

河湖水体新污染物赋存特征、去除技术及防控对策

王斌^{1,2}, 李文嘉¹, 王涛³, 李江³, 许晓毅⁴, 张林¹, 侯立安^{1,5*}

1. 浙江大学化学工程与生物工程学院, 杭州 310027
2. 贵州大学土木工程学院, 贵阳 550025
3. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025
4. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009
5. 中国人民解放军96901部队23分队, 北京 100094

摘要 近年来河湖水体中新污染物(包括持久性有机污染物、内分泌干扰物、抗生素、微塑料等)检出频率和类型逐渐增多,新污染物治理已成为我国“十四五”生态环境保护的重点工作之一。相较于传统污染物,新污染物具有隐蔽性、广泛性、环境持久性及慢性健康效应等,对河湖生态环境安全和饮水健康构成潜在风险。我国针对新污染物治理总体上起步较晚,面临监测技术手段较少、污染物质底数不清和相关防控法规不完善等难题。通过梳理新污染物的政策与行动计划发展情况,分析了河湖水体中新污染物赋存特征和生态风险,总结了河湖水体中新污染物防控技术研究进展,提出了河湖水体新污染物防控策略和健康风险效应评价方法。

关键词 河湖水体;新污染物;风险评估;污染物去除技术

随着工业水平不断提升,各类工业品、生活用品、药品保健品的生产和消耗量稳居高位的同时,引发的环境新污染问题也日益成为国内外关注的

焦点^[1]。自1962年,美国海洋生物学家蕾切尔·卡逊在《寂静的春天》中揭示滴滴涕等农药危害鸟类和其他野生动物以来,新污染物对生态环境和人类

收稿日期:2024-01-02;修回日期:2024-04-29

基金项目:国家自然科学基金项目(22306037,52360012);贵州省科技计划项目(QKHZC[2023]YB110,QKHJC-ZK[2022]YB102);贵州大学自然科学专项(特岗)科研基金项目(X2021003)

作者简介:王斌,特聘教授,研究方向为水中新污染物治理,电子邮箱:bwang7@gzu.edu.cn;侯立安(通信作者),中国工程院院士,正高级工程师,研究方向为饮用水安全保障、分散点源生活污水处理等,电子信箱:h20091957@126.com

引用格式:王斌,李文嘉,王涛,等.河湖水体新污染物赋存特征、去除技术及防控对策[J].科技导报,2024,42(11):6-17;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.00019

健康的威胁已达半个多世纪,成为全球环境问题之一^[2]。中国与国际社会对此均高度关注,早在2001年《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》正式通过,目前已管控30多种持久性有机污染物,其中10余种化学品已被全球完全淘汰^[3]。我国关于新污染物的研究仍处于起步阶段,与发达国家、地区在管理和控制等方面存在差距。目前已陆续出台多项关于新污染物防控的政策法规(图1)。2001年5月发布《国家环境科技发展“十五”计划纲要》中提到:建立相应的内分泌干扰物(EDCs)监测方法。2015年以前,我国主要履行《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》中规定的部分EDCs的治理^[3]。2015年国务院印发《水污染防治行动计划》中提出严格控制环境激素类化学品污染等相关规定。2022年5月国务院办公厅出台的《新污染物治理行动方案》强调:“对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逐步建立健全,新污染物治理能力明显增强^[4]。”



图1 我国关于新污染物治理相关政策梳理

由于新污染物涉及面广,且与经济发展、社会生活息息相关,导致河湖水体新污染物频繁检出,给河湖水体生态环境安全和饮用水健康保障带来新挑战。新污染物作为“十四五”时期水污染防治的新领域,存在污染种类又“新”又“多”、环境迁移转化途径不清晰、健康风险不明确、常规处理技术时效低,以及相关政策法规不完善等多方面问题,

缺乏切实有效的防控技术与治理手段,严重制约河湖水体中新污染物治理。因此,加强河湖水体中新污染物溯源和赋存特征研究,解析新污染物的生态环境风险,提出新污染物防控策略颇为重要。

1 我国河湖水体新污染物来源及赋存特征

河湖水体中新污染物的来源广泛,涉及行业主要包括医药行业、养殖业、塑料加工、航空、纺织等(图2^[5]),这些行业产生的废水未能达到有效处理,通过各种途径进入河湖水体。Hu等^[6]研究发现污水处理厂难以完全去除微塑料(Microplastics, MP),导致污水处理厂出水中残留的微塑料进入河湖水体。Chen等^[7]发现珠三角的内分泌干扰物污染可归因于沿海人为排放、污水处理厂排放、海水养殖等。

