

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.13.008

给水厂常规处理工艺对新污染物的去除及优化

梁晓君¹, 李秋¹, 王芝玉¹, 张扬忠¹, 陈振国², 汪晓军¹

(1. 华南理工大学 环境与能源学院, 广东 广州 510006; 2. 华南师范大学 环境学院, 广东 广州 510006)

摘要: 为了解给水处理厂常规工艺对水源水中新污染物的去除效果,对广州某给水处理厂各工艺出水的特征新污染物进行了检测。结果表明,该水厂常规工艺可以有效去除双酚A、4-n-壬基酚、布洛芬、罗红霉素和磺胺二甲嘧啶,去除率为86.24%~99.62%;但对阿特拉津(ATZ)和异丙草胺(PPS)的去除率分别仅为1.18%和29.93%,表明部分农药类新污染物难以通过常规工艺去除。模拟该水厂的运行条件,探究了粉末活性炭(粉炭)及其耦合絮凝技术对目标污染物的去除效果。结果表明,投加20 mg/L粉炭,可显著提高对ATZ和PPS的去除率,分别达到66.97%和67.84%。粉炭耦合絮凝技术对大部分目标污染物的去除率低于单独粉炭,可能是由于絮体包裹部分粉炭,进而减少了粉炭与污染物的接触。然而,粉炭耦合絮凝技术对ATZ的去除效果(72.09%)优于单独使用粉炭的,可能是粉炭对ATZ的吸附速度快于絮凝沉降速度,即粉炭优先吸附ATZ。

关键词: 给水厂; 新污染物; 粉末活性炭; 阿特拉津; 异丙草胺

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)13-0056-07

Removal and Optimization of Emerging Contaminants by Conventional Treatment Processes in Waterworks

LIANG Xiao-jun¹, LI Qiu¹, WANG Zhi-yu¹, ZHANG Yang-zhong¹,

CHEN Zhen-guo², WANG Xiao-jun¹

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. School of Environment, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to understand the effect of conventional processes on the removal of emerging contaminants in water sources, the emerging contaminants in the effluent from a waterworks in Guangzhou were tested. The results showed that the conventional process could effectively remove bisphenol A, 4-n-nonylphenol, ibuprofen, roxithromycin and sulfadimidine, and the removal rates were 86.24%~99.62%. However, the removal rates of atrazine (ATZ) and propisochlor (PPS) were only 1.18% and 29.93%, indicating that some new pesticide pollutants were difficult to be removed by conventional processes. The operation conditions of the waterworks were simulated and the removal effect of powdered activated carbon and its coupled flocculation technology on target contaminants was investigated. The results showed that the removal rates of ATZ and PPS could be significantly increased by adding 20 mg/L powdered activated carbon, reaching 66.97% and 67.84% respectively. The efficiency of powdered

通信作者: 汪晓军 E-mail: cexjwang@scut.edu.cn

activated carbon coupling flocculation was lower than that of powdered activated carbon alone for the removal of most of the target contaminants, possibly because the floc was partially coated with powdered activated carbon, thereby reducing their contact. However, the ATZ removal effect (72.09%) of the coupled process was better than that of powdered activated carbon alone, possibly because the adsorption rate of ATZ by powdered activated carbon was faster than the flocculation settling rate, that was, the adsorption of ATZ by powdered activated carbon was preferred.

Key words: waterworks; emerging contaminants (ECs); powdered activated carbon; atrazine (ATZ); propisochlor (PPS)

自20世纪中期以来,新型化学合成品的产量激增,据统计2002年—2023年平均每天新增近15 000种化学品^[1]。虽然新型化学合成品通过促进药物和先进材料的开发等方式对人类福祉做出了积极贡献,但这些产品的大量使用和不当处置导致其在自然环境中无处不在,并产生着持续的污染,成为了新的环境污染物^[2]。新污染物(ECs)包括药物和个人护理品(PPCPs)、内分泌干扰物(EDCs)、全氟和多氟化合物(PFAS)及微塑料等。ECs可以通过各种途径进入环境,在水环境中仅处于痕量范围^[3],但它们在环境中持续存在,具有生物积聚和流动潜力,可能形成危害生态的持久环境足迹,对公众健康和环境能产生显著而持久的负面影响^[4]。

