

发展新质生产力背景下的新污染物治理研究

王小刚^{1,2}, 王斌^{1,2*}, 衡利苹³, 刘宇⁴, 刘懿颀⁵, 余刚⁶

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 区域环境安全全国重点实验室, 北京 100084; 3. 北京航空航天大学化学学院, 北京 100191; 4. 中国电子技术标准化研究院绿色发展研究中心, 北京 100007; 5. 中国工程院战略咨询中心, 北京 100088; 6. 北京师范大学环境与生态前沿交叉研究院, 广东珠海 519000)

摘要: 加快培育和发展新质生产力、推动发展方式绿色低碳转型, 是实现经济社会高质量发展的必然路径。新质生产力的培育和发展对化学品有高度依赖性, 尤其是很多新兴产业广泛使用化学品, 由此带来了新污染物问题。这些新污染物来源广泛, 环境风险隐蔽, 对生态环境和人类健康构成严重威胁。本文系统梳理了新质生产力背景下新污染物的治理现状和面临挑战, 提出了新污染物治理的框架, 分别从优先事项和支撑保障两方面提出了治理策略建议。研究结果表明, 新污染物治理存在多方面挑战, 包括高度依赖化学品、新污染问题层出不穷、废弃物处置问题突出、国际贸易壁垒和高风险化学品替代困难等。新污染物治理的优先事项包括, 加强调查监测、推进风险评估、突破替代技术瓶颈和深化末端治理水平等; 同时还应在加强科技创新攻关、制定标准规范等制度文件、加大监管力度等方面部署支撑保障措施。

关键词: 新污染物; 新质生产力; 全生命周期管控; 绿色替代技术; 风险评估

中图分类号: X323 **文献标识码:** A

Emerging Contaminant Control in the Context of Developing New-Quality Productivity

Wang Xiaogang^{1,2}, Wang Bin^{1,2*}, Heng Liping³, Liu Yu⁴, Liu Yijie⁵, Yu Gang⁶

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Regional Environment and Sustainability, Beijing 100084, China; 3. School of Chemistry, Beihang University, Beijing 100191, China; 4. Green Development Research Center, China Electronics Standardization Institute, Beijing 100007, China; 5. Center for Strategic Studies, Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China; 6. Advanced Interdisciplinary Institute of Environment and Ecology, Beijing Normal University, Zhuhai 519000, Guangdong, China)

Abstract: Accelerating the cultivation and development of new-quality productivity and promoting the green and low-carbon transformation of development methods are inevitable paths to achieving high-quality socio-economic development. The cultivation and development of new-quality productivity are highly dependent on chemicals, especially given that many emerging industries extensively use chemicals, which has led to the emergence of new pollutants. These new pollutants originate from various sources and pose hidden environmental risks, posing serious threats to the ecological environment and human health. This study reviews the current situation and challenges of emerging contaminant control in the context of new-quality productivity, proposes a framework for emerging contaminant control, and offers governance suggestions from two aspects: priority issues and supporting measures. The research results indicate that multiple challenges exist in the control of emerging contaminants, including high dependence on

收稿日期: 2024-10-09; 修回日期: 2025-02-14

通讯作者: *王斌, 清华大学环境学院副研究员, 研究方向为新污染物风险评估与控制; E-mail: thuwb@tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“面向美丽中国的新污染物治理科技战略研究”(2024-XZ-46); 国家自然科学基金项目(52091544)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

chemicals, new pollutions, prominent waste-disposal issues, international trade barriers, and difficulties in substitution of high-risk chemicals. The priority issues for emerging contaminant control include strengthening investigation and supervision, promoting risk assessment, achieving breakthroughs in alternative technologies, and improving end-of-pipe treatment. Meanwhile, supporting measures should be deployed in strengthening scientific and technological innovation, formulating normative guidelines, and increasing regulatory efforts.

Keywords: emerging contaminants; new-quality productivity; whole lifecycle control; green alternative technologies; risk assessment

一、前言

近年来,新污染物问题受到全球广泛关注。新污染物是指新发现或被新关注的对生态环境或人类健康有不利影响的污染物^[1],尚未纳入管理或因现阶段管理措施不足难以有效防控其风险^[2]。新污染物虽然在环境中浓度较低,但因其具有持久性、远距离迁移性、生物累积性和生物毒性^[1,3]等特点,对生态环境和人类健康构成严重威胁。大量研究表明,新污染物在自然环境和日常生活中无处不在,如电子电器产品、新能源汽车、塑料和药品等。新污染物可以通过各种暴露途径进入人体,引发肠道功能破坏、心肺疾病、生殖障碍、免疫系统损伤、内分泌紊乱和癌症风险增加等健康问题^[3-5]。

我国高度重视新污染物治理工作。2020年10月,党的十九届五中全会首次提出要重视新污染物治理^[6]。随后,“十四五”规划纲要、《关于深入打好污染防治攻坚战的意见》、党的二十大报告等均强调要重视和加强新污染物治理。然而,我国新污染物治理形势严峻,任重道远。有毒有害化学物质的生产和使用是新污染物的主要来源,而我国是世界上最大的化学品生产国和消费国,预计到2030年,我国的化学工业产值将占全球总产值的50%^[2]。总体上,我国新污染物治理的科技水平与发达国家相比存在差距,在替代技术开发及风险评估等方面尚存不足^[7]。另外,新污染物涉及行业广泛,产业链长,治理具有艰巨性和长期性。

新污染物治理要立足时代背景和国家发展规划。2024年7月,党的二十届三中全会对健全因地制宜发展新质生产力体制机制作出重大部署,可见,加快发展新质生产力是我国的重要战略规划。新质生产力是指科技创新在其中发挥主导作用的生产力,区别于依靠大量资源投入、高度消耗资源能源的发展方式,是摆脱传统增长路径、符合高质量发展要求的生产力^[8];代表性产业有新能源、新材料、先进制造、电子信息等战略性新兴产业。

