

城镇污水厂新污染物赋存特征及去除技术研究进展

封涛涛¹, 王斌^{1,2*}, 李江³, 王涛³, 许晓毅⁴, 侯立安^{5*}

1. 贵州大学土木工程学院, 贵阳 550025
2. 浙江大学化学工程与生物工程学院, 杭州 310027
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 城镇污水处理厂作为新污染物的重要源和汇, 是控制新污染物排放的关键屏障。城镇污水中新污染物赋存特征相关研究发现, 不同地区污水中新污染物浓度呈现出明显的地域特征, 主要与区域环境条件、服务区域人口密度、污水来源、社会经济状况和产业布局等因素密切相关; 解析了新污染物在城镇污水处理厂各单元的迁移转化规律, 明晰了污水处理厂新污染物去除受污水处理工艺、新污染物种类等关键因子影响; 阐明了目前城镇污水处理厂去除新污染物面临法规标准空白、监测技术短板明显、风险评估体系建设难度大、去除技术时效性低等挑战, 并提出了相应防控对策。

关键词 城镇污水处理厂; 新污染物; 赋存特征; 污染物去除技术

自2003年西班牙学者首次提出新兴污染物概念以来, 其命名方式存在差异, 学界也称之为“新兴污染物”或“新型污染物”, 我国“十四五”规划后被

统称为“新污染物”。新污染物(Emerging Contaminants, ECs)是指那些具有生物毒性、环境持久性、生物累积性等特征, 对环境或者人体健康存在较大

收稿日期: 2024-01-04; 修回日期: 2024-04-28

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: 封涛涛, 硕士研究生, 研究方向为水环境中新污染物治理, 电子信箱: 1271440586@qq.com; 王斌(通信作者), 特聘教授, 研究方向为水中新污染物治理, 电子信箱: bwang7@gzu.edu.cn; 侯立安(共同通信作者), 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: 封涛涛, 王斌, 李江, 等. 城镇污水厂新污染物赋存特征及去除技术研究进展[J]. 科技导报, 2024, 42(11): 36-46;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.00018

生态风险,但尚未纳入环境管理或者现有管理措施不足的有毒有害化学物质^[1],主要包括持久性有机污染物、内分泌干扰物、抗生素和微塑料等四大类。其“新”主要体现在2个方面,一是相对常规污染物而言,二是种类繁多,且更为重要的“新”是因为其种类还可能会持续增加。随着人们对化学物质的环境和生态安全认识的不断深入以及环境监测技术的不断发展,可能被识别出或关注的新污染物种类还会持续增加^[2]。

我国是各类工业品、生活用品、药品和个人护理产品的生产和消耗大国,长期存在工业化学品与日常生活用品的制造、使用和排放,导致含有不同浓度水平新污染物的生活污水、工业废水和养殖废水通过各种途径进入城镇污水处理厂,使其成为绝大多数新污染物的汇聚地和污染源^[3]。截至2020年底,我国城市污水处理厂已有2618座,污水年排放量达到571.36亿 m^3 ,残留于排放污水中新污染物对生态环境的危害不容忽视。据报道,在北美、欧洲和亚洲污水处理厂进水和出水中均频繁检出抗生素、药品、个人护理产品、激素等新污染物^[4]。中国污水处理厂出水中新污染物的总浓度为1392 ng/L ~35453 ng/L ,其中抗生素类新污染物经污水厂处理后仍可能存在破坏生态环境风险^[5]。水环境中的新污染物赋存特征与污水处理厂的排放密切相关,可能的原因是新污染物自身的理化特性导致传统污水处理工艺难以实现其彻底去除,进而通过污水厂出水排放等多种途径进入水环境中。水环境中新污染物浓度通常处于 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ~ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 级水平,但因其生物毒性、环境持久性等特点,即使低浓度的新污染物也可能造成显著的环境健康风险^[6],诸如抗生素类新污染物,生物毒性强,可抑制藻类、细菌和真菌的生长和诱导抗性基因(ARG)的产生,对微生态系统和人类健康构成潜在的威胁^[7]。内分泌干扰物会损害生物的内分泌系统,可能造成行为异常、生殖障碍等影响^[8]。人类或动物长期暴露于新污染物污染环境,可能会引起慢性中毒,甚至诱发癌症^[9]。因此,随着人们对环境安全的愈发重视及污水回用的需求增加,加强城镇污水处理厂新污染物去除,对科学落实新污染物治理行动方案具有

重要意义。本文在分析城镇污水处理厂污水中新污染物赋存特征的基础上,解析其在污水处理厂各单元的迁移转化规律,阐述污水处理工艺对新污染物去除特性,提出污水处理厂新污染物去除对策。