传统的给水处理厂没有明确以有效去除ECs为设计目标,絮凝、砂滤和消毒等常规工艺对部分ECs的去除效率较低。由于该类物质对人类健康可能产生负面影响,因此有必要探索针对ECs去除的优化处理技术^[5]。目前,活性炭吸附^[6]、膜过滤^[7]和高级氧化^[8]等技术适用于给水处理厂对ECs的去除,其中活性炭吸附工艺在保证去除效果的同时相对经济^[9]。而在常规处理的基础上进行改进以去除ECs更经济实用,粉末活性炭(粉炭)的使用无需对给水处理厂的构筑物结构进行重大改变,其投加量也可以根据原水水质和出水要求灵活变化,具有简便、去除效率高、成本低而且不会形成大量污泥等优点^[10]。

课题组已对北江饮用水源地中ECs的含量及时空分布进行了长达一年的检测,根据研究结果选出了检出率及检出浓度高于同类污染物的8种新污染物——阿特拉津(ATZ,农药)、异丙草胺(PPS,农药)、双酚A(BPA,雌激素)、4-n-壬基酚(4-n-NP,雌激素)、布洛芬(IBU,解热镇痛药)、罗红霉素

(ROX,抗生素)、磺胺二甲嘧啶(SMZ,抗生素)、洛美沙星(LOM,抗生素),作为典型污染物重点分析研究^[11]。本研究中给水处理厂原水取自流溪河,虽不属于北江支流,但地理位置接近,污染物具有相似性。因此,检测了该水厂常规工艺出水中8种代表性常见ECs的含量,并分析常规工艺对目标ECs的去除率,在此基础上探讨了粉炭对去除ECs的改善效果,为在实际应用中使用粉炭经济高效去除ECs提供指导。

1 材料与方法

1.1 取样点信息及采样方法

该水厂坐落于广州市花都区,其工艺流程如图1所示,主要负责向花都中心城区供水,水源取自流溪河保良村段,供水水质较稳定。为了评估不同工艺单元对8种典型ECs的去除效果,分别在进水口、生物接触氧化池出口、网格反应池出口以及清水池出水口取样,水温为25℃,pH为7.01,进水氨氮<0.05 mg/L。样品皆在采样后7 d内完成所有处理及检测分析。

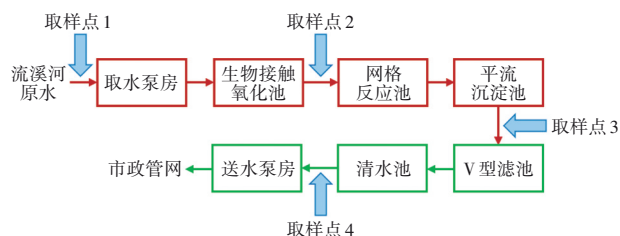


图1 给水处理厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of treatment process in a waterworks

1.2 检测方法

将实际水样通过0.45 μm的玻璃纤维滤膜(美国Whatman GF/F)过滤,将Oasis HLB萃取柱(美国Waters公司)固定在Fotector Plus全自动固相萃取装置(厦门睿科集团有限公司)上,对8种ECs进行

固相萃取富集。富集样液采用 HPLC-MS/MS 检测, 仪器型号为 Agilent 1290 infinity II HPLC 串联 6495C 质谱, 色谱柱采用 Agilent C18 小柱。使用的同位素内标化合物阿特拉津-D5 以及阿特拉津、异丙草胺、双酚 A 和 4-壬基酚等 8 种标准品均购于天津阿尔塔科技公司。色谱分析时, 流动相为 0.002% 氨水和纯乙腈(美国 DiKMA 科技公司), 流动相流速为 0.4 mL/min。校准曲线的相关系数 R^2 均大于 0.99, 加标回收率范围为 78%~120%。串联质谱技术采用电喷雾离子源(ESI), 在正、负(ESI+、ESI-)两种离子模式下同时进行。