在加快发展新质生产力背景下,新一代信息技术、新能源、新材料、生物医药等新兴产业发展迅速,使用的化学品种类和数量将以前所未有的速度增长,产生的新污染物量大面广、复杂多变,涉及的新污染物问题纷繁复杂,加剧了新污染物治理的难度和压力。绿色发展是高质量发展和新质生产力的底色,加快形成新质生产力意味着要加快生产力的绿色化转型^[9],绿色低碳是新兴产业发展的趋势,因此,亟需开展新兴产业涉及的新污染物的治理现状调研、面临挑战分析及管控策略研究。本文立足加快发展新质生产力的时代背景,聚焦新质生产力发展过程中的新污染物问题,分析其治理现状及面临的挑战,从理论框架、优先事项和支撑保障等方面提出治理策略建议。

二、发展新质生产力背景下新污染治理的现状、问题和挑战

(一) 新污染物治理现状

顶层设计为新污染物治理提供遵循,指明方向。2022年5月,国务院办公厅印发的《新污染物治理行动方案》是我国首部专门针对新污染物治理的顶层设计文件^[10],从完善法规制度、开展调查监测、严格源头管控等6个维度对新污染物治理进行了系统性部署,共18条行动举措,同时在加强组织领导、强化监管执法等4个方面做好保障措施。针对新兴产业,该方案有多条举措,如开展重点行业中重点化学物质的基本信息调查,对重点行业、重点工业园区开展新污染物监测试点,加强产品中新污染物含量控制,聚焦重点行业开展一批新污染物治理试点工程等^[11]。

目前,我国对新污染物治理提出两大核心目标。一是《新污染物治理行动方案》提出了到2025年,新污染物治理能力明显增强的工作目标;二是《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》明确提出,到2035年,新污染物风险得到有效管控。

近年来，我国新污染物治理取得一系列成果。在风险筛查方面，完成了122个重点行业的化学物质生产情况使用调查，筛选出4000余种潜在高风险化学物质^[12]。在环境监测方面，在天津、河北、江苏、浙江等10个省（区、市）开展新污染物试点监测，发布《新污染物生态环境监测标准体系表（2024年版）》，指导环境监测标准的制定/修订。在源头管控方面，通过《重点管控新污染物清单（2023年版）》对14种新污染物实施管控，截至2023年年底，已全面淘汰8种重点管控新污染物，其中包括全氟辛基磺酰化合物（PFOS）、短链氯化石蜡等新兴产业涉及的典型新污染物。在绿色替代方面，研发出卤代阻燃剂等新污染物的绿色替代产品。在治理技术方面，面向持久性有机污染物重度污染土壤，研发了常温常压下的物化协同修复技术^[13]。

我国新污染物研究与管理工作的正稳步推进，但仍处于起步阶段，还存在诸多短板弱项。尤其是在发展新质生产力背景下，新污染物治理面临的挑战更加严峻。

（二）新污染物治理存在的问题和挑战

1. 新质生产力发展高度依赖化学品

在电子信息、新能源汽车、光伏、生物医药等新兴产业发展过程中，为提高产品性能，往往高度依赖化学品的使用，其中不乏有毒有害的新污染物，需要高度警惕（见表1）。

电子信息、新能源等新兴产业高度依赖电子化学品的生产和使用。2022年，我国湿电子化学品需求总量达到 2.643×10^6 t，到2025年，这一数字将达到 4.605×10^6 t^[14]。湿电子化学品的原材料种类繁多，其中多溴联苯、多溴二苯醚等被工业和信息化部列为电子电器产品中的有害物质。

含氟材料广泛应用于新能源、计算机、通信等产业。光伏制造业中太阳能电池背板往往采用含氟背膜，如聚氟乙烯（PVF）和聚偏氟乙烯（PVDF）等。在氢能领域应用的含氟材料主要是全氟磺酸质子交换膜。锂电行业中用到含氟材料主要是六氟磷酸锂、PVDF和双氟磺酰亚胺锂等。另外，氟塑料因具有卓越的物化性能，在电子电气和半导体等工业部门常被应用于关键部位，如“塑料王”聚四氟乙烯塑料（PTFE）^[15]等。

塑料等功能高分子材料凭借轻巧的质量和卓越的可塑性，已被广泛应用于先进制造、电子电器和新能源等领域。但在塑料的生产和使用过程中，为增强其耐用性、灵活性和改善外观，经常添加增塑剂、阻燃剂、抗氧化剂、光稳定剂和着色剂等。关于塑料中化学物质的最新研究表明^[16]，在塑料中已识别出超过1.6万种化学品，其中至少4200种具有“持久性、生物累积性、迁移性或毒性”的特性，如全氟和多氟烷基物质（PFAS）、双酚A等新污染物^[17]。

2. 新兴产业带来新污染问题

被称为“永久化学品”的PFAS污染在新兴产业中无处不在。在电子设备制造中，PFAS作为防污和防腐剂、抗静电添加剂等，在产品的整个生命周期中持续存在^[18]。制造计算机芯片的关键步骤中，需要在硅片表面涂上一层含有PFAS的光致抗蚀剂材料^[19]。在锂电池中添加了一类特定的PFAS——双全氟烷基磺酰亚胺（bis-FASIs），但部分锂离子电池被填埋，PFAS将由此浸出到水、土壤中^[25]。PFAS在环境中迅速积累且非常难降解，会造成肝损伤、高胆固醇、慢性肾病和免疫系统损伤等健康问题，增加人体罹患癌症、不孕症等风险^[19-21]。

在太阳能光伏发电产品制造过程中，硅冶炼与提纯环节会产生大量四氯化硅、氯化氢废气及含氟污水^[22]。但目前含氟废水处理仍存在处理效率低、工艺落后、资源化手段缺乏、政策法规不完善等问题^[23]。

新能源汽车发展的初衷虽然是以清洁的可再生能源代替石油等传统能源，但是其清洁性主要体现在汽车的运营阶段^[24]，在锂矿的开采冶炼、锂电池制造、废弃电池回收等环节容易发生锂污染风险^[25]。在“双碳”目标背景下，新能源汽车和锂离子电池的需求量将激增。锂污染在植物体内显示出明显的富集效应，可降低植物的光合效率，过量锂暴露会对人体的神经系统、甲状腺和肾脏系统等有害^[26]。

