



腐植酸增效化肥及腐植酸复合肥料生产工艺相关应用研究简述

张会平 牛志敏 刘艳婷 苗婷婷 李 洋* 冯梦喜*

河南黑色生态科技有限公司 新乡 453731

摘 要: 本文综述了腐植酸对化肥的增效作用, 以及腐植酸在团粒法、高塔及挤压法 3 种复合肥料生产工艺中的添加方式, 既可选择在原有工艺装置上直接添加, 也可选择通过添加绞龙或者齿轮泵等装置从特定位置进行添加, 最后从腐植酸复合肥料的作用、原料、添加工艺、市场发展前景等方面提出展望, 旨在为今后腐植酸复合肥料的发展提供一定的参考。

关键词: 腐植酸; 腐植酸复合肥料; 生产工艺

中图分类号: TQ444.6 文章编号: 1671-9212(2024)06-0045-08

文献标识码: A DOI: 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2024.06.002

Brief of Relevant Applied Research on Humic Acid Enhanced Fertilizer and Humic Acid Compound Fertilizer Production Technology

Zhang Huiping, Niu Zhimin, Liu Yanting, Miao Tingting, Li Yang*, Feng Mengxi*

Henan Black Ecological Technology Co. Ltd., Xinxiang, 453731

Abstract: This paper summarized the synergistic effect of humic acid on chemical fertilizers and the addition methods of humic acid in three kinds of compound fertilizer production technology processes: agglomeration method, high tower and extrusion method. It could be added directly to the original process equipment, or it could be added from a specific position by adding a packing auger or gear pump device. Finally, the function, raw materials, adding technology and market development prospect of humic acid compound fertilizer were put forward, aiming to provide some reference for the development of humic acid compound fertilizer in the future.

Key words: humic acid; humic acid compound fertilizer; production technology

2015年, 肥料工业进入4.0时代, 这个时代开始注重全营养施肥和平衡施肥, 强调有机肥和有益菌的投入, 追求有机+无机相结合的施肥方式, 这代表着我国农业正由传统农业生产模式向农业绿色发展转变, 一场“减肥增效”的绿色转型升级在尿素、磷铵、复合肥料等大宗传统化肥产业快速推进, 而让腐植酸与这些大宗传统化肥结合使用也成为一大亮点。可以说, 腐植酸与化肥相结合恰好能够实现 $1+1 > 2$ 的集成效应^[1]。腐植酸集改良土壤、

增效化肥、刺激生长、增强抗逆、改善品质五大功能于一体^[2~4]。近年来, 随着国内外对腐植酸类物质结构及其特性研究的不断深入, 腐植酸在农业方面的应用比例逐年上升, 而利用腐植酸资源研发各种复合肥料有着越来越广阔的发展前景^[5~7]。

1 腐植酸与化肥增效

腐植酸结构主体为芳香核, 含有多种活性官能

[收稿日期] 2024-01-14

[作者简介] 张会平, 女, 1996年生, 助理工程师, 主要从事新型肥料开发与施肥技术研究工作, E-mail: 3012524118@qq.com。*通讯作者: 李洋, 男, 助理工程师, E-mail: 996789383@qq.com; 冯梦喜, 男, 高级农艺师, E-mail: 44499724@qq.com。

团,具有弱酸性、阳离子交换性以及螯合(络合)能力、吸附能力。腐植酸的结构性质决定了它能够与阳离子作用,调控土壤—植物系统的养分,不仅可调控土壤和肥料中的氮、磷、钾,还可调控钙、锌、铜等中微量元素,被誉为氮肥的缓释剂、磷肥的增效剂、钾肥的保护剂、中微量元素的螯合(络合)剂^[8~10]。

1.1 腐植酸对氮肥的增效作用

尿素是农业应用中最常用的氮肥,尿素进入土壤后,在土壤脲酶作用下,很快发生水解而生成氨。水解后的氨,一部分与土壤中的水发生水合反应形成 NH_4^+ ,使其存在于土壤中供作物吸收利用,另一部分进入大气而损失。研究表明,在尿素中添加腐植酸,不但可以生成尿素络合物,使尿素分解减缓、肥效延长、损失降低,而且水合形成的 NH_4^+ 能够很快被腐植酸吸附,并与其发生氨化反应生成较稳定的腐植酸铵盐,一方面减少了氨的挥发损失,另一方面为作物吸收提供了 NH_4^+ 源,从而达到对氮肥的增效作用。另外,腐植酸还能通过抑制土壤脲酶活性、硝化细菌活性,以及借助腐植酸大的内表面积和较强的吸附能力,来提高氮肥利用率^[11~15]。

