

新污染物的前沿治理及预警技术的进展与展望

沈双

南通市海门生态环境监测站

DOI:10.12238/eep.v8i5.2707

[摘要] 新污染物因其生物毒性、环境持久性及生物累积性等特性,已成为全球环境健康领域的研究热点。本文系统综述了新污染物治理的前沿技术,包括高级氧化技术、基因编辑驱动的生物修复技术、机器学习优化的吸附材料技术、微气泡氧化技术及智能监测调控技术;总结了基于生物标志物、模型预测及环境监测网络集成的预警技术体系。最后,分析了当前研究存在的挑战,并展望了未来跨介质协同监测、量子计算与深度学习融合等发展方向,为新污染物的科学管控提供理论与技术参考。

[关键词] 新污染物; 前沿技术; 预警技术

中图分类号: V271.4+7 文献标识码: A

Progress and Prospect of Cutting-Edge Treatment and Early Warning Technologies for Emerging Pollutants

Shuang Shen

Nantong Haimen Ecological Environment Monitoring Station

[Abstract] Emerging pollutants have become a research hotspot in the global field of environmental health due to their characteristics such as biological toxicity, environmental persistence, and bioaccumulation. This paper systematically reviews the cutting-edge technologies for the treatment of emerging pollutants, including advanced oxidation technologies, gene-editing-driven bioremediation technologies, machine learning-optimized adsorbent material technologies, microbubble oxidation technologies, and intelligent monitoring and regulation technologies. It also summarizes the early warning technology systems based on biomarkers, model prediction, and the integration of environmental monitoring networks. Finally, it analyzes the challenges existing in current research and looks forward to future development directions such as cross-media collaborative monitoring and the integration of quantum computing with deep learning, providing theoretical and technical references for the scientific management and control of emerging pollutants.

[Key words] Emerging contaminants; Toxic effects; Early warning technologies

引言

新污染物是指具有生物毒性、环境持久性和生物累积性,且尚未被纳入常规环境管理体系的化学物质,包括全氟和多氟烷基化合物(PFASs)、内分泌干扰物、抗生素、微塑料等^[1]。近年来,研究证实新污染物已广泛存在于海水、土壤/沉积物、地表水和饮用水等多种环境介质中^{[2]-[3]}。与传统污染物相比,新污染物具有三大核心特征:一是来源广泛性,涉及工业生产、农业活动、日常生活等多个领域;二是毒性隐蔽性,低浓度长期暴露可能导致生物体慢性中毒、基因损伤甚至种群衰退^[4];三是治理复杂性,其迁移转化路径复杂,传统物理化学或生物方法难以实现高效去除。目前,新污染物的环境行为机制、高效治理技术及精准监控体系仍存在诸多科学问题亟待解决。

本文基于国内外最新研究成果,从治理技术、识别筛查、预警体系三个维度进行系统综述,旨在为新污染物的环境风险管理及精准监控体系仍存在诸多科学问题亟待解决。

控及相关研究提供理论支撑与技术参考。

1 新污染物治理前沿技术

1.1 高级氧化技术。高级氧化技术通过产生具有强氧化性的活性物种(如·OH、O₂·-)降解污染物,是治理难降解新污染物的核心技术之一。传统光催化氧化技术依赖光源驱动,在黑暗环境或复杂水体中效率受限,而新型非光介导高级氧化技术实现了突破。

徐贺等提出了一种将过氧乙酸(PAA)与碳催化剂相结合的方法,通过从富电子酚类物质中提取电子实现高效降解^[5]。其主要降解机制包括羟基自由基(·OH)攻击和电子转移,这种结合自由基与非自由基的混合机制能在1小时内完全去除污染物(如20 μM双酚A),并在五次循环后仍保持80%的高去除率,展现出优异的可重复使用性。该方法有望突破碳基高级氧化工艺稳定性差的瓶颈。

Azam Seifi等人研究了层状双氢氧化物(CuFeLa LDH)的石墨烯毡(GF)纳米电极,构建了光-电催化协同降解利福平体

系^[6]。该体系采用电泳沉积法将合成的CuFeLa LDH负载于GF基底上,在pH值为6和8的条件下,CuFeLa LDH@GF阴极的光电催化体系对利福平的降解效率分别达到79.4%和65.7%。