1.3 粉末活性炭吸附实验

在采用粉末活性炭(粉炭)与絮凝剂去除 8 种 ECs 的研究中, 粉炭粒度为 180~200 目(福晨化学试剂有限公司), 碘值 >900 mg/g, 填充密度为 450~550 g/L, pH 为 5.0~7.0。絮凝剂为给水厂实际采用的 10% 聚合氯化铝(PAC)。取预处理后的粉末活性炭制备成 2 g/L 的粉炭储备液。

单独吸附实验参照 Bogunović 等人^[12]的研究方法, 各取 1 L 的 3 组生物接触氧化池出水, 分别加入粉炭储备液, 使得各组的粉炭投加量分别为 5、10 和 20 mg/L。3 组先以 300 r/min 的转速快速搅拌 5 min, 然后再以 100 r/min 的转速缓慢混合 125 min, 停止搅拌并静置 1 h, 取上清液并将其通过 0.22 μm 玻璃纤维滤膜过滤。

共沉降实验中的 3 组溶液条件与单独吸附实验的相同, 为确保实验室处理条件与该水厂实际条件相近, 将 PAC 投加浓度设定为 20 mg/L。3 组同时加入粉炭储备液和 PAC 后, 先以 300 r/min 的转速快速搅拌 1 min, 然后再以 100 r/min 的转速缓慢混合 130 min。以上实验均重复三次。

2 结果与讨论

2.1 常规工艺对目标新污染物的去除

根据此前研究结果^[11], 对水厂常规工艺出水中的阿特拉津、异丙草胺和双酚 A 等 8 种常见新污染物进行了定量分析。除了磺胺二甲嘧啶(SMZ)浓度低于检出限(LOD)、洛美沙星(LOM)未检出外, 其他 6 种物质的检出情况如表 1 所示。在水厂进水中, 6 种新污染物的检出浓度范围为 2.14~30.91 ng/L, 检出浓度最高的新污染物为阿特拉津(ATZ), 其次为 4-壬基酚(4-n-NP)。

表 1 给水处理厂常规工艺出水中目标新污染物

Tab.1 Target ECs in conventional process effluent of a waterworks $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	ATZ	PPS	BPA	4-n-NP	IBU	ROX
原水	30.91	15.60	14.20	27.26	2.14	2.51
生物预处理出水	32.03	11.06	11.19	21.31	1.63	1.47
平流沉淀池出水	30.55	10.93	LOD	1.64	LOD	LOD
出厂水	30.93	12.24	LOD	1.28	LOD	LOD

