

◆ 专论:纳米农药(特约稿) ◆

纳米农药国际管理现状及挑战

宋俊华

(沈阳沈化院测试技术有限公司, 沈阳 110021)

摘要:近年来,纳米农药因同时具有“增效”和“减量”的双重优势,赢得了业界广泛关注,发展势头强劲。但因其“纳米”特性可能对人体健康和环境安全造成危害,也给各国农药管理部门带来了一定的挑战。本文从纳米农药定义入手,对有关国际组织和欧美等发达国家的纳米农药管理现状进行了介绍,同时从理化特性、健康风险评估以及环境风险评估等角度总结了纳米农药管理的主要特点及面临的挑战,供相关管理部门和行业参考。

关键词:纳米农药;纳米材料;纳米载体和颗粒;理化性质及表征;健康风险评估;环境风险评估

中图分类号:NO;TQ 450 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-5284.2023.02.007

Current Status and Challenges of International Management of Nanopesticides

SONG Junhua

(Shenyang SYRICI Testing Co., Ltd., Shenyang 110021, China)

Abstract: In recent years, nanopesticides have gained widespread attention and momentum in the industry because of their dual advantages of "improved efficacy" and "reduced dosage". However, its "nano" characteristics may pose hazards to human health and environmental safety, which also pose certain challenges to pesticide management authorities in various countries. This paper starts from the definition of nanopesticides, introduces the current situation of nanopesticide management in relevant international organisations and developed countries, and summarises the main features and challenges of nanopesticide management in the areas of physical and chemical properties, health risk assessment and environmental risk assessment, in order to provide reference for relevant management departments and industries.

Key words: nanopesticide; nanomaterial; nanocarrier and particle; physicochemical propertie and characterization; health risk assessment; environmental risk assessment

据美国咨询公司Allied Market Research发布的数据显示,2021年全球纳米材料市场价值达到163亿美元,其中纳米农药为5亿美元;预计到2031年全球纳米材料市场将达到628亿美元,纳米农药为16亿美元,复合年均增长率分别达到14.6%和12.5%^[1]。另据欧洲化学品管理局(ECHA)发布的信息显示,纳米技术未来发展将会呈现4个明显不同的阶段,目前尚处于第一阶段或第二阶段早期,纳米农药未来的发展空间巨大,但随着纳米农药使用的快速增长,其带来的监管压力也将随之增加。纳米农药尺寸与天然生物大分子的尺寸相似,迁移到环境生物和人体组织中的能力增强,方式也可能不同,因此

可能对人类造成健康风险和环环境安全问题。国际化学品管理战略方针(SAICM)也将纳米材料管理纳为其未来工作的重点议题之一。

目前国际上对纳米农药广泛采用的管理方式为其纳入纳米材料的统一管理框架下,同时借鉴纳米材料在药品和化妆品领域等较为成熟的管理经验。本研究对纳米农药国际管理现状进行梳理和总结,从纳米材料管理的大背景下论述纳米农药的管理,为我国纳米农药的管理提供借鉴。

1 相关定义

规范定义是起草所有法规的基础,目前尚无统

收稿日期:2023-01-28

作者简介:宋俊华(1977—),女,湖北钟祥人,研究员,主要从事农药国际标准和评价研究工作。E-mail: songjunhua@sinochem.com

一旦国际普遍接受的纳米农药定义。表1列出了部分国际组织和国家管理部门发布的纳米材料等相关定义,可供定义纳米农药参考,最常见的要素涵盖尺寸、结构和纳米特性等。确定一个广泛接受且统一的定义是加强纳米农药管理的基础,也是国际纳米农药管理的共识,但纳米与非纳米的界限基于多种因素而定,且需兼顾到各国便利管理的目的,以保证在此基础上进行风险评估和管理的可行性,以上因素都增加了对纳米农药进行统一定义的难度。

