

目次

2013~2020年天津市PM_{2.5}-O₃污染变化趋势和影响因素分析 肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)

2015~2020年济南市O₃污染趋势及敏感性变化分析 孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)

南京市南部地区O₃污染特征、生成敏感性及传输影响分析 郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)

天津市“十三五”期间O₃污染特征和驱动因子 李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)

基于随机森林的南京市PM_{2.5}和O₃对减排的响应 尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)

基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化 吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓桐, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)

污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响 钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)

2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析 郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)

滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源 孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)

重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价 谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 朱丹尼, 王志恒 (4304)

衡水市桃城区浅层地下水咸化成因 何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)

吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价 白凡, 周金龙, 周殿竹, 韩双宝, 孙英 (4325)

金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性 丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇斌, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)

白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征 程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)

基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制 朱奕, 叶建锋, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)

甾体激素在污水处理厂中的赋存特征和行为归趋 刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)

博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价 郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)

太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价 吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)

雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价 郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)

基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析 段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)

锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价 余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)

老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价 王莹, 董爱俊, 杨建锋, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)

畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估 丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新宪, 曾巧云 (4440)

地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究 简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)

微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响 马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)

施加Fe₃O₄/桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响 阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)

生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制 张丽, 李如霞, 何玉玺, 姚彦坡, 林大松 (4479)

不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响 李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)

椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响 侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)

生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响 冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)

改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应 陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)

改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响 由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)

化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险 赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)

污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失 张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)

化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响 谢军, 王子芳, 王莹燕, 熊子怡, 高明 (4565)

黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测 刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)

微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响 刘月, 杨树青, 张万锋, 姜帅 (4585)

高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析 姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)

土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响 李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)

中国省域碳达峰路径与政策 苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)

基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制 钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 郭娜, 封强, 傅泽强 (4637)

不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析 刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘铮, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)

中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)

陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟 古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)

气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响 李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)

降水改变下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸 王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)

水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响 秦纪法, 张佳彭, 桑奕, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)

中国省域土壤重金属空间分布特征及分区管控对策 石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)

壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议 洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)

微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展 张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圃, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)

生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展 周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)

铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展 魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)

畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术分析 安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)

《环境科学》征订启事(4230) 《环境科学》征稿简则(4303) 信息(4506, 4678, 4741)

壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议

洪亚军^{1,2}, 冯承莲^{2*}, 徐大勇¹, 吴丰昌²

(1. 安徽工程大学化学与环境工程学院, 芜湖 241000; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要:近年来,我国大气环境、水环境和土壤环境质量得到一定的改善,“碧水蓝天”已经成为常态。但随着持久性有机污染物、内分泌干扰物、抗生素和微塑料等新污染物在环境中不断被检出,新污染物正逐步受到广泛的关注,壬基酚作为一种典型的内分泌干扰物也备受研究人员的关注。系统地概括了我国水体中壬基酚的环境行为和暴露水平,并基于风险商法和联合概率曲线法对壬基酚可能造成的生态风险进行了评估。结果表明,壬基酚对水生生物的毒性效应主要包括急性毒性、生长发育毒性、雌激素效应和繁殖毒性;壬基酚在我国主要流域水体中普遍存在,其浓度平均值在 $60 \sim 1\,000 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 浓度最高值可达 $4\,628 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$; 基于风险商法和联合概率曲线法的风险评估结果表明,壬基酚对我国主要流域里的水生生物均存在一定的风险。最后,总结了目前比较常用的壬基酚处理处置和风险管控技术,比较了国际上内分泌干扰物的监管方法,针对我国在新污染物环境管理中存在的问题,提出了针对性政策建议,研究结果可以为我国新污染物管理和管控提供参考。

关键词:新污染物; 内分泌干扰物(EDCs); 壬基酚(NP); 环境行为; 生态风险评估; 环境管理

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4717-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202209256

Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants

HONG Ya-jun^{1,2}, FENG Cheng-lian^{2*}, XU Da-yong¹, WU Feng-chang²

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In recent years, China's air environment, water environment, and soil environmental quality have been improved, and a “clear water blue sky” has become a normal state. However, as persistent organic pollutants, endocrine-disrupting chemicals, antibiotics, microplastics, and other emerging contaminants are continuously detected in the environment, these emerging contaminants have gradually been attracting wide attention. Nonylphenol, as a typical endocrine disrupting chemical, has also attracted the attention of researchers. The environmental behaviors and exposure levels of nonylphenol in Chinese water bodies were summarized systematically, and the ecological risks caused by nonylphenol were evaluated based on the risk quotient method and joint probability curve method. The results showed that the toxic effects of nonylphenol on aquatic organisms mainly included acute toxicity, growth and development toxicity, and estrogenic effect and reproductive toxicity. Nonylphenol was commonly found in the water bodies of major drainage areas in China, and the average concentration of nonylphenol ranged from 60 to $1\,000 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, with the highest concentration being as high as $4\,628 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. The results of risk assessment based on the risk quotient method and joint probability curve method showed that nonylphenol had certain risks to aquatic life in the major basins of China. Finally, the commonly used nonylphenol treatment, disposal, and risk management and control technologies were summarized, and the international supervision methods of endocrine-disrupting chemicals were compared. Aiming at addressing the problems existing in China's environmental management, targeted policy suggestions were put forward. The research results can provide reference for the management and control of emerging contaminants in China.

Key words: emerging contaminants; endocrine disrupting chemicals (EDCs); nonylphenol (NP); environmental behavior; ecological risk assessment; environmental management

新污染物是指由人类活动造成的、目前已明确存在、但尚无法律法规和标准予以规定或规定不完善、危害生活和生态环境的所有在生产建设或者其他活动中产生的污染物^[1,2]。近年来,我国大气环境、水环境和土壤环境质量得到一定的改善,“碧水蓝天”已经成为常态。但随着持久性有机污染物、内分泌干扰物(endocrine disrupting chemicals, EDCs)、抗生素和微塑料等新污染物在环境中不断被检出,新污染物正逐步受到广泛的关注^[3~8]。2017年12月27日,为落实国务院《水污染防治行动计划》,环境保护部邀请相关部门制定了《优先控制化学品名

录(第一批)》,壬基酚(nonylphenol, NP)就位于名录之中。2020年10月,《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》对“重视新污染物治理”提出了有关要求。2020年10月29日《中共中央关于制定国民经

收稿日期: 2022-09-26; 修订日期: 2022-11-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200104); 中国环境科学研究院国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室开放基金项目(2022KFYB02); 安徽工程大学校级引进人才科研启动基金项目(2022YQQ082)

作者简介: 洪亚军(1990~),男,博士,讲师,主要研究方向为水质基准方法学、生态风险评估和环境生态修复, E-mail: hongyajun@mail.ahpu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: fengchenglian@163.com

济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》指出要推动绿色发展,促进人与自然和谐共生,持续改善环境质量,重视新污染物治理. 2020年10月30日,为贯彻落实《中共中央 国务院关于全面加强生态环境保护 坚决打好污染防治攻坚战的意见》,生态环境部会同相关部门制定了《优先控制化学品名录(第二批)》. 2021年11月2日,《中共中央 国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》,就加强新污染物治理工作做出了重要部署,同时要求到2025年,新污染物治理能力明显增强^[9]. NP是一种典型的EDCs类新污染物,在过去几十年中引起了科学家极大的关注^[10-13].

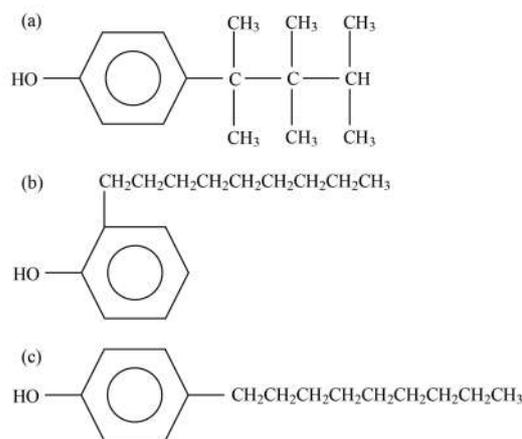
NP在环境中广泛存在,在生物群落中具有生物累积性,对生物体有毒性^[14-19]. NP在世界各地的生活污水、污水处理厂、地表水、地下水和沉积物中均以 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 或 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 以上的水平存在^[20-23]. 有研究表明,饮用NP污染的水可能会导致人类频繁发生肿瘤、肥胖和生殖功能受损等疾病^[24,25]. 此外,已证实NP的环境暴露水平是影响生态系统结构变化、物种组成和数量的最显著因素之一^[26,27]. 有研究表明,NP通过雌激素、雄激素、孕酮等核激素受体在体内和体外产生多种毒性作用,如急性毒性、生长发育毒性、雌激素毒性和生殖毒性等^[28]. 有研究还发现了一些其他机制,如干扰对膜受体和类固醇物质合成途径中相关酶的功能^[29,30]. NP能诱导雄性肝脏产生雌性特有的卵黄前体卵黄蛋白原,并与睾丸卵有关,降低生物的生殖力和生育能力^[28]. NP和NP单聚氧乙酸酯是新污染物,以上化合物已被欧盟确定为《水框架指令》和《关于污泥的工作文件》(第三稿)^[31]里的污染物. 在日本,NP被列为水污染环境质量标准的一个重要的参数. 因此,许多国家都限制了这些物质的使用. 然而,由于NP作为重要的化工产品,其使用量大,一些国家仍坚持使用.