高于检出限浓度的污染物去除率由检出浓度计算得出, 低于检出限浓度的 SMZ 去除率根据峰面积计算得出, 水厂常规处理工艺对各污染物的去除效果如图 2 所示。

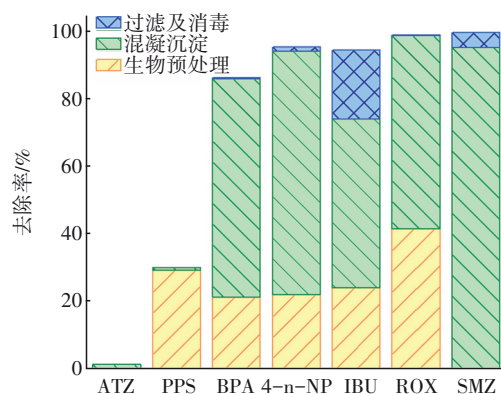


图2 给水处理厂常规工艺对目标新污染物的去除率

Fig.2 Removal efficiency of target ECs by conventional process in a waterworks

从图 2 可以看出, 生物预处理对各污染物的去除率均较低, 对个别污染物(如 ATZ)甚至没有去除作用; 而平流沉淀工艺对各污染物均有去除作用, 而且去除率相对较高, BPA、4-n-NP、IBU 和 ROX 的去除率由生物预处理的 21.22%、21.84%、23.89% 和 41.32% 分别提升到 85.80%、93.98%、74.02% 和 98.62%, 对 SMZ 的去除率更是达到了 95.19%。Tang 等^[13]研究发现, 经过混凝和沉淀后, 8 个水厂中的大部分双酚类化合物被有效去除, 其中一个水厂的沉淀单元对 BPA 的去除率高达 90%, 其余 7 个水厂的沉淀单元也均对 BPA 有一定的去除, 平均去除率为 60%~70%。Nam 等^[14]测定了 14 种 ECs 在韩国首尔某水厂中的去除情况, 发现混凝单元对 IBU 的平均去除率为 65%, 对 SMZ 的平均去除率为 76%。邵晓玲等^[15]、宋焕杰^[16]和张梦阳^[17]也得到了与本研究相似的结果。

混凝沉淀单元对上述 ECs 的去除效果良好, 可能是由于这些 ECs 均易吸附于沉积物上, 与固体颗

粒表面发生相互作用,通过吸附作用从水相转移到固相,随后被混凝沉淀去除^[18]。Lin等^[19]研究发现,在pH为中性的环境下,高pKa值有助于PPCPs转变为阳离子形态存在,使其更容易通过静电作用吸附到颗粒上,并在凝聚过程中形成絮体,促进ECs的去除。Nam等^[14]发现亲水性ECs如SMZ,其 $\lg K_{ow} < 1$,在混凝过程中可以与 Al^{3+} 发生电聚集,且其 pK_a 值为5.7,在pH为中性的环境下,以阴离子形式存在,可以有效地与聚合氯化铝中的 Al^{3+} 进行混凝。

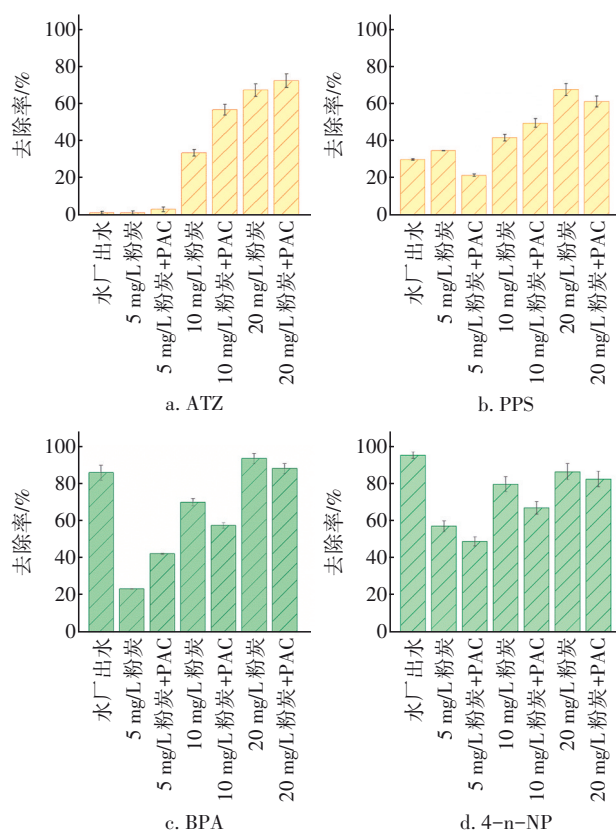
在水厂的出水中,检测到3种新污染物,检出浓度范围为1.28~30.93 ng/L,检出浓度最高的仍为ATZ,其次是PPS,BPA、IBU、ROX和SMZ均低于检出限,LOM仍未检出。由图2可知,该水厂常规工艺对BPA、4-n-NP、IBU、ROX和SMZ可以实现有效去除,去除率为86.24%~99.62%。胡建英等^[20]研究发现,90%以上的壬基酚聚乙氧基醚(NPEO)可以被自来水厂常规工艺去除。曲亚斌等^[21]测定了48种抗生素在南方某省5个城市水厂的去除效果,发现经过常规处理后,抗生素去除率达96.52%,其中磺胺类完全被去除。张梦阳^[17]研究发现,在珠三角地区某水厂的常规处理过程中有15种PPCPs和BPA被全部去除。这些研究表明,常规工艺虽不能完全去除所有ECs,但对部分具有特定结构^[18]或特定性质^[14]的ECs具有良好的去除效果,此外,去除效果还与水源水质有关^[15]。