1 城镇污水处理厂中新污染物赋存特征

城镇污水中新污染物的赋存特征与区域环境条件、服务区域人口密度、污水来源、社会经济状况和产业布局等因素相关,导致不同地区污水处理厂中新污染物浓度表现出明显的地域差异。根据图1所示,城镇污水处理厂中新污染物的赋存特征总体呈现为北方高于南方、东部高于西部,以服务区域人口密集、生活污水占主导的污水处理厂进水中抗生素类药物和雌激素类内分泌干扰物浓度偏高。Zhang等^[10]研究发现芜湖市某污水处理厂进水和出水中氧氟沙星浓度分别为 587.4 ± 537.4 和 226.0 ± 457.5 ng/L ,出水中仍存在较高的抗生素残留浓度,可构成中等风险($RQ=0.111\sim 0.583$)。Li等^[11]调查发现,在广东省38个污水处理厂进、出水中阿莫西林的平均浓度分别为1967.18和766.90 ng/L 。Ashfaq等^[12]研究发现,厦门污水处理厂中乙酰氨基酚和咖啡因的最高浓度分别为5650和2840 ng/L ,抗生素浓度范围为2.42~616 ng/L 。Sun等^[13]对陕西省51个污水处理厂中新污染物进行研究,结果显示诺氟沙星和氧氟沙星的最高浓度分别为474.2和656.18 ng/L ,经过不同处理工艺处理后,抗生素含量可降低5.88%~94.16%。Liu等^[14]研究表明,北京某污水处理厂进水中咖啡因、N,N-二乙基间甲苯酰胺和美托洛尔浓度分别为11387.0、9568.4和930.2 ng/L ,经处理后的新污染物累积浓度可从 2.54×10^4 ng/L 降至 1.44×10^3 ng/L ,氧氟沙星、卡马西平和咖啡因仍然存在于水体中,对水生动物构成高风险($RQ>1$)。Mu等^[15]对全国148座污水处理厂中的全氟化合物进行了系统性研究,研究表明当前的污水处理工艺不能有效地去除全氟化合物,进、出水中全氟化合物总浓度分别为4.2~1133.9和2.4~1088.5 ng/L 。Li等^[16]以为北京810万人提供服

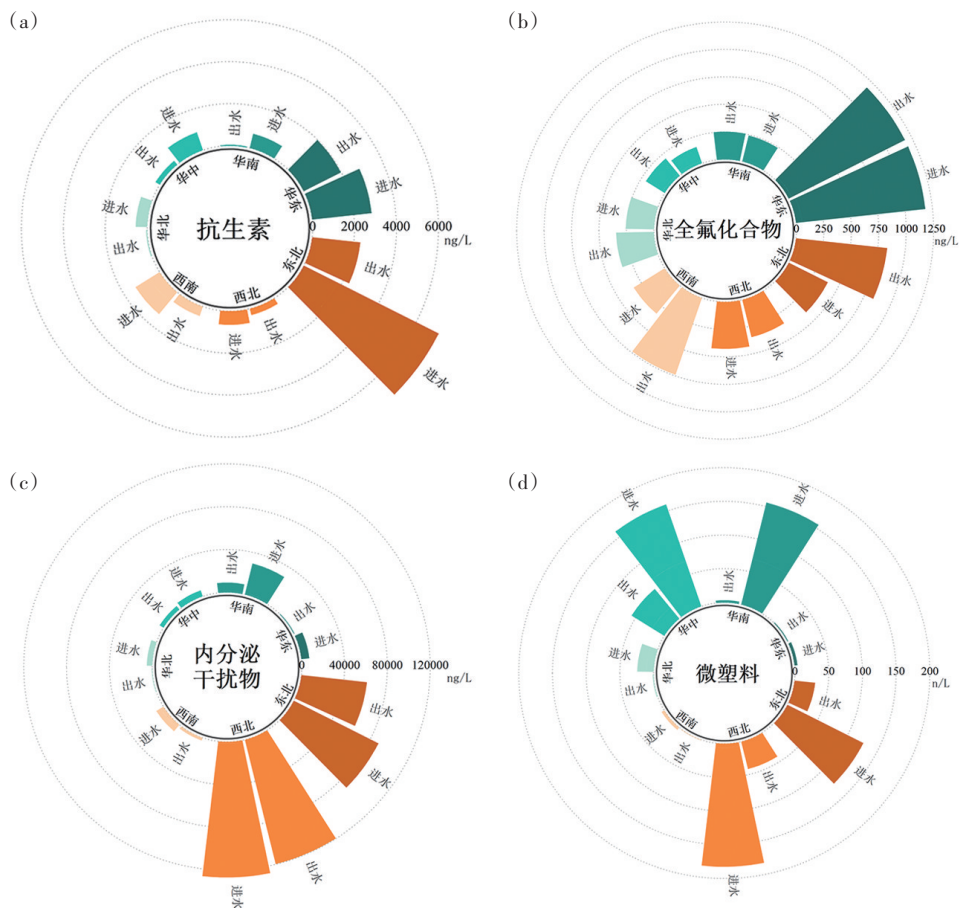


图1 城镇污水处理厂中的新污染物赋存特征

务的污水处理厂为研究对象,调查其中的抗生素含量,结果显示,进水中喹诺酮类和磺胺类抗生素浓度分别为4916 ng/L和2961 ng/L,经活性污泥工艺处理后,三级出水的浓度分别为123 ng/L和25.9 ng/L。

污水处理厂中新污染物浓度还受季节性因素的影响,主要体现在不同季节降雨量和人类药物用量变化^[17]。夏季高降雨量增加污水处理厂的总污水量,在降雨充足区域,由于降雨对污染物浓度起到稀释作用,使得新污染物浓度显著低于其他区域^[13]。对于人口密度较大的城镇而言,生活污水和医疗废水是城市污水的重要组成部分,并且家庭和临床常用的大环内酯类、氟喹诺酮类和磺胺类等抗生素药物,这些药物的使用量通常会随着寒冷时期疾病发病率的增加而增加,导致冬季污水中抗生素浓度高于夏季^[18]。

