

张 强, 常瑞雪, 胡兆平, 等. 生物刺激素及其在功能水溶性肥料中应用前景分析[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 111-118.

ZHANG Qiang, CHANG Rui-xue, HU Zhao-ping, et al. Biostimulants and Its Potential Utilization in Functional Water-soluble Fertilizers[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(2): 111-118.

生物刺激素及其在功能水溶性肥料中应用前景分析

张 强^{1,2}, 常瑞雪³, 胡兆平^{1,2}, 陈 清^{1,3*}

(1.养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室, 山东 临沂 276000; 2.金正大生态工程集团股份有限公司, 山东 临沂 276000; 3.中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要:施用生物刺激素所带来的改土抗逆促生功能对于提高土壤养分利用效率、促进作物提质增产十分有效,深受功能性肥料行业的关注。本文从分析生物刺激素概念入手,总结了市场上普遍应用的腐植酸、氨基酸、海藻提取物和促生菌的功能特性和作用机制,并归纳了含有这些物质并可作为功能水溶性肥料载体的废弃物资源种类及应用特点,探究其与活性物质复配制备功能水溶性肥料的工艺关键,以期为实现废弃物增值化利用,实现集约化生产中肥料减施、提高作物产量和品质等目标提供产品支撑。

关键词:生物刺激素;功能性水溶肥;复配;作物促生;减肥

中图分类号:S482.8

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)02-0111-08

doi: 10.13254/j.jare.2017.0233

Biostimulants and Its Potential Utilization in Functional Water-soluble Fertilizers

ZHANG Qiang^{1,2}, CHANG Rui-xue³, HU Zhao-ping^{1,2}, CHEN Qing^{1,3*}

(1.State Key Laboratory of Efficient Development and Comprehensive Utilization of Nutrient Resources, Linyi 276000, China; 2.Kingenta Ecological Engineering Group Co. Ltd., Linyi 276000, China; 3.College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Biostimulants are becoming widely applied and extended in the fertilizer industry, because of their effects on soil improvement, anti-stress ability enhancement and root growth promotion, which can increase efficient uptake and utilization of soil nutrients, crop yield and quality. This review introduced the concepts of biostimulants, and summarized the functions and related mechanisms of commonly-applied biostimulants in the market, i.e. humic acid, amino acid, seaweed extracts and plant-growth-promoting bacteria (PGPR). The properties and applied characteristics of different organic wastes containing some biostimulating compounds as the main material of functional water soluble fertilizers (WSF) in the industry were presented. The technical keys to compound these organic wastes with some bio-active substances to produce the functional WSF were explored, with the aims to support the value-added utilization of organic wastes, reduce the use of fertilizers, and promote crops' quality and quantity.

Keywords: biostimulant; functional water-soluble fertilizer; compounding; promoting crop growth; reducing fertilizer use

果树蔬菜生产体系中普遍存在土壤障碍(盐渍化、酸化、土传病害)和逆境胁迫等问题,对根系的养分吸收产生很大的抑制效应,而反季节的低温和弱光

等更会加剧这种抑制作用,这时盲目追求高产必然引起作物对肥料的高依赖性,长此以往将导致农田面源污染和农产品安全等问题。通过追肥和叶面施用生物刺激素类物质,改良土壤,调节和促进植物体对水分和养分的吸收和利用^[1],增加作物对非生物因素胁迫的抗逆性等是当前生产中的必然选择。生物刺激素类物质多应用在经济作物上,但不同类别的功能和作用机理存在差异,对于作用功效和应用技术等研究一直十分缺乏。

收稿日期:2017-09-18 录用日期:2018-01-04

基金项目:“十三五”国家重点研发计划“新型复混肥料及水溶肥料研制”项目:功能水溶肥料研制与产业化(2016YFD0200405)

作者简介:张 强(1979—),男,山东东营人,博士,农艺师,从事新型肥料研制与应用研究。E-mail: zhangqiang@kingenta.com

* 通信作者:陈 清 E-mail: qchen@cau.edu.cn

水肥一体化技术的近根调控作用和水溶性肥料的普及极大地提高了水肥的利用效率,在肥料产品中添加生物刺激素类物质,在改土促根的同时,可以有效改善根区环境、提高肥料利用效率等^[2-3]。将生物刺激素类物质与叶面喷施的水溶性肥料相结合,配合水肥一体化技术施用,更易实现抗逆抑病和改土促根效果的集成,同时省时省力,节约成本。

本文综述了国内外对于生物刺激素类物质的认识,介绍了我国肥料产业应用广泛、有一定研究基础生物刺激素的特点和作用机理,分析了当前工农业生产中含有这些物质的废弃物资源特点,并将其用于功能水溶性肥料载体(氨基酸、腐植酸等)的可行性分析,探讨分析了水溶性肥料载体和活性物质复配的工艺关键技术,以期其在实现“减肥减药”和“优质高效”等农业可持续发展的目标方面发挥作用。