表 1 纳米材料和农药等相关定义

国际组织/国家	来源	定义内容	注释
国际标准化组织 (ISO)	ISO/TS 80004-1:2015 纳米技术—词汇—第一部分:核心术语	纳米级:1~100 nm;纳米材料:任一外部尺度、内部结构或表面结构在纳米级别的材料 ^[3]	1. 规定下限1 nm 是为了避免将单个或少量原子的集合体归为纳米材料;2. ISO同时给出了纳米技术、纳米结构、纳米结构材料、工程纳米材料和人造纳米材料的定义
经济合作与发展组织 (OECD)	2008 OECD人造纳米材料工作组 (OECD WPMN)	人造纳米材料:有意生产的、具有特定性能或组分、尺寸范围通常在1~100 nm之间的材料,该材料可为纳米物体(即在三维尺度上任何一维处于纳米尺度内)或纳米结构(即内部或表面结构在纳米尺度内) ^[3]	该定义在ISO以尺度作为基础的定义上增加了“有意生产的、具备特定性能”等相关内容
美国	美国国家纳米技术倡议 (National Nanotechnology Initiative, 2011)	工程纳米材料:有意合成或生产、至少有一个外部尺寸在1~100 nm之间,并表现出由该尺寸所产生的特殊性质的材料 ^[4]	1. EPA官方网站上发布的一份研究综述建议,将纳米农药的纳米尺度上限调整到500 nm;2. EPA发布了《确定材料是否为纳米材料的步骤及框架白皮书:决策树》
	美国环保局 (EPA)	无官方统一定义,一般包括以下关键指标:1. 至少在一个维度上粒径在1~100 nm之间;2. 与较大尺寸的颗粒相比,表现出独特的性能;3. 在纳米尺度上设计;4. 包含团聚体和聚集体;5. 颗粒分布上,按质量比,至少10%的颗粒小于100 nm ^[5]	
欧盟	欧盟委员会建议 (European Commission Recommendation of 10.6.2022)	纳米材料:一类天然、无意和加工得到的材料,其含有分散存在,或以聚集体或团聚体形式存在的固体颗粒,且50%或以上的颗粒在粒径分布上至少满足以下任一条件:1. 一个或多个维度的粒径在1~100 nm范围内;2. 对长条状颗粒,例如棒、纤维或管状,2个维度的粒径小于1 nm,其他维度大于100 nm;3. 对片状颗粒,一个维度小于1 nm,其他维度大于100 nm ^[6]	该定义中所指颗粒不包含非固体颗粒,如液体或气体颗粒。该定义不涵盖大的、可能含有纳米尺寸内部结构或表面结构的固体产品或组分。超过1个纳米大小的大分子,如蛋白质等,不视为“颗粒”。在测定粒径分布时,无需考虑至少2个正交维度大于100 nm的颗粒。体积与表面积比小于6 m ³ /cm ³ 的材料不应被视为纳米材料
中国	GB/T 39855—2021《纳米产品的定义、分类与命名》	纳米尺度:同ISO定义 纳米材料:同ISO定义 纳米技术产品:由纳米材料组成或具有纳米结构的产品,添加纳米材料或使用纳米技术处理后主要性能显著变化的产品 ^[7]	

2 国际组织及全球主要国家和地区的纳米材料和农药管理

纳米农药管理对世界各国管理部门都是一个挑战,目前大多还处于“摸着石头过河”的状态,管理要求则更多根据不同纳米农药的特性,在确定基本准则的基础上,采取“一事一议”的原则。全球主要国家和地区的纳米农药管理基本呈现出以下几个特点:一是将纳米农药管理纳入纳米材料(化学品)管理的大框架下,根据农药特定的使用特征,有针对性地确定相关风险评估准则、程序和要求;二是因纳米技术在食品、化妆品和药品领域的使用远超在农药领域的使用,各国在对纳米农药进行管

理时,均充分借鉴了纳米技术在药品和化妆品等领域管理经验及检测技术等;三是在传统化学农药管理框架的基础上,针对纳米农药特性,视情况增加相关要求,同时对测试准则进行调整或重建。

