测定;或酸化后的沉淀用氢氧化钠溶解后,再用重铬酸钾氧化法滴定;或通过树脂吸附容量法进行测定;或通过硫酸 - 重铬酸钾氧化后分光光度法进行测定^[54]。针对不同基质的样品和不同类别的腐殖酸,其提取介质和条件差别较大,详见表 2。

3.3 肥料中海藻酸和寡糖的检测方法

由于海藻酸与褐藻寡糖的水解产物均为 L - 古罗糖醛酸单糖和 D - 甘露糖醛酸,因此其检测方法极为相似,一般有分光光度法和液相色谱法。分光光度法主要为咪唑硫酸法、间羟基联苯法。咪唑硫酸法测定糖醛酸,脲醛氮会对显色体系产生严重干扰,且中性糖的干扰也使得检测数据偏高,采用间羟基联苯法测定糖醛酸,干扰小,数据较为稳定可靠^[55-56]。液相色谱法测定海藻酸肥料中的海藻酸

表 2 肥料增效剂相关产品及标准

增效剂类别	产品标准	增效剂类别	增效剂含量	提取条件
腐殖酸类	HG/T 6079—2022《腐殖酸中量元素肥料》	腐殖酸	≥30.0%	用氢氧化钠和磷酸盐缓冲溶液提取, 60℃恒温水浴 0.5 h
		可溶性腐殖酸	≥5.0%	用水提取, 沸水浴 30 min
	NY/T 1106—2010《含腐殖酸水溶肥料》	腐殖酸	≥3.0% (固体产品), ≥30 g/L (液体产品)	用氢氧化钠溶液溶解
	GB/T 33804—2017《农业用腐殖酸钾》	可溶性腐殖酸	≥60% (优等品); ≥50% (一等品); ≥40% (合格品)	用水提取, 沸水浴 30 min
	HG/T 5333—2018《腐殖酸微量元素肥料》	腐殖酸	≥30%	用氢氧化钠和磷酸盐缓冲溶液提取, 60℃恒温水浴 0.5 h
	HG/T 5045—2016《腐殖酸尿素》	腐殖酸	≥0.12%	用水溶解
	HG/T 5933—2021《腐殖酸有机-无机复混肥料》	总腐殖酸	≥15.0% (I型); ≥5.0% (II型)	用碱性焦磷酸钠溶液提取, 沸水浴 30 min
		可溶性腐殖酸	≥8.0% (I型); ≥3.0% (II型)	用水提取, 沸水浴 30 min
	HG/T 5046—2016《腐殖酸复合肥料》	活化腐殖酸	≥1.0% (高浓度); ≥2.0% (中浓度); ≥3.0% (低浓度)	用柠檬酸-柠檬酸钠抽提液, 沸水浴抽提 60 min
		总腐殖酸	≥2.0% (高浓度); ≥4.0% (中浓度); ≥4.0% (低浓度)	用碱性焦磷酸钠溶液, 沸水浴抽提 2 h
	HG/T 5332—2018《腐殖酸生物有机肥》	总腐殖酸	≥25% (优等品); ≥15% (合格品)	用碱性焦磷酸钠溶液, 沸水浴 30 min
		黄腐酸	≥2%	用水提取, 沸水浴 30 min
	HG/T 5514—2019《含腐殖酸磷酸一铵、磷酸二铵》	腐殖酸	≥0.3%	用碱性焦磷酸钠溶液, 沸水浴抽提 2 h