3. 新兴产业废弃物处置问题突出

随着新兴行业的飞速发展，电子设备、光伏组件被大量制造，到使用期限后，会产生大量废弃物。这些废弃物往往兼具资源和环境双重危害，如果利用不好或处置不当，一方面会造成资源浪费、不利于新兴产业可持续发展，另一方面会对生态环境造成污染。

表1 新质生产力发展过程中涉及的典型新污染物

新兴产业	涉及的典型新污染物	相应用途	主要问题
电子信息	多溴联苯、多溴二苯醚、邻苯二甲酸酯类	阻燃剂、增塑剂	我国《电器电子产品有害物质限制使用管理办法》(RoHS) 尚未限制使用邻苯二甲酸酯类物质, 欧盟却早已规定最低限值, 因此会对我国形成绿色贸易壁垒
	PFAS	半导体 (芯片制造、光刻、蚀刻)、电子器件、线缆、液晶显示屏、印刷线路板	① PFAS 在自然环境中迅速积累且降解时间长, 严重危害动植物和人类的健康 ② 在医疗、电子半导体、航空航天和新能源等新兴重点行业里暂无较好的 PFAS 替代产品 ③ 欧盟的 PFAS 提案一旦通过, 将对我国的出口形成很大限制, 极大影响我国相关产业链的生态
	氟聚合物: 全氟聚醚 (PFPE)、乙烯-四氟乙烯共聚物 (ETFE)、聚全氟乙丙烯 (FEP)	真空机械泵油、电子电气部件、电器绝缘配件、高压电线电缆	① 随着 PFAS 定义范围的扩大, 含氟材料、氟聚合物也可能被欧盟等列入 PFAS 行列而受到管控 ② 这些含氟替代制冷剂大多因属于全氟烷基酸 (PFAA) 前体而被列入了欧盟 PFAS 限制案中 ^[27]
制冷	氢氯氟烃类 (HCFCs)、氢氟烃类 (HFCs)、氢氟烯烃类 (HFOs)	制冷剂	
新能源汽车	含氟材料: 六氟磷酸锂、氟代碳酸乙烯酯、双全氟烷基磺酰亚胺、PVDF、PTFE、氟橡胶 (FKM) 短链氯化石蜡 (SCCPs)、中链氯化石蜡 (MCCPs)	锂离子电池的电解液添加剂、正极黏结剂和隔膜等、燃料电池润滑油添加剂	我国是全球新能源车和电池的最大生产和出口国。随着 PFAS 定义范围的扩大, 含氟材料、氟聚合物也可能被欧盟等列入 PFAS 行列而受到管控 虽然 SCCPs 被全面管控, 但目前使用的替代品 MCCPs 在加工过程中会产生短链成分, 也具有环境持久性、生物累积性和生态毒性
光伏	氟聚合物: PVF、PVDF、四氟乙烯-六氟丙烯-偏氟乙烯共聚物 (THV)、三氟氯乙烯-乙烯共聚物 (ECTFE)、ETFE 氢氟酸、四氯化硅	太阳能电池背板膜 芯片清洗蚀刻、太阳能硅片切割、脱胶和清洗	当前对光伏组件的需求越来越大, 产生的含氟废弃物也将随之剧增。因其具有稳定的碳氟键而很难降解, 若焚烧处置则会释放氟化氢等有毒气体 含氟废水处理效率低、工艺落后、资源化手段缺乏、政策法规不完善
生物医药	① 抗生素: 喹诺酮类、大环内酯类、磺胺类 ② 内分泌干扰物: 雄激素、雌激素、烷基酚 (APs) ^[28] 卤代烃: 二氯甲烷、氯苯、溴代卤化烃、四氯化碳、氯仿 ^[29]	靶向药物、转基因药物、疫苗 提取、分离和纯化药物原料, 以及作为反应溶剂参与药物合成	生物医药领域的新污染物相关化学品种类繁多、性质各异、来源广泛, 大大增加了识别监测、风险评估、污染治理的难度
	PFAS (如全氟碘辛烷)	含氟药物的制备、医疗器械的涂层和润滑剂	对 PFAS 定义的逐步扩大使更多的含氟药物进入欧盟限制案管控名单, 含氟药物的制备将受到很大影响
功能高分子材料	① 短链、中链氯化石蜡 ② 邻苯二甲酸盐 / 酯类 多溴二苯醚 壬基酚 双酚 A, 双酚 S	增塑剂 阻燃剂 表面活性剂、材料改性 高分子原料、增塑剂、阻燃剂、抗氧剂	① 塑料中已识别出超过 1.6 万种化学品, 其中至少 4200 种具有持久性、生物累积性、迁移性或毒性 ② 化学品存在于塑料的整个生命周期中, 在生产和排放过程中都有生态环境风险并且危害人类的健康

我国是电子产品的生产和消费大国，电子废弃物数量巨大。同时，一些小作坊、小工厂为从电子废物中获利，会采取一些非法和不科学的处理方式，导致有毒有害物质通过地球化学循环影响生态环境。

含氟废弃物逐渐成为环境氟化物污染的重要来源。在光伏产业中，晶硅电池组件多采用含氟背板。据预测^[30]，2025年之后我国光伏组件逐渐进入退役高峰期，2030年累计退役量将达到 1.5×10^6 t。而其在处置过程中，如果采取焚烧则会释放氟化氢等有毒气体，但同时因其具有稳定的碳氟键而很难降解^[31]。在“双碳”目标背景下，对光伏组件的需求越来越大，产生的含氟废弃物也将随之增加。

4. 有毒有害化学添加导致国际贸易受阻

我国电子产品中有毒有害物质管控与欧盟存在差距。我国RoHS尚未包括邻苯二甲酸二正丁酯、邻苯二甲酸二异丁酯等4项邻苯二甲酸酯物质，而对于欧盟而言，该类物质早在2015年颁布、2019年实施的RoHS2.0中被纳入管控范围。这也意味着我国尚未限制电子电器产品使用邻苯二甲酸酯，因此相关产品在国际贸易，尤其是对欧洲出口贸易中会受到阻碍。