1 生物刺激素的定义与种类

1.1 定义

欧洲生物刺激素行业委员会(EBIC)认为生物刺激素包含功能性物质或/和微生物及其次生代谢产物的一类物质,可增加作物养分吸收、增强养分利用效率和作物抗逆性、提高农作物质量等^[4]。生物刺激素可以在作物自种子萌发到植物成熟的整个过程中发挥作用,如改良新陈代谢的效率从而提高作物产量和品质,增强对非生物胁迫的抗逆性和自我修复能力,提高水分利用效率,优化土壤理化性状和微生物种群的

变化等。EBIC 特别强调除了产品中的营养成分之外,生物刺激素与化肥的作用机理完全不同^[5]。北美生物刺激素联盟将生物刺激素定义为应用到植物、种子、土壤或其他生长基质中可以提高植物吸收和利用养分的能力,同时有利于植物自身生长的,包括微生物在内的一些功能性物质^[6]。

du Jardin 给出的定义为生物刺激素是指除了肥料和农药之外的,以适当的方式施用于作物、种子或生长基质中时可以起到调节植物体内的生理过程,促进其生长、发育和抵抗外部胁迫能力的物质或材料^[7],被产业体系内的大多数人广泛使用。一般认为,生物刺激素是一种既非农药也不是传统肥料的一类物质。国内常常也把生物刺激素作用于土壤后的改善土壤生态和激发作物潜能等功效也考虑在内。目前生物刺激素的定义和概念仍在不断完善中,在今后仍会有一些新的物质被认定为是生物刺激素,这也在一定程度上反应了生物刺激素类别和功能的多样性。

1.2 种类

du Jardin 根据文献分析将生物刺激素分为八类(图 1)^[7]。本文就应用广泛、研究比较深入的腐植酸、氨基酸、海藻提取物和促生菌的作用机理和研究进展进行总结分析。

1.2.1 腐植酸

腐植酸是矿物和有机废弃物发酵过程中产生的、由不同大小的分子互相交联形成的超大分子,矿物类腐植酸可通过酸碱等活化作用将大分子分解为小

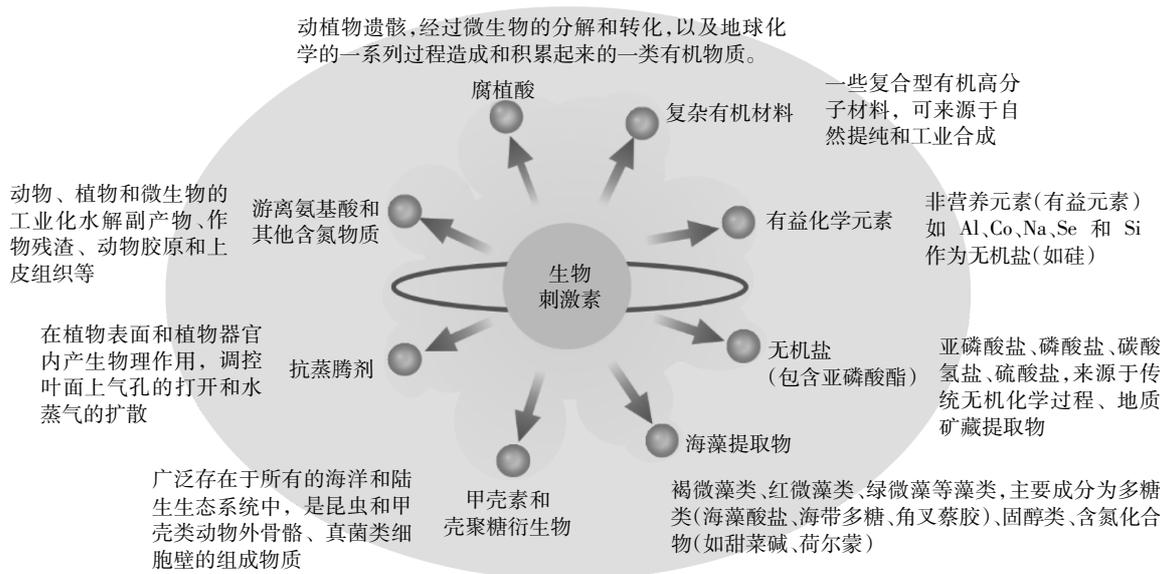


图 1 常见的生物刺激素分类及来源

Figure 1 Categories and origins of common biostimulants

分子物质。腐植酸具有弱酸性、亲水性、胶体性、吸附性、离子交换性、络合性、氧化还原性等,大多数情况下分子量越小生物刺激作用越高,但也与其结构特征有关^[8]。其主要作用机制如下:

(1)改良土壤结构:腐植酸施入土壤后可形成腐植黏土复合物,增强土壤团聚体稳定性和土壤透气性,团聚体稳定性的提高可以直接促进作物对营养物质的吸收^[9]。

(2)提高土壤微量元素和磷素的有效性:腐植酸与土壤金属离子形成金属-腐植酸复合体,可以提高微量元素的溶解性,特别是在碱性土壤中提高作物对微量养分的吸收,如改善石灰性土壤中铁的供应^[10]。作为天然螯合剂,大多数黄腐酸可活化和运输铁及其他微量营养元素^[11]。腐植酸与磷肥施用,可通过阻碍土壤磷酸钙盐的形成,增加活性磷的含量,减少磷素固定^[12],提高作物对磷的利用效率^[11]。