1.2 腐植酸对磷肥的增效作用

目前,我国磷肥资源比较缺乏,磷肥利用率较低^[16]。试验结果表明,普钙、重钙或磷铵中添加一定量的腐植酸,可提高肥效,可增加磷吸收量,进而提高磷肥利用率^[17]。而腐植酸能显著增加磷肥肥效的直接原因之一是腐植酸会与磷肥形成腐植酸-金属-磷酸盐络合物,这种络合物既能防止土壤对磷的固定,又易被作物吸收。腐植酸通过抑制土壤对磷的固定、提高磷在土壤中的移动距离、延缓速效磷向迟效磷或无效磷转化的速度、提高磷肥的利用率和肥效、提高作物吸磷量、提高土壤有效磷含量以及腐植酸中的羟基官能团与磷酸一铵通过阳离子桥接发生复合反应,生成水溶性腐植酸磷和腐植酸铵磷等,以达到对磷肥的增效作用^[18~20]。

1.3 腐植酸对钾肥的增效作用

腐植酸对钾增效作用的研究包括以下几个方面:(1)减少土壤对钾的固定,提高钾的有效

性;(2)提高植物的吸钾量;(3)活化土壤潜在钾^[21,22]。研究表明^[7],腐植酸可促使难溶性钾的释放,提高土壤速效钾的含量,同时还可减少钾的固定。利用热力学研究土壤腐殖质与钾离子结合能的关系,结果表明,土壤腐殖质对钾离子在土壤中的结合能有很大影响,在一定条件下,腐殖质含量越高,对钾离子结合能就越大。土壤与钾离子结合能的增大必然减少钾离子的随水流失和土壤固定,从而提高钾肥的有效性和利用率。

1.4 腐植酸对中微量元素肥的增效作用

农业生产中常用的中微量元素(如钙、镁、硼、锌、锰、铜、铁等),施入土壤,极易退化为难溶性盐,或被土壤吸附固定,使其利用率降低甚至全部失效。腐植酸对中微量元素具有增效和保护作用,对土壤中的那些被固定的微量元素有激活作用^[23~25]。研究表明^[26~28],腐植酸能通过增加交换性钙、镁含量提高潮土中钙和镁有效性;低分子量腐植酸容易扩散进入细胞,可以直接刺激植物根系,促进植物对微量元素的吸收。

2 腐植酸在复合肥料生产中添加工艺简介

《腐植酸复合肥料》(HG/T 5046—2016)中指出,腐植酸复合肥料是以风化煤、褐煤、泥炭为腐植酸原料,经活化与无机复合肥料制得的二元或三元肥料,即腐植酸复合肥料中要求添加的是矿物源腐植酸产品,而非生物源腐植酸产品。矿物源腐植酸和生物源腐植酸可从颜色、来源、所含成分、生产过程、主要组分分子结构及味道等方面进行区分。矿物源腐植酸主要来源于风化煤、褐煤、泥炭,所含成分主要是脂肪酸、酚酸以及芳香族多羧酸,组成组分相对固定,骨架里面芳环较多,生产过程是原料经过粉碎、提取制得,没有什么味道;而生物源腐植酸主要来源于食物残渣、糖蜜废料、秸秆,所含成分有蛋白质、核苷酸、醇类、糖类、木质素、纤维素等,受发酵时间和原材料的不同差别很大,骨架里面芳环很少,基本是碳链,生产过程是原料经过发酵、提取制得,有种酸味。

另外,该标准对腐植酸复合肥料中总腐植酸含



量的要求分为3个等级,总养分为高、中、低浓度时,总腐植酸含量对应大于等于2%、4%、6%;同样,该标准中对腐植酸复合肥料活化腐植酸含量的要求也分为3个等级,总养分为高、中、低浓度时,活化腐植酸含量对应大于等于1%、2%、3%。这里的总腐植酸是指用焦磷酸钠碱液直接抽提得到的腐植酸,包括游离腐植酸和结合态腐植酸,活化腐植酸是指用极性为中性的溶剂抽提得到的腐植酸,用于表征产品中腐植酸活化的程度。腐植酸活化是指对腐植酸的官能团进行物理、化学、生物活化的技术,使结合态的腐植酸变为游离态的腐植酸,能够提高化合物的反应性,将难被植物吸收的腐植酸经过活化转变为容易被吸收的土壤活性有机质。而腐植酸的活化大体上是通过三个方面进行:一是增加含氧官能团,二是降低腐植酸的分子量,三是在腐植酸分子上增加含氮化合物,以提高腐植酸的功能作用。