2023年，欧洲化学品管理局（ECHA）开展了第10次联合执法项目，发现电子信息类产品（如充电器、电缆、耳机）中有52%的产品不合格，主要是由于软塑料零件中的邻苯二甲酸酯、焊料中的铅或电路板中的镉。来自欧洲经济区以外的产品，不合格率更高，其中大部分来自中国，导致此类产品退出欧洲市场^[32]。

2023年2月，ECHA公布了德国、荷兰等五国向其提交的基于《化学品的注册、评估、授权和限制》（REACH）法规的PFAS限制提案。该提案对PFAS的定义为：至少含有一个完全氟化甲基（—CF₃）或亚甲基（—CF₂—）碳原子（该碳原子上无H/Cl/Br/I原子）的任何物质^[33,34]，该定义囊括了超过10 000种含氟有机物。该提案规定PFAS不得单独以物质形式在欧盟境内制造、使用或投放市场，当以物质组成成分、混合物或物品形式存在时，PFAS含量不得高于指定限值投放到欧盟市场^[33]。PFAS是我国新能源车燃料电池、电线电缆和光伏组件等新兴产业中广泛应用的化学品，欧盟PFAS限制提案一旦通过，将对我国的出口形成很大限

制，极大地影响我国相关产业链的发展。

5. 高风险化学品替代困难

寻求绿色环保、性能优良的替代品是应对新污染物挑战的关键课题。以PFAS为例，其广泛应用于新能源和电子信息等新兴行业产品，如线缆、半导体、液晶显示屏以及各类电子器件等。但PFAS降解时间长达数百年，容易在生物体和环境中迁移^[24]。随着全球对PFAS的管控逐渐升级，同时对PFAS定义范畴的逐步扩大，新兴产业逐渐去氟化将是大势所趋。

然而，PFAS涵盖了数以万计的工业化学物质，其应用贯穿于原材料生产、零部件制造直至最终产品上线的整个复杂产业链之中，替代极其困难。在医疗、电子半导体、航空航天和新能源等新兴重点行业里暂无较好的含氟物质替代产品^[34]，如电动汽车领域，目前暂时无不含PFAS的电池^[35]。另外，PFAS的替代需要一系列复杂的过程对其性能和环境、健康、安全风险进行评价，周期久、成本高是目前面临的重大挑战。

三、发展新质生产力背景下的新污染物治理框架及优先事项

（一）新污染物治理框架

我国新污染物治理的总体思路是“筛、评、控”^[36]。“筛”即风险筛查，是指首先在有毒有害化学物质中筛选出具有潜在环境风险、需要优先开展环境风险评估的新污染物。“评”是指风险评估，通过评估新污染物对环境健康的风险，识别出需要进行优先控制的新污染物。“控”则是指对新污染物实行全过程管控。全过程管控遵循“禁、减、治”的理念，即源头禁限、过程减排、末端治理。发展新质生产力背景下的新污染治理应当以上述思路为基础，形成治理框架（见图1）。

发展新质生产力背景下，新污染物治理应当坚持的核心理念是全生命周期思维，以系统思维设计新污染物管理制度，打通信息和管理屏障，推动各领域协同发力^[37]。新污染物治理的核心目标是通过全面提升新污染物治理能力、健全有毒有害化学物质环境风险管理法规制度体系和管理机制，管控新污染物生态环境风险。