2 城镇污水处理厂新污染物去除现状

我国现有城镇污水处理厂工艺多为物理、化学和生物单元组成的一级处理、二级处理和深度处理技术,各处理单元主要是针对悬浮颗粒、氮、磷、溶解性有机物、病原体等常规指标的去除而设计的^[19]。然而,由于新污染物具有难降解、有生物毒性等特点,传统污水处理工艺难以彻底去除这些新污染物^[20]。据报道,以活性污泥法为主的污水处理工艺对母体形态的新污染物去除效率相对较低,甚至出现了“负去除”的现象,但对于新污染物代谢产物的去除率却相对较高,其可能原因是在污水处理过程中,新污染物母体化合物与其代谢产物发生了相互转化^[21]。图2^[22]展示了PPCPs类新污染物在城镇污水处理厂各处理单元中的质量负荷变化和去除率。

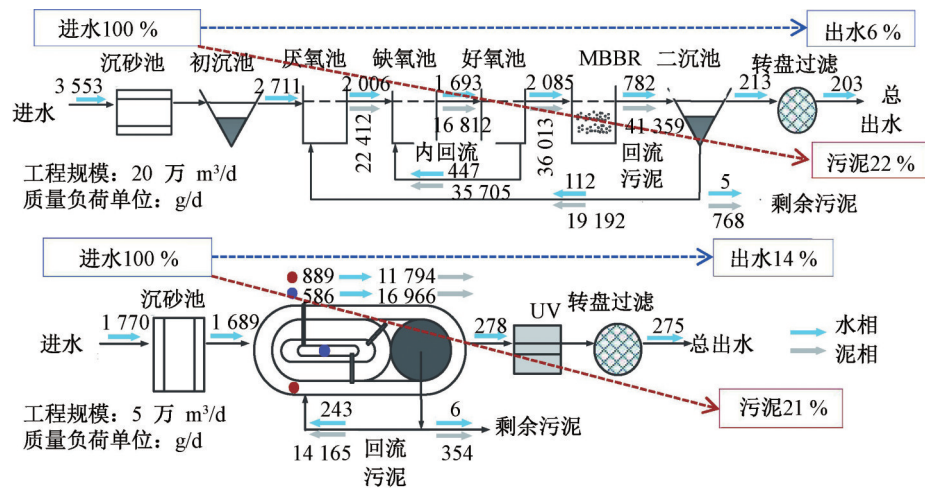


图2 PPCPs类新污染物在污水处理厂中的质量负荷变化和去除率

2.1 初级处理单元

初级处理工艺通常采用格栅、沉淀池和沉砂池等工艺单元,通过重力沉淀或适当曝气实现对污水中悬浮物的去除和减轻污水的腐化程度^[23]。在污水处理厂一级处理过程中,有机物含量和污染物浓度较高的进水得到了一定的处理,ECs被部分吸附到污泥中,可为ECs后续的生物降解提供良好环境^[24]。初级污泥上的吸附是ECs的主要去除途径,ECs可以通过与初级污泥上的脂质部分进行疏水相互作用而被吸附,也可以通过静电相互作用被吸附到污泥颗粒表面^[25]。因此,在一级处理单元中ECs的去除效率取决于它们的物理化学性质、吸附介质特性和操作环境条件。通常情况下,使用固-水分配系数(K_d)、辛醇-水分配系数(K_{ow})和酸解离常数(pK_a)来评估ECs的吸附趋势^[26,27]。 K_d 表示污泥中污染物浓度与水中浓度的比率,如式(1)所示。

$$K_d = \frac{C_{sol}}{C_{aq} C_{sp}} \quad (1)$$

其中, C_{sol} 是固相上污染物的浓度($\mu\text{g/L}$); C_{aq} 是污染物的溶解浓度($\mu\text{g/L}$); C_{sp} 是废水中悬浮颗粒物的浓度(kg/L)。 K_d 值小于300~500 L/kg MLSS的污染物,对污泥没有显著吸附效果。除少量新污染物,如阿奇霉素、双氯芬酸和三氯生等,大部分ECs的 K_d 值小于300~500 L/kg MLSS,吸附效果不显著。同时,ECs的 pK_a 值对静电相互作用引发的吸附至关重要,当pH高于 pK_a 时,解离出带负电荷的化合

物可能会通过电荷排斥阻碍ECs的吸附^[25]。Tran等^[28]研究发现,布洛芬、对乙酰氨基酚、阿替洛尔、咖啡因等新污染物由于其阳离子存在形态容易与带负电的活性污泥发生静电相互作用,在环境pH(6~8)条件下去除效率为83.7%~94.6%。因此,通过分析污水中ECs的理化特性,优化污水处理厂运行条件,可有效提升初级处理单元对新污染物的去除效能。

2.2 二级处理单元

活性污泥工艺(ASP)是污水处理厂中最常用的二级处理工艺,此外还有膜生物反应器(MBR)、曝气生物滤池(BAF)、移动床生物反应器(MBBR)、微藻生物反应器、氧化沟等^[29]。二级处理工艺通常基于生物处理去除有机物、氮和磷等营养物质,在此过程中,新污染物主要通过生物降解/生物转化和吸附来实现去除,而光降解和挥发等其他方法对新污染物去除效率的影响微不足道。新污染物在各污水处理厂的去效率差异主要取决于其本身的物化性质及所采用的处理工艺操作条件。Tran等^[4]研究发现,新污染物在污水处理厂中的去除效率存在差异,如四环素、对乙酰氨基酚、布洛芬雌三醇、双酚A、咖啡因等在污水处理厂中的去除率可达80%以上,而林可霉素、噻苯达唑、可待因、美托洛尔、普萘洛、卡马西平等的去除率却低于40%。此外,在污水处理过程中,一些抗生素、非甾体抗炎药和 β 受体阻滞剂等可能表现出负去除率,这可能