腐植酸在复合肥料生产中的应用已较为广泛,随着技术的不断进步,其应用水平也在逐步提高。另外,腐植酸在复合肥料中的添加具有工艺多样化(物理混合工艺、化学结合工艺、生物发酵工艺),精准控制与配比(原料选择与预处理、精准配比技术),生产设备与技术的升级(先进的生产设备、

工艺参数的优化),功能化与专用化(功能化设计、专用化生产)等特点。目前,复合肥料生产的主流工艺是料浆法工艺、团粒法工艺、高塔工艺、挤压法工艺等^[29]。但关于腐植酸在料浆法中添加工艺方面的文献未查阅到,因此仅对团粒法工艺、高塔工艺、挤压法工艺进行总结介绍。

2.1 团粒法工艺

2.1.1 工艺简介

团粒法工艺是在一定量液相存在条件下,固体原料小颗粒在机械作用力的挤压下,紧密接触,互相碰撞,由液相组分的表面张力引发的毛细管力把它们粘结成较大颗粒的造粒工艺。团粒法工艺主要包括氨酸法造粒和蒸汽转鼓造粒2种工艺,其生产过程为原料经过计量后,通过刮板机、皮带,并由皮带上的破碎机进行破碎,然后经过造粒提升机进入造粒机里面,再经过干燥(蒸汽加热)、初筛(大粒筛出后重新破碎再造粒)、冷却、精筛(筛出的细粉及小粒回到造粒机)即可形成成品,成品经回冷料仓进行回冷,经由成品秤计量后进入包膜机进行包膜,最后便可进行成品包装。其主要生产工序包括:固体原料处理及输送、液相固相团粒造粒、干燥、冷却、筛分、包膜、包装。工艺流程见图1。

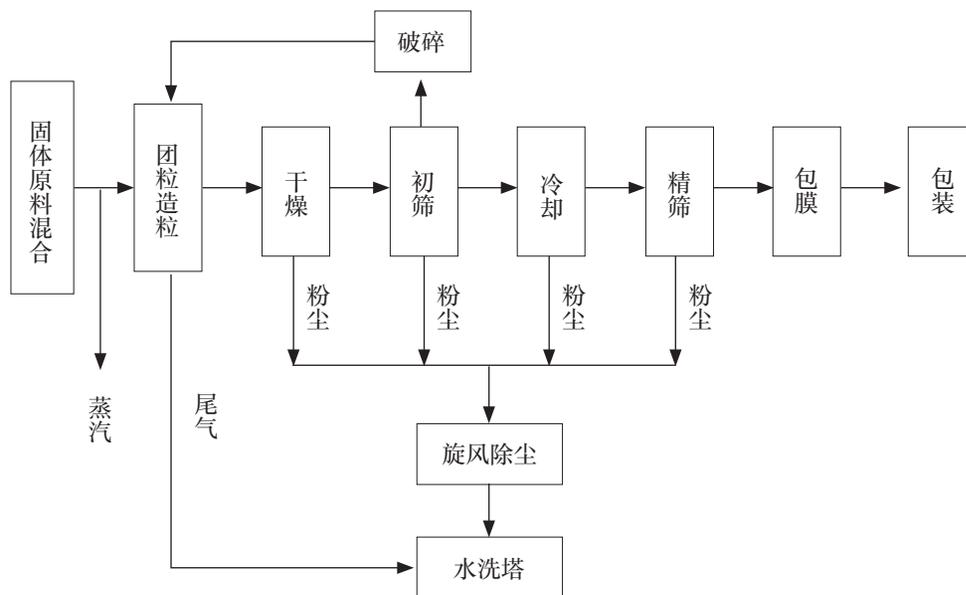


图1 团粒法工艺流程^[29]

Fig.1 Agglomeration technological process

2.1.2 工艺优缺点

优点：（1）团粒法工艺的造粒过程使得形成的产品性能良好，制成的颗粒圆润饱满，品相整体良好。（2）鉴于其设备操作简单及其原料来源广泛，整体生产灵活性较大。（3）造粒过程中化学反应较少，意味着生产过程受化学物质活性、反应程度等因素的干扰较小，能更稳定地控制产品的物理性质，有利于产品标准化生产，另外，较少的化学反应使得整个生产过程安全性较高。

缺点：（1）产品质量受原料影响较大，原料的粒度、含水率、粘性等物理性质对团粒的形成和产品质量影响较大，若原料质量不稳定，易导致颗粒强度不足、粒度不均匀等问题。（2）在造粒过程中需加入适量水分或蒸汽来促进颗粒形成和长大，后续还需干燥处理，能耗相对较大^[29]。