在发展新质生产力背景下，新污染物治理应把

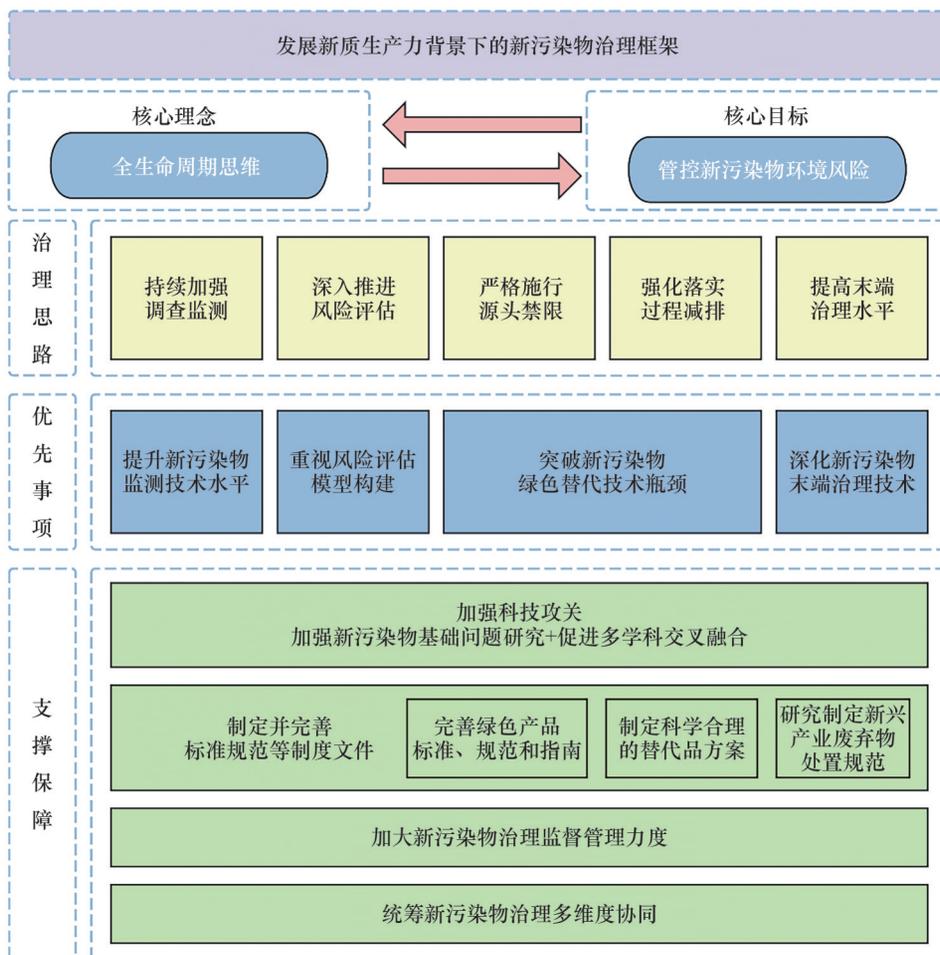


图1 发展新质生产力背景下的新污染物治理框架

握如下治理思路：第一，加强新兴产业涉及的新污染物的调查监测，准确摸清新污染物底数和污染状况，为管控风险提供依据；第二，深入推进环境风险评估，明确新兴产业新污染物对生态环境和人类健康的具体影响；第三，严格施行源头禁限，加强对新兴产业高风险化学品的淘汰或限用措施，动态更新重点管控新污染物清单；第四，落实过程减排，突破新污染物替代技术瓶颈，建立并完善绿色替代品的规范和指南，加强新兴产业清洁生产审核。第五，提高末端治理水平，提升新兴产业新污染物的末端治理水平和固体废弃物利用处置能力，制定相关处理处置标准规范。

（二）新污染物治理优先事项

1. 提升新污染物监测技术水平

我国新污染物监测尚处于起步阶段。目前新污染物的监测大多是服务于科研项目的研究目标，并

没有被纳入常规监测^[38,39]。逐渐在新兴产业中建立新污染物监测体系非常重要。

对标生态环境部发布的《新污染物生态环境监测标准体系表（2024年版）》，大多数新污染物监测项目的状态均为“拟制定”，尤其是与新兴产业密切相关的全氟化合物、抗生素和微塑料等，应着力开展相关监测技术的研究。

针对新兴产业发展过程中产生新污染物的复杂性，监测技术应向更高效、更灵敏、更便捷的方向重点突破，探索适合基层生态环境监测机构使用的监测技术。建议构建数智化实验平台，利用机器学习对新污染物进行快速识别与检测^[40,41]。发挥人工智能优势，监测空气和水体质量、精确定位污染源、预测新污染物扩散情况。

2. 重视新污染物风险评估模型构建

针对新兴产业发展带来的新污染物，要深入推进基于暴露模型的环境风险评估，着力开发多介

质、复杂场景暴露模型，研究计算毒理预测和体外测试技术，重视模型工具化、技术系统化和参数本土化^[13,42]。开展基于多危害特征的高通量毒性测试，分析各类新污染物的毒性机理^[42]，尽快构建基于本土生物的化学物质环境风险毒性数据库。建立数学模型以识别生态系统中新污染物的迁移和归趋特征，促进对人类健康和生态系统的全面风险评估^[4]。

3. 突破新污染物绿色替代技术瓶颈

美国-欧盟贸易和科技委员会高级别会议将利用人工智能寻找半导体制造中PFAS环保替代品的计划提上日程。美国研究人员利用人工智能发现高性能可降解塑料替代新方法^[43]。因此，我国应加快新污染物替代品开发技术攻关脚步，借鉴国际先进经验，从“跟跑”走向“并跑”，甚至“领跑”，为新污染物治理提供保障。

依托国家重点研发计划，加强环境友好型替代产品及技术的科学研究。根据《产业结构调整指导目录（2024年本）》，鼓励PFOS、全氟辛酸及其盐类和相关化合物的替代品和替代技术开发和应用。虽然目前我国在PFAS替代品和技术上有一定的进展，如光伏电池背板使用聚对苯二甲酸乙二醇酯替代氟化物，质子交换膜燃料电池的强化材料用聚苯并咪唑型材料取代聚四氟乙烯，但是这些替代品都存在不同程度的成本高、商业化困难、性能有缺憾等问题^[34]，因此应集中精力攻克这些瓶颈问题，并优先弥合技术与实际应用之间的差距，使技术真正应用到产业中来。

4. 深化新污染物末端治理技术

根据新兴产业类型和新污染物类别，分级分类深化新污染物削减控制技术创新。虽然新污染物去除技术已有一定研发成果，如生物炭、碳纳米管、高级氧化工艺、黏土矿物以及反渗透等技术广泛应用于新污染物治理研究^[44]；膜相关的表面改性、形态控制、纳米结构设计等技术也是处理新污染物的新发展方向^[45]。但仍然存在处理效率低、成本高、实际应用不足等问题，应聚焦这些核心瓶颈，开展科技攻坚，如利用机器学习对去除技术进行筛选评估^[46]。

推进“产学研”融合，提升新兴产业废弃物利用处置能力。加强退役风光发电设备等新能源器件废弃物处理处置相关技术的系统性研究和推广应用。当前，我国在该领域的核心专利数量与转化量远低于欧美等发达国家^[47]，应加大成果转化力度，

突破专利壁垒，构建支撑我国新能源产业持续循环发展的科技实力。鼓励地方政府、企业、技术机构协助发展新兴产业固体废物绿色回收处理产业，打造一批先进的绿色技术^[48]。对先进技术和企业应加大扶持和奖励，带动废弃物处理产业集群发展。

四、发展新质生产力背景下推进新污染物治理的支撑保障

（一）加强科技攻关

1. 加强新污染物基础问题研究和核心技术攻关

针对新污染物治理的关键基础科学问题，亟需建立多维度、全链条的基础研究框架。加快对各类新污染物的迁移转化、污染特征及生态毒性的深入研究，明晰危害机理，进行新污染物环境排放特征与源排放量测算方法研究，对各区域新污染物实时追踪溯源和动态监测，以实现精准管控和科学治理新污染物^[49]。

建议设立新污染物治理重大科技专项计划，加大资金支持力度，全面构建新污染物治理技术体系、管理支撑与工具平台，创新新污染物治理管理体制机制，解决绿色化学品替代、快速精准筛查、末端治理、无害化处置等关键技术瓶颈。加快研发新污染物筛查、监测、去除等关键设备，提升自主知识产权水平，着力打造新污染物治理技术集成平台，建立新兴产业新污染物全生命周期风险评估和控制方法技术体系。