	HG/T 5931—2021《肥料增效剂 腐殖酸》	总腐殖酸	≥40% (固体产品), ≥100 g/L (液体产品)	用碱性焦磷酸钠溶液溶解, 在不同的氧化条件下, 区分活性腐殖酸和总腐殖酸
		活性腐殖酸	≥7% (固体产品); ≥7 g/L (液体产品)	
	HG/T 5602—2019《矿物源腐殖酸有机肥料》	总腐殖酸	≥35% (I型); ≥25% (II型)	用碱性焦磷酸钠溶液, 沸水浴提取 30 min
		可溶性腐殖酸	≥5%	用水提取, 沸水浴 30 min
	HG/T 6082—2022《生物质腐殖酸有机肥料》	生物质腐殖酸	≥12% (I型); ≥8% (II型)	用氢氧化钠, 沸水浴提取 2 h
	HG/T 6397—2025《黄腐酸大量元素水溶肥料》	矿物源黄腐酸	≥2.0% (固体产品); ≥20 g/L (液体产品)	用水将样品溶解于透析袋中, 水浴 50~60℃透析 2~4 h, 直至透析袋外部水的电导率(EC) <50 μS/cm
	HG/T 6396—2025《含黄腐酸复合肥料》	矿物源黄腐酸	≥0.1% (高浓度); ≥0.3% (中浓度); ≥0.5% (低浓度)	
	HG/T 5935—2021《黄腐酸微量元素肥料》	矿物源黄腐酸	≥25% (固体产品); ≥100 g/L (液体产品)	定性分析: 用荧光光谱定性判断黄腐酸的种类
		生物源黄腐酸	≥20% (固体产品); ≥200 g/L (液体产品)	提取方式: 用水提取, 沸水浴 2 h
	HG/T 5934—2021《黄腐酸中量元素肥料》	矿物源黄腐酸	≥25% (固体产品); ≥100 g/L (液体产品)	
		生物源黄腐酸	≥20% (固体产品); ≥200 g/L (液体产品)	
	HG/T 5334—2018《黄腐酸钾》	矿物源黄腐酸钾	≥50% (固体, 优等品); ≥40% (固体, 一等品); ≥30% (固体, 合格品); ≥80 g/L (液体)	
		生物源黄腐酸钾	≥25% (固体, 颗粒); ≥35% (固体, 粉状); ≥200 g/L (液体)	
氨基酸类	NY 1429—2010《含氨基酸水溶肥料》	游离氨基酸	≥10.0% (固体产品); ≥100 g/L (液体产品)	用水溶解
海藻酸	HG/T 5049—2016《含海藻酸尿素》	海藻酸	≥0.03%	用水溶解
	HG/T 5050—2016《海藻酸类肥料》	海藻酸	≥0.02% (含部分海藻酸包膜尿素的掺混肥料); ≥0.05% (海藻酸复合肥料); ≥1.5% (海藻酸水溶肥料)	用水溶解
	HG/T 5515—2019《含海藻酸磷酸一铵、磷酸二铵》	海藻酸	≥0.03%	用水溶解
	HG/T 5932—2021《肥料增效剂 海藻酸》	海藻酸	≥10% (固体, I型); ≥50 g/L (液体, I型); ≥4% (固体, II型); 20 g/L (液体, II型)	用水溶解