在国际上,很多国家和机构如美国、欧盟、加拿大、世界卫生组织和日本等都已经制定了NP的水质基准或标准来管控和限制NP的使用,但是在中国,目前还没有制定NP的基准或标准,因此也没有相应的管控措施来管理这类污染物. 本文系统地概括总结了我国水体中NP的环境行为和暴露水平,并基于风险商(risk quotient, RQ)法和联合概率曲线(joint probability curves, JPCs)法对NP造成的生态风险进行了评估,最后总结了目前比较常用的NP处理处置和风险管控技术,比较了国际上监管EDCs的方法,针对我国在新污染物环境管理中存在的问题,提出针对性政策建议,以期为我国新污染物管理提供参考.

1 壬基酚概述

NP是石油和煤焦油原油精炼过程中的循环中间体所产生的,它是由苯酚与混合异构壬烯在酸性催化剂作用下通过烷基化而制成^[32]. NP除了作为一种与邻苯二甲酸二异丁酯的混合物用于为燃油上色以达到增加税收的目的,或与酰化作用产生脞作为提取铜的一种试剂外,几乎没有直接的用途. 大多数NP被用作其他化学品生产的中间体. NP乙氧基型的非离子表面活性剂是在碱性催化剂存在下,与环氧乙烷缩合,将NP醚化而得到的. 非离子表面活性剂被用作油溶性洗涤剂 and 乳化剂,可以磺化或磷酸化来生产阴离子洗涤剂、润滑剂、抗静电剂、高性能织物洗涤剂、农业乳化剂、橡胶制造抗氧化剂和润滑油添加剂^[32].

NP是一种持久性有机污染物,其分子式为 $\text{C}_{15}\text{H}_{24}\text{O}$,相对分子量为220.3. NP的3种主要化学结构式如图1所示. 在常温下,NP是一种无色或浅黄色黏稠状液体. NP微溶于水,25℃时的溶解度仅有 $1.57\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但NP易溶于多种有机溶剂,例如丙酮、甲醇、正己烷和二氯甲烷等. 在标准状态下,NP的熔点约为42℃,沸点为298~303℃,闪点184.2℃,25℃时的饱和蒸气压为0.0207 Pa. NP的正辛醇-水分配系数($\lg K_{ow}$)为4.48^[33]. NP不易被生物降解,因此易于在生物体内蓄积^[34].



(a) 支链对位壬基酚, (b) 支链邻位壬基酚, (c) 支链对位壬基酚

图1 壬基酚的3种主要分子结构式

Fig. 1 Three main molecular structures of nonylphenol

自然界中本身并不存在NP,环境中检测出来的NP完全是由于人类的各种生产和生活活动产生的. 从1940年,NP首次被制造和生产出来^[35],到目前为止,NP的生产和应用仍在继续. 美国每年生产NP约154 200 t,而欧洲、日本和中国的NP年产量分别为73 500、16 500和16 000 t^[31]. 有研究表明,近些年来,印度和中国是NP的主要生产国^[35]. 以NP为原

料合成的壬基酚聚氧乙烯醚 (nonylphenol ethoxylates, NPEO), 是世界第二大非离子表面活性剂, 被广泛用于工业 (纸浆和造纸、纺织、农业、金属、塑料、炼油)、机构、商业和家庭应用中的洗涤剂、乳化剂、润湿和分散剂、抗静电剂、反乳化剂和增溶剂^[36], 在全球年产量已达 60 万 t, 其中中国的年消费量占 1/6. 由于尚未找到更经济、更安全的替代品, NPEO 的年使用量仍呈上升趋势^[37]. 根据中国石化行业的发展和趋势评估, 我国 NP 的产能将进一步扩大, 而 NPEO 作为产品的重要组成部分, 以各种方式进入水体后, 在各种环境因素的共同作用下, 容易降解为化学结构更加稳定的 NP, 该过程中在 NP 环境来源中占 80%^[38]. 从理论上讲, NP 有 100 多种结构异构体, 其中 4-NP 约占 90%, NP 是典型的疏水性有机污染物 ($\lg K_{ow}$ 为 4.48), 具有很强的亲脂性, 不易溶于水, 而且 NP 化学结构稳定, 在自然环境中降解缓慢, 半衰期长达 46.2 ~ 69.3 d, 它在常规的污水处理厂中不易被有效地降解, 污水处理厂一次和二次排水中 NP 异构体的降解情况没有明显差异, 这也是为何有些 NP 不能被污水处理厂有效降解的重要原因^[39]. NP 主要来源于 NPEOs 的降解, 由于快速的城市化、现代化和工业化发展, 在过去几十年中, 大量的 NP 进入水源, 如河流、湖泊和水库^[40]. 世界上制造的约 60% 的 NP 及其衍生物被引入水源^[40]. NP 是一种半挥发性化合物, 可以通过各种排放源缓慢地蒸发到大气中, 如交通排放、工业废气、农业残留物和废物焚烧、城市供暖、废水处理等, 而一旦进入大气, 就会通过干湿沉降返回地面和水生系统, 对包括鱼类在内的水生生物造成损害; NP 进入水体的主要途径是污水处理厂, 其他 NP 来源包括用生物固体或粪便修复的土地、农田中的杀虫剂和肥料的径流以及牲畜饲养作业^[40].

2 壬基酚对生物的毒性效应和致毒机制

环境中存在着各种人工合成的工业化学品, 已有研究表明了许多化学物可以干扰激素正常调节的生理过程, 在低至 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度水平即具有内分泌干扰性, 从而对动物和人类的生长发育和生殖功能产生不良影响, 主要的毒性作用包括致毒、致癌、基因突变、皮肤过敏、雌性化、生物富集、环境污染和内分泌干扰效应等^[40,41]. NP 对水生生物的毒性效应主要包括急性毒性、生长发育毒性、雌激素效应和繁殖毒性效应^[40].

2.1 壬基酚对水生生物的毒性效应

有研究表明, 不同种类生物对 NP 的敏感性有较大差异. 用于 NP 急性毒性效应研究的水生生物、

两栖类主要为鱼类或非洲爪蟾 (*Xenopus laevis*), 而且大部分研究对象为生物的幼体阶段. 鲮鱼 (*Hemiculter leucisculus*) 幼体对 NP 的耐受性较强, 24 h 半数致死浓度 (LC_{50}) 为 $310\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 而对 NP 耐受性较弱的是牙鲮 (*Paralichthys olivaceus*) 48 h 幼体, NP 对其 24 h 的 LC_{50} 为 $17\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 总的来说, 淡水生物的平均 24 h LC_{50} 高于海水生物物种^[32].

不同发育阶段的胚胎对环境污染物的敏感度具有较大差异. NP 可能会干扰机体的内分泌系统, 阻碍生物体的生长和发育, 表现为体型变短或体重变轻等方式. NP 会对鱼类和两栖类动物的胚胎发育造成不良的毒性影响. 有研究表明, NP 能引起虹鳟鱼 (*Oncorhynchus mykiss*) 表皮细胞及细胞中的高尔基体空泡化^[42], 能诱导欧洲舌齿鲈 (*Dicentrarchus labrax*) 肝脏中的细胞色素 P450 (CYP450) 酶含量上升, 并能导致海鲈 (*Lateolabrax japonicus*) 体内红细胞的核畸形率增加^[43]. NP 还能导致生殖细胞凋亡, 有研究表明, NP 能够诱导雄性日本青鲈鱼 (*Oryzias latipes*) 精巢内的精母细胞、支持细胞以及间质细胞的凋亡^[44]. 另外, 有研究发现 $\rho(\text{NP})$ 为 $202\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 将显著降低大型溞 (*Daphnia magna*) 的繁殖力及幼体的孵化率, 研究还发现在虹鳟鱼 (*O. mykiss*) 的受精过程中, 对虹鳟鱼 (*O. mykiss*) 精子的形态并无影响, 但是却显著降低了虹鳟鱼 (*O. mykiss*) 的精子存活率、受精能力以及精子的运动速度, 但其机制尚不明确^[45].