通过对该水厂的检测分析,发现ATZ和PPS在各水样中的检出浓度基本一致,分别维持在30.55~32.03和10.93~15.60 ng/L。经过常规工艺处理后ATZ和PPS去除率分别为1.18%和29.93%,证明该水厂常规工艺不能有效去除部分农药类新污染物。潘新赞等^[22]对武汉的10座给水厂水源水和出厂水中的ATZ及其降解产物进行检测,发现ATZ几乎不能被常规工艺去除。徐鸿等^[23]分析了沈阳市某水厂水源水及常规处理工艺中ATZ浓度的变化,通过为期一年的监测发现,常规工艺不能有效去除ATZ。因此,为高效去除此类新污染物,需进一步探索新处理工艺。

2.2 粉末活性炭吸附对新污染物的去除

模拟水厂网格反应池的运行条件,探究了粉炭以及粉炭耦合絮凝技术对目标污染物的去除效果,结果如图3所示。粉炭对所有目标污染物均具有去除效果,且投加量越高,去除效果越好。仅投加5

mg/L粉炭时,只对4-n-NP和ROX的去除效果较好,去除率分别达到了57.18%和58.05%。仅投加10 mg/L粉炭时,对部分目标污染物取得了良好的去除效果,如BPA、4-n-NP和ROX的去除率分别为70.36%、79.63%和88.82%。而投加20 mg/L粉炭时,对除了SMZ以外的其余目标污染物均取得了较好的去除效果,包括常规工艺无法有效去除的农药类新污染物ATZ和PPS,相应去除率为66.97%和67.84%,而对BPA、4-n-NP、IBU和ROX的去除率在86.46%~98.59%之间。Adams等^[24]考察了粉炭对美国Missouri河水中抗生素的去除效果,投量为5、10、20 mg/L时去除率分别为27%~50%、50%~73%、65%~100%。贾丽萍等^[25]以上海黄浦江松浦大桥取水口段原水为试验用水,研究粉炭投加量对ATZ去除率的影响,结果表明粉炭投量为20 mg/L时对ATZ的去除率为73.8%。赵婕^[26]的研究也得到了相似的结果。因此,根据实验结果,推荐粉末活性炭投加量为20 mg/L。另外,吸附动力学实验表明,各实验组均在6 h时接近吸附饱和,2~24 h的ATZ去除率较前2 h仅提高了约3%,因此建议最佳反应时间为2 h。