表 3 肥料中抑制剂的检测方法

名称	标准	检测器	色谱柱	波长 (nm)	流动相
DCD	NY/T 2877—2015《肥料增效剂 双氰胺含量的测定》,EN 15360—2007《肥料 双氰胺的测定.使用高效液相色谱(HPLC)法》,ISO 6650:2023	UV	RP ₁₈	220	甲醇水(1+99)
		UV 或 PDA	C ₁₈	214	乙腈水(梯度洗脱)
DMPP	NY/T 3423—2019《肥料增效剂 3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)含量的测定》,EN 16328—2012	UV	C ₁₈	224	0.01 mol/L NaH ₂ PO ₄ -H ₂ O,17.5% 乙腈水溶液
CP	NY/T 3037—2016《肥料增效剂 2-氯-6-三氯甲基吡啶含量的测定》	UV	C ₁₈	230	甲醇水(70+30)
DMP SA	EN 17090—2018	UV	C ₁₈	232	乙腈水溶液(90+10) 1 L,加入 1 mL 磷酸
PPD	NY/T 4429—2023《肥料增效剂 苯基磷酸二胺(PPD)含量的测定》	UV 或 PDA	C ₁₈	224	乙腈水(40+60)
HQ	NY/T 4428—2023《肥料增效剂 氢醌(HQ)含量的测定》	UV 或 PDA	C ₁₈	280	乙腈水(40+60)
MP	EN 15905:2010	UV	C ₁₈	214	乙腈水(20+80)
1H-1,2,4-三氮唑	EN 16024:2011	ED	C ₈	—	乙腈/缓冲溶液(15+85)
2-NPT	EN 16075:2011	UV	RP ₈₀	214	甲醇水(50+50)
NBPT	NY/T 3038—2016《肥料增效剂 正丁基硫代磷酸三胺(NBPT)和正丙基硫代磷酸三胺(NPPT)含量的测定》	UV	RP-8	未提及	乙腈水(25+75)
	ISO 6650:2023	UV 或 PDA	C ₁₈	205	乙腈水(梯度洗脱)
	EN 15688:2008	UV	C ₁₈ /RP-8	205/203	乙腈水(10+90)/(15+85)
	EN 16651:2015	UV	RP-8	205	乙腈水(25+75)
NPPT	NY/T 3038—2016	UV	RP-8	未提及	乙腈水(25+75)
	EN 16651:2015	UV	RP-8	205	乙腈水(25+75)

或褐藻寡糖时,需要先在酸性条件下将其水解为单糖后,通过与 1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(PMP)进行衍生化反应,用紫外检测器进行检测。以上 2 种方法只能测定糖醛酸的含量,通过控制水解条件来区别样品中的海藻酸、褐藻寡糖和糖醛酸。肥料中壳聚糖的检测方法目前主要为分光光度法,水解生成氨基葡萄糖后,再与乙酰丙酮和对二甲氨基苯甲醛反应生成红色化合物。寡糖的种类繁多,除褐藻寡糖、壳聚糖外,对于其他类型的寡糖检测方法研究较少。

3.4 肥料中氨基酸、 γ -PGA、GABA 的检测方法

肥料中的氨基酸一般采用氨基酸自动分析仪法,目前水溶肥料中游离氨基酸的检测方法较为成熟,试样经磺基水杨酸沉淀蛋白质后,用 EDTA 络合金属元素释放氨基酸,经分离柱分离后与茚三酮显色,适合分析高含量的氨基酸水溶肥料产品。

肥料中 γ -PGA 的检测方法主要有氨基酸自动分析仪法和液相色谱法。氨基酸自动分析仪法,通过分别测定试样中经盐酸溶液水解后的和未经水解的游离谷氨酸含量,计算两者之差即为 γ -PGA 含量,但该方法的前处理步骤复杂,精密度较差,不适用于肥料中低含量的 γ -PGA。液相色谱法测定肥料中的 γ -PGA,样品经水提取后,直接通过凝胶色谱柱分离,用液相色谱的紫外检测器进行检测,但该方法存在 2 个问题,第一,样品基体的干扰较大,保留时间偏移较大;第二,在相同浓度的 γ -PGA 溶液中, γ -PGA 的分子量越大,其紫外吸收越强,而实际检测中无法适配与肥料中 γ -PGA 分子量排布一致的标准品。对于 γ -PGA 含量低的肥料,由于其基体干扰较大,且标准品与肥料中 γ -PGA 的分子量排布不一致时,试验误差较大。肥料中 GABA 的检测方法主要为液相色谱法,但需要与 2,4-二硝基

氟苯进行柱前衍生反应,操作较为繁琐。

4 问题与展望

肥料增效剂发展至今,其有效性已得到了市场的广泛认可,其良好的农学效益和环境效益为实现农业节本增效提供了重要途径。脲酶抑制剂、硝化抑制剂以及氨基酸、海藻酸等增效剂的作用机制已被广泛研究,腐殖酸、海藻酸和氨基酸在农业中应用较为广泛,但其他类型的应用研究较少,亟需开发高效、低毒、稳定、环境友好型的新型肥料增效剂。