2.1 相关国际组织和机构纳米材料及农药管理

ISO纳米技术委员会TC 229成立于2005年,是负责与纳米技术相关的国际标准化工作的主要技术委员会。ISO/TC 229下设3个工作组,包括由加拿大牵头的术语和命名法工作组、由日本牵头的测量和表征工作组以及由美国牵头的纳米技术相关健康、安全和环境问题工作组。术语和命名法是其他工作正常开展的基础,也是ISO/TC 229的优先工

作。此外,ISO还制定了部分与粒度检测相关的方法标准。

OECD于2006年成立人造纳米材料工作小组(WPMN)和纳米技术工作小组(WPN),至今共发布有关人造纳米材料文件105个,涵盖纳米材料测试方法、风险评估导则及产品评估报告等诸多领域。ISO/TC 229与OECD WPMN和WPN、国际计量局(BIPM)、欧盟委员会联合研究中心(JRC)以及国际凡尔赛先进材料和标准项目(VAMAS)等在纳米技术标准制定领域开展广泛合作。

此外,国际理论和应用化学联合会(IUPAC)也设立了纳米农药环境风险评估和健康风险评估2个项目,研究报告将市场上已有或正在开发的纳米农药进行分类,结合纳米农药不同的理化特性,提出建议的风险评估框架、流程以及资料要求。世界卫生组织(WHO)于2017年发布了《WHO保护工人免于人造纳米材料风险准则》。2021年FAO/WHO联合发布的《家用农药管理导则》明确指出:因风险未知,不推荐在家庭使用纳米农药。

2.2 美国纳米材料和农药管理

对纳米材料管理,美国国家层面上设有国家纳米技术办公室(NNCO),负责执行美国国家纳米技术倡议协调项目,其下属的纳米科学、工程和技术(NSET)分委会负责协调与该项目有关的25个不同机构,包括EPA下属的纳米技术环境和健康影响(NEHD)工作组,该工作组负责EPA与其他纳米技术环境研究相关机构的合作。

美国EPA依据有毒物质管理法(TSCA)负责对包括纳米材料在内的新化合物进行评估,EPA将纳米农药中已登记有效成分默认为新有效成分进行管理,除非申请者能够提交证据显示与传统农药相比,其危险性并无明显变化,则可视作相同产品登记。美国EPA于2007年发布《纳米技术白皮书》,明确纳米农药按照《联邦杀虫剂、杀菌剂和杀鼠剂法》(FIFRA)的相关要求进行管理,并对纳米产品未来发展机会、挑战及环境影响等进行了分析,确定了对纳米产品进行风险评估需要重点进行的科学与技术研究领域,包括人类健康影响、环境归趋及迁移等,同时制定了EPA纳米技术研究框架。

2011年,EPA登记了美国第一个纳米农药——纳米银防腐剂,用于抑制纺织品上细菌的产生。该产品于2008年提交申请,2010年8月批准了为期4年的临时登记,待申请者提供相关补充资料。2011年12月,该产品获批正式登记,同时标注了需要进一

步补充的资料。正常情况下,再评审计划一般在产品登记后15年左右进行,但2012年7月EPA即启动了纳米银产品再评审计划。

迄今为止,美国EPA农药项目办公室(OPP)尚未给出纳米农药官方定义,FIFRA亦未纳入纳米农药管理特定内容,但根据FIFRA有关登记后提交补充资料的要求,EPA于2011年6月发布公告,要求登记证持有者提交产品中是否含有纳米材料的信息。2021年11月,EPA OPP与研究和发展办公室(ORD)联合发布《确定材料是否为纳米材料的步骤及框架白皮书:决策树》,但该框架仅适用于大多数金属、金属氧化物、硅及上述结合体类的纳米材料。