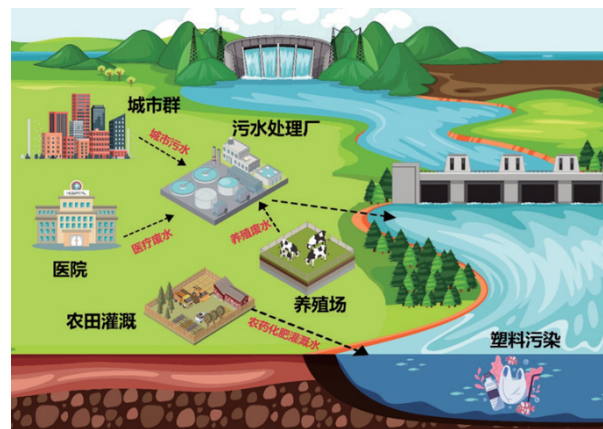
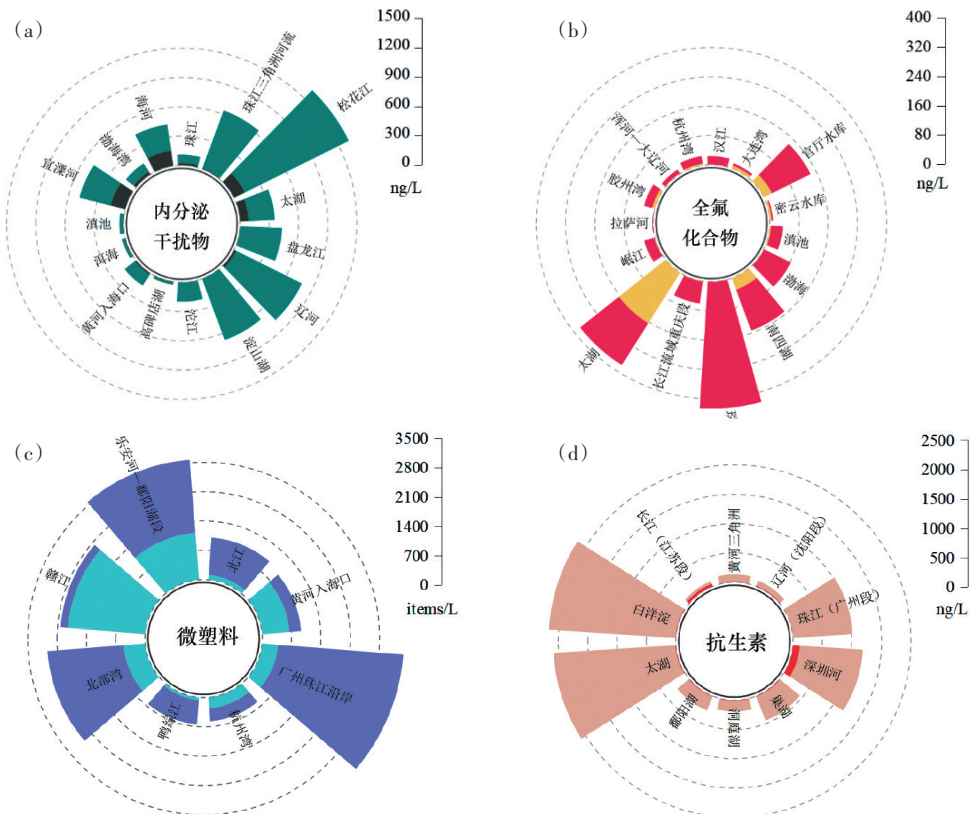


图2 河湖水体中新污染物的主要来源

我国河湖水体中新污染物分布区域广、地域特征较为明显,与工业化、城市化等人类活动程度、季节性差异等因素有关,诸如珠三角、长三角、京津冀等经济比较发达地区。整体来看,河湖水中新污染物的分布水平呈现东高西低、下游高于上游的特征^[8],多处于ng/L级污染水平(图3)^[9]。陈玫宏等^[10]对太湖及入湖支流表层水体中的内分泌干扰物质进行检测,结果显示,壬基酚(NP)和双酚A(BPA)的检出率最高,平均浓度分别为29.6 ng/L和17.5 ng/L。Yan等^[11]在珠江流域检出微塑料,其中广州市区和

图3 新污染物在河湖水体中浓度分布^[8]

珠三角地区MP丰度分别从8725和7850件/m³到53250和10950件/m³。武倩倩等^[12]在天津市地表水中检出全氟化合物(PFCs),其中潮白河和永定河中的浓度最高均值分别为156.09 ng/L和153.84 ng/L,分析认为可能与该区域的工业废水和生活污水排放有关。Gao等^[13]在辽宁省辽河流域中检测出β-内酰胺类抗生素的最高浓度为130.46 ng/L,其次是红霉素类的浓度为52.83 ng/L。韩迁等^[14]解析了成都市地表水中抗生素赋存特征,研究发现大环内酯类红霉素(ETM)的检出浓度最高且平均值达到495.3 ng/L,其次是阿奇霉素(AZM)平均浓度为40.21 ng/L。导致这一现象的原因可能是磺胺类和大环内酯类在去除过程中具有相对稳定的化学特性,不易被降解。

2 生态风险评估方法

2.1 微塑料生态风险评估

塑料工业的快速发展引发了一系列环境污染

问题,据预测到2060年,全球每年将生产约1.55亿~2.65亿t塑料,塑料是可回收材料,但回收利用率只有不到10%^[6,15],对河湖水体生态环境安全带来潜在的威胁。目前,MP是最常见的生态风险评估方法,使用污染负荷指数(PLI)来评估不同地区的MP污染水平^[16]。

$$CF_i = \frac{c_i}{c_0} \quad (1)$$

$$PLI_i = \sqrt{CF_i} \quad (2)$$

$$PLI = \sqrt[n]{PLI_1 + PLI_2 + \dots + PLI_n} \quad (3)$$

式中, CF_i 为采样点沉积物中MP的污染负荷系数; c_i 为采样点沉积物中MP的丰度; c_0 为沉积物中MP的背景丰度; PLI_i 为采样点沉积物中MP的污染负荷指数; PLI 为研究区沉积物中MP的污染负荷指数。

计算指数 $PLI < 10$ 为低污染负荷; $10 \leq PLI < 20$ 为中等污染负荷; $20 \leq PLI < 30$ 为高污染负荷; $PLI \geq 30$ 为危险污染负荷。

已有许多研究基于水环境中长期存在的微塑料污染,对微塑料的空间分布、迁移模式和内在特

性进行风险评估。Xu等^[17]对长江口和邻近东海的地表水进行了初步评估,根据MP化学性质的风险指数,发现长江口及其周边海域的地表水面临着严重的微塑料污染问题。MP污染的风险等级与水文动态和人类活动有关,导致渔场周围的区域显示出最高的MP风险,这些区域应受到密切监测。此外,Ye等^[18]对渤海北部辽东湾沉积物进行了取样,并分析其中MP在时空上的分布情况,并对该地区的MP污染进行风险评估。结果显示,所有采样点位于一级危险等级范围内,说明辽东湾存在较低程度的MP污染风险。渤海属于半封闭海域,只能通过狭窄的渤海海峡与黄海进行物质交换。较弱的水动力导致渤海与黄海之间的物质交换减弱。因此,输入渤海的MP可以长期停留,并使MP产生长久风险。评估结果可为渤海地区微塑料污染水平和环境风险评估提供参考。