目前,针对各类肥料增效剂的单一作用研究较多,但针对混合施用各类增效剂的叠加效应研究不多,植物在不同时期需要的营养元素不同,迫切需要研究一种复合型的缓释肥料,在植物不同的生长环境和时期,根据需求缓释出不同的营养元素,并增加植物在各种胁迫下的抗逆性,以提高其农学效益和环境效益。

在肥料增效剂的市场应用方面,市场监管力度不足。市场上的肥料增效剂种类繁多,但目前国内仅有 3 家企业的肥料增效剂进行了登记管理。目前,缺乏对天然/植物源材料提取物、微生物代谢产物类肥料增效剂有效性的评估,缺乏对化学合成物的安全性评估和市场监管。稳定性肥料中添加了脲酶抑制剂、硝化抑制剂,但并未标注添加种类和添加量,在农业规模化应用中,容易出现过量施用的情况,造成土壤和植物残留,继而引发食品安全问题。

肥料中增效剂的效果评价及其检测技术为智慧农业与绿色肥料提供了强力支撑。目前,缺乏对天然/植物源材料提取物、微生物代谢产物类肥料增效剂的评价体系和方法;国内外针对肥料中脲酶抑制剂、硝化抑制剂的检测方法中的目标物质较为单一;对于肥料中的 γ -聚谷氨酸、 γ -氨基丁酸等的检测方法研究较少,亟需开发更为准确、高效的方法。

参考文献:

- [1] 焦卫平,周鹏程,刘晓波,等. 氮肥抑制剂在肥料中的应用[J]. 磷肥与复肥,2022,37(9):22-25.
- [2] 闫湘,金继运,何萍,等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学,2008,41(2):450-459.
- [3] 赵宏,包立,张乃明. 2015 年云南省化肥消费结构与施肥强度分析[J]. 磷肥与复肥,2017,32(12):37-41.
- [4] 苏成国,尹斌,朱兆良,等. 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气氮的湿沉降[J]. 应用生态学报,2003,14(11):1884-1888.
- [5] 曹银珠,赵同科,刘树庆,等. 脲酶抑制剂、硝化抑制剂双控过程中硝化抑制尿素分解效应[J]. 水土保持学报,2015,29(4):143-147,200.
- [6] 隽英华,陈利军,武志杰,等. 脲酶抑制剂、硝化抑制剂在土壤 N 转化过程中的作用[J]. 土壤通报,2007,38(4):773-780.
- [7] 李宝石,刘文科,王奇,等. 根区施用硝化抑制剂 DMPP 对不同栽培方式下黄瓜产量及根区温室气体排放的影响[J]. 中国农业科技导报,2021,23(9):184-192.
- [8] 赵斌,朱四喜,程谊,等. 贵州草海地区不同土地利用方式土壤中尿素氮转化对 3 种硝化抑制剂的响应[J]. 西北农业学报,2019,28(7):1169-1178.
- [9] 郭广正. 减氮配施硝化抑制剂对西南露地蔬菜农学和环境效应的影响[D]. 重庆:西南大学,2021.
- [10] 张文学,杨成春,王少先,等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田土壤氮素转化的影响[J]. 中国水稻科学,2017,31(4):417-424.
- [11] 郑福丽,李彬,李晓云,等. 脲酶抑制剂的作用机理与效应[J]. 吉林农业科学,2006,31(6):25-28.
- [12] Muneer A. 脲酶抑制剂减少氮损失和提高氮肥利用率效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [13] 张文学,孙刚,何萍,等. 双季稻田添加脲酶抑制剂 NBPT 氮肥的最高减量潜力研究[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(4):821-830.
- [14] M·斯塔尔, M·施密德, W·泽鲁拉. 芳基取代的(硫代)磷酸三酰胺脲酶抑制剂与含磷尿素肥料的混合物:CN110099881B [P]. 2022-05-27.
- [15] 郭长青. 硝化抑制剂评价方法与新型硝化抑制剂合成及应用效果研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2022.
- [16] 朱金龙,梁富忠,邓松华. 硝化作用影响因素及含硝化抑制剂肥料的应用[J]. 现代农业科技,2021(17):180-182,187.
- [17] Souza E F C, Rosen C J, Venterea R T. Co-application of DMPSA and NBPT with urea mitigates both nitrous oxide emissions and nitrate leaching during irrigated potato production [J]. Environmental Pollution, 2021, 284:117124.
- [18] Recio J, Alvarez J M, Rodriguez - Quijano M, et al. Nitrification inhibitor DMPSA mitigated N₂O emission and promoted NO sink in rainfed wheat [J]. Environmental Pollution, 2019, 245:199-207.
- [19] 杨勇,蒋宏芳,荣湘民,等. 不同肥料增效剂在水稻上的应用效果研究[J]. 中国土壤与肥料,2015(5):83-87.
- [20] 沈远鹏,郭广正,张芬,等. 新型硝化抑制剂 DMPSA 对甜玉米产量和氮素吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(10):138-146.
- [21] 李学红,李东坡,武志杰,等. 添加 NBPT/DMPP/CP 的高效稳定性尿素在黑土和褐土中的施用效应[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(6):957-968.
- [22] 王雪薇,刘涛,褚贵新. 三种硝化抑制剂抑制土壤硝化作用比较及用量研究[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(1):54-61.
- [23] 李思平,刘蕊,刘家欢,等. 稳定性肥料产业发展创新及展望[J]. 现代化工,2022,42(11):1-8.