2.3 欧盟纳米材料和农药管理

欧盟对纳米材料的管理理念为“统一、安全、负责”。与对其他化学品管理类似,欧盟将纳米材料纳入《化学品注册、评估、授权和限制》(REACH)法规和《欧盟物质和混合物的分类、标签和包装》(CLP)法规统一管理,对于不同用途的纳米材料,如食品、化妆品和杀生物剂等,还需接受不同行业法规的管理。REACH 2018修订版中增加了专门针对纳米材料的安全性评估、安全数据单以及登记资料要求等内容,针对上述新要求,ECHA于2022年10月发布了《如何准备纳米材料注册资料手册》。欧盟《杀生物剂管理条例》也已经纳入了专门针对纳米产品的相关内容,明确在杀生物剂中使用的活性或非活性纳米材料需要单独进行评估,且需在产品标签上加注“Nano”标识,含有纳米材料的产品不可使用简单评估程序等。目前经欧盟批准在杀生物剂中使用的纳米材料仅有2种,包括氧化硅(以聚合体和团聚体形式存在)以及合成的不定性氧化硅,另外一种氧化硅吸附银产品仍在评审当中。欧盟植物保护产品法规[Regulation (EC) No. 1107/2009]中尚未增加专门针对纳米农药的相应条款。

欧盟食品安全局(EFSA)负责农药等用于食品领域的纳米材料管理。EFSA组建纳米工作组,以促进EFSA和成员国之间在食品有关纳米科学和技术领域的合作,该机构每年发布年度工作报告。EFSA在2018年发布的《膳食暴露风险评估导则》中重点关注了纳米材料的理化表征及有关毒理试验设计。EFSA科学委员会于2021年发布《食品和饲料链上使用的纳米材料风险评估导则》及《为确认小颗粒包括纳米颗粒是否存在,受监管的食品和饲料产品申请技术要求准则》。

此外,欧盟还成立了各类研究机构和行业等广

泛参与的组织或平台,聚焦于纳米材料相关测试准则和评价方法开发,为纳米材料和纳米农药管理提供技术支撑。例如,ECHA内部建立了纳米材料观测站(EUON),以监测纳米材料有关安全问题,并与各成员国和其他利益攸关方保持交流合作,以及旨在欧盟范围内统一纳米材料管理测试方法的“NanoREG”项目和马耳他倡议(Malte Initiative)等,在“NanoREG”项目的支持下,欧盟于2017年发布了《纳米材料安全评估框架》。

同时,欧盟还建立了纳米材料检索数据库,可根据CAS号、通用名等关键词进行检索。据其统计数据显示:截至2021年,欧盟市场(包括欧洲经济区域EEA和瑞士)上共有2 200个含纳米材料的产品,其中90个未列入欧盟发布的纳米材料清单^[8]。

2.4 中国纳米材料和农药管理

我国政府非常重视纳米行业发展工作,国务院将纳米研究列入到《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》,国家科技部为支持和推动我国纳米行业发展和纳米技术标准化工作,在国家重大科研项目中专门设立了与纳米技术标准制定相关的研究项目。早在2005年,国家质检总局和国家标准委就联合发布了一批纳米材料标准,2015年我国主导制定的ISO 18473—1《功能燃料和体质燃料第1部分:密封胶用纳米碳酸钙》和ISO 18473—2《功能燃料和体质燃料第2部分:防晒用纳米二氧化钛》两项纳米材料国际标准就已经正式发布实施。

另据国家标准全文公开系统统计查询的数据显示:截至2022年10月,我国共制定纳米技术相关国家标准144个,另有10个起草阶段的国家标准,征求意见阶段23个,审查阶段6个和待批准阶段17个。上述国家标准绝大部分归口单位为全国纳米标准化技术委员会。除此之外,还制定发行了26个行业标准和16个地方标准。以上标准涵盖纳米材料定义、术语、测试准则和产品标准等,部分可借鉴用于纳米农药管理。2021年,我国研制了《农药纳米制剂产品质量标准制定规范》行业标准并通过专家审定,这将成为国际上第一个纳米农药标准。我国《“十四五”全国农药产业规划》明确指出:鼓励纳米技术在农药剂型上的创新应用。

3 纳米农药登记管理关注的重点

与传统农药相比,结合纳米农药特性,各国对其管理增加的相关要求主要包括:一是与纳米农药理化表征相关的理化性质测定,如粒径及粒径分布、

形状、表面积、表面化学以及溶解动力学等;二是毒理学信息,包括对纳米载体和颗粒单独进行的毒代动力学评估、致突变性以及毒理学试验中可能不同的试验终点、暴露途径及靶标器官等;三是环境毒理学信息,包括额外的环境归趋指标,如分散稳定性和溶解速率以及在环境条件下的转换等。