由于 NP 与动物的雌激素有相似的化学结构, 因此它能干扰生物体内的激素调节, 显示出雌激素效应. NP 对水生生物的生殖细胞、性分化、性腺组织结构和与生殖有关的内分泌系统等具有雌激素作用和生殖毒性作用^[46]. 在水生生物中, 鱼类是 NP 雌激素效应的主要研究模式生物. VTG 是雌性脊椎动物肝脏中产生的一种蛋白, 雄性脊椎动物分泌的量相对于雌性动物来说很少, 因此 VTG 检测是一种常用的雌激素效应检测的常用方法. 有研究表明, $\rho(\text{NP})$ 为 $100\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 暴露 7 d 后将显著增加虹鳟鱼 (*O. mykiss*) 体内的 VTG 含量^[47], 而仅 $\rho(\text{NP})$ 为 $14.14\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 在 72 h 内就会显著增加 VTG 的 mRNA 的转录^[48]. Yu 等^[49] 研究发现, NP 可以诱导花斑溪鲈 (*Rivulus marmoratus*) 性腺中的谷胱甘肽 S-转移酶-Mu 基因的下调. 此外, 在暴露于 $\rho(\text{NP})$ 为 $1\sim 10\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的情况下, 荧光素酶检测显示摇蚊 (*Chironomus tentans*) 的雌激素相关受体基因被上调^[50].

2.2 壬基酚对人类和动物的毒性效应

NP 对人类和动物也会产生诸多不利的影响和毒性. 一般来说, 接触 NP 会产生毒害和疾病风险. 癌症是由于接触 NP 而导致的主要疾病之一. 最近的一项

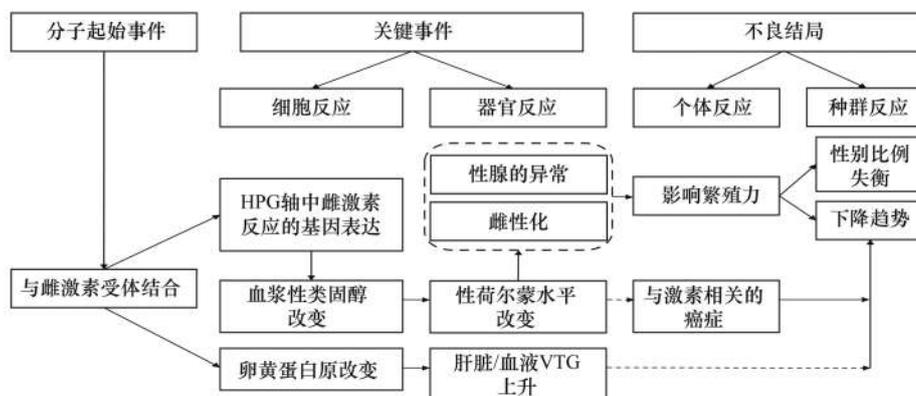
研究重点是调查环境中的 NP 暴露与癌症进展风险之间的关系^[51]. 根据报告的研究结果,在预定的实验中,NP 强烈诱导乳腺癌的发生,而且发现接触 NP 会引发不同的癌症,如卵巢癌、子宫癌、垂体癌和睾丸癌与 NP 之间有正相关关系. 由于 NP 的疏水性,它可以在环境中残留和积累,随后引起严重的疾病. NP 已被发现是一种 EDCs,影响雌性激素并导致乳腺肿瘤^[52],它可以模拟脊椎动物的天然荷尔蒙的作用,从而干扰生物体正常的内分泌功能^[53]. $\rho(\text{NP})$ 在低至 $8.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可导致生物的雌性化,降低雄性的生育能力,以及幼体的存活率^[31,54]. 暴露于 NP 也会导致长期的毒性效应. NP 对人类和动物的其他毒性效应目前报道的还不多,需要进一步的研究.

2.3 壬基酚的致毒机制

不良结局途径(adverse outcome pathway, AOP)提供了一种创新的方法,主要从综合的毒性作用模式而不是单一的作用模式来分析污染物的潜在毒性效应,能准确了解其潜在的毒性机制,对准确评估其生态风险至关重要^[55]. 每个 AOP 都是由分子起始事件、关键事件和不良结果组成^[56]. EDCs 的 AOP 一般由其分子起始事件启动,如与雌激素受体结合,

它包括一个全面的关键事件机制链,最终影响到野生动物的生殖系统、性别比例,导致与激素相关的癌症、代谢紊乱,甚至免疫功能紊乱. 目前对 EDCs 的 AOP 机制研究还不是很完善,研究的比较成熟的是 NP 在水生动物中的 AOP 机制(如图 2),主要是通过与雌激素受体的结合,可对内分泌系统造成很大的不良影响,并在整个生物体内改变繁殖能力,从而对种群产生影响^[57,58].

根据慢性毒性数据是否与 AOP 中的关键事件和不良后果相关,将慢性毒性数据分为两类^[57]. 一类是与 AOP 相关的,包括遗传数据(如性腺中特定的 DNA 甲基化,生殖基因的表达,与下丘脑-垂体-性腺轴相关的细胞色素 CYP450 基因 *CYP19B*),生物化学数据(如雄性生物体内的 VTG 含量增加),生殖数据(如后代数/数量,受精率,卵巢中卵泡的发育阶段)和种群数据(如性别比). 另一类是与 AOP 无关的,包括死亡效应数据(如致死率、孵化百分比、年龄的变化、存活概率)、种群效应数据,特别是藻类(如生物量、丰度、种群增长率、叶绿素 a 浓度)、生长效应数据(如体重、体长)以及其他发育效应、遗传效应和酶效应.



实心箭头表示分子起始事件、关键事件和不良结果之间的机制联系已被充分研究,虚线箭头表示根据有限的不能完全解释的机制联系

图 2 壬基酚在水生动物中的 AOP 示意

Fig. 2 AOP of nonylphenol in aquatic animals

3 壬基酚的环境暴露浓度及其生态风险评估

3.1 壬基酚的环境暴露浓度

目前 NP 已在各类湖泊、河流、海洋、沉积物、污泥、土壤甚至在饮用水、食物以及空气被检测出来,而其中以水体环境污染最为严重. 虽然 2011 年 NP 被列入《中国严格限制进出口的有毒化学品目录》,但由于工业需要,NP 仍然被大量生产和使用,而且没有采取相应的措施来减少其使用量,导致一些水体的 NP 污染极为严重. 有研究表明武汉富营养湖泊的水体中 $\rho(\text{NP})$ 在 $1.94 \sim 32.85 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,钱塘江杭州段水体中 $\rho(\text{NP})$ 在 $7.31 \sim 9.77 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间. Lei

等^[59]研究表明,京津冀城市群河流、污水处理厂排放口和未处理的废水中 $\rho(\text{NP})$ 范围分别为 $73 \sim 255$ 、 $198 \sim 536$ 和 $468 \sim 918 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{NP})$ 平均值分别为 155 、 375 和 $654 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 以上水体中的 NP 污染程度已经相当严重,水体生物的安全性不容乐观. 通过文献检索得到 NP 在中国主要流域的浓度分布情况(如图 3 所示),并对流域中 NP 的浓度进行分析可得,我国主要流域水体中 $\rho(\text{NP})$ 的平均值为 $60 \sim 1000 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值可达 $4628 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.