2.2 内分泌干扰物风险评估

水环境中残留的内分泌干扰物(EDCs)具有破坏分泌系统稳态的能力。由于其持续残留于环境介质中,甚至有可能损害人体生育功能,引发公共卫生问题^[19]。目前,环境中EDCs主要通过风险商RQ和优先级指数 I_p 进行生态风险评估。

$$RQ = \frac{MEC}{PNEC} \quad (4)$$

式中,MEC为测量的环境浓度(单位为ng/L);PNEC为预测的无影响浓度(单位为ng/L),通过有效中位数(EC_{50})或致死浓度(LC_{50})获取。

风险评级的标准基于 $RQ \geq 1$ 高风险; $1 > RQ \geq 0.1$ 中等风险; $RQ < 0.1$ 低风险。

优先级指数 I_p :

$$I_p = RQ_M \times F \quad (5)$$

$$F = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (6)$$

式中, RQ_M 为平均RQ值; n 和 N 分别表示浓度高于PNEC的样品数量和样品总数。

养殖业地区的污染水平相对其他地区通常较高,水产养殖中的EDCs已成为研究热点。出于生态环境安全的考虑,有必要全面了解养殖业中的EDCs污染风险效应,但大多数研究仅集中在分析检测,对水环境中残留的EDCs及其潜在风险评估

研究较少。Chen等^[7]对珠三角的5个海水养殖区(大亚湾、海陵湾、红海湾、珠海桂山岛和珠海牡蛎海水养殖区)中典型激素和EDCs进行生态风险评估,通过检测6种主要激素和EDCs的生态毒性数据,计算PNEC值、RQ值,结果表明这些物质对人类健康没有直接生态风险,但对某些地区的鱼类构成较高的生态风险。Lu等^[20]对位于黄海西岸的胶州湾地区进行研究,该地区是一个浅半封闭海湾,计算不同营养级水生生物14个目标EDCs的RQ值,结果显示,EDCs混合物对鱼类和软体动物构成高风险,因为它们RQ值超过1;对藻类而言为中等或低风险,其RQ值范围为0.03~0.22。在过去的几年里,胶州湾的鱼类种类有所减少,大多数鱼类生长速度异常,这些可能与海湾中的EDCs等污染物的污染风险有关。未来研究需要考虑EDCs间接影响和食物网生物积累以及食用鱼类水生生物健康风险等重要因素。

2.3 抗生素和全氟化合物(PFCs)风险评估

长期残留于水中的抗生素和全氟化合物(PFCs)可能引发多种不良反应,如过敏、骨髓毒性、抗生素耐药基因以及致突变性等,对水生动物和人类健康构成潜在的威胁^[21]。通常使用风险商指数(RQ)来评估抗生素和PFCs的潜在生态风险^[22]。

$$RQ = \frac{MEC_i}{PNEC_{wat-i}} \quad (7)$$

$$PNEC_{wat-i} = \frac{EC_{50-i}}{AF} \quad (8)$$

式中,MEC为抗生素或PFCs的环境浓度;PNEC为抗生素或PFCs的预测无影响浓度; EC_{50-i} 为抗生素或PFCs的中位有效浓度;AF为评估因子,其值为1000。

将RQ分为4个级别:<0.01风险不显著;0.01~0.1低风险;0.1~1中等风险;>1高风险。

近年来,许多研究针对中国主要流域和水体新污染物的环境开展了大量分析。赵源等^[23]以北京市通州区东南郊地区的凉水河为研究区域,分析PFCs的分布特征,京郊典型河流农用水中PFCs污染的分布特征总体上呈现上游高于下游的趋势,PFCs污染来源主要来自污水处理厂排放和地表径流流入,且受到人类活动的影响。利用风险商值法

对PFCs进行生态风险评估,得出现阶段PFCs的浓度均未达到对生态环境造成危害的水平(图4(a))。韩迁等^[14]对能代表成都市典型污染源类别的流域进行丰水期和枯水期采样分析(图4(b)),检测结果表明在人口聚集的居民区抗生素的浓度明显高于人口稀少地区,大环内酯类抗生素风险评

估高于磺胺类,有必要采取措施控制水体中抗生素污染,加强监管抗生素的使用,减少抗生素对水体环境的潜在影响。也表明了抗生素的污染水平和风险水平与地区的经济发展程度和人口密集程度密切相关。

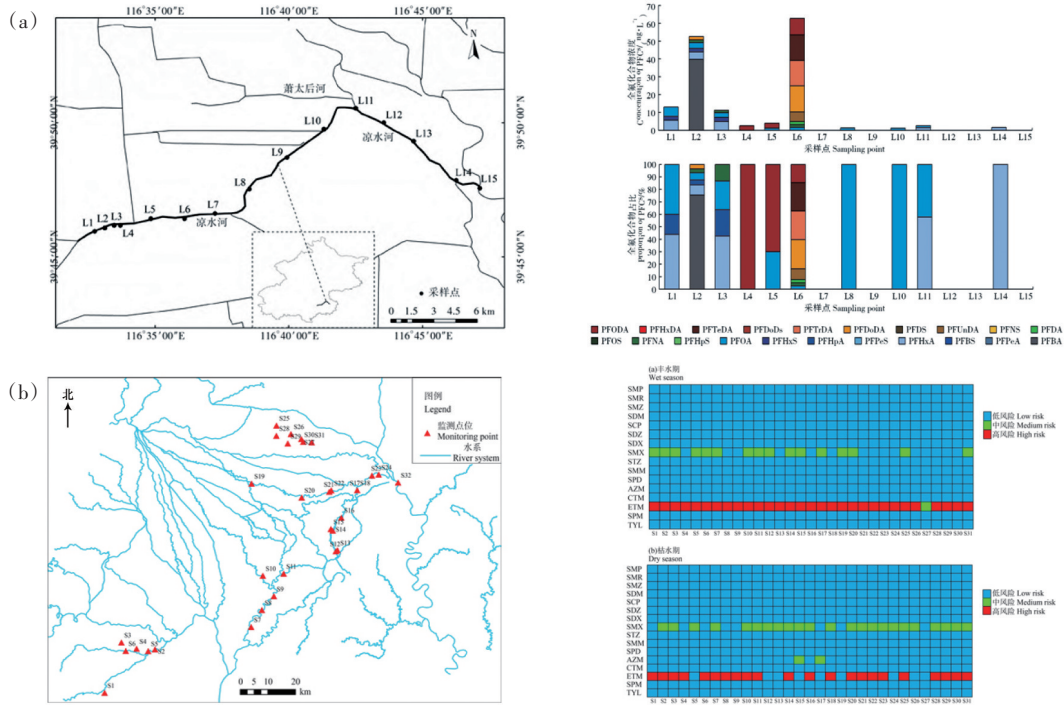


图4 北京市郊区典型河流中PFCs风险评估(a)^[23];
成都市地表水中抗生素风险评估(b)^[14]