3.1 理化性质及表征

农药的理化性质是农药管理及风险评估的起点,从监管角度出发,分析纳米农药的相关物理化学特性,并对其进行适当的表征,对纳米农药后续的安全性评价和风险评估都至关重要。OECD WPMN列出了17种可用于描述纳米材料的理化特性,主要归为以下4类:物理鉴别、化学鉴别、表面性质以及与环境及暴露相关的性质,具体包括:形状、聚集体或团聚体状态、水溶性及分散性、结晶状态、粉尘、晶体大小、有代表性的电子显微镜图片、干燥状态和相关介质中的粒径分布、比表面积、Zeta电位(表面电荷)、表面化学、光催化活性、倾倒密度、孔隙率、氧化还原电位及自由基形成的可能性等^[9]。其中聚集体用于描述结合力较强的颗粒,团聚体用于描述结合力较弱的颗粒,但二者之间的界限需视情况而定。Zeta电位是决定纳米颗粒是否结块、聚集、沉降、絮凝或保持悬浮状态的关键因素,且测量Zeta电位以确定等电点与纳米材料的归趋和暴露性质极其相关。粒度则为纳米颗粒的毒理学研究提供了必要的计量基础。近年来,OECD制定或发布了有关纳米材料理化性质的测试方法(表2)。

3.2 毒理及健康风险评估

与传统农药相比,纳米农药的健康风险评估主要存在以下不同点:首先,需要对纳米农药在生物介质中的持留性和穿透生物屏障的能力进行评价,如生物可用性和生物活性数据。其次,对于传统农药毒性评价,通常假定其与有效成分质量浓度直接相关,因此有关毒性终点数据多用有效成分含量表示,但对于纳米农药,其物理化学性质能对其与生物组织的交互作用产生巨大影响,转而能够影响其药理学、毒物动力学和潜在毒性,因此除有效成分含量外,其他指标,如颗粒浓度及分布、游离有效成分和纳米载体绑定有效成分比例等都可能对其生物可用性和毒性产生影响,且上述指标还会受pH、离子强度和介质等因素影响,在进入人体或环境后随时间发生变化。另外,传统农药的评估主要基于有效成分和其有代表性的制剂进行,而通常忽略其他助剂(稳定剂和增效剂除外)的影响,但对于纳米农药,

所有助剂都可能对农药的有效性、安全性产生巨大影响，因此还需对助剂可能造成的风险进行评价。

IUPAC健康风险评估工作组将目前市场上已有的纳米农药大致分为两类，采取分阶段评估方式对其进行健康风险评价。一类为有效成分存在于纳米载体内缓慢释放的产品；另一类为有效成分以纳米颗粒形式存在的产品，如金属或金属氧化物的纳米颗粒。依据产品理化性质、使用方式和存在阶段的不同，对于第一类的健康风险评估需要考虑以下3个主体：纳米载体-有效成分复合物(NC-AD)、释放有效

成分后的纳米载体(NC)和释放后的有效成分(AD)。对于第二类则仅需考虑2个主体：金属或金属氧化物的纳米颗粒和释放后的离子。对纳米载体或纳米颗粒不能穿透生物屏障或纳米颗粒不具有滞留性（即快速溶解）的纳米农药产品进行传统健康风险评估；对具有屏障穿透性的纳米农药，则需要对空的纳米载体或纳米颗粒运用适宜的试验准则进行额外的毒代动力学和毒理学测试，若纳米剂型改变了有效成分的毒代动力学，还需要对NC-AI复合物进行毒理学测试^[10]。