3.2 壬基酚的水生态风险评估

3.2.1 基于风险商法的生态风险评估

RQ 法是用来评估生态风险的常用方法,以评

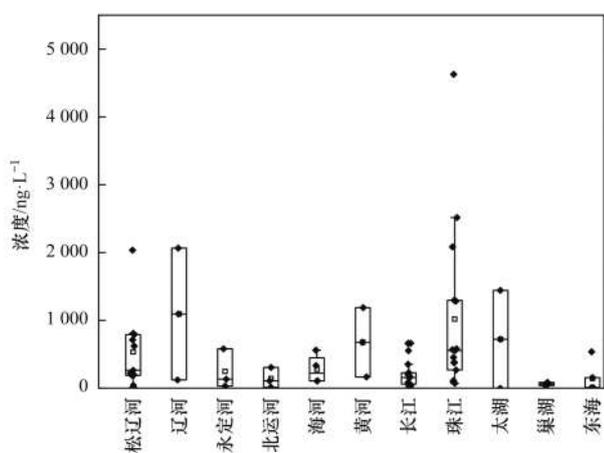


图3 中国主要流域内 NP 的浓度分布

Fig. 3 Concentration distribution of NP in major basins of China

估多种化合物在水生生态系统中的潜在风险^[60]. RQ 的计算方法是水体中单个化学品的实测环境浓度 (measured environment concentration, MEC) 除以预测无效应浓度 (predicted no-effect concentration, PNEC) 得到的 [公式(1)]. PNEC 一般是由物种敏感度分布法 (species sensitivity distribution, SSD) 模型推导得到的保护 95% 物质的危害浓度 (5% hazardous concentration, HC_5)^[61], 除以安全因子 (safety factor, SF) [公式(2)], SF 一般为 2 或 3^[62]. 一般来说, 如果 $RQ < 0.01$, 风险评估等级标准被认为无风险; 如果 $0.01 \leq RQ < 0.1$, 则为低风险; 如果 $0.1 \leq RQ < 1$, 则为中度风险; 如果 $RQ \geq 1$, 则为高风险^[59,63].

$$RQ = MEC/PNEC \quad (1)$$

$$PNEC = HC_5/SF \quad (2)$$

在前期的研究中已经推导了 NP 的淡水水质 PNEC 值, 为 $0.38 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[64]. 使用 RQ 法计算得到各流域水体中 NP 的 RQ 值如图 4 所示. 结果表明, 永定河、北运河、海河、长江、巢湖和东海的平均 RQ 值小于 1, 表明 NP 对水生生物没有高的生态风险, 而松辽河、辽河、黄河、珠江和太湖的平均 RQ 值大于 1, 表明 NP 对水生生物有一定的生态风险. 也有部分学者对 NP 的水质基准和风险评估开展了相关的研究, 如雷炳莉等^[65]对 NP 的水质基准进行了研究, 结果表明使用评估因子 (assessment factor, AF) 法对 3 种不同 CAS 号的 NP 得到的慢性基准值都比使用 SSD 法获得的基准值要低, 而且以繁殖效应为毒性终点得到的基准值基本上都小于以致死为毒性终点得到的基准值. 刘文萍等^[66]采用 RQ 法研究了北黄海辽宁段近岸水体中 NP 的污染情况, 结果表明 19 个水样中 NP 的 RQ 值为 0.05 ~ 2.25, 部分点位水体中 NP 存在一定的风险. 黄超^[67]通过调研太湖流域水体中 NP 的风险状况表明, RQ 为

0.006 ~ 0.691, 没有高风险. Chen 等^[68]利用黑头呆鱼 (*Pimephales promelas*) 和模糊网纹蚤 (*Ceriodaphnia dubia*) 的 LC_{50} 除以 AF (取 1000) 计算得到 PNEC, Liu 等^[69]使用剑尾鱼 (*Xiphophorus*) 的 LC_{50} 除以 AF (取 50) 得到 PNEC 值, 均基于 RQ 法分别对 NP 在珠江河口和长江南京段的生态风险进行了评价. Gao 等^[70]基于 SSD 法, 对我国沿海 10 个水域中的 NP 生态风险进行了评价, 结果表明, 淡水和海水中 NP 的 PNEC 分别为 $0.48 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.28 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 中国沿海海域 NP 的 RQ 值在 0.01 ~ 69.70 之间, 约 60% 的区域具有较高的生态风险, $RQ \geq 1$, 因此, NP 广泛存在于中国沿海水域, 对我国的水生生态系统构成各种风险.

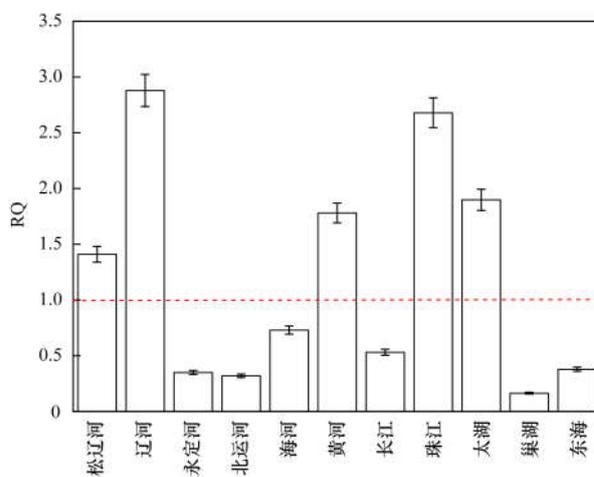
红色虚线表示 $RQ \geq 1$, 为高风险

图4 中国主要流域 NP 的 RQ 分布

Fig. 4 RQ distribution of NP in major basins of China

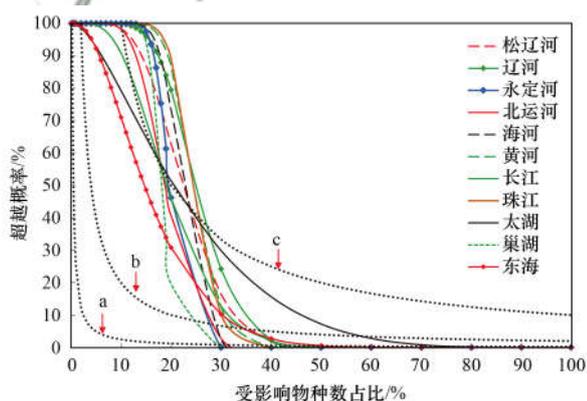
3.2.2 基于联合概率曲线法的生态风险评估

基于 RQ 的生态风险评估方法取决于 PNEC 的选择, PNEC 来自单一物种的毒性试验, 未能保护多样化的生态系统. 对于构成高风险的化学品, 在全国范围内描述其对各种物种的风险是很有价值的^[71]. 因此, 采用 JPCs 来确定那些最有可能在最广泛的地点/时间对最广泛的物种产生不利影响的化学品^[72,73]. 在这种方法中, 对中国地表水中的正向检测浓度和各种物种反应的慢性毒性数据进行了汇总, 并通过拟合适当的分布将其转换为概率数据, 然后用这两组数据的线性回归来计算浓度对特定比例 (%) 的物种造成不良影响的概率. 曲线上的每一点都代表了所选比例的物种受到影响的概率 (影响程度) 和地表水中超过该影响程度的频率 (超过概率). x 轴代表受影响的水生生物的百分比, y 轴代表超过暴露水平的概率 (超越概率). JPCs 越接近轴线, 不利影响的概率就越小. 为了便于讨论风险结果 (risk product, RP), 根据文献 [72] 中描述的标

准,使用 RP($RP = \text{超标概率} \times \text{影响程度}$)将风险分为最小、低、中或高,其中风险类别的定义如下。

如果最大的风险乘积 $< 0.25\%$,那么风险被归类为风险最小;如果最大的风险乘积 $\geq 0.25\%$ 但 $< 2\%$,那么风险被归类为低等风险;如果最大的风险乘积 $\geq 2\%$ 但 $< 10\%$,那么风险被归类为中等风险;如果最大风险乘积 $\geq 10\%$,那么风险被归类为高等风险。

通过计算得到我国主要流域 NP 的 JPCs 如图 5 所示. NP 在不同流域的生态风险存在较大差异. 松辽河、辽河、永定河、北运河、海河、黄河、长江、珠江、太湖、巢湖和东海的 RP 值分别为 13.33%、15.97%、14.97%、11.87%、16.00%、17.37%、10.53%、17.82%、10.28%、14.10% 和 7.44%,表明东海流域水生生物承受水体中 NP 的中等慢性毒性风险,有 3%~30% 的物种处于中等风险;松辽河、辽河、永定河、北运河、海河、黄河、长江、珠江、太湖、巢湖流域水生生物均承受水体中 NP 的高等慢性毒性风险,分别有 11%~20%、11%~20%、10%~19%、11%~18%、10%~20%、10%~20%、12%~17%、10%~20%、17%~20%、10%~17% 的物种处于高等风险,因此,需要引起相关部门的重视. 目前我国地表淡水环境中 NP 风险评价的研究工作呈现出少而散的特点,淡水环境作为生态系统的重要组成部分,对其进行系统、全面的评价,对我国水环境系统的保护具有重要意义。



a 表示低等风险, b 表示中等风险, c 表示高等风险

图 5 中国主要流域 NP 的联合概率曲线分布

Fig. 5 Joint probability curve distribution of NP in major basins of China

4 壬基酚的处理处置和风险管控技术

NP 作为环境 EDCs 在自然界广泛存在,生活中也处处可见,其存在的潜在生态风险,成为了目前世界各国不得不面临的重大环境课题. 因此采取相应的风险控制方法,将 NP 产生的生态风险降低到最小已经迫在眉睫. 普通的污水处理方法对去除污水