3 河湖水体新污染物防控技术研究进展

3.1 吸附技术

吸附方法因其简便、经济、易得和环保特性,在河湖水中污染物去除方面具有显著优势。常见的吸附材料有活性炭、介孔碳、树脂、金属有机框架等^[24],Al-sareji等^[25]利用椰壳制备的颗粒活性炭能够快速完全地吸附并去除被测试物中的抗生素,通过对双氯芬酸(DCF)、阿莫西林(AMO)、卡马西平(CBZ)和环丙沙星(CIP)进行吸附实验,活性炭对某些抗生素有较好的吸附去除效果。Ngan等^[26]采用溶剂热法合成圆柱形块的Co/Fe-MOF气凝胶,用于环丙沙星抗生素的吸附,在一定条件下,实现

了64.85%的最佳收率,表明掺杂材料在MOF和气凝胶之间作为环境污染修复问题的有效吸附剂具有巨大潜力。尽管吸附技术可以去除多种污染物,但它对复杂环境介质中特定污染物的选择性和吸附能力有限,且达到饱和后需要再生或置换。在未来的研究中,应针对实际废水中复合污染体系,进一步研究改性复合材料对多种有机污染物的竞争吸附^[27]。

3.2 膜分离技术

作为21世纪最具发展潜力的高新技术之一,膜技术是实现可持续发展的关键前沿技术,在解决中国当前面临的水资源问题方面扮演着关键角色,同时也是全球范围内应用最广泛、发展速度最快的先进水处理技术之一^[28]。近年来,随着新污染物等

全球范围内的水污染问题备受关注,膜技术的应用潜力日益凸显,具有操作简单、污染物去除率高、占用空间小等特点。在膜过滤过程中,捕获和积聚在膜上的污染物容易造成膜污染,从而降低膜通量并降低分离选择性。因此,亟待开发一种抗污染且通量高的新型膜材料^[29]。Neves等^[30]合成了一种新型含氧化石墨烯(GO)和氧化石墨烯的水解聚丙烯(hPAN)膜,并经过阳离子染料safranin(GO-SF)改性,充分表征并应用于水处理。相较于原始膜,改性后的hPAN@GO-SF膜具有更高的吸附容量。此外,共价有机骨架(COF)是一类具备其他传统多孔材料无法比拟优势的新型多孔晶体材料。Cui等^[31]将钯(Pd)装饰在功能化木质材料基底上制备COF薄膜,并利用具有大比表面积的COF作为钯纳米颗粒载体,在催化还原新型污染物4-硝基苯酚和罗丹明B方面保持着92%以上催化降解效率,并显示出优异的可回收性。未来开发新型膜应注重考虑防止污损机制以及提高污染物去除效率,因此合成创新催化层叠结构复合材料将成为未来研究关注点^[32]。

3.3 高级氧化技术

高级氧化过程(AOP)通过产生强氧化自由基,利用加成、取代、电子转移和功能键断裂反应来降解水体中的大分子和不可降解的有机物质,将其转化为更小且毒性较低的分子,或者完全矿化为二氧化碳和水^[33]。因此,无论是单独使用还是与其他技术结合使用,AOP都能提高对水中各种污染物的降解效果^[24]。然而,由于自由基缺乏选择性,在氧化目标污染物时不能进行特异性地作用^[34]。因此,开发具有优先吸附排阻性能的新型催化剂对于提高去除新污染物的降解效率至关重要^[35]。

氧化去除新污染物的高级氧化工艺包括臭氧氧化、过硫酸盐氧化、芬顿氧化、光催化氧化和电催化氧化等(图5)。Sergienko等^[36]通过电沉积方法在TiO₂纳米管阵列上制备了一种含锰阳极,并将其应用于持久性有机污染物的电催化氧化过程中。结果表明该电极系统可以快速有效地去除持久性有机污染物,并最大限度减少生成Cl⁻的问题,从而克服了传统负极材料所面临的主要限制。Xue等^[37]合

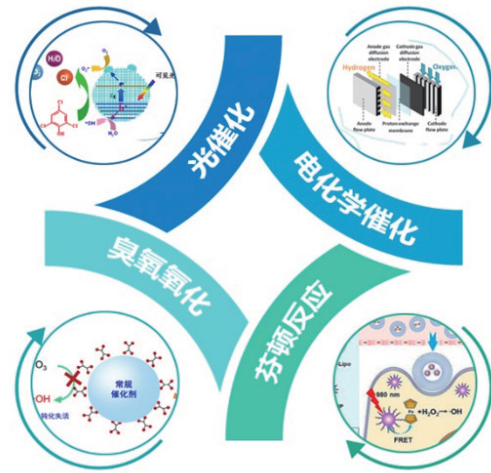


图5 高级氧化工艺

成了核桃壳生物炭(WSBC)、纳米零价铁(nZVI)以及核桃壳生物炭-纳米零价铁复合材料(WSBC-nZVI),并利用活化过硫酸盐(PMS)对抗生素卡马西平(CBZ)进行降解处理。WSBC-nZVI对CBZ的去除效率达到86%。然而,关于降解过程中组分之间的传质和中间体的生态毒性行为风险方面尚存在着研究不足之处,未来需要进一步优化制备方法并加强二次污染控制。