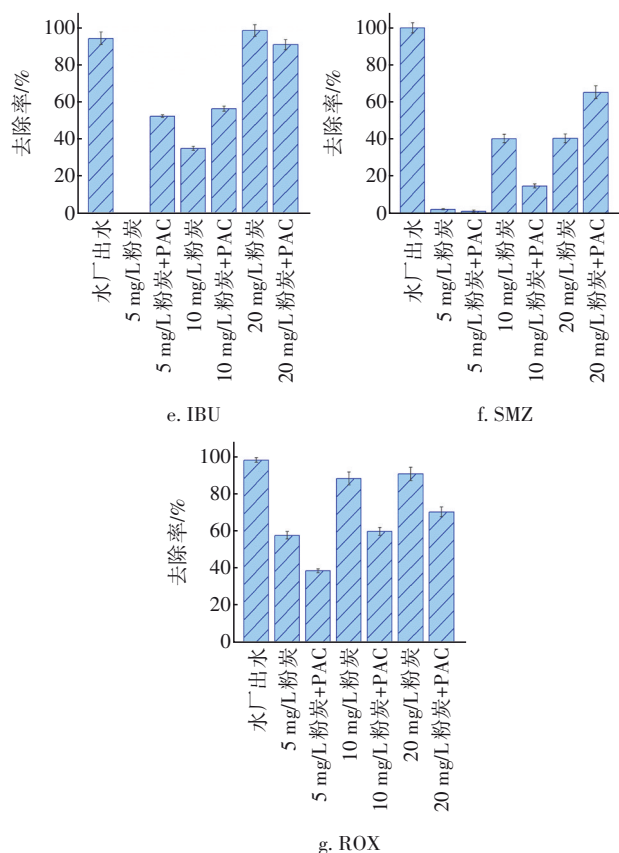


图3 粉炭深度处理对原水中目标新污染物的去除效果

Fig.3 Removal efficiency of ECs in source water by advanced treatment with powdered activated carbon

2.3 粉末活性炭耦合絮凝对新污染物的去除

模拟水厂网格反应池运行条件,进一步考察了絮凝对粉炭去除目标污染物的影响。从图3可以看出,絮凝对粉炭去除大部分新污染物具有消极影响,以BPA、4-n-NP和ROX的去除最为明显。当投加10 mg/L粉炭与20 mg/L PAC时,BPA、4-n-NP和ROX的去除率较单独投加粉炭时降低了12.56%~28.67%;当投加20 mg/L粉炭与20 mg/L PAC时,BPA、4-n-NP和ROX的去除率较单独投加粉炭时降低了4.00%~20.62%。粉炭耦合絮凝剂对目标污染物的去除率低于单独使用粉炭,这可能是由于部分 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 絮体包裹在吸附剂表面,减少了可供新污染物吸附的位点数量^[3, 27]。

新污染物的去除主要是由于它能够被粉炭吸附,这种吸附过程由较弱的结合力实现,所以通常认为是可逆的,即吸附的化合物可以从粉炭上解吸出来。这与López等^[27]的研究结果相似,粉炭和混凝剂一经投加便立即相互作用,混凝剂占据了吸附

剂上的吸附位点,减少了微污染物的可用位点。另一种解释是粉炭被捕集到絮体中,从而显著增长了分子的扩散途径,导致吸附速率减慢。因此,混凝剂的存在可能会隐藏活性炭的孔隙入口或堵塞具有混凝剂沉淀的吸附位点。此外,通过 Al^{3+} 的吸附和/或 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 在活性炭表面的沉淀,可以改变吸附界面的pH和/或表面的表观极性。因此,可以提出一种反应模型:在慢速搅拌过程中, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 已经形成;在沉淀过程中, $\text{Al}(\text{OH})_3$ /胶体絮体接触粉炭,改变了粉炭表面的电荷和化学环境,局部pH变化,弱吸附的ECs很可能发生解吸。在处理过程中,这种解吸是不可取的,因为这意味着为了保证总体效率,需要投加更多的粉炭。

絮凝虽然会降低粉炭对大部分目标污染物的去除效果,但对ATZ和PPS的去除似乎具有积极影响(见图3),这可能是因为粉炭能优先且快速吸附这些污染物^[28],后续没有发生解吸作用可能是因为粉炭与ATZ、PPS的吸附结合力较强。这两者恰好属于水厂常规工艺难以去除的新污染物,因此应用粉炭作为水厂的深度处理工艺是可行的。

3 结论与展望

① 广州某给水厂常规工艺能去除部分新污染物,如目标PPCPs(布洛芬、罗红霉素和洛美沙星)和某些EDCs(双酚A和4-n-壬基酚),但几乎不能去除属于农药的阿特拉津和异丙草胺。

② 粉末活性炭吸附对除磺胺二甲嘧啶外的新污染物具有良好的去除效果,可以作为给水厂去除新污染物的深度处理方法。

③ 粉末活性炭吸附原水中新污染物的最佳投加量为20 mg/L,接触时间为2 h。

④ 未来拟研究吸附与絮凝操作运行顺序对新污染物去除效果的影响,以及粉末活性炭优先吸附污染物的特性,如官能团、分子结构和分子质量等。同时,考虑进行中试,以便于更好地指导水厂的实际运行。

参考文献:

- [1] ESCHER B I, STAPLETON H M, SCHYMANSKI E L. Tracking complex mixtures of chemicals in our changing environment[J]. Science, 2020, 367(6476): 388-392.
- [2] TONG X, MOHAPATRA S, ZHANG J, et al. Source, fate, transport and modelling of selected emerging

- contaminants in the aquatic environment: current status and future perspectives [J]. *Water Research*, 2022, 217:118418.
- [3] SANG D, CIMETIERE N, GIRAUDET S, *et al.* Adsorption-desorption of organic micropollutants by powdered activated carbon and coagulant in drinking water treatment [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 49:103190.
- [4] WANG F, XIANG L, SZE-YIN LEUNG K, *et al.* Emerging contaminants: a one health perspective [J]. *The Innovation*, 2024, 5(4):100612.
- [5] 刘则华,李颖强,陈颀,等. 澳大利亚饮用水水质标准概述及探讨[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(24):30-33.
LIU Zehua, LI Yingqiang, CHEN Sa, *et al.* Introduction and discussions on drinking water quality standard of Australia [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(24): 30-33 (in Chinese).
- [6] HUERTA-FONTELA M, GALCERAN M T, VENTURA F. Occurrence and removal of pharmaceuticals and hormones through drinking water treatment [J]. *Water Research*, 2011, 45(3):1432-1442.
- [7] HUANG Z, GONG B, HUANG C, *et al.* Performance evaluation of integrated adsorption-nanofiltration system for emerging compounds removal: exemplified by caffeine, diclofenac and octylphenol [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231:121-128.
- [8] BAALOUJ O, BADAWI A K, KENFOUD H, *et al.* Techno-economic studies for a pilot-scale Bi₁₂TiO₂₀ based photocatalytic system for pharmaceutical wastewater treatment: from laboratory studies to commercial-scale applications [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 48:102847.
- [9] BACHMANN S A L, CALVETE T, FÉRIS L A. Caffeine removal from aqueous media by adsorption: an overview of adsorbents evolution and the kinetic, equilibrium and thermodynamic studies [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767:144229.
- [10] RIGUETO C V T, NAZARI M T, DE SOUZA C F, *et al.* Alternative techniques for caffeine removal from wastewater: an overview of opportunities and challenges [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 35: 101231.
- [11] 王芝玉,李秋,张扬忠,等. 珠江三角洲北江饮用水源地新污染物的非靶向筛查与生态风险评估[J]. *环境科学*, 2024, 45(11):6555-6564.
WANG Zhiyu, LI Qiu, ZHANG Yangzhong, *et al.* Non-targeted screening and ecological risk assessment of emerging contaminants in Beijiang drinking water source of the Pearl River Delta [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(11):6555-6564 (in Chinese).
- [12] BOGUNOVIĆ M, IVANČEV-TUMBAS I, ČESEN M, *et al.* Removal of selected emerging micropollutants from wastewater treatment plant effluent by advanced non-oxidative treatment—a lab-scale case study from Serbia [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 765: 142764.
- [13] TANG Z, LIU Z, WANG H, *et al.* Twelve natural estrogens and ten bisphenol analogues in eight drinking water treatment plants: analytical method, their occurrence and risk evaluation [J]. *Water Research*, 2023, 243:120310.
- [14] NAM S, JO B, YOON Y, *et al.* Occurrence and removal of selected micropollutants in a water treatment plant [J]. *Chemosphere*, 2014, 95:156-165.
- [15] 邵晓玲,马军,文刚. 松花江流域某自来水厂中内分泌干扰物的调查[J]. *环境科学*, 2008, 29(10):2723-2728.
SHAO Xiaoling, MA Jun, WEN Gang. Investigation of endocrine disrupting chemicals in a drinking water work located in Songhua River Basin [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(10):2723-2728 (in Chinese).
- [16] 宋焕杰. 武汉市水源及典型自来水厂中抗生素及抗性基因污染特征研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2021.
SONG Huanjie. Study on the Pollution Characteristics of Antibiotics and Resistance Genes in Water Sources and Typical Waterworks in Wuhan [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021 (in Chinese).
- [17] 张梦阳. 珠三角区域饮用水新兴污染物检测和处理技术[D]. 北京:清华大学, 2017.
ZHANG Mengyang. Determination and Treatment Technology of Emerging Contaminants in Drinking Water in Pearl River Delta Area [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017 (in Chinese).
- [18] 李楠,赵新华. 华北T市某自来水厂抗生素的分布及去除[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(21):48-52.
LI Nan, ZHAO Xinhua. Distribution and removal of antibiotics in a waterworks in North China [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33 (21): 48-52 (in Chinese).
- [19] LIN T, YU S, CHEN W. Occurrence, removal and risk assessment of pharmaceutical and personal care products