中的 NP 效果并不是很理想,相关领域的专家学者也正在研究 NP 的降解方法,主要包括:光催化法^[74,75]、微生物分解法^[76,77]以及新兴的处理技术(包括氧化、吸附、离子交换和膜过滤)等^[78,79]. 通过这些方法,均可以降解或清除环境中的 NP,从而降低其生态风险,使得 NP 的污染得以控制,进而保护生态系统的健康和人类的安全。

一些常用的物理化学技术,包括光催化和先进的化学氧化、臭氧和氢解,已被用于去除 NP^[74,75]. 但是由于物理化学技术的各种缺点,如昂贵、产生有毒的副产品和使用大量的化学试剂,而对于可持续的生物修复,微生物方法比物理化学方法更受欢迎,利用微生物去除污染物的生物修复被认为是最有效、经济和可持续的方法^[76,77]. 据报道,在好氧和厌氧条件下,从沉积物、污水污泥和活性污泥中发现了 37 个降解 NP 的微生物菌株^[80-82]. *Sphingomonads* 已被证明是最有效的 NP 降解菌株,其降解率为 $100 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[83]. Corvini 等^[84] 报告了 NP 矿化及其融入 *Sphingomonas* sp. TTNP3 的生物物质中,通过采用单支 NP 的放射性标记,有研究人员已经在微生物、无脊椎动物、鱼类和植物中充分记录了 NP 转化的中间产物^[85,86]. 迄今为止,关于微生物对 NP 进行生物降解的报道非常有限,而且只有在鞘氨醇单胞菌中描述了完整的矿化途径。

由于微藻具有较高的处理效率和较低的成本效益,它们也可以净化一些有毒的有机和无机废水污染物^[87]. Gao 等^[88] 研究了 4 种小球藻在去除 NP 方面的作用,结果表明,采用了 4 种微藻株来去除 NP,在 24 h 内从水中高效地去除浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NP. Liu 等^[89] 研究发现淡水绿色微藻 *Scenedesmus obliquus* 在实验的 5 d 内对 NP 的生物降解率高于 85%^[90]. 据报道,4 种微藻培养物 (*Scenedesmus quadricauda*、*Chlorella vulgaris*、*Ankistrodesmus acicularis* 和 *Chroococcus minutus*) 被用于处理不同浓度的 NP 溶液 ($0.5 \sim 2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),在 120 h 内可以达到最大的 NP 降解率,为 83.77%^[91]. 在一项批量实验中评估了 4 种海洋藻类 (*Phaeocystis globosa*、*Nannochloropsis oculata*、*Dunaliella salina* 和 *Platymonas subcordiformis*) 对 NP 的降解效果,研究结果表明这 4 种藻类对 NP 的生物降解率在 120 h 内从 43.43%~90.94% 不等^[92].

电化学高级氧化工艺 (electrochemical advanced oxidation process, EAOP) 是一种去除持久性和有毒污染物的新兴技术^[93]. EAOPs 包括阳极氧化、电-芬顿、光-芬顿和声电化学. 因为它们具有高效的氧化作用,有研究人员已经采用这些 EAOPs 来净

化废水中的微污染物,操作条件温和,与传统的氧化方法相比,对额外的化学试剂要求较低^[94,95]。在使用生物方法去除 NP 之前,应用 EAOPs 作为预处理是另一种替代方法。最近,Niu 等^[94]合成了一种新型的分子压印高指数面 SnO₂ (MI-SnO₂, HIF) 电极^[94]。分子印记聚合物是一种选择性材料,它可以将目标分析物从复杂的基质中区分出来。在这项研究中,从工业废水中去除 NP,使用该方法,NP 被有效地降解,该方法是第一个报道的使用电极去除 NP 的方法。

NP 的生态风险控制措施主要包括:制订相关环境法规限制 NP 的生产、使用和排放过程,着力寻找 NP 的替代品,并将其投入到大规模生产使用中。同时还可以通过各种技术手段降解或清除已经排放到环境中的 NP。

5 国际上关于内分泌干扰物的监管方法

欧盟和美国用于监管 EDCs 的方法最为完善且影响深远,其他的国家也是在参考欧盟和美国的方法来制定本国的监管方法。欧盟有关化学物质和环境危害的法规要么以使用为导向(例如生物杀灭剂

产品或化妆品法规),要么以介质为导向(例如空气或水保护)。欧洲的环境政策包含了预防原则,该原则规定,当有迹象表明对环境、人类、动物或地球健康有潜在的危險影响时,即使没有科学的确定性,也应该限制接触。1999 年,欧盟启动了一些措施,将一些物质作为 EDCs 进行进一步评估,监测 EDCs 的暴露和影响,向公众传达有关 EDCs 的信息,并开发和验证新的测试方法。欧盟关于消费者、健康和环境保护的立法条文被逐步修正,以考虑 EDCs 的影响。2018 年,欧盟重申其应用预防原则,旨在最大限度地减少 EDCs 的总体暴露,并特别关注发展的关键窗口。在美国,关于食品和食品添加剂、药品和化妆品的主要化学监管法律由食品和药品管理局管理,关于农药和其他地方没有涉及的商业化学品的法律由环保署管理。美国有几个州制定了与特定 EDCs 相关的法规。加利福尼亚州于 1986 年通过了第 65 号提案,要求该州保持一份已知会导致癌症或生殖毒性的化学品清单。该法规要求产品文件详细说明对消费者的潜在风险超出了所谓的安全水平,尽管它没有特别要求列出 EDCs。欧盟和美国用于监管 EDCs 方法的比较如表 1 所示^[96]。

表 1 欧盟和美国之间的监管方法比较¹⁾

Table 1 Comparison of regulatory approaches between the EU and the US

管理方法	欧盟	美国	说明
化学品监管的总体方法	主要是基于危害的方法,当存在潜在危险影响的迹象时,应限制暴露;不考虑暴露问题	完全是一种基于风险的方法,监管必须考虑化学品的危害和对该化学品的预期接触	基于风险的方法没有考虑到 EDCs 对慢性疾病负担的成本;没有适当捕捉到对健康结果具有长潜伏期的暴露风险
农药和杀虫剂	2009 年《植物保护产品条例》和 2012 年《生物杀伤产品条例》禁止在杀虫剂中使用 EDCs;除了人类接触可忽略不计,否则不允许将 EDCs 作为活性成分;发布关于如何识别杀虫剂中 EDCs 的指导文件	EPA 根据《食品质量保护法》(1996 年)授权制定筛选方案,以确定农药产品中的雌激素 EDCs;委员会的最终报告详细介绍了雌激素、雄激素和甲状腺介导的影响的两级检测小组;只有约 50 种农药通过第一级检测进行了筛选,第二级尚未得到验证	EDCs 筛选和测试委员会建议的筛选方法陷入了监管障碍,只测试 3 种受体的干扰,局限性太大;需要建立涵盖所有内分泌模式的筛选系统,如果筛选发现了,则不能授权。
化妆品	既没有关于 EDCs 的一般规定,也没有关于 EDCs 的定义;EDCs 的处理是逐步进行的,可能涉及完全禁止或可容忍的限制(如三氯生);不允许对化妆品中使用的物质进行动物实验	由美国食品和药物管理局的《食品、药品和化妆品法》管理;没有管理 EDCs 的具体条款;香料漏洞允许在标签上使用不知名的术语香料,以详细说明化学品的混合物并保护商业秘密	对所有行业的 EDCs 进行定义和要求,将大大简化监管环境
医疗器械	仅在某些情况下,明确允许与身体或体液接触的部分的 EDCs 含量超过 0.1%	由美国食品和药物管理局的《食品、药品和化妆品法》管理;没有具体规定管理 EDCs	对所有行业的 EDCs 进行定义和要求,将大大简化监管环境
饮用水	对 EDCs 的检测没有具体要求,但在监测清单中增加几种 EDCs 的动向	《安全饮用水法》明确涵盖了雌激素类 EDCs,并允许在大量人口可能接触的情况下提交给筛查计划	定义并要求考虑所有行业的 EDCs,将大大简化监管环境;法规必须涵盖不止是单一的受体和作用方式
其他地方	在其他具体法规中没有明确涵盖的化学品被纳入 REACH 法规;只有在证明与 CMR 或 PBT 物质具有同等关注度的情况下,EDCs 才被纳入 REACH 法规;根据基于风险的方法进行授权和限制	其他具体法规中没有明确规定的化学品在 TSCA 中也有规定,EDCs 没有具体规定;根据基于风险的方法进行授权和限制	在这些总体协议下,针对 EDCs 的要求将使对这些化学品的监管方法更加透明,并使各行业的法规保持一致,通过标准化降低复杂性和成本