(3)改变根部形态,促进根系生长:蚯蚓粪和污泥中提取的腐植酸可以促进玉米、拟南芥作物和水稻等作物的根系生长、侧根数量和根毛密度的增加^[3,13],中低浓度的腐植酸处理下,活性氧的产生不会导致脂质过氧化作用,这有利于作物的生长与侧根的形成。相反,高浓度腐植酸处理的活性氧含量升高,进而导致脂质过氧化,抑制作物根系的生长发育^[8]。

(4)腐植酸刺激 H^+ -ATP 酶和 NO_3^- 同化酶的活性:腐植酸可以活化 H^+ -ATP 酶,使根际酸化,提高磷素及微量养分的溶解性^[3,14]; H^+ -ATP 酶同时促进 NO_3^- 与 H^+ 同向运输,使作物吸收更多的 NO_3^- ^[14-15]。

(5)提高作物抗性,缓解逆境胁迫:黄腐酸在干旱胁迫条件下可促进作物生长,提高作物产量^[16]。在盐碱土中施用腐植酸能够降低土壤电导率,减少植物中脯氨酸的渗出,进而提高作物的抗盐胁迫能力。

在肥料行业中,腐植酸已被广泛认可为生物刺激素,含腐植酸水溶肥标准(NY 1106—2010)指出中量元素型和微量元素型的含腐植酸水溶肥料的认证标准。到2017年初,农业部登记的含腐植酸水溶性肥料已占水溶性肥料总登记数量的23.1%。但是标准仅将矿物源腐植酸作为原料,并未将生化腐植酸列入进来,二者从生产工艺、特点、功能、效果等方面都具有较大的差异性。矿物源腐植酸成分相对固定,含有脂肪酸、酚酸、苯多羧酸等成分;生化腐植酸成分复杂不固定,受发酵时间、工艺和原材料的影响,选择矿物源腐植酸可以较好地保证肥料的品质和使用效果的稳定性,一些废弃物中含有丰富的生化型黄腐酸。

1.2.2 氨基酸

氨基酸是一组分子量大小不等,含有氨基和羧基官能团,并有一个短碳链的有机化合物。不同种类氨基酸具有一些特定的生理生化作用,如作物可以通过根部特定的运输方式直接吸收氨基酸并进入植物地上部分^[17],氨基酸被广泛应用于叶面喷施、土壤冲施和种子处理等,用来抵御生物和非生物胁迫的目的和作物增产目标。主要作用机制如下:

(1)提高土壤微生物的活性,改善土壤理化特性,提高土壤中有机物质的降解速率,将有机物质转化为植物可吸收利用的矿物质。

(2)通过细胞膜上与氨基酸转运有关的载体蛋白螯合铁、锌、锰、铜等微量元素,使其更易被植物的根、叶吸收^[18]。很多叶喷型微量元素水溶性肥料都含有氨基酸类物质,某些氨基酸也可以作为还原剂,提高微量元素利用率,并促进其在植物体内的转移^[19]。

(3)影响根部形态,如根部施用 L-型谷氨酸盐能抑制主根的生长,刺激侧根的生长,也可刺激靠近根尖的根毛的生长,调节作物根系氮素吸收,增强养分利用效率,提高作物产量。色氨酸是生长素产生的前体,能够刺激作物根系的生长^[20]。

(4)刺激硝酸合成酶活性:氨基酸可以通过植物激素活动,进而来提高硝酸合成酶的活性,刺激作物碳氮代谢,增加氮同化。

(5)增强对生物和非生物胁迫的防御作用:氨基酸能刺激作物生长,诱导植物防御反应,提高作物对各种非生物胁迫(包括盐害、干旱、低温和氧化条件)的耐性。

含氨基酸水溶肥料标准(NY 1429—2010)中给出了对中量元素型含氨基酸水溶肥料和微量元素型含氨基酸水溶肥料的要求。到2017年初,我国登记的含氨基酸水溶性肥料已占水溶性肥料总登记数量的24%,肥料市场对氨基酸水溶肥料的需求也越来越多。

1.2.3 海藻提取物

市场上的海藻提取物大部分是由褐藻、墨角藻、海带和马尾藻等通过采用水、酸或碱萃取,或者采用研磨等物理处理方式生产的,产品被加工为液体或粉剂,然后再与养分等复配施用^[21]。海藻提取物是复杂的混合物,随海藻来源、季节及提取方法的不同而不同^[21],主要功能如下:

(1)改良土壤结构:褐藻含有大量如海藻酸盐等物质,施用到土壤中可以与金属离子结合产生胶体,

具有保水和保护土壤团粒结构的功能^[22],这有助于作物健壮根系的发育。

(2)提高微量元素的溶解性:海藻提取物中的海藻酸类有机分子能整合微量元素,增加利用效率,如从 *A. nodosum* 提取的海藻酸可替代常规金属螯合剂——EDTA 来整合微量元素^[23]。