1.2 生物修复技术: 基因编辑驱动的功能菌株革新。生物修复技术利用微生物的代谢作用降解污染物,具有成本低、环境友好等优势,但其核心瓶颈在于天然微生物对新污染物的降解效率低、底物特异性差。合成生物学与基因编辑技术的结合,为构建高效功能菌株提供了新途径。

上海交通大学唐鸿志团队与中国科学院戴俊彪团队合作,成功建立了基于需钠弧菌(*Vibrio natriegens*)Vmax的工程化污染物降解底盘体系,构建出工程菌株VCOD-15,实现了高盐环境下复合有机污染物的高效降解^[7]。该菌株可在氯碱厂、炼油厂等工业废水样本中降解二苯、酚、萘、二苯并呋喃及甲苯等5种污染物(覆盖单环至多环化合物),完成了从代谢通路设计到实际废水处理应用的全流程验证,为石化、氯碱等高盐废水处理、海上石油泄漏、微塑料污染等全球性挑战提供了生物解决方案。

1.3 吸附材料技术: 机器学习优化的高效吸附体系。吸附法因操作简便、适用性广,被广泛用于新污染物的富集去除,其核心在于高性能吸附材料的研发。传统吸附材料(如活性炭)存在容量低、选择性差等问题,而新型吸附材料结合高通量实验与机器学习技术,实现了性能的精准调控。

储玉婷、戴勇等人研究合成了苄基二甲基十六烷基氯化铵(HDBAC)改性蒙脱土(H-Mt-1.6),并将其用于吸附双氯芬酸钠(DCF)和布洛芬(IBU)^[8]。研究表明当HDBAC的最佳投加量为1.6倍阳离子交换容量(CEC)时,吸附效果最佳。H-Mt-1.6对DCF和IBU的吸附容量分别为125.55mg/g和81.64mg/g,而钙基蒙脱土(Ca-Mt)对二者的吸附容量分别为54.02mg/g和13.14mg/g,可见H-Mt-1.6的吸附效果优于Ca-Mt。

塞阿腊联邦大学的Erica Porto Fernandes团队以热电厂水处理污泥为原料,经十二烷基三甲基氯化铵(DTAC)改性制备化学改性残留物(CMR),用于去除水溶液中布洛芬、双氯芬酸钠和氯沙坦钾^[9]。研究证明,经DTAC改性后,CMR的去除效率得到提升,对目标药品的去除率均超过70%。研究表明CMR是一种高效低成本的新型吸附剂,既能实现药物污染物去除,又可促进废弃物资源化利用,具有显著的环境效益。

1.4 微气泡氧化技术: 多尺度传质强化的高效降解系统。针对精细化工废水中高浓度新污染物(如含氟农药、染料中间体)的降解难题,微气泡氧化技术通过强化臭氧传质与反应效率,实现了低成本治理。

初里冰等对比微米气泡系统(平均粒径约58μm)与普通鼓泡系统的氧化效能,以活性艳蓝KNR为目标物的实验显示,微米气泡系统的脱色速率和矿化率均显著高于鼓泡系统,且相同脱色速率下TOC去除率更高,证实其可同时强化臭氧传质速度与氧化能力^[10]。

董杰、姚嘉康等人研究了填充式鼓泡反应器中臭氧微气泡工艺降解甲基橙的性能^[11]。结果显示其最高脱色效率达96.04%,饱和气含率、臭氧传质系数及脱色速率常数均优于未填充臭氧

微气泡工艺和臭氧毫米气泡工艺;最佳操作条件下(初始浓度30mg/L, pH为3, 循环液流量75L/h, 臭氧投加0.56mg/L), 120min内脱色效率达99.28%,为高浓度染料废水治理提供了参数支撑。

1.5 智能监测与调控技术: 物联网与AI驱动的精准治理。新污染物的隐蔽性和低浓度特性(ng/L-μg/L级)对治理过程的实时监测提出高要求,智能监测技术通过“感知-分析-调控”闭环,实现治理系统的精准化运行。基于机器学习(ML)的人工神经网络(ANN)为物联网(IoT)智能污染监测系统提供了高效解决方案,可克服传统监测系统的局限性,为前瞻性污染控制策略奠定基础。