3.4 耦合工艺

为了应对复杂环境中新污染物的去除,采用耦合工艺可有效提升河湖水中新污染物的去除性能^[29]。常见的耦合工艺主要包括膜+高级氧化工艺、生物+高级氧化工艺、膜分离+微生物降解等,其中将膜分离技术与高级氧化工艺AOP相结合构建多功能催化膜体系,可实现膜污染的控制^[38]。Chen等^[39]在膜表面负载了Fe/活性炭(AC)催化剂,在高pH值条件下该催化剂能够有效降解水中的腐植酸(HA),并且在高环境下加速降解过程。通过连续过滤工艺,Fe/AC膜成功拦截和降解HA,其去除效率达到93.33%。该耦合技术充分发挥了提高渗透率、减少膜污染以及增强催化剂活性能力等优势,在有机废水处理领域具有良好的应用前景。

此外,生态修复已被证实在新污染物去除方面起着重要作用,但对于高浓度和复杂结构的新污染物却很难降解。生态修复技术以生物修复为基础,结合物理和化学修复,达到最佳效果和最低耗费的

综合新污染物治理方法。大多采用人工湿地(CW),由于其成本效益高且环境友好受到越来越多关注^[40]。Chen等^[41]将光催化技术与CW相结合,在去除抗生素抗性基因(ARGs)方面取得了显著优势,并构建了光催化处理人工湿地。结果表明,光催化与CW结合提高了ARGs去除率,并且ARGs减少归因于相关微生物丰度的减少。这为ARGs去除工艺和开发环境污染控制技术提供了新思路。此外,Qin等^[42]利用Cu/N-TiO₂多环芳烃降解细菌组装成光催化和生物降解组合体系,在不同光源下增强了菲的去附和矿化作用。未来需要进一步加强耦合工艺去除效率及影响因素等方面研究,可为新污染物防控提供有力支持,如图6和表1所示。

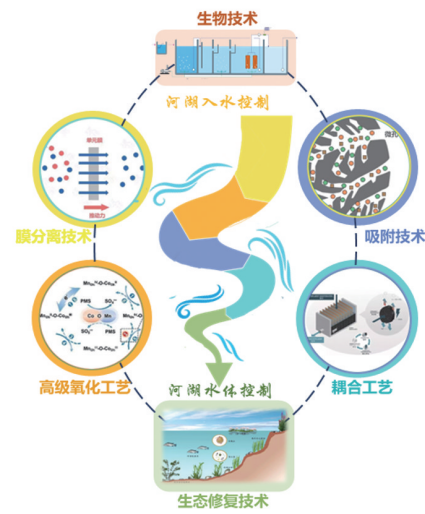


图6 新污染物主要控制技术

表1 新污染物去除技术比较

去除技术	新污染物类型	去除率/%	优点	缺点	文献
吸附技术	抗生素	>95	稳定性和可重复利用性	吸附剂成本较高	[25]
	全氟化合物	>90	去除效果好	运行时间长,吸附速度缓慢	[43]
	内分泌干扰物	90	再生循环性好,成本低	选择性较弱	[44]
	微塑料	95.2	混凝效果好,去除率高	回收利用性差	[45]
膜分离技术	抗生素	>90	经济实惠,去除率高	膜污染	[46]
	全氟化合物	>93	截留率高和透水性好	膜污染	[47]
	内分泌干扰物	>53	选择性强,分离效果好	成本高且膜污染	[48]
	微塑料	99	去除率高,防污能力强	运行成本高	[49]
高级氧化技术	抗生素	99	稳定性强,可重复使用	难形成规模化,能耗高	[50]
	全氟化合物	>85	高效性	运行条件苛刻	[51]
	内分泌干扰物	>95	去除率高	运行条件苛刻	[52]
	微塑料	98	重复使用性	运行成本高	[53]
耦合技术	抗生素	82	矿化率高	运行条件刻苦	[54]
	全氟化合物	92.5	高稳定性和降解性能	运行成本高	[55]
	内分泌干扰物	94	去除效率高,无二次污染	处理时间长,降解副产物毒性不确定	[56]

4 河湖水体中新污染物防控策略

4.1 源头控制

从源头展开污染物的控制,将各种污染物截留控制在源头中以防止其进入水环境,是降低污染风险的重要方式^[57]。国务院印发的《新污染物治理行动方案》中提出严格的源头管控措施,预防新型污染物产生。新污染物治理重在源头,核心是化学物

质。建立化学品管控制度并加强对新型污染物源头控制^[58]。构建各层面协调机制,需要国际、国家、地方和专家共同参与,并形成统筹联动来对新污染物进行管控。

污水处理厂作为最重要的污染物减排设施,同时也是新污染物进入河湖中的重要来源^[58]。然而,国家尚未制定针对新污染物的污水处理厂排放标准。因此,在未来需要借鉴发达国家的污水厂排放

标准,制定出适合我国的污染处理厂新污染物排放标准。

4.2 过程管控及末端治理

过程管控是新污染物治理必不可少的重要环节。首先,针对生产过程中产生的新污染物,应立足清洁生产理念,在产业链上游推广绿色制造,有效遏制新污染物的产生源头,利用不易产生新污染物的原料和绿色生产技术,统一处理制造过程中所产生含有新污染物的废气、废液和固废,从生产过程控制新污染物排入环境^[59]。其次,全面推进新污染物清单的调查研究,并建立化学物质环境调查监测、企业信息数据收集以及数据质量监督等方面的信息数据共享制度。

目前针对水环境中新污染物去除技术多集中于高级氧化技术、吸附技术、膜处理技术、活性污泥法、生物酶法等,但由于多处于实验室探索阶段,实际应用相对较少。Sanchez等^[60]提出利用混合消化池、垂直流人工湿地和光降解混合工艺作为深度处理对于新污染物的去除效率较高,但实际中应用不多。因此,未来仍需进一步探索技术工艺的去除机理、去除效率、探索大规模工业应用条件,同时也要重视新型材料在新污染物治理过程中的应用,加大绿色、高效的新材料研发,充分发挥传统技术特点之间的互补优势,开发多技术联用的新工艺(河岸过滤与反渗透技术联用、光催化与膜技术联用等),可有效提升复合污染物的综合去除效率,从而实现河湖水中新污染物高效去除。此外,还应加强新污染物去除技术的实际应用,可在长江、黄河等流域选取一批重点企业和工业园区开展新污染物治理试点工程。利用大数据、人工智能等新科技,引入先进的采样技术,结合智能传感器,开发自动、智能、高效的河湖新污染物在线监测技术,实现河湖水体中各种新污染物的实时监测和风险评估。