2.1.3 产品特点

团粒法复合肥料具有以下特点：（1）养分分布均匀：在造粒过程中，通过将多种基础肥料混合团聚，能够使氮、磷、钾等养分均匀分布在颗粒内部和表面，这有利于肥料在土壤中释放养分时，比较均衡地为作物提供营养，避免局部养分浓度过高或过低。（2）缓释性有一定提升：相较于一些粉状肥料，团粒法工艺的复合肥料颗粒具有一定的缓释效果。因为颗粒的物理结构使养分不能瞬间全部释放，需要一定的时间在土壤中崩解和溶出，从而延长了肥料养分的供应周期。

2.1.4 腐植酸添加方式

这里主要介绍蒸汽转鼓造粒工艺中腐植酸的添加方式，转鼓造粒又称滚筒造粒。腐植酸可选择液体产品或粉剂产品，液体产品可经稀释后在造粒过程中进行喷加，但操作较为麻烦，因此多数选择粉剂产品，粉剂产品可使用绞龙装置在原料添加端进行添加，目前滚筒造粒中添加的腐植酸产品主要以腐植酸钾为主。孙鹰翔等^[30]研究了一种脲甲醛腐植酸复合肥料生产工艺，将腐植酸产品同氮源、磷源、钾源等从原料仓经过原料皮带输送至破碎机后，由粉体传送带输送到滚筒造粒机进行造粒。另外，李明臣^[31]介绍了将尿素、氯化钾、酸化骨粉及腐植酸铵按照配方要求计量后加入螺旋输送机，

由输送机送至混合机搅拌，然后用皮带机将物料连续送入圆盘造粒机，同时喷水。成粒后送入回转干燥机进行反应和脱水，干燥后的物料经冷却和筛分，合格产品进行包装过磅入库，返料粉碎后重新送至造粒机。

2.2 高塔工艺

2.2.1 工艺简介

高塔工艺复合肥料是采用的高塔熔融喷浆造粒技术，将氮磷钾及各种辅料经不同投料口投料、计量后通过提升机输送至塔上，提供液相的原料进入溶解槽熔融后溢流至一级槽，与钾肥等原料混合后溢流至二级槽，并与进入二级槽的其他原料混合后溢流至磨浆机，进行充分混合后进入造粒机，透过造粒喷头喷出自由落体至塔下收料皮带进行造粒，并经冷却、筛分、包膜后进行成品包装。生产工序包括：固体原料处理、粉料提升输送、熔融、混合制浆、造粒、塔底收料、冷却、筛分、包膜、包装。一般配置干法除尘及湿法尾气洗涤工序。工艺流程见图2。

2.2.2 工艺优缺点

优点：（1）高塔工艺生产出的肥料颗粒光滑、圆润、形状规整，外观质量好。（2）相较于传统工艺，如团粒法等，高塔工艺生产流程简洁，生产周期短，且其为连续性生产，生产效率高。

缺点：（1）对原料要求严格，对原料的水分、细度等指标需要严格控制，否则会造成颗粒空壳或者黏结成球。（2）复合肥料各养分物理化学参数不稳定，一般需要经验控制，在日常生产过程中生产人员需做好生产记录，以便及时做好调整。

2.2.3 产品特点

高塔工艺复合肥料产品特点：（1）高塔工艺生产的复合肥料颗粒表面有小孔，无法通过传统造粒方法制造，是独特的防伪标志。（2）养分均匀、释放稳定，能适用于各种作物和土壤类型。（3）中微量元素可经螯合技术处理，使得养分有效性进一步提高，为作物提供全面的营养支持。

2.2.4 腐植酸添加方式

腐植酸产品可从走量较小的原料仓，随其他氮源、磷源、钾源等一起添加，也可通过添加绞龙、



齿轮泵等装置从二级槽上进行添加。而目前在高塔工艺中添加粉剂腐植酸产品较为方便,比如黄腐酸钾。高进华等^[32]采用高塔工艺,先将腐植酸预处理:风化煤经过筛分除杂后进入粉碎机,经粉碎后的风化煤过 $120 \sim 75 \mu\text{m}$ (120~200目)筛进入酸解槽,经质量分数为30%~40%的稀硫酸酸解后,进入烘干机(120~160℃),当含水质量分数 $< 4\%$ 时,通过喂料机、皮带秤进入高塔系统料