1) REACH: 化学品的注册、评估、授权和限制,CMR: 致癌性、诱变性、或对生殖系统的毒性,PBT: 持久性、生物蓄积性和毒性,TSCA: 有毒物质控制法

6 我国新污染物环境管理存在的问题和建议

新污染物治理是目前国内外重大环境问题之一,我国新污染物治理起步晚,而且基础薄弱,环境质量标准中缺乏新污染物指标.新污染物与常规污染物将长期并存,我国化学物质的环境风险管理体系还不完善^[3].在“十四五”期间,党中央要求加强新污染物治理工作.目前,我国环境保护法、大气污染防治法、水污染防治法、土壤污染防治法等相关法规中,已明确提到新污染物管控名录.但是这类污染物危害效应更隐蔽,环境赋存更分散,来源更复杂,对检测技术要求更尖端、管控方式更动态、管理措施更多元^[3].因此,对于持久性有机污染物、EDCs等新污染物,未来应积极借鉴国际经验,并坚持问题导向,结合我国污染水平和治理水平推动新污染物环境管理进程^[2].

首先,需要加强新污染物监测顶层设计,完善法律法规与标准建设,结合常规监测网络统筹设置新污染物监测点位,开展持久性有机污染物、环境EDCs和全氟化合物^[97]等重点管控新污染物调查监测试点.

其次,对新污染物检出种类多、暴露潜力大的重点区域进一步加密监测,动态开展其他潜在新污染物的筛查性监测,初步摸清新污染物环境赋存底数,支撑新污染物治理与管控.

第三,重视新污染物环境毒理学基础研究,对微塑料^[4,5]、抗生素^[98]和EDCs^[99]等新污染物开展多代和全生命周期的风险研究,同时推进水质基准和标准方面的研究,全面加快技术标准体系、实验能力和人才队伍建设.

第四,加快环境友好型材料的研究,着力推动可替代材料的研发与治理,并经过风险评估确认无环境风险后投入生产使用.

最后,加大新污染物环境治理的宣传深度和力度,帮助公众科学理性地认识和判断新污染物危害,提高公众参与能力,激发全社会共同参与环境治理的热情.

7 结论与展望

(1)目前关于NP在水环境中的生物地球化学行为及毒性效应研究多集中在实验室内开展,并未考虑自然环境条件,但是在自然环境条件下的水体受诸多环境因素的影响,如pH、温度、硬度以及在其他污染物质的作用下容易发生联合毒性作用,因此,应着重研究实际水体中复合多要素条件下NP的环境行为、毒性效应及其致毒机制.

(2)NP作为一种EDCs,本身没有很强的急性毒性,但长期低剂量的暴露于NP会对生物的生殖系统造成不可逆转的毒性作用,进而影响整个生态系统的稳定性,因此需要侧重考虑NP的毒性效应,根据具体的毒性效应建立多代全生命周期的测试方法是今后的一个工作重点.

(3)我国尚未发布关于NP的水质基准和水质标准,仅靠参照目前国外现行的基准或标准中对NP浓度的限制,对于我国特殊的国情以及特定区域条件的水体,可能存在“过保护”或“欠保护”的情况,对生态安全和环境质量评价构成潜在威胁和评价偏差.因此,需要加快我国NP水质基准和水质标准的建设,根据我国实际水体水化学条件,制定适合我国国情的水质基准及水质标准.

(4)我国新污染物治理起步晚,而且基础薄弱,环境质量标准中缺乏新污染物指标,未来应积极借鉴国际经验,并坚持问题导向,结合我国污染水平和治理水平推动新污染物环境管理进程.

参考文献:

- [1] Field J A, Johnson C A, Rose J B. What is “emerging”? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(23), doi: 10.1021/es062982z.
- [2] 韦正峰, 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.
- [3] 王金南. 加强新污染物治理 统筹推动有毒有害化学物质环境风险管理[J]. *中国环境监察*, 2022, (4): 44-46.
- [4] 刘彬, 侯立安, 王媛, 等. 我国海洋塑料垃圾和微塑料排放现状及对策[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(1): 174-182.
Liu B, Hou L A, Wang Y, *et al.* Emission estimate and countermeasures of marine plastic debris and microplastics in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(1): 174-182.
- [5] Xiang Y J, Jiang L, Zhou Y Y, *et al.* Microplastics and environmental pollutants: key interaction and toxicology in aquatic and soil environments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **422**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126843.
- [6] 孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 等. 我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估[J]. *环境科学*, 2022, **43**(11): 5040-5052.
Sun X N, Chen H, Jia Q L, *et al.* Ecological risk assessment of microplastics occurring in surface water of terrestrial water systems across China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5040-5052.
- [7] 王新红, 于晓璇, 王思权, 等. 河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险[J]. *环境科学*, 2022, **43**(11): 4810-4821.
Wang X H, Yu X X, Wang S Q, *et al.* Environmental process, effects and risks of emerging contaminants in the estuary-coastal environment[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 4810-4821.
- [8] 蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 等. 北京市北运河水体中抗生素污