- (PPCPs) in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP) around Taihu Lake in China [J]. *Chemosphere*, 2016, 152:1-9.
- [20] 胡建英, 杨敏. 自来水及其水源中的内分泌干扰物质[J]. *净水技术*, 2001, 20(3):3-6.
- HU Jianying, YANG Min. Endocrine disrupting compounds in tap water and raw water [J]. *Water Purification Technology*, 2001, 20 (3) : 3-6 (in Chinese).
- [21] 曲亚斌, 朱炳辉, 余胜兵, 等. 南方某省5城市水厂供水中抗生素分布特征与健康风险评估[J]. *职业卫生与应急救援*, 2018, 36(3):194-197.
- QU Yabin, ZHU Binghui, YU Shengbing, *et al.* Distribution characteristics of selected antibiotics in urban water supply systems in 5 southern cities and their potential health risk analysis [J]. *Occupational Health and Emergency Rescue*, 2018, 36 (3) : 194-197 (in Chinese).
- [22] 潘新赞, 石斌, 毛翔, 等. 武汉市饮用水中阿特拉津及降解产物浓度特征[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(4):137-140.
- PAN Xinyun, SHI Bin, MAO Xiang, *et al.* The concentration characteristics of atrazine and degradation products in drinking water in Wuhan [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46 (4) : 137-140 (in Chinese).
- [23] 徐鸿, 才军. 水厂水处理各工艺段水中阿特拉津的检测与评价[J]. *净水技术*, 2018, 37(6):41-44.
- XU Hong, CAI Jun. Determination and evaluation of atrazine in each processed water samples of water treatment plant [J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(6):41-44 (in Chinese).
- [24] ADAMS C, WANG Y, LOFTIN K, *et al.* Removal of antibiotics from surface and distilled water in conventional water treatment processes [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2002, 128(3):253-260.
- [25] 贾丽萍, 刘学卿, 王新刚, 等. 粉末活性炭应急处理阿特拉津突发污染原水研究[J]. *工业安全与环保*, 2012, 38(2):24-26.
- JIA Liping, LIU Xueqing, WANG Xingang, *et al.* Research on emergency treatment of accidental atrazine pollution of raw water by powdered activated carbon [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2012, 38 (2):24-26 (in Chinese).
- [26] 赵婕. 粉末活性炭吸附有机微污染物与臭氧原位再生效能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- ZHAO Jie. Efficacy of Powdered Activated Carbon Adsorption of Organic Micro-pollutants and Ozone In-situ Regeneration [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023 (in Chinese).
- [27] LÓPEZ S S, MACADAM J, BIDDLE M, *et al.* The impact of dosing sequence on the removal of the persistent pesticide metaldehyde using powdered activated carbon with coagulation and clarification [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 39: 101756.
- [28] YANG T, HU X, ZHANG P, *et al.* Study of pre-treatment of quinoline in aqueous solution using activated carbon made from low-cost agricultural waste (walnut shells) modified with ammonium persulfate [J]. *Water Science and Technology*, 2019, 79 (11) : 2086-2094.

作者简介: 梁晓君(2000-), 女, 广东广州人, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水中新污染物检测及去除。

E-mail: esl202321047905@mail.scut.edu.cn

收稿日期: 2024-10-24

修回日期: 2025-01-23

(编辑: 李德强)

保障用水安全

例行高效节约