2. 促进多学科交叉融合

新污染物治理亟需建立跨学科交叉融合的创新范式。建立基于大数据和人工智能的新污染物管理支撑体系，将机器学习和人工智能等新技术整合到新污染物治理中^[50]。利用机器学习模型的预测能力，在新化学品广泛使用之前预测其对环境和健康的影响^[51]，完善修复策略。通过多目标优化模型平衡环境效益和经济成本，实现新污染物治理智能决策。

（二）制定并完善标准规范等制度文件

1. 完善绿色产品标准、规范和指南

在工业流程和产品设计之初，应遵守绿色化学原则，最大限度减少有毒有害物质的产生和使用，加大政策激励和监管，加强产业界和学术界的合作，从而促进绿色化学实践的可持续转变^[51]。

加大绿色产品供给,健全绿色产品设计、采购、制造等标准规范,加强绿色产品认证与标识体系建设。如新兴产业中的塑料污染,应将塑料整个生命周期的化学品问题纳入行业标准范围,逐步淘汰塑料生产中的有毒化学品^[52]。

研究制定替代品评估指南,确保替代品绿色安全。参考借鉴美国环境保护局发布的替代品评估方法^[53],尽快制定相关技术指南,科学分析替代评估原则、评估指标以及方法步骤等,以便指导企业开发和应用绿色替代品。

2. 制定循序渐进、科学合理的替代品方案

根据不同的应用场景、性能要求等综合分析,科学合理地制定替代方案。以 PFAS 为例,对于光伏组件,在恶劣的环境下应提高氟背板材料效率,逐步减量化;而在温和的环境下,建议使用无氟背板材料。在纺织品和服装领域,对于防水防油要求不是特别高的纺织品,建议采用聚氨酯、有机硅/碳氢化合物等替代品^[54]。另外,对于一些重要应用场景,如芯片制造,可考虑适当延缓替代。

3. 研究制定新兴产业废弃物处置规范

应科学评估新兴产业废弃物的产生情况,建立相应的技术标准体系。建议生态环境部组织相关企业、行业协会、固废处置机构等单位共同制定新兴产业固废管理标准^[48]。重点制定新兴产业固废回收利用规范及指南,推进风光发电退役组件回收利用,推动新能源等领域可持续发展。

(三) 加大新污染物治理监管力度

完善新兴产业新污染物治理的监督管理体系,加强监管力度。跟踪产品全生命周期,落实新兴产业生产使用化学物质登记制度,加强高风险化学品的源头管控,以更正规的方式排放新污染物,以更绿色的方式生产、使用和回收风光发电组件,积极探索新路径^[48]。建议加强对企业违法违规排放新污染物、产品中新污染物含量超出规定限值、违规处置固体废弃物的打击力度,加强新兴产业固废处理处置过程中新污染物识别、环境风险评估及监测工作。压实新污染物和固体废弃物产生单位主体责任,完善管理台账,分级分类整改。

(四) 统筹新污染物治理多维度协同

在新质生产力快速发展的背景下,要避免过去

传统产业发展过程中走过的先污染、后治理的道路,要平衡好新兴产业发展与新污染物治理之间的关系,在多维度上推进协同治理机制。

一是统筹各区域之间协同治理,在新质生产力区域协调发展的同时,强化新污染物治理跨行政边界合作机制。各地区应开展相互学习和合作,建立跨区域/流域的新污染物联防联控机制,解决好各类新污染物跨界传输问题。二是强化多介质协同治理,研究各类新污染物在大气、水、土壤等多环境介质的迁移转化特征,对多介质环境归趋数据进行采集并进行风险分析,形成多源数据管理机制及相关标准。三是推进常规污染物与新污染物协同治理,研究其复合污染效应,建立监测技术、去除技术等协同控制技术体系,构建协同管理框架。四是重视监管与指导协同,一方面要提高新兴产业中新污染物治理的监管能力,加大监管和对违规行为的打击力度;另一方面要注重中央对地方新污染物识别和治理的指导,充分理解地方新污染物治理的难度,循序渐进、合理用力,强化技术支撑单位对基层政府及行业企业的指导,提升其新污染物识别、评估和治理能力,协同支撑新污染物治理。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: October 9, 2024; **Revised date:** February 14, 2025

Corresponding author: Wang Bin is an associate research fellow from School of Environment, Tsinghua University. His major research field is risk assessment and control of emerging contaminants. E-mail: thuwb@tsinghua.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Scientific and Technological Strategic Research on Emerging Contaminants Control for A Beautiful China”(2024-XZ-46); National Natural Science Fund Project (52091544)

参考文献

- [1] Ruan T, Li P Y, Wang H T, et al. Identification and prioritization of environmental organic pollutants: From an analytical and toxicological perspective [J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(17): 10584–10640.
- [2] Wang B, Sui Q, Liu H J, et al. Promoting environmental risk assessment and control of emerging contaminants in China [J]. *Engineering*, 2024, 37: 13–17.
- [3] Chen P, Wang J Q, Xue Y N, et al. From challenge to opportunity: Revolutionizing the monitoring of emerging contaminants in water with advanced sensors [J]. *Water Research*, 2024, 265: 122297.
- [4] Wang F, Xiang L L, Sze-Yin Leung K, et al. Emerging contaminants:

- A one health perspective [J]. *The Innovation*, 2024, 5(4): 100612.
- [5] Tang K H D, Li R H, Li Z, et al. Health risk of human exposure to microplastics: A review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2024, 22(3): 1155–1183.
- [6] 於方, 曹国志, 张衍桑, 等. 加强新污染物协同治理和环境风险管控体系建设 [J]. *环境保护*, 2024, 52(16): 36–38.
Yu F, Cao G Z, Zhang Y S, et al. Strengthening set-up of synergistic management of emerging pollutants and environmental risk control system [J]. *Environmental Protection*, 2024, 52(16): 36–38.
- [7] 韦正峥, 向月皎, 郭云, 等. 国内外新污染物环境管理政策分析与建议 [J]. *环境科学研究*, 2022, 35(2): 443–451.
Wei Z Z, Xiang Y J, Guo Y, et al. Analysis and suggestions of environmental management policies of new pollutants at home and abroad [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(2): 443–451.
- [8] 周文, 许凌云. 论新质生产力: 内涵特征与重要着力点 [J]. *改革*, 2023 (10): 1–13.
Zhou W, Xu L Y. On new quality Productivity: Connotative characteristics and important focus [J]. *Reform*, 2023 (10): 1–13.
- [9] 石建勋, 徐玲. 加快形成新质生产力的重大战略意义及实现路径研究 [J]. *财经问题研究*, 2024 (1): 3–12.
Shi J X, Xu L. Major strategic significance and implementation path of accelerating the formation of new quality productivity [J]. *Research on Financial and Economic Issues*, 2024 (1): 3–12.
- [10] 孟小燕, 黄宝荣. 我国新污染物治理的进展、问题及对策 [J]. *环境保护*, 2023, 51(7): 9–13.
Meng X Y, Huang B R. The progress, problems and countermeasures of new pollutants treatment in China [J]. *Environmental Protection*, 2023, 51(7): 9–13.
- [11] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发新污染物治理行动方案的通知 [EB/OL]. (2022-05-24)[2024-09-05]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/24/content_5692059.htm.
General Office of the State Council of the People's Republic of China. Circular of the General Office of the State Council on the issuance of the action program for the control of emerging contaminants [EB/OL]. (2022-05-24)[2024-09-05]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/24/content_5692059.htm.
- [12] 郭芳. 建立新污染物协同治理和环境风险管控体系 [J]. *环境保护*, 2024, 52(19): 8–10.
Guo F. Establish a collaborative control system for new pollutants and environmental risks [J]. *Environmental Protection*, 2024, 52(19): 8–10.
- [13] 武会会, 只艳, 肖庆聪, 等. 我国新污染物治理科技需求分析 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(9): 5202–5208.
Wu H H, Zhi Y, Xiao Q C, et al. Analysis of science and technology need for emerging contaminants control in China [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(9): 5202–5208.
- [14] 中国电子材料行业协会. 2023版湿化学品产业研究报告 [R]. 北京: 中国电子材料行业协会, 2023.
China Electronics Materials Industry Association. Wet chemicals industry research report 2023 [R]. Beijing: China Electronics Materials Industry Association, 2023.
- [15] 汪晓鹏, 徐洪育, 李兴强. 塑料王特种工程塑料——氟塑料 [J]. *西部皮革*, 2021, 43(15): 18–19.
Wang X P, Xu H Y, Li X Q. Plastic king special engineering plastics-fluoroplastics [J]. *West Leather*, 2021, 43(15): 18–19.
- [16] Wagner M, Monclús L, Arp H P H, et al. State of the science on plastic chemicals—Identifying and addressing chemicals and polymers of concern [R]. Norwegian: *PlastChem*, 2024.
- [17] Weber R, Ashta N M, Aurisano N, et al. Chemicals in plastics — A technical report [R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2023.
- [18] Baqar M, Zhao M S, Saleem R, et al. Identification of emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in E-waste recycling practices and new precursors for trifluoroacetic acid [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(36): 16153–16163.
- [19] Lim X. Can the world leave forever chemicals' behind [J]. *Nature*, 2023, 620(7972): 24–27.
- [20] Guelfo J L, Ferguson P L, Beck J, et al. Lithium-ion battery components are at the nexus of sustainable energy and environmental release of per- and polyfluoroalkyl substances [J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 5548.
- [21] Fang J H, Li S L, Qiu R L, et al. “Forever chemicals”: A sticky environmental problem [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2024, 18(10): 131.
- [22] 王硕. 江桂斌委员: 新能源并非零污染 [N]. *人民政协报*, 2022-03-24(05).
Wang S. Member Jiang Guibin: New energy is not zero pollution [N]. *CPPCC Daily*, 2022-03-24(05).
- [23] 张鑫, 任保纯, 段志栋. 含氟废水处理存在的问题与对策 [J]. *山东水利*, 2024 (5): 66–67, 70.
Zhang X, Ren B C, Duan Z Y. Problems and countermeasures for treating fluoride-containing wastewater [J]. *Shandong Water Resources*, 2024 (5): 66–67, 70.
- [24] 苏幸. 新能源汽车产业链的环境污染与治理 [J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40(9): 124–126.
Su X. Environmental pollution and treatment of the new energy vehicle industry chain [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2022, 40(9): 124–126.
- [25] 冯丽妃. 中国科学院院士江桂斌: 新能源发展需重视环境污染新问题 [N]. *中国科学报*, 2024-03-13(03).
Feng L F. Jiang Guibin, Academician of the CAS Member: New energy development needs to pay attention to new problems of environmental pollution [N]. *China Science Daily*, 2024-03-13(03).
- [26] 杨学志, 齐甜雨, 文昊楠, 等. 高精度锂分析方法及我国多种环境介质中锂污染初探 [J]. *科学通报*, 2023, 68(15): 1959–1970.
Yang X Z, Qi T Y, Wen H N, et al. Development of high-precision analytical method for lithium and the preliminary investigation on lithium pollution in environmental media in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(15): 1959–1970.
- [27] 安青松, 侯佳鑫, 史琳, 等. 欧盟PFAS限制提案解读及其对制冷空调行业影响与应对 [J]. *制冷学报*, 2024, 45(2): 22–29.
An Q S, Hou J X, Shi L, et al. Interpretation of the EU PFAS restriction proposal and its impact on R & AC industry [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(2): 22–29.
- [28] 陈可欣, 辜凌云, 余春秀, 等. 医疗污水中新污染物特征与环境归趋研究进展 [J]. *工业水处理*, 2024, 44(8): 1–12.