(3)促进根系生长:海藻提取物中含有细胞分裂素、生长素、脱落酸、赤霉素和水杨酸^[3],能促进侧根的形成、增加总根体积和根长度^[24],通过根部或叶面施用提高作物的根系数量或根冠比,有助于增加作物根系的养分吸收^[3]。海藻提取物也可通过增加土壤微生物活性间接刺激作物根系的生长。

(4)缓解胁迫:海藻提取物能提高植物体内细胞分裂素、脯氨酸、抗氧化剂和抗氧化酶等可以抵抗非生物胁迫的物质的含量,提高非生物胁迫抵抗力^[24-25]。施用海藻提取物能够减缓叶绿素降解,提高溶解性蛋白、抗氧化物等延迟衰老的相关物质的含量^[26]。纯化的海藻细胞壁多糖和衍生的寡糖能够促进植物生长,从褐藻等提取衍生的寡聚-藻酸盐能够促进植物的氮同化和基础代谢,并保护作物免受病毒、真菌和细菌的感染^[27]。

1.2.4 促生菌

促生长细菌通常在根际或根区土壤活跃,具有促进作物生长作用,主要作用机制如下:

(1)活化养分、促进植物吸收营养元素:根际微生物,如革兰氏阴性细菌,如假单胞菌属、伯克霍尔德菌属、肠杆菌属、柠檬酸杆菌属和沙雷氏菌属^[28],可以产生酸性磷酸酶和植酸酶,酸化占土壤有机磷 60%的植酸盐(肌醇六磷酸),促进其转化利用。接种外源假单胞菌属^[23]和芽孢杆菌^[29]也可以促进有机磷的转化和植物的吸收利用。这些功能菌还可以合成葡萄糖酸、柠檬酸等有机酸,用其羟基和羧基螯合磷酸盐中的阳离子,释放磷酸根离子,改善作物磷素营养;同时降低土壤 pH 值,使难溶性无机磷溶解。

一些细菌会产生铁载体来整合铁,从而增加植物对铁的吸收量^[30]。许多独立生存的具有固氮作用的促生长细菌,如固氮螺菌,能够提高小麦总氮含量 7%~12%,也有研究通过示踪的方法证明甘蔗植株 60%~80%的氮来自固氮螺菌固定的氮素^[31]。

(2)改变根部形态促进营养吸收:接种固氮螺菌可以增加水培高粱的次生根数量和长度,主要是由于固氮螺菌产生的类植物激素物质起作用^[32]。

(3)增加植物生长激素的产生:促生菌通过产生

植物激素(生长素、细胞分裂素、赤霉素和乙烯等)来调节多种生理过程,包括生根、根伸长和根毛的形成等,进而改变根系结构,促进作物的生长^[33]。

(4)增强植物抗病能力:促生菌可产生多种抑病物质,提高作物抗病能力,还可以抑制土壤根结线虫、防治根腐病、青枯病、枯萎病、疫病等多种土传病害^[34]。

(5)耐干旱和盐碱胁迫:在高盐土壤上,草莓植株通过接种枯草芽孢杆菌等促生菌,能够提高草莓的产量^[35]。接种固氮螺菌属显著提高油菜地上部和根系重量^[36]。

到目前为止,文献可查的可作为生物刺激素的主要菌种已有近 8 000 种,其中按应用次数和引用次数的前 9 种为:真菌摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*)、丛枝菌根真菌(*Arbuscular mycorrhiza fungi*, AMF)、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)、巴西固氮螺菌(*Azospirillum*)、假单胞菌(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)、恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)和幼套近明囊霉(*Claroideoglomus etunicatum*),且其中有超过 50%的应用实例中采用复合菌剂^[37]。

2 水溶性肥料的载体来源及特点

水溶性肥料是一种可完全、迅速溶解于水的单质化学肥料、多元复合肥料或功能型有机水溶性固体或液体肥料,易被作物吸收,可用于灌溉施肥、叶面施肥、无土栽培、浸种蘸根等^[1,38]。功能型水溶性肥料是无机营养元素(两种或两种以上)和生物活性物质或其他有益物质混配而成,既能为作物提供养分,又能改土促根调节生长发育的一类肥料产品^[38]。因添加功能性活性物质的不同,功能效果有所不同。

生物刺激素腐植酸、氨基酸是肥料产品登记标准中规定的有机载体或者功能载体,在产业化生产中这些载体大多是从一些价格低廉的有机废弃物中获取的,如蛋白水解废液、糖蜜发酵液和堆肥提取物等,了解这些有机废弃物的产生特点和功能,对于扩大推广以其为功能载体的功能性水溶肥具有重要意义。

2.1 蛋白水解产物

常见的作为生物刺激素的氨基酸大多是多种氨基酸和多肽的混合物,是从工、农业废弃物的蛋白质中提取出来的蛋白质水解产物的混合物。蛋白质、多肽和氨基酸产品中游离氨基酸的含量不同是造成市场上氨基酸水溶肥料产品差异的重要原因。蛋白质的分解方法有酸水解、酶水解、碱水解和微生物发酵等