是由于代谢产物通过酶活性和非生物过程重新转化为母体化合物所致^[30]。

2.2.1 活性污泥工艺

活性污泥工艺依赖于其中的活性生物质对新污染物进行生物降解/生物转化。通过微生物的羟基化、羧化、糖基化和环裂解等多种酶促反应,实现复杂的新污染物分解为更简单的中间产物^[31]。当微生物降解一些具有毒性且难降解的新污染物时,共代谢是重要的降解过程,其利用初级碳源来维持生长和酶合成以实现对新污染物降解过程的支持。与生物滴滤池、厌氧泻湖和人工湿地等其他低成本技术相比,活性污泥工艺能够更好地去除易吸附的新污染物。这可能是由于常规处理期间强制曝气下促进生物降解,以及常规处理系统中产生的大量污泥增强了吸附效应。

新污染物的生物降解取决于其理化性质、污泥特性及运行条件,其理化性质主要包括结构复杂性、生物利用度和官能团。结构复杂度较低的化合物更易于被生物降解,短链化合物和不饱和脂肪族化合物比具有芳香族、高度支化或长链化合物更容易生物降解^[21]。其中官能团也是影响新污染物去除效能的重要因素之一,相较于顽固的吸电子基团($-\text{C}\equiv\text{N}$ 、 $-\text{CF}_3$ 、 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{COOR}$ 、 $-\text{COR}$ 、 $-\text{Cl}$ 、 $-\text{F}$ 、 $-\text{CONH}_2$ 、 $-\text{CH}$),大多数具有供电子基团(如 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{NHR}$ 、 $-\text{OH}$ 、 $-\text{CH}_3$ 、 $-\text{OCH}_3$ 等羟基和伯胺基团)的化合物能够在生物处理过程中可获得更高的去除效果^[32]。生物量活性、微生物群落结构和优势菌群等是评估活性污泥特性的重要指标。ECs去除依赖于活性污泥的特性,C/N比、接种污泥类型和碳源等因素会影响污泥生物量、微生物群落和优势微生物。Wang等^[33]以蔗糖为碳源培养的好氧颗粒污泥(AGS)具有高生物量(12.65 g/L),改善了微生物群落多样性和优势微生物,对抗生素的去除效率能够达到81.40%。优化污水处理厂的氧化还原条件、水力停留时间、污泥停留时间等工艺运行参数,可改善ECs去除效能。氧化还原条件包括好氧、缺氧和厌氧条件,不同的氧化还原条件对ECs的生物降解有不同影响,通常好氧条件下能够增强对药用活性化合物(PhAC)的去除,而磺胺甲

恶唑、甲氧苄啶和萘普生在厌氧条件下能够实现更高的降解效率^[34]。较长的污泥停留时间(SRT)可使缓慢生长的微生物在污泥富集,适当延长污泥停留时间会提高体系中污泥浓度,从而增强了污泥的生物降解能力^[35]。然而,也有部分研究报道ECs的去除与SRT无直接相关性^[36]。延长水力停留时间(HRT)能够降低COD,减少易降解物质和复杂分子之间的竞争,并且增加ECs与污泥间的接触时间,有利于ECs降解^[37]。此外,环境条件(温度、pH)也是影响新污染物去除效能的重要因子;如可电离ECs(磺胺甲噁唑、布洛芬、酮洛芬、双氯芬酸等)在酸性条件下以疏水形式存在,易通过活性污泥吸附实现去除,而不可电离的化合物去除效率相对较低^[38]。相比夏季,冬季污水温度相对较低,微生物活性衰减,进而导致冬季ECs去除率低于夏季。

2.2.2 膜生物反应器

膜生物反应器(MBR)将生物降解机制与膜分离相结合,被认为是一种克服活性污泥工艺局限性的污水处理技术。传统活性污泥工艺的SRT短和生物量浓度低,导致ECs在生物处理过程中未能充分降解。膜生物反应器具有更高的新污染物去除效率,主要归因于如下几个特征:(1)较长的SRT(膜生物反应器15~80 d对比活性污泥工艺7~20 d),MBR中较长SRT允许缓慢生长的细菌富集,并随后建立多样化微生物群落,有利于实现ECs共代谢降解;(2)通过膜的截留作用实现高效的生物质/污泥分离,提高反应器的生物质浓度;(3)能够在不干扰SRT的情况下,调节HRT可处理具有不同理化特性的ECs^[39]。此外,MBR还具有占地面积小和出水质量高的特点,在去除疏水性和易生物降解的新污染物方面表现出显著的效果,但在去除亲水和生物持久性的新污染物方面效果较差。Tadkaew等^[40]研究发现,MBR对疏水性较强($\text{Log}D>3.2$)的新污染物去除效率超过85%,而对较为亲水($\text{Log}D<3.2$)的新污染物去除效率通常低于20%。MBR是ECs的有效处理技术之一,但膜污染和反复冲洗等因素限制了其在污水处理厂中的大规模应用。