浆混合槽内混合。关键技术是利用尿素熔融液与预处理的腐植酸、磷酸一铵、氯化钾等原料混合后迅速复合成流动性能良好的低温共熔体料浆,利用特制的喷头喷淋造粒,喷淋液滴在造粒塔下落过程中与上升的空气流接触时,迅速冷却固化形成颗粒,再经冷却、筛分、包膜、计量包装获得养分均衡稳定、外觀光滑圆润、带有针孔状的高氮、高浓度腐植酸功能性肥料颗粒。

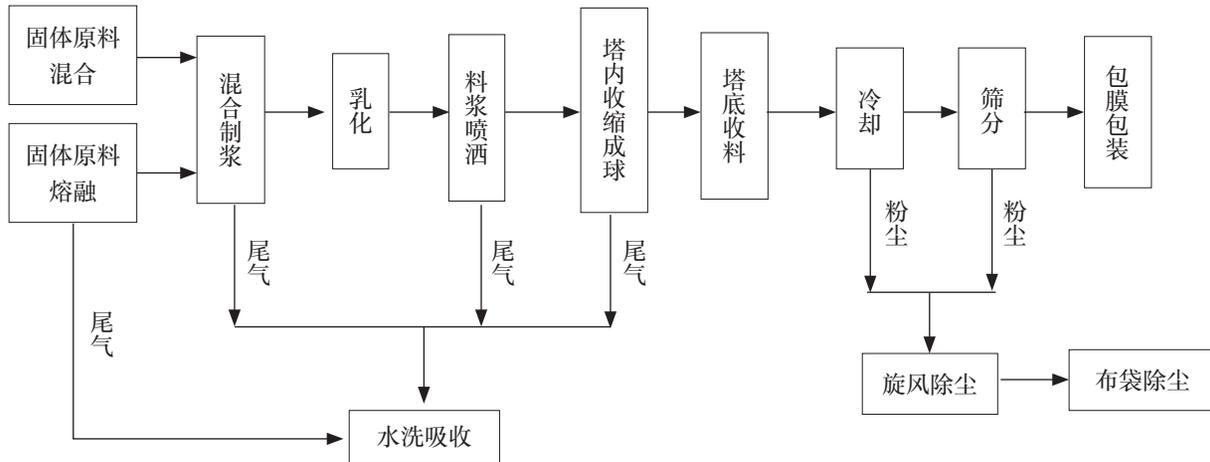


图2 高塔工艺流程^[29]

Fig.2 High tower technological process

2.3 挤压法工艺

2.3.1 工艺简介

挤压造粒是一种较新的干法造粒生产复合肥料的工艺。挤压造粒在肥料领域最早应用于氯化钾的造粒,用于掺混肥料(BB肥)所需的颗粒状(1~4mm)氯化钾基本都采用挤压法生产。近年来,用挤压造粒生产复混肥料在国内得到了较快的发展。挤压造粒的形式有对辊式和轮碾式2种,对辊式挤压是先压成大块,再破碎成颗粒,这样装置的能力大、颗粒强度高、能耗低,对辊挤压在国外使用广泛。轮碾式是在辊表面直接做成有穴槽型的形状,一次挤成型颗粒。产品强度较低有时需添加粘结剂。适合生产有机肥等颗粒肥料。目前市场上挤压造粒常用的是对辊式挤压,工艺原理是:干物料在压力作用下团聚成致密坚硬的大块(饼料),称为挤压过程;饼料再被破碎筛分后成为颗粒料称为造粒过程。挤压的作用一是将颗粒间的空气挤

掉,另外是使颗粒间距达到足够近,以产生如范德华力、吸附力、晶桥及内嵌连接等吸引力。挤压造粒的颗粒主要是靠分子之间的作用力形成的颗粒强度。其生产工艺流程为:原料从投料口进入,待投料量达到后,停止投料,随后各原料进入料斗里面,经过提升机到达掺混机中进行掺混,待混合均匀后再经皮带机提升至挤压造粒处。在挤压时一般无需加入黏结剂、脱模剂,由于挤压后是不规则的片状,须经破碎机破碎后(通过错位的厚铁刀片在滚动时进行破碎),进行过筛打磨,过筛所用的筛网有摇摆筛、滚筒筛等,成品则经皮带机进行包装,而筛出小颗粒或粉状物,需经提升机进行重新挤压造粒。工艺流程见图3。