(表1),酸水解是目前氨基酸生产的常用方法。氨基酸水解液可经过浓缩干燥处理制备成固体氨基酸粉末,直接加入肥料中制成氨基酸水溶肥。

2.2 糖蜜发酵液

浓缩糖蜜发酵液是以甘蔗糖蜜、淀粉、甜菜提取物等为主要原料,经深层液态微生物(含纤维素分解菌类、芽胞杆菌类、双歧杆菌类、酵母菌、纳豆菌类等)发酵技术发酵,再经浓缩制成的一种新型液态原料,主要含有菌体生物蛋白(也叫单细胞蛋白)与生化黄腐酸。糖蜜发酵过程中产生的多种氨基酸,有较高的生物活性,富含N、P、K和微量元素等营养成分及维生素类,适宜作生态叶面肥、有机液肥及冲施肥。

此外,糖蜜发酵液富含各类腐植酸,可持续刺激作物生长发育,增强作物抗逆能力,并对植物根系起到促进作用,增强作物抗旱性,并调节肥料的酸碱性^[39];同时发酵液本身富含有机质,可培肥、疏松土壤,改善土壤中微生物的生存环境。其与农药复配,可对病原菌孢子萌发和菌落扩展起到抑制作用,有利于农药的缓释、增效。若将糖蜜发酵液与水溶性肥料结合施用,或直接制备功能型水溶性肥料,不仅提供了氨基酸、腐植酸等生物刺激素类物质,降低了糖蜜发酵液的处理成本,且利用效果远远高于其他处理方式。这种工艺的建立需要通过实验室复配试验和效果验证,并通过工厂化生产和田间试验验证。

2.3 堆肥提取液

堆肥提取液是由堆制腐熟的有机物料,经浸提或浸提液发酵获得的功能性溶液。不同来源的固体废弃物堆肥的提取液可以促进植物生长、改善作物品质和增加作物产量,因为提取液中含有植物生长所需要的营养元素,和一些有益微生物及其次生代谢物质,其

中具有类激素活性的腐植酸也会发挥一定的作用。

提取液还会对土传病原菌产生明显的抑制作用,可以发展成为代替化学农药的生物防治植物病害的有效手段。尽管堆肥提取液在美国已经得到了普遍应用,尤其是在有机农业生产方面,我国应用堆肥和堆肥提取液防治植物土传病害的研究多停留在实验室规模,且研究多集中在从某种堆肥中筛选具有抑菌效果的微生物菌株^[40],或在盆栽种植中应用堆肥对植株的抑病效果和长势的影响等,所涉及的堆肥多含有具有特殊功能的物质,如中药渣、酒糟、烟渣、醋渣等,并未系统地分析堆肥产生抑病效果的原因及其影响因素。

已有研究证实通过高压灭菌或筛选后堆肥的抑病功效会显著降低^[41]或丧失^[42],这说明抑制植物土传病害的效果主要来源于堆肥中有活性的微生物组织。因此,理解抗病害的关键是需要理解堆肥或提取液中的微生物种群,包括它们的种群多样性、影响因素及其与病原菌的相互作用。

堆肥提取液的应用效果与堆肥的成熟度、堆肥原料来源、曝气量、发酵时间、营养条件、助剂、施用时的稀释比例和施用频率有很大关系^[43]。

2.4 微生物发酵产物

微生物发酵是指利用微生物,在适宜的条件下,将原料经过特定的代谢途径转化为想要获得的代谢产物的过程。在微生物的发酵过程中,将可再生碳水化合物转化为各种有用产品,如柠檬酸、维生素、氨基酸、抗生素、酶制剂、生物杀虫剂、生物碱、类固醇等等,且微生物类别也会影响其所产生的次级代谢产物。因此,生产功能型水溶性肥料时,应选择适当的微生物种群,在适宜的环境条件下进行生物

表1 蛋白质类废弃物水解方式对比

Table 1 Comparison of different hydrolysis methods for the protein-contained waste

项目	酸解法	碱解法	酶解法	微生物发酵法
优点	工艺简单,低成本,适用于大规模工厂生产,水解迅速彻底,水解最终产物是L-型氨基酸,不产生旋光异构体	工艺简单,低成本,色氨酸不被破坏,水解液清亮	条件温和,水解效率高,仅需要少量酶,氨基酸种类保留丰富。L-型氨基酸得到保护,寡肽含量较高,有害物质少	利用微生物特定的代谢途径生产高纯度的氨基酸,质量较优,产品一般用于食品加工业
缺点	营养价值较高的色氨酸被破坏,与含醛基的化合物生成腐黑质,水解液呈黑色。含羟基的丝氨酸、苏氨酸、络氨酸部分被破坏。产生大量酸性废弃物	精氨酸脱氨损失,核苷酸、多肽等含量低,多数被破坏。发生旋光异构作用,丝氨酸、苏氨酸、赖氨酸、胱氨酸等大部分被破坏,产生大量碱性废物	需要同时使用多种酶,要控制温度、pH等条件,价格较高,工艺较复杂	一种菌种只能生产一种或两种氨基酸,工艺较复杂,生产条件较苛刻,生产成本较高
技术控制	一般使用20% HCl或50% H ₂ SO ₄ ,需控制反应时间、温度和压力	20% NaOH或Na ₂ CO ₃ 也有用15% Ba(OH) ₂ ,需要控制反应时间、压力、温度,调节等电点	需控制温度、pH等条件。常用酶:枯草杆菌的中性或碱性蛋白酶、曲霉菌的霉菌蛋白酶、动物的胃蛋白酶、木瓜酶	控制培养基的养分含量、适宜的温度和pH等条件。选育菌种:谷氨酸棒杆菌、乳糖发酵短杆菌、黄色短杆菌、大肠杆菌