2.3 深度处理单元

由于二级处理单元对新污染物的去除效果有

限,为降低新污染物对受纳水体的不利影响,通过深度处理工艺可进一步去除具有难生物降解性或微生物毒性的痕量新污染物,以获得符合排放和回用标准的高质量出水(图3)。

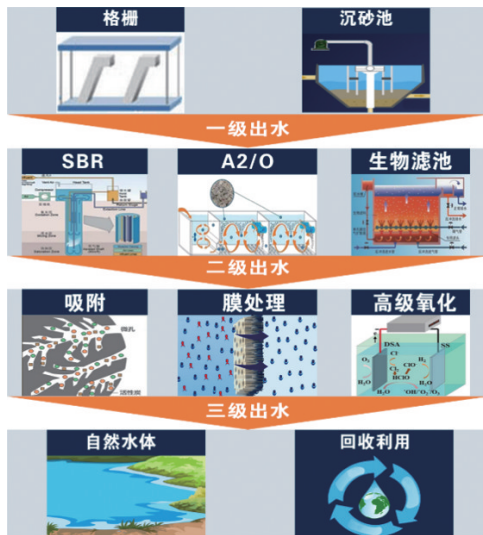


图3 城镇污水处理厂的工艺流程

污水处理厂常用活性炭吸附、紫外线消毒、臭氧消毒和氯消毒等处理工艺作为深度处理单元。近年来,具有新污染物去除功效的深度去除技术主要包括吸附、高级氧化、膜分离技术等^[41]。吸附技术主要依靠吸附剂对新污染物的吸附作用,常见的吸附剂包括活性炭、生物炭、碳纳米管、黏土矿物等。膜分离技术具有高效率、低能耗和易操作的优势,如纳滤和反渗透对新污染物去除展现了巨大的应用潜力。值得注意的是,吸附和膜分离技术仅对新污染物进行了简单的分离,仍需在处理后对废化

吸附剂和膜浓缩液进行处置。高级氧化技术是通过产生活性物种将新污染物及其副产物进一步矿化为 CO_2 、 H_2O 和简单的无机离子,主要包括芬顿氧化、臭氧化、光催化等。De la Cruz等^[42]研究发现尽管污水中的溶解性有机质会阻碍光传递和淬灭活性物质,但光芬顿可去除污水处理厂出水中97%新污染物。尽管高级氧化技术具有高去除速率,能够有效破坏ECs的分子结构,但这些化学氧化过程也可能产生比母体化合物更有害或持久的副产物。

耦合工艺的构建可弥补单个深度处理工艺的局限性,具有广阔的应用前景。针对膜分离技术在应用过程中出现的膜堵塞、膜污染等问题,可通过膜分离和高级氧化(如芬顿、臭氧、光催化等)耦合工艺,充分发挥二者优势,不仅可实现污水中新污染物的高效去除,同时也可缓解膜污染和解决催化剂难以回收利用的难题^[43]。据报道,将高级氧化技术作为膜系统的前处理、后处理或集成于膜反应器中,可实现高达90%的有机污染物去除效率^[44]。目前,缺乏对于耦合工艺实际应用潜力的深入了解,仍需对其协同作用机理和实际废水处理性能进行深入研究。

3 城镇污水处理厂新污染物处理面临的挑战

新污染物作为城镇污水污染防控的新领域,受到越来越多关注的同时,也给城镇污水处理带来诸多挑战^[45],如图4所示。

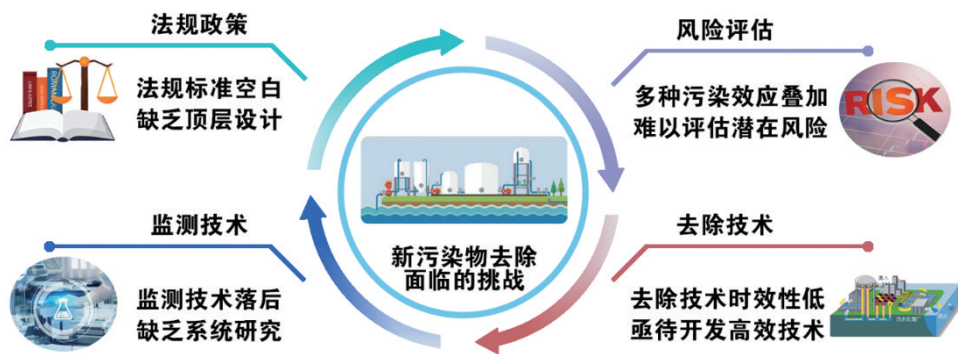


图4 新污染物处理面临的挑战

一是法规标准体系空白。2001年12月,国家863项目“环境内分泌干扰物的筛选与控制技术”的立项,正式开启了我国的新污染物防范工作。2020年10月,中共中央、国务院发布的《关于深入打好污染防治攻坚战的意见》中强调“加强新污染物治理”。随着污染防治攻坚战的深入推进,新污染物治理已成为新阶段生态环境保护工作的重点。2022年5月,国务院办公厅发布了《新污染物治理行动方案》,是我国首个针对新污染物治理的顶层设计文件^[46]。我国新污染物管控工作起步较晚,针对新污染物的管控、禁止、限排方面的法规标准尚属空白,但随着新污染物环境管理制度、体制机制、监测评估、科学研究等建设逐步推进,亟须加强新污染物治理的顶层设计,制定城镇污水处理厂新污染物的排放标准,引领污水处理行业高质量发展。

二是新污染物监测技术短板明显。新污染物涉及的行业广、产业链长、时间跨度大、低含量排放,且具有较强的隐蔽性,难以实现对其排放源进行有效监管与追踪。当前,现有的检测技术常包含萃取、净化、浓缩富集等多个前处理步骤,操作较为繁琐、传统随机采样以及实验室分析技术容易产生时间差,存在滞后性。缺乏针对新污染物的检测标准指引,监测难,使得新污染物分布状况和区域特征污染的系统研究缺乏^[47]。