2.3.2 工艺优缺点

优点:(1)相比于其他造粒方法,该法的操作相对简单,不需要复杂的设备和大量的人员培训。(2)该法能够生产均匀的粒度,因此可以在

药片制造、颗粒制剂、微丸制剂等领域广泛应用。

(3) 可用于多种性质的原料混合造粒, 对原料要求不高。

缺点: (1) 由于制粒过程需要一定的压力, 因此不适用于含水量高的物质。(2) 压力不高, 产品强度较低, 不适合长期储存, 否则易粉化、变质。(3) 产品颗粒圆润度不如团粒法工艺及高塔工艺好, 市场接受度不好^[33]。

2.3.3 产品特点

挤压造粒复合肥料产品特点: (1) 均衡的营养成分: 产品的制造工艺能够保证复合肥料中各种养分的比例均衡, 对植物生长具有良好的促进作用。

(2) 发挥缓释效果: 产品采用颗粒状的形态, 营养成分释放缓慢, 能够保证作物长时间得到充足的养分。(3) 减少肥料流失: 产品的制造工艺能够将肥料粘合到颗粒上, 不容易被雨水冲走, 减少肥料流失。

2.3.4 腐植酸添加方式

挤压法工艺中, 腐植酸产品一般选择的是腐植酸钾, 添加时直接随其他复合肥料生产原料一起加入, 但需要考虑到部分腐植酸产品在挤压时会放热, 产生黏性, 出现粘连的现象。目前有厂家针对这种放热性质的产品采用液冷挤压机进行造粒, 在造粒过程中通过循环水进行降温, 从而防止粘连。贺英^[34]曾在《新型高效腐植酸复合肥的生产工艺》一文中指出, 以风化煤为基础掺混料, 与碳酸氢铵、尿素、磷酸一铵、氯化钾按生产不同配比复合肥料的配方定量混合后, 在捏合机中发生一系列氨化、脲合和复合反应生成腐植酸复合肥料, 然后在造粒机内挤压成型。另外, 该文中也指出由于普通复合肥料生产所用的转鼓造粒机或圆盘造粒机满足不了本工艺物料较粘稠的特殊要求, 所以选择由捏合机、造粒机与干燥机等设备组成的粉体湿法挤出造粒成套设备。

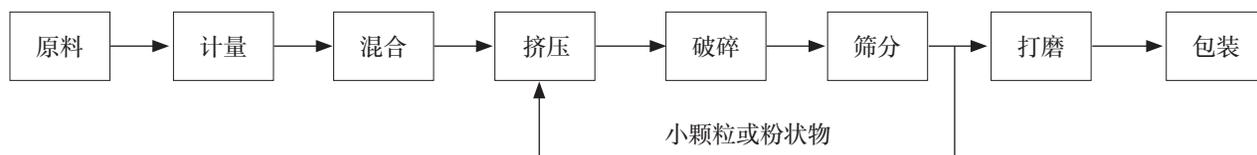


图3 挤压法工艺流程

Fig.3 Extrusion technological process

3 腐植酸复合肥料前景展望

腐植酸复合肥料可以促进土壤中有机碳的积累, 减少温室气体排放, 通过提高肥料利用率, 降低农业生产对化石能源的依赖, 实现农业的碳减排目标。在双碳目标下, 腐植酸复合肥料将成为推动农业可持续发展的重要力量。其绿色环保特性和对土壤改良、农作物品质提升的作用, 将有助于实现农业生态效益、经济效益和社会效益的统一。同时, 未来腐植酸复合肥料可能在增强土壤团粒结构稳定性、精准调控土壤孔隙度、精准调节土壤酸碱度、提高土壤养分有效性、促进有益微生物繁殖、增强土壤生物修复能力、优化养分供应与吸收、促进功能性成分合成、增强果实色泽和光泽、提高植物抗性等方面发挥一定的作用^[35~39]。

目前, 关于腐植酸复合肥料, 不仅其生产工艺在改进, 规模在扩大, 而且其生产方法及原料的选择利用也在不断发展。随着技术的进步, 未来将更加注重腐植酸原料的筛选和提纯, 提高原料的纯度和活性, 以确保腐植酸复合肥料的高效性, 并且根据不同的应用需求, 对腐植酸原料进行功能化改性, 如增强保水能力、提高养分缓释效果等。在添加工艺方面, 腐植酸复合肥料将更加注重智能化生产以及绿色环保, 可引入先进的自动化和智能化技术, 实现腐植酸复合肥料生产过程的精准控制和优化。例如, (1) 利用传感器实时监测生产参数; (2) 通过智能控制系统自动调整工艺条件, 提高生产效率和产品质量稳定性; (3) 研发更加环保的添加工艺, 减少生产过程中的能源消耗和污染物排放 (采用新型的造粒技术, 降低粉尘排放; 开发