发酵。

除此之外,为了保证功能型水溶性肥料的稳定性,接种的微生物必须可以在选用的配方中生存,具备解磷、促生、防病等功能,同时具备不易退化、发酵速度快、土壤中定殖能力强等特点。选取的复合功能微生物菌种间不存在拮抗作用,以保证其功能的稳定性;且选取的微生物必须具备一定的耐盐能力,或对其进行耐盐能力的驯化,以适应产品后期添加的无机营养成分。

3 功能性水溶性肥料复配的关键

不同生物刺激素的作用机制存在差异,且在实际生产中,不同有机废弃物含有的生物刺激素成分也会存在差异,因此应用前要对功能性有机物料的原料特点和生物活性进行试验和验证。在将生物刺激素类物质与水溶性肥料进行复配生产功能型水溶肥时,需要注意:

(1)明确肥料所针对作物的养分需求特点和肥料产品的施用方法。功能型水溶性肥料在应用中多作为追肥施用^[38],这就要求掌握作物的养分需求特点和产品施用方法,然后甄选养分形态、不同养分的比例和含量等均适宜的功能性载体原料;考虑施用地区的基施有机肥特点,土壤的理化特点和养分水平,以及施肥的要求;同时推荐施肥技术(施肥量、施肥时间和施肥条件)^[39]。

(2)注意所选肥料的功能载体和适用作物。选择施用目前已有的功能型水溶肥时,所用的特殊功能型物质或载体决定了其特殊的作用。在选择作物的适用肥料时,要根据作物的需求、土壤的理化条件和肥料的作用特点来选择适用的功能型水溶性肥料^[40]。而随着越来越多的生物刺激素类物质以单体或应用不同载体添加到水溶性肥料中,以生物刺激素为功能型物质的功能型水溶性肥料产品也会逐渐增加,这些肥料产品因载体的差异也会存在应用效果或功能的差异。应注意在进行功能型水溶性肥料的复配之前,要对所选用的特殊功能性有机物料及其载体的螯合性、表面活性特征、作用浓度及应用注意事项等特点进行全面分析,并基于这些特征进行肥料复配,避免因对物料特点不了解造成生产和应用过程中的各种问题。特别是多种生物刺激素的混配方式和复合作用浓度需要进行生物试验确认后再生产应用。

(3)肥料信息配套肥料产品,并伴随有适当的农化服务。基于生物刺激素类物质的功能型水溶肥产品

在销售和使用过程中,应将生物刺激素的作用浓度及应用注意事项等配套信息提供给广大消费者。肥料企业应为其出售的产品提供对应的技术培训或农化服务,以确保肥料的正确施用。

4 展望

生物刺激素来源的无毒害性使其需求量不断增长,当前全球生物刺激素类产品的市场估值已不少于 13 亿美元,其中中国市场上生物刺激素类产品的市场估值在 2 亿美元以上,且在未来 3~5 年内,将继续增加 2 亿~3 亿美元^[45]。生物刺激素类物质的快速发展为我国水溶性肥料产业注入了新的活力,带动了复合型和功能型的新肥料产品的研发,含腐植酸和氨基酸的水溶性肥料已经得到了大力发展,二者共占我国登记的水溶性肥料的 47% 以上。其他类别的生物刺激素类物质或含有这些物质的废弃物等已经逐渐开始在水溶性肥料中应用,且登记数量逐渐增加,但并未建立相应的标准,易出现质量问题,应用效果不能保证。

从 2015 年和 2017 年在意大利和美国举行的国际生物刺激剂大会的交流报告可以判断,国内外关于生物刺激素的研究已经不仅局限于田间的效果、评价,更多的是关于功能性物质的原料开发、提取、纯化以及生物作用机制等方面的研究,深入到通过分子生物学的方法对影响作物激素调控、抗逆基因的调控和表达等方面的研究越来越多,而这些机理的探究将为功能型载体的应用奠定良好的基础;在复配技术方面,目前广泛应用的界面聚合反应的微胶囊化技术、化学稳定技术、化学表面活性剂以及药剂学等技术,可以有效地解决功能载体和活性物质稳定复配等问题,为发展功能型水溶性肥料产品提供技术支撑:功能性物质机理研究与水溶肥研制相结合,根据活性物质的特性与水溶肥的标准要求,研制功能型水溶性肥料。

但是,目前这些研究多集中在实验室水平,鲜有大规模中试或应用推广示范,效果不能保证;产业化生产中所用功能型组分的原料来源不稳定,难以保证产品的稳定性。因此,在功能型水溶性肥料应用和示范的基础上,进一步完善其生产工艺;同时加强物质筛选及分析技术,确保复配前了解所用原料的性质,并将所筛选的功能性活性物质与水溶性肥料溶液一起加工成具有杀虫杀菌作用的天然药肥产品、生物型有机水溶肥产品、液体肥产品等,必将促进具有多重功能的水溶肥不断发展。