三是新污染物风险评估体系建设难度大。城市污水处理厂的污水来源除生活污水外,还会接纳部分工业废水、垃圾渗滤液等,导致城市污水中多种新污染物聚集,其相互作用以及对环境过程的影响更加复杂,难以针对整个生命周期进行风险评估。现有生态风险评价多基于单一新污染物,缺乏针对复合污染的评价。同时,目前毒理研究仅限于已发现的新污染物,无法对已知新污染物的类似物或衍生物进行潜在风险评估,缺乏客观、科学的预测模型。

四是城镇污水处理厂新污染物去除技术时效性低。当前,基于活性污泥法的生物处理技术为主的城镇污水处理厂工艺多针对氮、磷元素等常规污染物去除而设计,难以适应污水中浓度低且成分复杂的新污染物,导致出水中仍残留较高浓度的新污

染物,可能污染受纳水体。由于缺乏新污染物的污染源、迁移转化途径、赋存特征以及环境健康风险等基础数据,常规的吸附、高级氧化等技术难以直接应用,亟待开发一种绿色高效且适合于城市污水处理厂新污染物的去除技术。

4 城镇污水处理厂新污染物去除对策

4.1 完善法规制度体系,控制新污染物源头排放

新污染物治理过程中顶层设计是重点,科学落实《新污染物治理行动方案》是关键。借鉴欧盟、美国等已有化学品管理成熟经验,开展新污染物风险筛查、分级评估,建立配套新化学品管控制度,如包括登记、危害分类、名录管理、排放与转移登记等制度。立足清洁生产理念,大力发展绿色制造技术,减少生产过程和产品生命周期新污染物排放,树立“风险”的全生命周期理念;构建国际、国家、地方等多层面协调机制,协同推进新污染物治理^[48]。还需制定城镇污水处理厂新污染物排放标准,严格控制污水处理厂出水中新污染物进入受纳水体。

4.2 开发先进监测技术,建立新污染物管控清单

为加强新污染物的监管能力建设,亟须发展监测评估手段,全面推进新污染物清单调查研究,掌握新污染物的本底资料。首先是建立新污染物数据共享制度;整合污水中新污染物环境调查监测、企业排放信息数据收集、数据质量监督等信息数据,实现新污染物的数据共享。其次是开展污水中新污染物清单系统性研究。借助大数据、物联网等新科技,开发先进自动化在线监测技术,对市政污水管网接纳污水源头排放的新污染物进行实时监控,摸清进入污水厂的新污染物底数,形成污水处理厂新污染物管控清单。最后,聚焦重点流域新污染物监测。以长江、黄河、珠江等重点流域典型城镇污水处理厂,开展污水中新污染物监测、识别和暴露分析,实现新污染物的快速溯源^[49]。

4.3 聚焦科技创新前沿,开发新污染物处理新技术

随着污水中新污染物的频繁检出,传统污水处理工艺同时面临着传统污染物和新污染物去除的双重考验。为应对污水处理领域日渐复杂的发展

趋势,围绕新技术“广谱性、安全性、数值化”的3个特点,开发绿色高效的深度处理新技术(如新膜水处理技术、纳米技术、生物电化学技术等),已成为污水处理厂实现新污染物高效去除的关键。作为21世纪的水处理新技术,膜分离技术在污水中新污染物去除领域具有良好的发展前景,但传统膜技术易堵塞、易污染等问题,难以达到理想的去除效果,亟须开发基于新材料的新膜技术^[50]。此外,通过将膜分离技术与芬顿、光催化等高级氧化工艺进行耦合,充分发挥膜分离和高级氧化的优势,不仅可有效去除污水中新污染物,同时也能缓解膜污染,并解决催化剂难回收利用的问题,这种“一石二鸟”的优势在新污染物治理领域具有广阔的应用前景^[51]。此外,借助大数据信息、人工智能、机器人等新科技,建立污水处理行业全过程监管平台、风险预警和防控体系,形成智慧化管理平台,实现污染物污水中新污染物数字化防控^[52](图5)。



图5 城镇污水处理厂防控策略

5 结论

城镇污水处理厂作为新污染物的“源”和“汇”，其处理效果与污水处理厂工艺类型、工艺参数、新污染物的理化特性与残留浓度等因素有关。尽管当前城镇污水处理厂工艺可去除部分新污染物,但由于污水处理厂面临新污染物底数不清、排放限制标准缺失、风险评估难等挑战,严重制约污水中新污染物的高效削减,残留于出水中的新污染物对水环境的生态风险仍需重视。为提升污水中新污染物的去除效能,亟须开展新污染物排放相关标准规范制定、污水处理工艺提质增效、绿色高效新技术

研发等措施,并科学落实《新污染物治理行动方案》,以保障公众健康和生态环境安全,助力实现健康中国建设。

参考文献(References)