表 2 OECD 最近制定或已经发布的纳米材料理化性质测试指南

名称	发布或预计发布时间
纳米材料绝对表面积测定准则 New TG on determination of the (Volume) specific surface area of manufactured nanomaterial	2022年发布
纳米材料粒径和粒径分布测定准则 New TG on particle size and size distribution of manufactured nanomaterial	2022年发布
纳米材料在水和相关合成生物介质中溶解性和溶解度测定准则 GD on determination of solubility and dissolution rate of NMs in water and relevant synthetic biological media	预计2023年
纳米和微型材料表明化学和涂层定性和定量测定导则 GD on identification and quantification of the surface chemistry and coatings on nano- and microscale materials	预计2024年
纳米材料表面疏水性测定准则 New TG on determination of surface hydrophobicity of manufactured nanomaterial	预计2023年
纳米材料粉尘测定准则 TG on determination of the dustiness of manufactured nanomaterial	预计2024年
用于(生态)毒理试验的生物样品中纳米颗粒浓度测定导则 GD on the determination of concentrations of nano-particles in biological samples for (eco)toxicity studies	预计2023年
纳米材料释放测试指南 Guidance on release tests for manufactured nanomaterials	预计2024年

3.3 生态毒理学及环境风险评估

纳米农药环境风险评估与健康风险评估存在诸多相似特性，如理化表征的要求以及理化性质对产品毒性的影响等。除此之外，与传统农药相比，因纳米农药不遵循动态平衡原理，在各相间的分布不完全受如正辛醇水分配系数和挥发性等有效成分理化性质控制，且生物体对纳米农药的吸收途径和传统农药也存在很大差异，因此对传统农药适用的评估指标如沉积物-水分配系数、解离常数、蒸气压和生物富集因子等并不适用于评价纳米农药在土壤、水和空气中的分布以及生物蓄积等，因此美国FIFRA的科学顾问专家委员会认为纳米农药对人类和环境的潜在风险可能和传统农药不同，一般情况下，现存的环境归趋和影响评估模型不足以预测纳米农药的行为，对于纳米农药环境归趋和影响评估需要建立额外的度量指标和参数。

虽然依据现有条件无法对纳米农药在特定条

件下的暴露和影响进行精确评估，但IUPAC纳米农药环境工作组认为可依据纳米农药的滞留性和产品在土壤中的归趋信息，确定纳米农药在水体和陆地环境中环境毒理试验中需检测和分析的主体。如纳米乳剂或分散剂等，仅用于显著增加溶解和分散性的纳米剂型。或保护其产品中免于分解，但一经喷洒后农药的纳米特性消失，有效成分的环境归趋和行为与传统农药一致，对其进行传统风险评估即可。如纳米剂型产品滞留性较强，则需要对纳米载体-有效成分复合物进行陆生生物的风险评估；如无产品土壤持效性数据，则可能需要对复合物和有效成分分别进行水生生物的风险评估。另外，由于纳米剂型可能改变有效成分的毒代动力学和毒效动力学，明确有效成分的实际存在形式，如仅游离的有效成分有效，或仅与纳米载体结合的有效成分有效，或与纳米载体结合的有效成分比有效成分更加有效，可帮助确定相关评估流程、检测周期和

方法^[1]。

4 纳米农药登记管理面临的挑战

纳米农药管理对于全球各国农药管理部门的挑战主要体现在以下几个方面:

第一,在纳米农药的全生命周期管理中,依据其颗粒大小及性状不同,其理化性质可能在环境或生物暴露过程中发生变化,从而导致产品的安全性数据随之发生改变,因此需要对纳米材料在干燥状态、相关介质中的悬浮状态以及在暴露于器官和细胞后的状态分别进行表征,且同一厂家不同批次纳米农药间的理化性质差别可能会较大。但目前对于产品理化性质与其特定负面影响的关联性理解并不完善,需要针对不同种类纳米材料分别制定理化性质资料清单,并将与其可能导致的负面影响进行对应。