4.3 新污染物健康风险效应评价

由于新污染物具有生物毒性,其对公众健康和生态环境可能产生潜在危害^[61]。据报道,暴露于部分新污染物可能会对人体器官造成永久性损伤。Mitra等^[62]研究发现长期暴露于EDCs可能会损害肝脏和肾细胞,引起肝、肾功能障碍。Zhu等^[63]探究微

塑料颗粒进入人体后主要毒性作用表现为化学和微生物毒性,如微塑料进入人体后,积聚在胃、肠和肝等各种器官上,触发氧化应激反应影响脂质代谢和能量代谢,进而改变功能基因表达和诱导蛋白质变性产生局部炎症。Pang等^[64]研究发现PFCs可通过诱导细胞氧化应激来破坏胎盘发育,可能导致胎盘血管异常和怀孕期间血液灌注不足,进而引起妊娠高血压疾病。此外,环境中抗生素残留也会加速诱导抗生素耐药基因和耐药细菌的出现,增加抗生素耐药性转移的风险。有研究表明,耐药细菌可穿透组织并在人体肠道中增殖和传播,导致各种肠道疾病致病,引起急性感染和免疫反应^[65]。因此,结合科学技术和数据分析等手段,对环境中各种新污染物的赋存和传播建立相关健康风险评估体系尤为重要。

目前,已有研究表明,可通过正电子发射断层扫描(PET)、单光子发射计算机断层扫描(SPECT)、大数据预测等技术评估水中新污染物生态健康风险。Fan等^[66]利用放射性核素成像技术,检测来自身体不同部位的辐射来生成图作为一种评估新污染物毒理学的新兴工具,揭示从系统水平到个体水平的毒性效应,但实现体内新污染物的定量分析仍面临较大的挑战,亟待进一步研究。此外,结合大数据等先进数据分析技术,构建风险评价模型预测新污染物毒理(图7),可为建立更全面、更准确的数据库奠定基础^[67]。Wang等^[68]通过搜



图7 新污染物健康风险评估

索、挖掘和清理网络数据,建立农药场地数据分析方法和数据库,并构建一套评估农药使用对人体健康的风险预测指标体系,成功地预测未调查地点人体健康风险等级。然而,大部分研究并未对预测精度进行验证。因此,在未来的研究中,须确保预测结果的准确性,并通过备案调查对调查数据进行验证,同时考虑预测结果在未来研究中的实际应用价值。

5 结论

新污染物具有分布广、地域差异明显、隐蔽性强等特点,导致河湖水体中新污染物底数不清、监测困难,给河湖水体中新污染物治理及公众健康带来新的挑战。通过分析我国河湖水体中新污染物的赋存特征,利用风险评估模型解析了新污染物潜在的生态环境风险,综述了河湖新污染物去除技术研究进展和应用瓶颈,提出了河湖水体中新污染物的防控策略。未来河湖水体中新污染物防控应加强新污染物监测,建立新污染物管控清单,制定河湖水体中新污染物控制标准,开发新污染物治理新技术,并推进应用示范的开展,为提升污染防治攻坚战深度和广度奠定基础,助力实现美丽中国建设。

参考文献 (References)

- [1] Deblonde T, Cossu-Leguille C, Hartemann P. Emerging pollutants in wastewater: A review of the literature[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2011, 214(6): 442-448.
- [2] Jarman W M, Ballschmiter K. From coal to DDT: The history of the development of the pesticide DDT from synthetic dyes till Silent Spring[J]. *Endeavour*, 2012, 36(4): 131-142.
- [3] 韦正崢, 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.
- [4] 李秋爽, 於方, 曹国志, 等. 新污染物治理进展及“十四五”期间和长期治理思路研究[J]. *环境保护*, 2021, 49(10): 13-19.
- [5] Rathi B S, Kumar P S, Show P L. A review on effective removal of emerging contaminants from aquatic systems: Current trends and scope for further research[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 409: 124413.
- [6] Hu D F, Zhang Y X, Shen M C. Investigation on microplastic pollution of Dongting Lake and its affiliated rivers [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 160: 111555.
- [7] Chen Y P, Xie H W, Junaid M, et al. Spatiotemporal distribution, source apportionment and risk assessment of typical hormones and phenolic endocrine disrupting chemicals in environmental and biological samples from the mariculture areas in the Pearl River Delta, China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 807: 150752.
- [8] 刘宝印, 荀斌, 黄宝荣, 等. 我国水环境中新污染物空间分布特征分析[J]. *环境保护*, 2021, 49(10): 25-30.
- [9] 秦宇, 李健鹏, 毛鑫, 等. 膜分离技术去除水中新兴污染物的研究进展[J]. *水处理技术*, 2023, 49(7): 1-6.
- [10] 陈玫宏, 郭敏, 刘丹, 等. 典型内分泌干扰物在太湖及其支流水体和沉积物中的污染特征[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(11): 4323-4332.
- [11] Yan M T, Nie H Y, Xu K H, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou city and Pearl River Estuary, China[J]. *Chemosphere*, 2019, 217: 879-886.
- [12] 武倩倩, 吴强, 宋帅, 等. 天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价[J]. *环境科学*, 2021, 42(8): 3682-3694.
- [13] Gao H, Zhao F Q, Li R J, et al. Occurrence and distribution of antibiotics and antibiotic resistance genes in water of Liaohe River Basin, China[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(5): 108297.
- [14] 韩迁, 张玉娇, 赖承钺, 等. 成都市典型流域抗生素分布特征及生态风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2023, 18(2): 395-409.
- [15] Sharma S, Basu S M, Shetti N P, et al. Microplastics in the environment: Occurrence, perils, and eradication[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 408: 127317.
- [16] Peng G Y, Xu P, Zhu B S, et al. Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China: A case study of risk assessment in mega-cities[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 448-456.
- [17] Xu P, Peng G Y, Su L, et al. Microplastic risk assessment in surface waters: A case study in the Changjiang Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 133: 647-654.
- [18] Ye Y H, Zhang A G, Teng J, et al. Pollution characteristics and ecological risk of microplastic in sediments of Liaodong Bay from the northern Bohai Sea in China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 187: 114505.
- [19] Grobin A, Roškar R, Trontelj J. Multi-parameter risk assessment of forty-one selected substances with endocrine disruptive properties in surface waters worldwide [J]. *Chemosphere*, 2022, 287: 132195.
- [20] Lu S, Lin C Y, Lei K, et al. Endocrine-disrupting chemi-