- [1] 李江蕴. 我国新污染物治理现状与对策[J]. 质量与认证, 2023(7): 81-83.
- [2] Guo J, Tu K, Chou L B, et al. Deep mining of reported emerging contaminants in China's surface water in the past decade: Exposure, ecological effects and risk assessment[J]. Water Research, 2023, 243: 120318.
- [3] Rizzo L, Malato S, Antakyali D, et al. Consolidated vs new advanced treatment methods for the removal of contaminants of emerging concern from urban wastewater[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 655: 986-1008.
- [4] Tran N H, Reinhard M, Gin K Y H. Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment plants from different geographical regions—A review [J]. Water Research, 2018, 133: 182-207.
- [5] Liu J C, Yang F, Cai Y F, et al. Unveiling the existence and ecological hazards of trace organic pollutants in wastewater treatment plant effluents across China[J]. Eco-Environment & Health, 2024, 3(1): 21-29.
- [6] Giri A, Pant D, Chandra Srivastava V, et al. Plant-microbe assisted emerging contaminants (ECs) removal and carbon cycling[J]. Bioresource Technology, 2023, 385: 129395.
- [7] Li S Q, Zhu Y, Zhong G B, et al. Comprehensive assessment of environmental emissions, fate, and risks of veterinary antibiotics in China: An environmental fate modeling approach[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(12): 5534-5547.
- [8] Ismanto A, Hadibarata T, Kristanti R A, et al. Endocrine disrupting chemicals (EDCs) in environmental matrices: Occurrence, fate, health impact, physio-chemical and bio-remediation technology[J]. Environmental Pollution, 2022, 302: 119061.
- [9] Bilal M, Adeel M, Rasheed T, et al. Emerging contaminants of high concern and their enzyme-assisted biodegradation: A review[J]. Environment International, 2019, 124: 336-353.
- [10] Zhang L R, Zhu Z, Zhao M L, et al. Occurrence, removal, emission and environment risk of 32 antibiotics and

- metabolites in wastewater treatment plants in Wuhu, China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 899: 165681.
- [11] Li P, Wang Y R, Huang B, et al. Antibiotics in wastewater of Guangdong, China: Distribution patterns, and their environmental risk due to incomplete removal[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 849: 157889.
- [12] Ashfaq M, Li Y, Wang Y W, et al. Occurrence, fate, and mass balance of different classes of pharmaceuticals and personal care products in an anaerobic-anoxic-oxic wastewater treatment plant in Xiamen, China[J]. *Water Research*, 2017, 123: 655–667.
- [13] Sun C S, Hu E, Liu S W, et al. Spatial distribution and risk assessment of certain antibiotics in 51 urban wastewater treatment plants in the transition zone between North and South China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 437: 129307.
- [14] Liu J, Ge S M, Shao P, et al. Occurrence and removal rate of typical pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in an urban wastewater treatment plant in Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2023, 339: 139644.
- [15] Mu H X, Li J H, Chen L, et al. Distribution, source and ecological risk of per- and polyfluoroalkyl substances in Chinese municipal wastewater treatment plants[J]. *Environment International*, 2022, 167: 107447.
- [16] Li W H, Shi Y L, Gao L H, et al. Occurrence and removal of antibiotics in a municipal wastewater reclamation plant in Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(4): 435–444.
- [17] Zhao H, Cao Z, Liu X, et al. Seasonal variation, flux estimation, and source analysis of dissolved emerging organic contaminants in the Yangtze Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 125(1/2): 208–215.
- [18] Liu X H, Zhang G D, Liu Y, et al. Occurrence and fate of antibiotics and antibiotic resistance genes in typical urban water of Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 246: 163–173.
- [19] Chandel N, Ahuja V, Gurav R, et al. Progress in microalgal mediated bioremediation systems for the removal of antibiotics and pharmaceuticals from wastewater[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 825: 153895.
- [20] Oberoi A S, Jia Y Y, Zhang H Q, et al. Insights into the fate and removal of antibiotics in engineered biological treatment systems: A critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(13): 7234–7264.
- [21] Tiwari B, Sellamuthu B, Ouarda Y, et al. Review on fate and mechanism of removal of pharmaceutical pollutants from wastewater using biological approach[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224: 1–12.
- [22] 郑兴灿, 张昱, 贲伟伟, 等. 城镇污水微量新污染物赋存特征与全过程控制技术研究[J]. *给水排水*, 2022, 58(6): 26–34.
- [23] Lasaki B A, Maurer P, Schönberger H, et al. Empowering municipal wastewater treatment: Enhancing particulate organic carbon removal via chemical advanced primary treatment[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, 32: 103436.
- [24] Stasinakis A S, Thomaidis N S, Arvaniti O S, et al. Contribution of primary and secondary treatment on the removal of benzothiazoles, benzotriazoles, endocrine disruptors, pharmaceuticals and perfluorinated compounds in a sewage treatment plant[J]. *The Science of the Total Environment*, 2013, 463/464: 1067–1075.
- [25] Luo Y L, Guo W S, Ngo H H, et al. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment [J]. *The Science of the Total Environment*, 2014, 473/474: 619–641.
- [26] Saidulu D, Gupta B, Gupta A K, et al. A review on occurrences, eco-toxic effects, and remediation of emerging contaminants from wastewater: Special emphasis on biological treatment based hybrid systems[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4): 105282.
- [27] Rout P R, Zhang T C, Bhunia P, et al. Treatment technologies for emerging contaminants in wastewater treatment plants: A review[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 753: 141990.
- [28] Tran N H, Gin K Y H. Occurrence and removal of pharmaceuticals, hormones, personal care products, and endocrine disruptors in a full-scale water reclamation plant [J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 599/600: 1503–1516.
- [29] Langbehn R K, Michels C, Soares H M. Antibiotics in wastewater: From its occurrence to the biological removal by environmentally conscious technologies[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 275: 116603.
- [30] Stadler L B, Su L J, Moline C J, et al. Effect of redox conditions on pharmaceutical loss during biological wastewater treatment using sequencing batch reactors[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 282: 106–115.
- [31] Nguyen P Y, Carvalho G, Reis M A M, et al. A review of the biotransformations of priority pharmaceuticals in