第二,缺乏经验证的方法,现有针对传统农药的风险评估模型未考虑纳米农药的“纳米特性”,如因纳米农药理化表征指标和传统农药差别较大,大部分方法还有待开发验证;目前采纳的毒代动力学和毒理学测试方法大多基于有机材料开发,适用于金属及金属氧化物类纳米农药,但可能并不适用于纳米载体包裹缓释型的纳米农药。缺乏检测和跟踪生物和环境介质中纳米农药的经验证的方法。传统农药的风险评估模型未将产品颗粒、大小、比例、形状及表面性质等纳米特性纳入考量指标,因此也不完全适用于纳米农药,需要依据纳米农药特性开发新的评估模型。同时,OECD也明确在解决涉及纳米材料的具体测量问题之前,还需要解决有关纳米计量学的问题。

第三,目前建议的纳米农药风险评估模型均按其分类进行管理,如分为纳米载体-有效成分复合物(NC-AD)和无机金属或金属氧化物类,但其他不同类型的纳米农药也会陆续出现,对其评估可能还需考虑其他因素的影响。

5 总结与展望

在可持续发展理念和加强环保要求导致的全球农药减量背景下,如欧盟计划到2030年实现化学农药使用量减半的目标,纳米农药因其“精、准、少”的施药特性,势必在未来发挥优势作用,但如何保证在充分发挥其优势的同时避免对环境和人类健康造成额外危害,是全球各国农药管理部门需要考虑且亟待解决的问题。我国纳米农药管理可广泛

借鉴现有国际经验,如ISO和OECD已经发布的相关试验准则以及IUPAC发布的相关的风险评估方法,积极参与相关国际测试准则和标准制定。从规范定义和加强基础方法研究入手,充分借鉴纳米材料在医药和化妆品等领域的经验和方法,参考现有农药风险评估方法,依据纳米农药不同的理化特性及使用方法,尽快制定针对纳米农药的风险评估体系,为相关行业发展及产品准入打好管理基础。

参考文献

- [1] ALLIED MARKET RESEARCH. Nanopesticide market research 2031[R/OL]. [2023-03-10]. <https://www.alliedmarketresearch.com/nanopesticide-market-A17409>.
- [2] ISO/TC 229. ISO/TS 80004—1:2015 Nanotechnologies—vocabulary—part 1: Core terms[S/OL]. [2023-03-10]. <https://www.iso.org/standard/68058.html>.
- [3] OECD. Safety of manufactured nanomaterials[EB/OL]. [2023-03-10]. <https://www.oecd.org/science/nanosafety/45910212.pdf>.
- [4] ADAMICK J. National nanotechnology initiative (NNI), environmental, health, and safety research strategy[Z/OL]. (2011-10-01) [2023-03-10]. https://www.nano.gov/sites/default/files/pub_resource/nni_2011_ehs_research_strategy.pdf.
- [5] EPA. US EPA working guidance on EPA's section 8(a) information gathering rule on nanomaterials in commerce[Z/OL]. (2017-08-01) [2023-03-10]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-08/documents/august_2017guidance.8-7-2017_002.pdf.
- [6] EUROPEAN COMMISSION RECOMMENDATION. European commission recommendation of 10.6.2022, on the definition of nanomaterial [Z/OL]. (2022-06-10) [2023-03-10]. https://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/pdf/C_2022_3689_1_EN_AC-T_part1_v6.pdf.
- [7] 中国科学院. GB/T 39855—2021 纳米产品的定义、分类与命名[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [8] ECHA. Nanodata[DB/OL]. [2023-03-10]. <https://europa.ec.europa.eu/nanodata>.
- [9] OECD. Physical-chemical parameters: measurements and methods relevant for the regulation of nanomaterials[Z/OL]. (2016-01-21) [2023-03-10]. [https://one.oecd.org/document/ENV/JM/MONO\(2016\)2/en/pdf](https://one.oecd.org/document/ENV/JM/MONO(2016)2/en/pdf).
- [10] MELANIE K, LINDA J J, RAI S K, et al. Comprehensive framework for human health risk assessment of nanopesticides[J]. Nature Nanotechnology, 2021, 16: 955-964.
- [11] RAI S K, ALISTAIR B A, PHILIP T R, et al. Nanopesticides: guiding principles for regulatory evaluation of environmental risks [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2014, 62 (19): 4227-4240.

(责任编辑:金兰)