- cals in a typical urbanized bay of Yellow Sea, China: Distribution, risk assessment, and identification of priority pollutants[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 287: 117588.
- [21] Bacanlı M, Başaran N. Importance of antibiotic residues in animal food[J]. *Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, 2019, 125: 462–466.
- [22] Wang T Y, Lu Y L, Chen C L, et al. Perfluorinated compounds in estuarine and coastal areas of North Bohai Sea, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8): 1905–1914.
- [23] 赵源, 杨红菊, 温雅君, 等. 京郊典型河流农用水中全氟化合物赋存特征、源解析及生态风险评估[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(2): 392–400.
- [24] Li L, Liu D, Zhang Q, et al. Occurrence and ecological risk assessment of selected antibiotics in the freshwater lakes along the middle and lower reaches of Yangtze River Basin[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 249: 109396.
- [25] Al-sareji O J, Meiczinger M, Somogyi V, et al. Removal of emerging pollutants from water using enzyme-immobilized activated carbon from coconut shell[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(3): 109803.
- [26] Ngan T T K, Tran C, Tran T T N, et al. Optimization of ciprofloxacin adsorption onto CoFe-MOF aerogel cylinders based on response surface methodology: Adsorption kinetics, isotherm models[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2023, 297: 116694.
- [27] Qiu B B, Shao Q N, Shi J C, et al. Application of biochar for the adsorption of organic pollutants from wastewater: Modification strategies, mechanisms and challenges[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 300: 121925.
- [28] Wang H S, Yang J X, Zhang H, et al. Membrane-based technology in water and resources recovery from the perspective of water social circulation: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 908: 168277.
- [29] Zhou M Z, Chen J J, Yu S N, et al. The coupling of persulfate activation and membrane separation for the effective pollutant degradation and membrane fouling alleviation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451: 139009.
- [30] Neves T D F, Camparotto N G, Rodrigues E A, et al. New graphene oxide-safranin modified polyacrylonitrile membranes for removal of emerging contaminants: The role of chemical and morphological features[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 446: 137176.
- [31] Cui Z W, Wu J F, Wu T T, et al. Novel wood membrane decorated with covalent organic frameworks and palladium nanoparticles for reduction of aromatic organic contaminants[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 319: 124112.
- [32] Kumar R, Liu C J, Ha G S, et al. A novel membrane-integrated sustainable technology for downstream recovery of molybdenum from industrial wastewater[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 196: 107035.
- [33] Bilińska L, Gmurek M, Ledakowicz S. Comparison between industrial and simulated textile wastewater treatment by AOPs – Biodegradability, toxicity and cost assessment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 306: 550–559.
- [34] Zhang S, Sun M, Hedtke T, et al. Mechanism of heterogeneous Fenton reaction kinetics enhancement under nanoscale spatial confinement[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(17): 10868–10875.
- [35] Wang L J, Yang T Y, Xu X Y, et al. Acid groups decorated bimetal-organic catalyst for advanced oxidation technology at full pH range[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 969: 172370.
- [36] Sergienko N, Lumbaue E C, Duinslaeger N, et al. Electrocatalytic removal of persistent organic contaminants at molybdenum doped manganese oxide coated TiO₂ nanotube-based anode[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2023, 334: 122831.
- [37] Xue Y T, Kamali M, Liyakat A, et al. A walnut shell biochar-nano zero-valent iron composite membrane for the degradation of carbamazepine via persulfate activation [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 899: 165535.
- [38] Bao Y P, Lee W J, Lim T T, et al. Pore-functionalized ceramic membrane with isotropically impregnated cobalt oxide for sulfamethoxazole degradation and membrane fouling elimination: Synergistic effect between catalytic oxidation and membrane separation[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, 254: 37–46.
- [39] Chen L, Ren X M, Li Y X, et al. High flux Fe/activated carbon membranes for efficient degradation of organic pollutants in water by activating sodium persulfate[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 285: 120411.
- [40] Wang J Q, Wang W M, Xiong J B, et al. A constructed wetland system with aquatic macrophytes for cleaning contaminated runoff/storm water from urban area in Florida[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280: 111794.
- [41] Chen P P, Yu X F, Zhang J Y. Photocatalysis enhanced