参考文献:

- [1] 郭英民. 全面解读:“解剖”生物刺激素[J]. 营销界: 农资与市场, 2016(8):30-33.
GUO Ying-min. Comprehensive interpretation: “Dissect” biostimulants [J]. *Marketing World: Agricultural and Market*, 2016(8):30-33. (in Chinese)
- [2] 李胜华, 谷丽萍, 刘可星, 等. 有机肥配施对番茄土传病害的防治及土壤微生物多样性的调控[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 965-969.
LI Sheng-hua, GU Li-ping, LIU Ke-xing, et al. Effects of combined application of organic fertilizers on the control of soil-borne diseases and the regulation of soil microbial diversity[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4):965-969. (in Chinese)
- [3] Zandonadi D B, Canellas L P, Façanha A R. Indolacetic and humic acids induce lateral root development through a concerted plasmalemma and tonoplast H⁺ pumps activation[J]. *Planta*, 2007, 225(6): 1583-1595.
- [4] European Biostimulants Industry Council. EBIC and biostimulants in brief [EB/OL]. [http://www.biostimulants.eu/\(2012a\)](http://www.biostimulants.eu/(2012a))
- [5] European Biostimulants Industry Council. What are biostimulants? [EB/OL]. [http://www.biostimulants.eu/aboutwhatarebiostimulants/\(2012b\)](http://www.biostimulants.eu/aboutwhatarebiostimulants/(2012b))
- [6] Biostimulant Coalition. What are biostimulants? [EB/OL]. <http://www.biostimulantcoalition.org/about/2013>.
- [7] Jardin P D. The science of plant biostimulants: A bibliographic analysis [R]. European Commission, 2012.
- [8] Barbara R L L, García A C. Humic substances and plant defense metabolism[M]. New York: Springer, 2014:297-319.
- [9] 邢鹏飞, 高圣超, 马鸣超, 等. 有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响[J]. 土壤, 2016(3):98-104.
XING Peng-fei, GAO Sheng-chao, MA Ming-chao, et al. Impact of organic manure supplement chemical fertilizer partially on soil nutrition, enzyme activity and crop yield in the North China Plain[J]. *Soil*, 2016(3):98-104. (in Chinese)
- [10] Sánchez-Sánchez A, Sánchez-Andreu J, Juárez M, et al. Improvement of iron uptake in table grape by addition of humic substances[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2006, 29(2):259-272.
- [11] Bocanegra M P, Lobartini J C, Orioli G A. Plant uptake of iron chelated by humic acids of different molecular weights[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2006, 37(1-2):239-248.
- [12] Audette Y, O'Halloran I P, Voroney R P. Kinetics of phosphorus forms applied as inorganic and organic amendments to a calcareous soil[J]. *Geoderma*, 2016, 262:119-124.
- [13] Schmidt W, Santi S, Pinton R, et al. Water-extractable humic substances alter root development and epidermal cell pattern in *Arabidopsis*[J]. *Plant and Soil*, 2007, 300(1-2):259-267.
- [14] Canellas L P, Teixeira Junior L R L, Dobbss L B, et al. Humic acids cross interactions with root and organic acids[J]. *Annals of Applied Biology*, 2008, 153(2):157-166.
- [15] Zandonadi D B, Santos M P, Dobbss L B, et al. Nitric oxide mediates humic acids-induced root development and plasma membrane H⁺-ATPase activation[J]. *Planta*, 2010, 231(5):1025-1036.
- [16] García A C, Berbara R L L, Farias L P, et al. Humic acids of vermicompost as an ecological pathway to increase resistance of rice seedlings to water stress[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(13):3125-3134.
- [17] Pecha J, Fürst T, Kolomazník K, et al. Protein biostimulant foliar uptake modeling: The impact of climatic conditions[J]. *AIChE Journal*, 2012, 58(7):2010-2019.
- [18] Ghasemi S, Khoshgoftarmansh A H, Hadadzadeh H, et al. Synthesis of iron-amino acid chelates and evaluation of their efficacy as iron source and growth stimulator for tomato in nutrient solution culture[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2012, 31(4):498-508.
- [19] Zhou Z, Zhou J, Li R, et al. Effect of exogenous amino acids on Cu uptake and translocation in maize seedlings[J]. *Plant and Soil*, 2007, 292(1-2):105-117.
- [20] Walch-Liu P, Liu L H, Remans T, et al. Evidence that L-glutamate can act as an exogenous signal to modulate root growth and branching in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2006, 47(8):1045-1057.
- [21] Sharma S H S, Lyons G, McRoberts C, et al. Biostimulant activity of brown seaweed species from Strangford Lough: Compositional analyses of polysaccharides and bioassay of extracts using mung bean (*Vigna mungo* L.) and pakchoi (*Brassica rapachinensis* L.)[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2012, 24(5):1081-1091.
- [22] Halpern M, Bar-Tal A, Ofek M, et al. The use of biostimulants for enhancing nutrient uptake[J]. *Advances in Agronomy*, 2015, 130:141-174.
- [23] Richardson A E, Barea J M, McNeill A M, et al. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms[J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1-2):305-339.
- [24] Zhang X, Wang K, Ervin E H. Optimizing dosages of seaweed extract-based cytokinins and zeatin riboside for improving creeping bentgrass heat tolerance[J]. *Crop Science*, 2010, 50(1):316-320.
- [25] Spinelli F, Fiori G, Noferini M, et al. A novel type of seaweed extract as a natural alternative to the use of iron chelates in strawberry production [J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 125(3):263-269.
- [26] González A, Castro J, Vera J, et al. Seaweed oligosaccharides stimulate plant growth by enhancing carbon and nitrogen assimilation, basal metabolism, and cell division[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2013, 32(2):443-448.
- [27] Sarfaraz A, Naem M, Nasir S, et al. An evaluation of the effects of irradiated sodium alginate on the growth, physiological activities and essential oil production of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) [J]. *Journal of Medicinal Plants Research*, 2011, 5(1):15-21.
- [28] Gamalero E, Glick B R. Mechanisms used by plant growth-promoting bacteria[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2011:17-46.
- [29] Burns R G, DeForest J L, Marxsen J, et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58:216-234.
- [30] de Santi Ferrara F I, Oliveira Z M, Gonzales H H S, et al. Endophytic and rhizospheric enterobacteria isolated from sugar cane have different potentials for producing plant growth-promoting substances[J]. *Plant*