- [24]张鹏,俄胜哲,袁金华,等. 腐殖酸肥料研究进展[J]. 中国农学通报,2023,39(25):102-108.
- [25]石冰,章卫星. 腐殖酸在农业生产与土壤修复领域的作用和建议[J]. 化肥工业,2015(3):86-89.
- [26]毕军,夏光利,毕研文,等. 腐殖酸生物活性肥料对冬小麦生长及土壤微生物活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(1):99-103.
- [27]李伟,袁亮,张水勤,等. 中低分子量腐殖酸提高冬小麦磷吸收和产量的机理[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(11):2043-2050.
- [28]周丽平,袁亮,赵秉强,等. 腐殖酸的组成结构及其对作物根系调控的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报,2022,28(2):334-343.
- [29]马丙尧,邢尚军,马海林,等. 腐殖酸类肥料的特性及其应用展望[J]. 山东林业科技,2008,38(1):82-84.
- [30]李小明,赵群法,尚玉臣,等. 腐殖酸肥对温室番茄土壤微生物及产量品质的影响[J]. 河南农业大学学报,2016,50(2):203-208.
- [31] Wang J F, Liu S J, Huang J Q, et al. Alginate: Microbial production, functionalization, and biomedical applications [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 125048.
- [32]张静,冀建华,李絮花,等. 海藻酸增效剂对尿素在土壤中转位及损失的调控[J]. 中国土壤与肥料,2020(6):228-233.
- [33]李金鑫,李絮花,刘敏,等. 海藻酸增效复混肥料在冬小麦上的施用效果[J]. 中国土壤与肥料,2020(1):153-159.
- [34] Liu H, Zhang Y H, Yin H, et al. Alginate oligosaccharides enhanced *Triticum aestivum* L. tolerance to drought stress [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 62:33-40.
- [35] Zhang Y H, Liu H, Yin H, et al. Nitric oxide mediates alginate oligosaccharides - induced root development in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 71: 49-56.
- [36]王赛红,孙莹莹,李冬佳,等. 生物活性物质在增效肥料行业的应用现状及发展前景[J]. 中国土壤与肥料,2025(3):241-250.
- [37]向德明,张明发,彭曙光,等. 不同氨基酸有机肥对烤烟生长发育及产质量的影响[J]. 农学学报,2018,8(12):40-46.
- [38]程林,章力干,张国漪,等. 氨基酸增值尿素对水稻苗期生长及根际微生物菌群的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(1):35-44.
- [39]许猛,袁亮,李伟,等. 复合氨基酸肥料增效剂对NaCl胁迫下小白菜种子萌发和苗期生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(4):992-1000.
- [40]马式太,王峰,成琪璐,等. 海藻寡糖在农业领域的研究应用进展[J]. 中国农学通报,2024,40(33):86-92.