- constructed wetlands effectively remove antibiotic resistance genes from domestic wastewater[J]. *Chemosphere*, 2023, 325: 138330.
- [42] Qin Z R, Zhao Z H, Jiao W T, et al. Phenanthrene removal and response of bacterial community in the combined system of photocatalysis and PAH-degrading microbial consortium in laboratory system[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 301: 122736.
- [43] Yu Q, Zhang R, Deng S, Huang J, et al. Sorption of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate on activated carbons and resin: Kinetic and isotherm study[J]. *Water Research*, 2009, 43(4): 1150–1158.
- [44] Romero V, Fernandes S P S, Kovář P, et al. Efficient adsorption of endocrine-disrupting pesticides from water with a reusable magnetic covalent organic framework[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, 307: 110523.
- [45] 陈金垒, 龚佳昕, 陈锦莉, 等. 昆布多糖-聚合氯化铝铁复配去除水中聚乙烯微塑料[J]. *环境化学*, 2024, 43(4): 1401.
- [46] Huang B Q, Cui H G, Feng T Y, et al. Thin film composite polyamide nanofiltration membranes with interlayer constructed with core-shell structured polystyrene-polyacrylamide nanospheres for antibiotics separation[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 57: 104550.
- [47] Ma J, Wang Y, Xu H, et al. MXene ($\text{Ti}_3\text{T}_2\text{CX}$)-reinforced thin-film polyamide nanofiltration membrane for short-chain perfluorinated compounds removal[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 168: 275–284.
- [48] Dai R, Han H, Wang T, et al. Enhanced removal of hydrophobic endocrine disrupting compounds from wastewater by nanofiltration membranes intercalated with hydrophilic MoS_2 nanosheets: Role of surface properties and internal nanochannels[J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 628: 119267.
- [49] Kim S, Hyeon Y, Rho H, et al. Ceramic membranes as a potential high-performance alternative to microplastic filters for household washing machines[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 344: 127278.
- [50] Banat F, Abu Haija M. Photoelectrochemical advanced oxidation processes for simultaneous removal of antibiotics and heavy metal ions in wastewater using 2D-on-2D $\text{WS}_2/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ heteronanostructures[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 339: 122753.
- [51] Li Z, Zhang P, Li J, et al. Synthesis of In_2O_3 -graphene composites and their photocatalytic performance towards perfluorooctanoic acid decomposition[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2013, 271: 111–116.
- [52] Raj R, Tripathi A, Das S, et al. Waste coconut shell-derived carbon monolith as an efficient binder-free cathode for electrochemical advanced oxidation treatment of endocrine-disrupting compounds[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 348: 119328.
- [53] Zanaty M, Zaki A H, El-Dek S I, et al. Zeolitic imidazolate framework@hydrogen titanate nanotubes for efficient adsorption and catalytic oxidation of organic dyes and microplastics[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3): 112547.
- [54] Hu J, Tian J, Yang Y, et al. Enhanced antibiotic degradation via photo-assisted peroxymonosulfate over graphitic carbon nitride nanosheets/ CuBi_2O_4 : Highly efficiency of oxygen activation and interfacial charge transfer[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 661: 68–82.
- [55] Zhang D, Li Y, Chen X, et al. Wide spectra-responsive Polypyrrole- $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{BiPO}_4$ co-coupled TiO_2 nanotube arrays for intensified photoelectrocatalysis degradation of PFOA[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 287: 120521.
- [56] Boutamine Z, Hamdaoui O, Merouani S. Sonochemical and photsonochemical degradation of endocrine disruptor 2-phenoxyethanol in aqueous media[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 206: 356–364.
- [57] 邓义祥, 雷坤, 安立会, 等. 我国塑料垃圾和微塑料污染源头控制对策[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(10): 1042–1051.
- [58] 姜蕾. 水环境中PPCPs类新型污染物监测及控制技术展望——新型污染物监测平台、污染源头识别及末端控制[J]. *净水技术*, 2016, 35(6): 1–5.
- [59] 王佳钰, 王中钰, 陈景文, 等. 环境新污染物治理与化学品环境风险防控的系统工程[J]. *科学通报*, 2022, 67(3): 267–277.
- [60] Sanchez M, Ramos D R, Fernandez M I, et al. Removal of emerging pollutants by a 3-step system: Hybrid digester, vertical flow constructed wetland and photodegradation post-treatments[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 842: 156750.
- [61] Pereira L C, De Souza A O, Bernardes M F F, et al. A perspective on the potential risks of emerging contaminants to human and environmental health[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(18): 13800–13823.
- [62] Mitra S, Chakraborty A J, Tareq A M, et al. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity[J]. *Journal of King Saud University-Science*, 2022, 34(3): 101550.

- 101865.
- [63] Zhu Y, Che R, Zong X, et al. A comprehensive review on the source, ingestion route, attachment and toxicity of microplastics/nanoplastics in human systems[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 352: 120039.
- [64] Pang L, Li M, Dukureh A, et al. Association between prenatal perfluorinated compounds exposure and risk of pregnancy complications: A meta-analysis[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 272: 116017.
- [65] Mathur P, Sanyal D, Callahan D L, et al. Treatment technologies to mitigate the harmful effects of recalcitrant fluoroquinolone antibiotics on the environment and human health[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 291: 118233.
- [66] Fan Y, Pan D, Yang M, et al. Radiolabelling and in vivo radionuclide imaging tracking of emerging pollutants in environmental toxicology: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 866: 161412.
- [67] Yamashita R, Nishio M, Do R K G, et al. Convolutional neural networks: An overview and application in radiology[J]. *Insights into Imaging*, 2018, 9(4): 611–629.
- [68] Wang X, Yu D, Ma L, et al. Using big data searching and machine learning to predict human health risk probability from pesticide site soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 320: 115798.

New pollutants in river and lake water: Occurrence characteristics, ecological risks, and prevention and control measures

WANG Bin^{1,2}, LI Wenjia¹, WANG Tao³, LI Jiang³, XU Xiaoyi⁴, ZHANG Lin¹, HOU Li'an^{1,5*}

1. Department of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China

3. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China

4. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China

5. Detachment 23, Unit 96901 People's Liberation Army of China, Beijing 100094, China

Abstract The frequency and types of new pollutants detected in rivers and lakes are increasing, including persistent organic pollutants, endocrine disruptors, antibiotics, microplastics and other new pollutants. Management of new pollutants has become one of the priorities of ecological environmental protection. Compared with traditional pollutants, new pollutants pose potential risks to the safety of river and lake ecosystems and the health of drinking water. China's new pollutant management started late in general, facing fewer technological monitoring means, the bottom of pollutants being unclear, lacking of better related prevention and control regulations etc. In this paper, the development of policies and action plans for new pollutants are sorted out, the characteristics and ecological risks of new pollutants in rivers and lakes are analyzed, the research progress on new pollutant prevention and control technologies in rivers and lakes is summarized, and new pollutant prevention and control strategies for rivers and lakes and methods for evaluating the effects of health risks are proposed, so as to provide a reference for the prevention and control strategies of new pollutants in rivers and lakes.

Keywords river and lake water; emerging contaminants; risk assessment; pollutant removal techniques ●



(责任编辑 卫夏雯)