高效的分离和回收技术,减少废水和废渣的产生)。在市场前景方面,腐植酸复合肥料的市场需求在不断增加,企业将更加注重品牌建设,提高产品质量和服务水平;同时,加强市场推广和技术服务,以提高消费者对腐植酸复合肥料的认知度和接受度;另外,随着中国农业的国际化发展,腐植酸复合肥料有望在国际市场上获得更大份额,企业更应该加强技术创新和产品研发,提高产品竞争力,积极拓展国际市场。

参考文献

- [1] 中腐协技术开发部. “HA+” 开创“肥料工业 4.0”时代的新辉煌[J]. 腐植酸, 2015(4): 41 ~ 42.
- [2] 成绍鑫 编. 腐植酸类物质概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [3] 张丽, 王小璇. 腐植酸对土壤性质及作物生长发育影响的研究进展[J]. 腐植酸, 2023(5): 21 ~ 27.
- [4] 黄占斌, 冯俊义, 马浩冉, 等. 腐植酸在旱地农业土壤改良和水肥增效中的作用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 49 ~ 54.
- [5] 曾宪成, 李双. 腐植酸钾复合肥与高品质农业发展[J]. 腐植酸, 2020(4): 12 ~ 20.
- [6] 张敏, 胡兆平, 李新柱, 等. 腐植酸肥料的研究进展及前景展望[J]. 磷肥与复肥, 2014, 29(1): 38 ~ 40.
- [7] 王玲玲. 腐植酸复合肥料的研制与应用[D]. 北京交通大学硕士学位论文, 2007.
- [8] 曾志伟, 周龙, 杨德荣. 腐植酸予化肥提质增效[J]. 腐植酸, 2021(2): 8 ~ 16.
- [9] 张志明. 腐植酸功能性肥料与食品安全[J]. 腐植酸, 2007(5): 7 ~ 10.
- [10] 李玉知. 腐植酸肥料的作用与使用技术[J]. 河北农业, 2015(10): 32 ~ 34.
- [11] 李兆君, 马国瑞. 腐植酸尿素的制造及其增产作用机理的研究近况[J]. 土壤通报, 2004(6): 799 ~ 801.
- [12] 薄录吉, 李冰, 李彦, 等. 腐植酸尿素在农业生产和面源污染防治中的研究与应用[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 240 ~ 251.
- [13] 高树清, 王宝申, 韩英群. 腐植酸及不同原料对土壤脲酶活性及氮素的影响研究[J]. 腐植酸, 2004(6): 32 ~ 36.
- [14] Qi R, Li J, Lin Z, et al. Temperature effects on soil organic carbon, soil labile organic carbon fractions, and soil enzyme activities under long-term fertilization regimes[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 102: 36 ~ 45.
- [15] Campos O R, Mattiello E M, Cantayutti R B, et al. Nitrogen release from urea with different coatings[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(2): 775 ~ 780.
- [16] 雷烁, 李翠兰, 谢修鸿, 等. 磷肥配施对黑土磷素形态及有效性的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报, 2024: 1 ~ 7. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.20227>.
- [17] 冯固, 杨茂秋, 白灯莎, 等. 用 ^{32}P 示踪法研究石灰性土壤中磷素的形态及有效性变化[J]. 土壤学报, 1996(3): 301 ~ 307.
- [18] Kleinman P J A, Sharpley A N, Wolf A M, et al. Measuring water-extractable phosphorus in manure as an indicator of phosphorus in runoff[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66: 2009 ~ 2015.
- [19] 王敏, 刘石磊, 张帅, 等. 腐植酸钾与磷肥施用方式对土壤磷素移动性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 209 ~ 215.
- [20] 李春越, 党廷辉, 王万忠, 等. 腐植酸对农田土壤磷素吸附行为的影响研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 77 ~ 82.
- [21] 张克, 邱明伦. 发展绿色农业的新型高效腐植酸微生物复合肥[J]. 环境保护, 1998(12): 26 ~ 27.
- [22] 贺英. 新型高效腐植酸复合肥的生产工艺[J]. 化学工业与工程技术, 1999(1): 32 ~ 34.
- [23] Randhawa N S, Broadbent F E. Soil organic matter-metal complexes: 5. Reactions of zinc with model compounds and humic acids[J]. Soil Science, 1965, 99(5): 295 ~ 300.
- [24] Byler D M, Gerasimowicz W V, Susi H, et al. FTIR spectra of soil constituents: fulvic acid and fulvic acid complex with ferric ions[J]. Applied Spectroscopy, 1987,