- Chen K X, Gu L Y, Yu C X, et al. Research progress of occurrence, characteristics and fate of emerging contaminants in medical wastewater [J]. *Industrial Water Treatment*, 2024, 44(8): 1–12.
- [29] Meng L N, Gao S, Zhang S W, et al. Identification of atmospheric emerging contaminants from industrial emissions: A case study of halogenated hydrocarbons emitted by the pharmaceutical industry [J]. *Environment International*, 2024, 192: 109027.
- [30] 张建文, 王海东, 梁汉, 等. 退役晶硅光伏组件回收技术研究进展 [J]. *矿冶工程*, 2022, 42(3): 147–152, 157.
Zhang J W, Wang H D, Liang H, et al. Research progress in recycling technology of decommissioned crystalline silicon photovoltaic modules [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2022, 42(3): 147–152, 157.
- [31] 殷爱鸣. 废弃光伏组件回收现状与趋势 [J]. *分布式能源*, 2021, 6(3): 76–80.
Yin A M. Status and trend of recycling of waste photovoltaic modules [J]. *Distributed Energy*, 2021, 6(3): 76–80.
- [32] European Chemicals Agency. Hazardous chemicals found in many consumer products [EB/OL]. (2023-12-13)[2024-09-08]. <https://echa.europa.eu/-/hazardous-chemicals-found-in-many-consumer-products>.
- [33] 涂伟文, 董淑秀, 赵凯. 纺织品相关全氟或多氟烷基物质(PFAS)的全球最新管控动向 [J]. *印染*, 2024, 50(7): 88–94.
Tu W W, Dong S X, Zhao K. The latest trend of global control of textile-related per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) [J]. *China Dyeing & Finishing*, 2024, 50(7): 88–94.
- [34] 郭衍锦, 卢鸿武, 张苗苗, 等. 全氟或多氟烷基物质(PFAS)管控及替代 [J]. *有机氟工业*, 2023 (3): 43–51.
Guo Y J, Lu H W, Zhang M M, et al. Regulation of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and its substitutes [J]. *Organofluorine Industry*, 2023 (3): 43–51.
- [35] Wang Y Q, Wu Z Z, Azad F M, et al. Fluorination in advanced battery design [J]. *Nature Reviews Materials*, 2023, 9(2): 119–133.
- [36] 高歌, 张文晴, 魏歆倪, 等. 新型优先管控污染物筛选研究进展 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(11): 6472–6483.
Gao G, Zhang W Q, Wei X N, et al. Research progress on screening of emerging priority controlled contaminants [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(11): 6472–6483.
- [37] 只艳, 武会会, 於方, 等. 有毒有害化学物质全生命周期环境风险管理制度设计 [J]. *生态毒理学报*, 2024, 19(5): 64–74.
Zhi Y, Wu H H, Yu F, et al. Design of a comprehensive life-cycle environmental risk management system for hazardous chemicals [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2024, 19(5): 64–74.
- [38] Wang B, Yu G. Emerging contaminant control: From science to action [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2022, 16(6): 81.
- [39] 周林军, 梁梦园, 范德玲, 等. 新污染物环境监测国际实践及启示 [J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(12): 1532–1539.
Zhou L J, Liang M Y, Fan D L, et al. International practices and enlightenment for environment monitoring of emerging pollutants [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(12): 1532–1539.
- [40] 赵淑莉, 陈少坤, 于秀豪, 等. 美丽中国建设过程中重点关注的新污染物监测研究 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(8): 4576–4587.
Zhao S L, Chen S K, Yu X H, et al. Study on monitoring widespread concerned emerging contaminants under the construction of the Beautiful China [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(8): 4576–4587.
- [41] Lei L, Pang R R, Han Z B, et al. Current applications and future impact of machine learning in emerging contaminants: A review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2023, 53(20): 1817–1835.
- [42] 王蕾, 邢维龙, 范德玲, 等. 新污染物治理面临的技术挑战与科技支撑建议 [J]. *环境影响评价*, 2023, 45(2): 1–6.
Wang L, Xing W L, Fan D L, et al. Technical challenges and technology support suggestions for the control of new pollutants [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2023, 45(2): 1–6.
- [43] Chen T L, Pang Z Q, He S M, et al. Machine intelligence-accelerated discovery of all-natural plastic substitutes [J]. *Nature Nanotechnology*, 2024, 19(6): 782–791.
- [44] Coccia M, Bontempi E. New trajectories of technologies for the removal of pollutants and emerging contaminants in the environment [J]. *Environmental Research*, 2023, 229: 115938.
- [45] Zhao D L, Zhou W Y, Shen L G, et al. New directions on membranes for removal and degradation of emerging pollutants in aqueous systems [J]. *Water Research*, 2024, 251: 121111.
- [46] Liu B Y, Xi F Y, Zhang H J, et al. Coupling machine learning and theoretical models to compare key properties of biochar in adsorption kinetics rate and maximum adsorption capacity for emerging contaminants [J]. *Bioresource Technology*, 2024, 402: 130776.
- [47] 徐卫星. 风光设备大规模退役将至, 如何打通回收处理“最后一公里”? [N]. *中国环境报*, 2024-07-04(08).
Xu W X. Large-scale decommissioning of wind and solar equipment is approaching, how to get through the “last kilometer” of recycling treatment [N]. *China Environment News*, 2024-07-04(08).
- [48] 罗锦程. 打通清洁能源产业新兴固废循环利用“最后一公里” [J]. *中华环境*, 2022 (11): 26–28.
Luo J C. Open up the “last mile” of emerging solid waste recycling in clean energy industry [J]. *China Environment*, 2022 (11): 26–28.
- [49] 王亚韡, 张秋瑞, 于南洋, 等. 新污染物 [J]. *化学进展*, 2024, 36(11): 1607–1784.
Wang Y W, Zhang Q R, Yu N Y, et al. Emerging pollutants [J]. *Progress in Chemistry*, 2024, 36(11): 1607–1784.
- [50] Wu S Y, Wang L P, Schlenk D, et al. Machine learning-based toxicological modeling for screening environmental obesogens [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(41): 18133–18144.
- [51] Gao P. Chasing “emerging” contaminants: An endless journey toward environmental health [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(4): 1790–1792.
- [52] Dey T, Trasande L, Altman R, et al. Global plastic treaty should address chemicals [J]. *Science*, 2022, 378(6622): 841–842.
- [53] 胡俊杰, 赵静, 葛海虹, 等. 美国替代品评估方法及其对我国新污染物治理的启示 [J]. *生态毒理学报*, 2023, 18(6): 68–78.
Hu J J, Zhao J, Ge H H, et al. Chemical alternatives assessment in the United States and its implications for new pollutants control in China [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2023, 18(6): 68–78.