Rezan Bakır等探索机器学习算法在预测绿色合成光催化剂对吡虫啉(PR)降解效率中的应用^[12],通过岭回归、随机森林、梯度提升、极端梯度提升(XGBoost)及袋装回归器等模型筛选,确定了不同条件下高精度、高可靠的预测模型,证实环保合成方法与先进机器学习模型的结合可显著优化光催化过程,助力实际环境修复。

中国农业科学院程勘团队成功研发出全球首套面源污染智能监测系统,并制定《农业面源污染智能监测技术规范》,首次实现对流动水体中高风险抗生素、农药残留等新发污染物的实时、在线、动态监测。该系统整合了纳米复合材料传感器、AI算法与物联网技术。该系统在太湖流域布设20个监测点,通过LoRa无线传输技术构建物联网网络,连续180天无人值守运行,预警准确率达92%,运维成本降低70%,指导周边农田精准控药,使面源污染排放减少35%^[13]。

2 新污染物的预警技术

2.1 基于生物标志物的预警技术: (1) 氧化应激指标。针对微塑料暴露,可通过监测水体中鲫鱼、鲤鱼等鱼类肝脏丙二醛(MDA)、谷胱甘肽(GSH)、过氧化氢酶(CAT)等含量作为氧化应激生物标志物。Serdar Yedier等人^[14]研究结果表明微塑料暴露组的丙二醛(MDA)和谷胱甘肽(GSH)水平升高,而总蛋白含量(TPC)和过氧化氢酶(CAT)水平则随浓度和暴露时间的增加而降低,与对照组差异显著($P<0.05$)。因此,MDA、GSH、CAT等指标含量的变化可作为早期预警信号。(2) 基因表达分析。利用实时荧光定量PCR(qPCR)技术检测鳃组织中热休克蛋白基因(HSP70)表达量。Rangaswamy, B. 研究指出HSP70是一种天然生物标志物,其遗传变异性和平适应性生存作用突出,可作为微塑料污染的分子生物标志物,通过异常表达反映生物体受到的环境胁迫,实现潜在危害预警。

2.2 模型预测预警技术: (1) 水质模型预测。运用水质模型,如QUAL2K模型,结合新污染物的迁移转化规律和环境参数,对水体中污染物浓度变化进行预测。通过输入水流速度、水温、pH值以及污染物初始浓度等参数,模型模拟污染物在水体中的扩散、降解过程,预测未来一段时间内污染物的浓度分布,为水环境质量预警提供依据。(2) 人工智能预警模型。采用长短期记忆神经网络(LSTM)构建预警模型,用于预测水体中污染物浓度变化。以某污染物前7天的浓度、水温、pH、流量等作为输入变量,该模型在14天短期预测中误差<10%。该模型能够有效处理时间序列数据,捕捉污染物浓度变化的复杂规律,为污水处理厂等提供提前3天的负荷预警,以便及时采取应对措施。

2.3 环境监测网络与预警系统集成。(1) 监测网络布局。构建覆盖不同环境介质(水、气、土)的监测网络,在重点区域(如工业聚集区、饮用水源地、农业面源污染高发区)合理设置监测站点。例如,通过网格化布点,全面监测新污染物的空间分布。利用自动监测设备、移动监测平台等多种手段,实现对新污染物的实时、连续监测,获取全面准确的环境数据。(2) 预警系统运行机制。将监测数据实时传输至预警系统,系统运用数据分析算法和预警模型对数据进行处理分析。当监测数据超过预设的预警阈值时,系统自动触发预警机制,通过短信、邮件、平台推送等多种方式向相关管理部门和人员发出预警信息,及时启动应急响应措施,降低新污染物的环境风险。

3 结论与展望

3.1 研究现状总结。当前,新污染物的治理、识别、筛查技术取得了显著进展,从传统的实验室分析向现场快速检测、大数据驱动的智能筛查转变,提高了检测效率和准确性。对新污染物毒性效应的研究也从单一物质的毒性机制深入到复合污染的生态毒理效应层面,为风险评估提供了更全面的理论依据。预警技术通过生物标志物、模型预测与监测网络的集成,初步构建了多维度的预警体系,在实际应用中发挥了重要的风险预警作用。