- [41]崔晓霞,马倩,刘学勤,等. 壳寡糖对PEG胁迫下大豆种子萌发及幼苗生理指标的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(1):46-51.
- [42]郝林华,孙丕喜,石红旗,等. 牛蒡寡糖诱导黄瓜对白粉病的抗性[J]. 上海交通大学学报(农业科学版),2006,24(5):441-447.
- [43]代中旭,艾新帅,杨正华,等. 海藻寡糖与复合肥配合施用对菜心产量和品质的影响[J]. 磷肥与复肥,2022,37(5):49-52.
- [44]董梓慧,马青. 海藻酸寡糖诱导黄瓜抗灰霉病效果及其机理研究[J]. 西北农业学报,2024,33(6):1131-1139.
- [45]张玉凤,董亮,宋效宗,等. 不同浓度牛蒡寡糖对西瓜苗生长和抗枯萎病的影响[J]. 华北农学报,2016,31(增刊1):340-344.
- [46]高向南. 聚谷氨酸增效复合肥的生产与应用[J]. 生态产业科学与磷氟工程,2024,39(9):44-47,65.
- [47]魏全全,张萌,苟久兰,等. 聚谷氨酸增效肥料对贵州黄壤区露天茄子生物效应及肥料利用率的影响[J]. 河南农业科学,2022,51(5):53-61.
- [48] Bai N L, Zhang H L, Li S X, et al. Effects of application rates of poly- γ -glutamic acid on vegetable growth and soil bacterial community structure [J]. Applied Soil Ecology, 2020, 147: 103405.
- [49] Ramesh S A, Tyerman S D, Gilliam M, et al. γ -Aminobutyric acid (GABA) signalling in plants [J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2017, 74(9):1577-1603.
- [50] Gahlout P, Tripathi D K, Singh S P, et al. GABA in plants: developmental and stress resilience perspective [J]. Physiologia Plantarum, 2024, 176(1): e14116.
- [51]黄科文,邓群仙,周连莹,等. γ -氨基丁酸对枇杷幼果耐寒性的影响[J]. 现代农业科技,2024(12):79-84.
- [52] Nayyar H, Kaur R, Kaur S, et al. γ -aminobutyric acid (GABA) imparts partial protection from heat stress injury to rice seedlings by improving leaf turgor and upregulating osmoprotectants and antioxidants [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2014, 33(2): 408-419.
- [53]刘阳,张婧,高晓萍,等. 外源 γ -氨基丁酸对芥蓝生长及品质的影响[J]. 江苏农业学报,2023,39(9):1927-1937.
- [54]王立娟,周洪印,泽尔拉都,等. 不同施肥处理对Cd-Pb污染土壤马铃薯镉铅吸收累积和品质的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(18):151-158.
- [55]叶颖,耿银银,沈宏. 海藻肥中海藻酸测定方法的比较[J]. 磷肥与复肥,2019,34(12):30-32.
- [56]任兴源,胥学辉,刘婉文,等. 含海藻酸脲醛缓释复合肥中海藻酸含量的测定[J]. 磷肥与复肥,2024,39(3):37-40.