- biological wastewater treatment processes[J]. *Water Research*, 2021, 188: 116446.
- [32] Carneiro R B, Gonzalez-Gil L, Londoño Y A, et al. Acidogenesis is a key step in the anaerobic biotransformation of organic micropollutants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 121888.
- [33] Wang X C, Chen Z L, Shen J M, et al. Effect of carbon source on pollutant removal and microbial community dynamics in treatment of swine wastewater containing antibiotics by aerobic granular sludge[J]. *Chemosphere*, 2020, 260: 127544.
- [34] Suarez S, Lema J M, Omil F. Removal of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) under nitrifying and denitrifying conditions[J]. *Water Research*, 2010, 44(10): 3214–3224.
- [35] Prasertkulsak S, Chiemchaisri C, Chiemchaisri W, et al. Removals of pharmaceutical compounds at different sludge particle size fractions in membrane bioreactors operated under different solid retention times[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 368: 124–132.
- [36] Samaras V G, Stasinakis A S, Mamais D, et al. Fate of selected pharmaceuticals and synthetic endocrine disrupting compounds during wastewater treatment and sludge anaerobic digestion[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 244/245: 259–267.
- [37] Petrie B, McAdam E J, Hassard F, et al. Diagnostic investigation of steroid estrogen removal by activated sludge at varying solids retention time[J]. *Chemosphere*, 2014, 113: 101–108.
- [38] Tadkaew N, Sivakumar M, Khan S J, et al. Effect of mixed liquor pH on the removal of trace organic contaminants in a membrane bioreactor[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(5): 1494–1500.
- [39] Cecconet D, Molognoni D, Callegari A, et al. Biological combination processes for efficient removal of pharmaceutically active compounds from wastewater: A review and future perspectives[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2017, 5(4): 3590–3603.
- [40] Tadkaew N, Hai F I, McDonald J A, et al. Removal of trace organics by MBR treatment: The role of molecular properties[J]. *Water Research*, 2011, 45(8): 2439–2451.
- [41] Haciosmanoğlu G G, Mejías C, Martín J, et al. Antibiotic adsorption by natural and modified clay minerals as designer adsorbents for wastewater treatment: A comprehensive review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 317: 115397.
- [42] De la Cruz N, Giménez J, Esplugas S, et al. Degradation of 32 emergent contaminants by UV and neutral photo-Fenton in domestic wastewater effluent previously treated by activated sludge[J]. *Water Research*, 2012, 46(6): 1947–1957.
- [43] Rostam A B, Taghizadeh M. Advanced oxidation processes integrated by membrane reactors and bioreactors for various wastewater treatments: A critical review[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(6): 104566.
- [44] Titchou F E, Zazou H, Afanga H, et al. Removal of organic pollutants from wastewater by advanced oxidation processes and its combination with membrane processes [J]. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2021, 169: 108631.
- [45] Bolong N, Ismail A F, Salim M R, et al. A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal[J]. *Desalination*, 2009, 239(1–3): 229–246.
- [46] 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.
- [47] Wang R, Yan Y N, Liu H, et al. Integrating data dependent and data independent non-target screening methods for monitoring emerging contaminants in the Pearl River of Guangdong Province, China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 891: 164445.
- [48] 单菁菁. 探索构建中国特色新污染物防控治理体系[J]. *人民论坛*, 2023(4): 58–61.
- [49] Long Y, Song L, Shu Y Q, et al. Evaluating the spatial and temporal distribution of emerging contaminants in the Pearl River Basin for regulating purposes[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 257: 114918.
- [50] Raza A, Hassan J Z, Mahmood A, et al. Recent advances in membrane-enabled water desalination by 2D frameworks: Graphene and beyond[J]. *Desalination*, 2022, 531: 115684.
- [51] Chen L, Maqbool T, Nazir G, et al. Developing the large-area manganese-based catalytic ceramic membrane for peroxymonosulfate activation: Applications in degradation of endocrine disrupting compounds in drinking water[J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 655: 120602.
- [52] Ponce Romero J, Hallett S, Jude S. Leveraging big data tools and technologies: Addressing the challenges of the water quality sector[J]. *Sustainability*, 2017, 9(12): 2160.

Research progress on occurrence characteristics and removal technologies of emerging contaminants in urban sewage treatment plants

FENG Taotao¹, WANG Bin^{1,2*}, LI Jiang³, WANG Tao³, XU Xiaoyi⁴, HOU Li'an^{5*}

1. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China
2. Department of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, 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 Urban wastewater treatment plants are important sinks and sources of emerging contaminants, which are a crucial barrier to interrupt its discharge into the aquatic environment. To provide ideas for the prevention and control of emerging contaminants in urban wastewater treatment plants and help achieve the construction of a healthy China, this paper focuses on the categories of emerging contaminants in urban wastewater. We argue that the concentrations of emerging contaminants in wastewater from different districts show significant geographical characteristics, which are closely related to regional environmental conditions, population density, wastewater sources, socio-economic conditions and industrial layout. We analyze the migration and transformation patterns of emerging contaminants in various units of urban wastewater treatment plants. The results indicate that removal of emerging contaminants from wastewater treatment plants is influenced by critical factors including wastewater treatment processes and emerging contaminants categories. We also illustrate that removal of emerging contaminants from urban wastewater treatment plants is currently challenged by the lack of regulations and standards, outdated monitoring technologies, hard-to-construct risk assessment systems, and ineffective removal technologies. We propose appropriate prevention and control strategies to address these challenges.

Keywords urban sewage treatment plants; emerging contaminants; occurrence characteristics; pollutant removal technology ●



(责任编辑 卫夏雯)