3.2 存在的问题与挑战。尽管取得了一定成果,但仍面临诸多挑战。在识别筛查方面,对于复杂环境介质中痕量、未知新污染物的检测灵敏度和特异性有待进一步提高,部分新型污染物难以匹配现有数据库,识别率不足30%。预警技术层面,不同监测标准和方法在跨介质监测中的兼容性问题突出,预警模型的稳定性和普适性需要加强,且缺乏长期的实际运行验证数据。

3.3 未来研究方向。未来需重点发展跨介质协同监测技术,研发集水、气、土检测功能于一体的集成设备,实现新污染物在不同介质中的同步监测;借助量子计算、深度学习等前沿技术优化预警算法,提升复杂体系下浓度预测与风险预警精度;加快完善新污染物转化产物的监测方法与阈值标准,填补标准空白。通过多学科交叉融合,加强基础研究与应用实践结合,推动新污染物监控预警从被动响应向主动防控转变,保障生态环境安全与人类健康。

[参考文献]

- [1] 生态环境部.新污染物治理行动方案[Z].国办发(2022)15号,2022.
- [2] Susan D.Richardson,Susana Y.Kimura. Emerging environmental contaminants:Challenges facing our next generation and potential engineering solutions[J].Environmental Technology & Innovation,2017,8:40–56.
- [3] Liang Tang,Aozhou Li,Minghao Kong,et al. Effects of wavelength on the treatment of contaminants of emerging concern by UV-assisted homogeneous advanced oxidation/reduction processes[J].Science of The Total Environment,2023,899:165625.
- [4] Chongyuan Ren,Rui Bai,Wei Chen,et al.Advances in Nano material–microbe Coupling System for Removal of Emerging Contaminants[J].Chemical Research in Chinese Universities,2023,39:389–394.
- [5] Miao Shi,Bin Zhang,Xiaoyu Yan,et al.N-doped carbon nanotubes as metal-free catalysts for PAA activation to degrade emerging pollutants: Exploration of reaction mechanisms and prediction of active sites.[J]Environmental Research,2025,282:121998.
- [6] Azam Seifi, Ramazan Keyikoglu, Okan Karatas,et al.Nano architecturing of CuFeLa layered double hydroxide on graphite felt for photo-electrocatalytic degradation of emerging pollutants[J].Journal of Industrial and Engineering Chemistry,2025,147:598–607.
- [7] Cong Su,Haotian Cui,Weiwei Wang,et al. Bioremediation of complex organic pollutants by engineered Vibrio natriegens[J].Nature,2025,642:1024–1033.
- [8] Yuting Chu,Yong Dai,Mingzhu Xia,et al.The enhanced adsorption of diclofenac sodium (DCF)and ibuprofen (IBU)on modified montmorillonite with benzylidimethylhexadecyl ammonium chloride (HDBAC)[J].Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2024,681:132764.
- [9] Erica Porto Fernandes,Lucas dos Santos Lima,José Fernando de Macedo,et al. Nanoarchitecturing of CuFeLa layered double hydroxide on graphite felt for photo-electrocatalytic degradation of emerging pollutants[J].Environmental Research,2025,285:122259.
- [10] 初里冰,邢新会,于安峰等.微米气泡强化臭氧氧化的作用机理研究[J].环境化学,2007,26(5):622–625.
- [11] Jie Dong,Jiakang Yao,Jinliang Tao,et al. Degradation of Methyl Orange by ozone microbubble process with packing in the bubble column reactor[J].Environmental Technology,2023,44(17):2512–2524.
- [12] Rezan Bakır,Ceren Orak, Sabit Horoz. Enhancing photo catalytic degradation of hazardous pollutants with green-synthesized catalysts:A machine learning approach[J].Journal of Environmental Management,2025,385:125695.
- [13] 中国农业科学院.我国首创面源污染智能监测系统实现水体污染物动态追踪[EB/OL].[引用日期:2025-04-02].<https://www.caas.net.cn/xwzx/mtxw/80a183115e4c492a8460df248b66b36.htm>.
- [14] Serdar Yedier,Seda Kontaş Yalçınkaya,Derya Bostan, et al. Exposure to polypropylene microplastics via diet and water induces oxidative stress in Cyprinus carpio[J].Aquat Toxicol,2023,259:106540.

作者简介:

沈双(1989--),女,汉族,江苏南通人,硕士研究生,学位:工程硕士,单位:南通市海门生态环境监测站,院校:同济大学,职称:工程师,研究领域:环境污染防治与监测。