- 染特征及风险评估[J]. 环境科学, 2023, **44**(6): 3198-3205.
- Jiang B, Sui S S, Sun C Y, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of antibiotics in Beiyun River basin in Beijing [J]. Environmental Science, 2023, **44**(6): 3198-3205.
- [9] 新华社. 中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见[J]. 环境科学与管理, 2021, **46**(11): 1-6.
- [10] Kanaki M, Nikolaou A, Makri C A, *et al.* The occurrence of priority PAHs, nonylphenol and octylphenol in inland and coastal waters of Central Greece and the Island of Lesbos [J]. Desalination, 2007, **210**(1-3): 16-23.
- [11] Huang Y Q, Wong C K C, Zheng J S, *et al.* Bisphenol A (BPA) in China: a review of sources, environmental levels, and potential human health impacts[J]. Environment International, 2012, **42**: 91-99.
- [12] Goepfert N, Dror I, Berkowitz B. Detection, fate and transport of estrogen family hormones in soil [J]. Chemosphere, 2014, **95**: 336-345.
- [13] 苏超, 崔严. 长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4981-4988.
- Su C, Cui Y. Risk ranking of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals, and personal care products in the aquatic environment of the Yangtze River basin [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4981-4988.
- [14] Ekelund R, Granmo Å, Magnusson K, *et al.* Biodegradation of 4-nonylphenol in seawater and sediment [J]. Environmental Pollution, 1993, **79**(1): 59-61.
- [15] Corvini P F X, Elend M, Hollender J, *et al.* Metabolism of a nonylphenol isomer by *Sphingomonas* sp. strain TTNP3 [J]. Environmental Chemistry Letters, 2005, **2**(4): 185-189.
- [16] Patrick R, Jan S, Andreas S, *et al.* First evidence for a stereoselective incorporation of nonylphenol diastereomers in soil-derived organo-clay complexes [J]. Environmental Chemistry Letters, 2011, **9**(2): 293-299.
- [17] Riefer P, Klausmeyer T, Schwarzbauer J, *et al.* Rapid incorporation and short-term distribution of a nonylphenol isomer and the herbicide MCPA in soil-derived organo-clay complexes [J]. Environmental Chemistry Letters, 2011, **9**(3): 411-415.
- [18] Dsikowitzky L, Schwarzbauer J. Industrial organic contaminants: identification, toxicity and fate in the environment [J]. Environmental Chemistry Letters, 2014, **12**(3): 371-386.
- [19] Zhou M, Zhang J Q, Sun C Y. Easier removal of nonylphenol and naphthalene pollutants in wet weather revealed by Markov chains modeling[J]. Environmental Chemistry Letters, 2018, **16**(3): 1089-1093.
- [20] Ying G G, Williams B, Kookana R. Environmental fate of alkylphenols and alkylphenol ethoxylates—a review [J]. Environment International, 2002, **28**(3): 215-226.
- [21] Fawell J K, Sheahan D, James H A, *et al.* Oestrogens and oestrogenic activity in raw and treated water in severn trent water [J]. Water Research, 2001, **35**(5): 1240-1244.
- [22] Nowak K M, Kouloumbos V N, Schäffer A, *et al.* Effect of sludge treatment on the bioaccumulation of nonylphenol in grass grown on sludge-amended soil [J]. Environmental Chemistry Letters, 2008, **6**(1): 53-58.
- [23] Vieira W T, de Farias M B, Spaolonzi M P, *et al.* Removal of endocrine disruptors in waters by adsorption, membrane filtration and biodegradation. A review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2020, **18**(4): 1113-1143.
- [24] Chen H W, Liang C H, Wu Z M, *et al.* Occurrence and assessment of treatment efficiency of nonylphenol, octylphenol and bisphenol-a in drinking water in Taiwan[J]. Science of the Total Environment, 2013, **449**: 20-28.
- [25] Michałowicz J. Bisphenol a-sources, toxicity and biotransformation [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2014, **37**(2): 738-758.
- [26] Arnon S, Dahan O, Elhanany S, *et al.* Transport of testosterone and estrogen from dairy-farm waste lagoons to groundwater[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(15): 5521-5526.
- [27] Nie M H, Yang Y, Liu M, *et al.* Environmental estrogens in a drinking water reservoir area in Shanghai: occurrence, colloidal contribution and risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2014, **487**: 785-791.
- [28] Zha J M, Sun L W, Spear P A, *et al.* Comparison of ethinylestradiol and nonylphenol effects on reproduction of Chinese rare minnows (*Gobiocypris rarus*) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, **71**(2): 390-399.
- [29] Baravalle R, Ciaramella A, Baj F, *et al.* Identification of endocrine disrupting chemicals acting on human aromatase [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics, 2018, **1866**(1): 88-96.
- [30] Rosenfeld C S, Cooke P S. Endocrine disruption through membrane estrogen receptors and novel pathways leading to rapid toxicological and epigenetic effects [J]. The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology, 2019, **187**: 106-117.
- [31] Soares A, Guieysse B, Jefferson B, *et al.* nonylphenol in the environment: a critical review on occurrence, fate, toxicity and treatment in wastewaters [J]. Environment International, 2008, **34**(7): 1033-1049.
- [32] USEPA. Ambient aquatic life water quality criteria for nonylphenol [R]. Washington: US Environmental Protection Agency, 2005.
- [33] Ahel M, Giger W, Schaffner C. Behaviour of alkylphenol polyethoxylate surfactants in the aquatic environment—II. Occurrence and transformation in rivers [J]. Water Research, 1994, **28**(5): 1143-1152.
- [34] ECB. European Union risk assessment report: 4-Nonylphenol (branched) and nonylphenol. VOL 10, 2nd priority list [R]. Ispra: European Chemicals Bureau, 2002.
- [35] de Bruin W, Kritzinger Q, Bornman R, *et al.* Occurrence, fate and toxic effects of the industrial endocrine disrupter, nonylphenol, on plants—a review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **181**: 419-427.
- [36] Noorimotlagh Z, Kazeminezhad I, Jaafarzadeh N, *et al.* The visible-light photodegradation of nonylphenol in the presence of carbon-doped TiO₂ with rutile/anatase ratio coated on GAC: effect of parameters and degradation mechanism [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, **350**: 108-120.
- [37] Ji X Y, Li N, Yuan S W, *et al.* A comparison of endocrine disruption potential of nonylphenol ethoxylate, vanillin ethoxylate, 4-n-nonylphenol and vanillin *in vitro* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **175**: 208-214.
- [38] Lu Z J, Gan J. Analysis, toxicity, occurrence and biodegradation of nonylphenol isomers: a review [J]. Environment International, 2014, **73**: 334-345.
- [39] 姚玲丹, 王丽晓, 朱亮, 等. 一株壬基酚降解菌的分离鉴定及其对壬基酚同分异构体降解特性研究 [J]. 环境科学学报, 2017, **37**(5): 1674-1680.
- Yao L D, Wang L X, Zhu L, *et al.* Isolation and identification of a NP-degrading strain and its degradation characteristics for NP isomers [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(5): 1674-1680.

- [40] Hong Y J, Feng C L, Yan Z F, *et al.* Nonylphenol occurrence, distribution, toxicity and analytical methods in freshwater [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2020, **18**(6): 2095-2106.
- [41] 孙凯峰. 环境激素壬基酚对枝角类浮游动物的生殖干扰效应研究[D]. 广州: 暨南大学, 2012.
- [42] Lamche G, Burkhardt-Holm P. Nonylphenol provokes a vesiculation of the Golgi apparatus in three fish epidermis cultures [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2000, **47**(2): 137-148.
- [43] Tanaka J N, Grizzle J M. Effects of nonylphenol on the gonadal differentiation of the hermaphroditic fish, *Rivulus marmoratus* [J]. *Aquatic Toxicology*, 2002, **57**(3): 117-125.
- [44] Weber L P, Kiparissis Y, Hwang G S, *et al.* Increased cellular apoptosis after chronic aqueous exposure to nonylphenol and quercetin in adult medaka (*Oryzias latipes*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2002, **131**(1): 51-59.
- [45] Manar R, Vasseur P, Bessi H. Chronic toxicity of chlordane to *Daphnia magna* and *Ceriodaphnia dubia*: a comparative study [J]. *Environmental Toxicology*, 2012, **27**(2): 90-97.
- [46] Giesy J P, Pierens S L, Snyder E M, *et al.* Effects of 4-nonylphenol on fecundity and biomarkers of estrogenicity in fathead minnows (*Pimephales promelas*) [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, **19**(5): 1368-1377.
- [47] Ren L, Lattier D, Lech J J. Estrogenic activity in rainbow trout determined with a new cDNA probe for vitellogenesis, pSG5Vg1.1 [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1996, **56**(2): 287-294.
- [48] Lech J J, Lewis S K, Ren L F. *In vivo* estrogenic activity of nonylphenol in rainbow trout [J]. *Fundamental and Applied Toxicology*, 1996, **30**(2): 229-232.
- [49] Yu Z R, Peldszus S, Huck P M. Adsorption of selected pharmaceuticals and an endocrine disrupting compound by granular activated carbon. 1. Adsorption capacity and kinetics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(5): 1467-1473.
- [50] Park K, Kwak I S. Molecular effects of endocrine-disrupting chemicals on the *Chironomus riparius* estrogen-related receptor gene [J]. *Chemosphere*, 2010, **79**(9): 934-941.
- [51] Noorimotlagh Z, Mirzaee S A, Martinez S S, *et al.* Environmental exposure to nonylphenol and cancer progression risk-a systematic review [J]. *Environmental Research*, 2020, **184**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109263.
- [52] Ying G G. Fate, behavior and effects of surfactants and their degradation products in the environment [J]. *Environment International*, 2006, **32**(3): 417-431.
- [53] Junghanns C, Moeder M, Krauss G, *et al.* Degradation of the xenooestrogen nonylphenol by aquatic fungi and their laccases [J]. *Microbiology*, 2005, **151**(Pt 1): 45-57.
- [54] Yang W F, Gao X X, Wu Y X, *et al.* The combined toxicity influence of microplastics and nonylphenol on microalgae *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **195**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110484.
- [55] Yan Z F, Jin X W, Liu D Q, *et al.* The potential connections of adverse outcome pathways with the hazard identifications of typical organophosphate esters based on toxicity mechanisms [J]. *Chemosphere*, 2021, **266**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128989.
- [56] Knapen D, Stinckens E, Cavallin J E, *et al.* Toward an AOP network-based tiered testing strategy for the assessment of thyroid hormone disruption [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(14): 8491-8499.
- [57] Ankley G T, Bennett R S, Erickson R J, *et al.* Adverse outcome pathways: a conceptual framework to support ecotoxicology research and risk assessment [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2010, **29**(3): 730-741.
- [58] Wang Y, Na G S, Zong H M, *et al.* Applying adverse outcome pathways and species sensitivity-weighted distribution to predicted-no-effect concentration derivation and quantitative ecological risk assessment for bisphenol A and 4-nonylphenol in aquatic environments: a case study on Tianjin City, China [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2018, **37**(2): 551-562.
- [59] Lei K, Pan H Y, Zhu Y, *et al.* Pollution characteristics and mixture risk prediction of phenolic environmental estrogens in rivers of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **787**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147646.
- [60] Gros M, Petrović M, Ginebreda A, *et al.* Removal of pharmaceuticals during wastewater treatment and environmental risk assessment using hazard indexes [J]. *Environment International*, 2010, **36**(1): 15-26.
- [61] 乔宇, 闫振飞, 冯承莲, 等. 几种典型模型在物种敏感度分布中的应用和差异分析 [J]. *环境工程*, 2021, **39**(10): 85-92, 109.
- Qiao Y, Yan Z F, Feng C L, *et al.* Applications and differences analysis of several typical models in species sensitivity distribution [J]. *Environmental Engineering*, 2021, **39**(10): 85-92, 109.
- [62] Hou L, Jin X W, Liu N, *et al.* Triadimefon in aquatic environments: occurrence, fate, toxicity, and ecological risk [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2022, **34**(1), doi: 10.1186/s12302-022-00590-7.
- [63] Kosma C I, Lambropoulou D A, Albanis T A. Investigation of PPCPs in wastewater treatment plants in Greece: occurrence, removal and environmental risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **466-467**: 421-438.
- [64] Hong Y J, Li H, Feng C L, *et al.* A review on the water quality criteria of nonylphenol and the methodological construction for reproduction toxicity endocrine disrupting chemicals [J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2022, **260**(1), doi: 10.1007/s44169-021-00002-6.
- [65] 雷炳莉, 刘倩, 孙延枫, 等. 内分泌干扰物4-壬基酚的水质基准探讨 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, **42**(5): 657-664.
- Lei B L, Liu Q, Sun Y F, *et al.* Water quality criteria for 4-nonylphenol in protection of aquatic life [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, **55**(6): 892-899.
- [66] 刘文萍, 石晓勇, 王晓波, 等. 北黄海辽宁近岸水环境中壬基酚污染状况调查及生态风险评估 [J]. *海洋环境科学*, 2009, **28**(6): 664-667.
- Liu W P, Shi X Y, Wang X B, *et al.* Survey of nonylphenol in Liaoning coastal aquatic environment of north Yellow Sea and the ecological risk assessment [J]. *Marine Environmental Science*, 2009, **28**(6): 664-667.
- [67] 黄超. 壬基酚环境污染特性研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [68] Chen R, Yin P H, Zhao L, *et al.* Spatial-temporal distribution and potential ecological risk assessment of nonylphenol and octylphenol in riverine outlets of Pearl River Delta, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(11): 2340-2347.
- [69] Liu Y H, Zhang S H, Ji G X, *et al.* Occurrence, distribution and risk assessment of suspected endocrine-disrupting chemicals in surface water and suspended particulate matter of Yangtze River (Nanjing section) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **135**: 90-97.