- and Soil*, 2012, 353(1-2):409-417.
- [31] Calvo P, Nelson L, Kloepper J W. Agricultural uses of plant biostimulants[J]. *Plant and Soil*, 2014, 383(1-2):3-41.
- [32] Tailor A J, Joshi B H. Harnessing plant growth promoting rhizobacteria beyond nature: A review[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, 37(9): 1534-1571.
- [33] Bhattacharyya P N, Jha D K. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2012, 28(4):1327-1350.
- [34] Hamaoui B, Abbadi J, Burdman S, et al. Effects of inoculation with *Azospirillum brasilense* on chickpeas (*Cicer arietinum*) and faba beans (*Vicia faba*) under different growth conditions[J]. *Agronomie*, 2001, 21(6-7):553-560.
- [35] Karlidag H, Yildirim E, Turan M, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria mitigate deleterious effects of salt stress on strawberry plants (*Fragaria x ananassa*) [J]. *Hortscience*, 2013, 48(5):563-567.
- [36] Baniaghil N, Arzanesh M H, Ghorbanli M, et al. The effect of plant growth promoting rhizobacteria on growth parameters, antioxidant enzymes and microelements of canola under salt stress[J]. *Journal of Applied Environmental Biological Sciences*, 2013, 3(1):17-27.
- [37] Kuzyakin S. Biostimulants of the last decade: Comprehensive analysis of research papers and patents [R]. Miami: The 3rd World Congress on the Use of Biostimulants in Agriculture, 2017.
- [38] 陈清, 陈宏坤. 水溶性肥料生产与施用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
CHEN Qing, Chen Hong-kun. Production and application of water soluble fertilizer[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016. (in Chinese)
- [39] 张钦, 顾春光, 张富强. 糖蜜酒精发酵浓缩液生产螯合水溶肥技术研究与应用前景[J]. 磷肥与复肥, 2014, 29(6): 34-35.
ZHANG Qin, GU Chun-guang, ZHANG Fu-qiang. Study on technology of chelating water soluble fertilizer production from MAWC and its application prospect [J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2014, 29(6): 34-35. (in Chinese)
- [40] Du N, Shi L, Yuan Y, et al. Isolation of a potential biocontrol agent *Paenibacillus polymyxa* NSY50 from vinegar waste compost and its induction of host defense responses against *Fusarium wilt* of cucumber. [J]. *Microbiological Research*, 2017, 202:1.
- [41] Siddiqui Y, Meon S, Ismail M R, et al. *Trichoderma*-fortified compost extracts for the control of choanephora wet rot in okra production[J]. *Crop Protection*, 2008, 27(3):385-390.
- [42] Gea F J, Navarro M J, Tello J C. Potential application of compost teas of agricultural wastes in the control of the mushroom pathogen *Verticillium fungicola* [J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2009: 271-273.
- [43] 郭徽, 李玉红, 李顺义, 等. 牛粪堆肥茶最优发酵条件研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(8):3613-3614.
GUO Hui, LI Yu-hong, LI Shun-yi, et al. Study on process optimization for brewing compost tea made from cow manure[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(8):3613-3614. (in Chinese)
- [44] 自由路. 我国肥料产业面临的挑战与发展机遇[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1):1-8.
BAI You-lu. Challenges and opportunities of fertilizer industry in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, 23(1):1-8. (in Chinese)
- [45] 刘秀秀, 冯小亮, 吕东波. 生物刺激素在农业中的应用现状及发展前景[J]. 南方农业, 2017, 11(14):88-89.
LIU Xiu-xiu, FENG Xiao-liang, LÜ Dong-bo. Application status and development prospect of bio-stimulants in agriculture[J]. *South China Agriculture*, 2017, 11(14):88-89. (in Chinese)