- 41(8): 1428 ~ 1430.
- [25] Jerzykiewicz M, Jezierski A, Czechowski F, et al. Influence of metal ions binding on free radical concentration in humic acids. A quantitative electron paramagnetic resonance study[J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33(3): 265 ~ 268.
- [26] 陈海宁, 高文胜, 郑磊, 等. 硅钙钾镁肥与黄腐酸钾配施对酸化果园土壤化学性质及苹果产量和品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023 (3) : 82 ~ 87.
- [27] 冷茂林, 诸葛玉平, 杨全刚, 等. 不同浓度和分子量腐植酸对玉米幼苗根系和抗氧化系统的影响[J]. *山东农业科学*, 2023, 55 (2) : 100 ~ 109.
- [28] 孙静悦. 氧化/磺化腐植酸对中微量元素有效性的影响[D]. 中国农业科学院硕士学位论文, 2019.
- [29] 周少华, 孙睿, 杨兵. 复合肥主流生产工艺优缺点综述[J]. *磷肥与复肥*, 2023, 38 (11) : 16 ~ 19.
- [30] 孙鹰翔, 李乾和, 李同花, 等. 一种脲甲醛腐植酸复合肥生产工艺[J]. *磷肥与复肥*, 2018, 33 (9) : 21 ~ 22.
- [31] 李明臣. 腐植酸复合肥料的生产与造粒试验[J]. *黑河科技*, 2003 (4) : 33 ~ 34.
- [32] 高进华, 陈大印, 解学仕, 等. 熔体造粒腐植酸功能性肥料研究与产业化开发[J]. *化肥工业*, 2012, 39 (4) : 14 ~ 15, 45.
- [33] 王学江, 孙继成, 李峰, 等. 复合肥挤压造粒法工艺介绍[J]. *磷肥与复肥*, 2017, 32 (4) : 12 ~ 14.
- [34] 贺英. 新型高效腐植酸复合肥的生产工艺[J]. *化学工业与工程技术*, 1999 (1) : 36 ~ 38, 3.
- [35] 中腐协秘书处. 减缓全球气候变化的时间窗口越来越小, 反哺黑色腐植酸、腐植酸本色肥料的责任越来越大[J]. *腐植酸*, 2024 (4) : 106.
- [36] 曾宪成. 开创“双碳农业”新局面[J]. *腐植酸*, 2024 (1) : 卷首语.
- [37] 中腐协秘书处. 学习《土壤有机碳增加全球作物产量》一文, 腐植酸直面双碳农业“大市场”[J]. *腐植酸*, 2023 (6) : 96.
- [38] 杨会国, 马丽萍, 张彦彬, 等. 腐植酸接枝共聚物的研究进展及应用前景[J]. *应用化工*, 2024, 53 (4) : 873 ~ 876, 882.
- [39] 陈晨, 唐雨蒙, 王磊, 等. 改性腐植酸基复合材料钝化土壤重金属的应用研究[J]. *工业技术与职业教育*, 2023, 21 (4) : 13 ~ 16.

欢迎投稿《腐植酸》杂志

《腐植酸》杂志 1979 年创刊, 国内刊号为 CN 11—4736/TQ, 国际刊号为 ISSN 1671—9212。本刊征稿范围如下: (1) 腐植酸在结构剖析、功能特点及作用机理方面的研究; (2) 不同来源腐植酸原料加工、活化、制取的工艺研究和开发; (3) 腐植酸土壤修复和治理技术、产品开发应用新成果; (4) 腐植酸绿色环保肥料(农药)技术、产品开发应用新成果; (5) 腐植酸营养基质技术、产品开发应用新成果; (6) 腐植酸生物刺激素技术、产品开发应用成果; (7) 生物发酵腐植酸、黄腐酸菌种筛选, 发酵技术、设备或其他再生资源的回收利用等方面应用成果; (8) 腐植酸防治水环境污染的新技术、新产品应用成果; (9) 腐植酸防治雾霾的新技术、新产品应用成果; (10) 腐植酸肥料田间试验成果统计分析; (11) 腐植酸土壤调理剂、保水剂、可降解地膜等绿色新农资开发与应用成果; (12) 腐植酸生物学特性与病虫害防治应用成果; (13) 生物质资源腐植酸转化、生产和应用成果; (14) 腐植酸在畜牧、饲料、水产养殖等大农业领域的新成果; (15) 腐植酸工业助剂开发应用成果; (16) 腐植酸医药保健品开发应用成果; (17) 腐植酸在大环境、大农业、大工业、大医药等领域的生产模式、发展模式、技术服务创新模式; (18) 其他。

《腐植酸》编辑部

2024年11月20日