- [70] Gao P, Li Z Y, Gibson M, *et al.* Ecological risk assessment of nonylphenol in coastal waters of China based on species sensitivity distribution model[J]. *Chemosphere*, 2014, **104**: 113-119.
- [71] Hong Y J, Feng C L, Jin X W, *et al.* A QSAR-ICE-SSD model prediction of the PNECs for alkylphenol substances and application in ecological risk assessment for rivers of a megacity [J]. *Environment International*, 2022, **167**, doi: 10.1016/j.envint.2022.107367.
- [72] Liu N, Jin X W, Feng C L, *et al.* Ecological risk assessment of fifty pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Chinese surface waters: a proposed multiple-level system [J]. *Environment International*, 2020, **136**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105454.
- [73] Liu N, Wang Y Y, Yang Q, *et al.* Probabilistic assessment of risks of diethylhexyl phthalate (DEHP) in surface waters of China on reproduction of fish [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **213**: 482-488.
- [74] Li X, Zhou M H, Pan Y W, *et al.* Pre-magnetized Fe⁰/persulfate for notably enhanced degradation and dechlorination of 2,4-dichlorophenol [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **307**: 1092-1104.
- [75] Yu X Y, Cabooter D, Dewil R. Effects of process variables and kinetics on the degradation of 2,4-dichlorophenol using advanced reduction processes (ARP) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **357**: 81-88.
- [76] Bilal M, Rasheed T, Nabeel F, *et al.* Hazardous contaminants in the environment and their laccase-assisted degradation -a review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **234**: 253-264.
- [77] Różalska S, Sobon A, Pawłowska J, *et al.* Biodegradation of nonylphenol by a novel entomopathogenic *Metarhizium robertsii* strain [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **191**: 166-172.
- [78] Jin Z X, Wang X X, Sun Y B, *et al.* Adsorption of 4-n-nonylphenol and bisphenol-a on magnetic reduced graphene oxides: a combined experimental and theoretical studies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49** (15): 9168-9175.
- [79] Kausar A, Sher F, Hazafa A, *et al.* Biocomposite of sodium-alginate with acidified clay for wastewater treatment: kinetic, equilibrium and thermodynamic studies [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, **161**: 1272-1285.
- [80] Yuan S Y, Yu C H, Chang B V. Biodegradation of nonylphenol in river sediment [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **127**(3): 425-430.
- [81] Chang B V, Chiang F, Yuan S Y. Anaerobic degradation of nonylphenol in sludge [J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(10): 1415-1420.
- [82] Chang B V, Yu C H, Yuan S Y. Degradation of nonylphenol by anaerobic microorganisms from river sediment [J]. *Chemosphere*, 2004, **55**(4): 493-500.
- [83] Fujii K, Urano N, Ushio H, *et al.* *Sphingomonas cloacae* sp. nov., a nonylphenol-degrading bacterium isolated from wastewater of a sewage-treatment plant in Tokyo [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2001, **51** (2): 603-610.
- [84] Corvini P F X, Vinken R, Hommes G, *et al.* Microbial degradation of a single branched isomer of nonylphenol by sphingomonas TTNP3 [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **50**(5): 189-194.
- [85] Lalah J O, Schramm K W, Henkelmann B, *et al.* The dissipation, distribution and fate of a branched ¹⁴C-nonylphenol isomer in lake water/sediment systems [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **122**(2): 195-203.
- [86] Pedersen R T, Hill E M. Biotransformation of the xenoestrogen 4-tert-octylphenol in hepatocytes of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Xenobiotica*, 2000, **30**(9): 867-879.
- [87] Dann A B, Hontela A. Triclosan: environmental exposure, toxicity and mechanisms of action [J]. *Journal of Applied Toxicology*, 2011, **31**(4): 285-311.
- [88] Gao Q T, Wong Y S, Tam N F Y. Removal and biodegradation of nonylphenol by different *Chlorella* species [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **63**(5-12): 445-451.
- [89] Liu Y, Dai X K, Wei J. Toxicity of the xenoestrogen nonylphenol and its biodegradation by the alga *Cyclotella caspia* [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(8): 1662-1671.
- [90] Zhou G J, Peng F Q, Yang B, *et al.* Cellular responses and bioremoval of nonylphenol and octylphenol in the freshwater green microalga *Scenedesmus obliquus* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **87**: 10-16.
- [91] He N, Sun X, Zhong Y, *et al.* Removal and biodegradation of nonylphenol by four freshwater microalgae [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, **13** (12), doi: 10.3390/ijerph13121239.
- [92] Wang L Y, Xiao H, He N, *et al.* Biosorption and biodegradation of the environmental hormone nonylphenol by four marine microalgae [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**, doi: 10.1038/s41598-019-41808-8.
- [93] Bhatt P, Gangola S, Bhandari G, *et al.* New insights into the degradation of synthetic pollutants in contaminated environments [J]. *Chemosphere*, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128827.
- [94] Niu B L, Cai J Z, Song W J, *et al.* Novel electrochemical pretreatment for preferential removal of nonylphenol in industrial wastewater: biodegradability improvement and toxicity reduction [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54** (2): 1258-1266.
- [95] Rashid T, Iqbal D, Hazafa A, *et al.* Formulation of zeolite supported nano-metallic catalyst and applications in textile effluent treatment [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, **8**(4), doi: 10.1016/j.jece.2020.104023.
- [96] Kassotis C D, Vandenberg L N, Demeneix B A, *et al.* Endocrine-disrupting chemicals: economic, regulatory, and policy implications [J]. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, 2020, **8**(8): 719-730.
- [97] 陈诗艳, 仇雁翎, 朱志良, 等. 土壤中全氟和多氟烷基化合物的污染现状及环境行为 [J]. *环境科学研究*, 2021, **34** (2): 468-478.
- Chen S Y, Qiu Y L, Zhu Z L, *et al.* Current pollution status and environmental behaviors of PFASs in soil [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(2): 468-478.
- [98] Feng G Q, Huang H N, Chen Y G. Effects of emerging pollutants on the occurrence and transfer of antibiotic resistance genes: a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **420**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126602.
- [99] Liu D Q, Hong Y J, Feng C L, *et al.* General challenges and recommendations for the water quality criteria of endocrine disrupting chemicals (EDCs) [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2022, **108**(6): 995-1000.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvo-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weibei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-yang, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)