

高加新, 张鑫琰, 王珊. 颗粒过滤工艺对新污染物去除的效能及机制研究进展[J]. 净水技术, 2026, 45(9): 10-19.

Gao J X, Zhang X Y, Wang S. Research progress of efficiency and mechanism of particle filtration process for novel contaminants removal[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(9): 10-19.

颗粒过滤工艺对新污染物去除的效能及机制研究进展

高加新¹, 张鑫琰¹, 王珊^{1,2,*}

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学重点实验室, 北京 100085)

摘要 【目的】新污染物具有持久性、生物累积性及潜在健康危害等特征,对生态环境和人类健康构成严峻挑战。传统水处理工艺难以有效控制此类污染物。颗粒过滤技术通过物理、化学和微生物协同作用展现出显著的应用潜力,成为研究热点。本文旨在系统探究岸滤、生物慢滤、普通快滤池和活性炭滤池对新污染物的去除效能与作用机制,为水中新污染物控制技术的研发与应用提供参考。【方法】本文采用文献计量学方法,对4种过滤技术的作用机理、应用现状及最新研究进展进行全面系统地综述。【结果】不同过滤工艺因作用机制差异,在新污染物去除效能上呈现显著差异。岸滤主要依赖自然水文过程和微生物降解,对磺胺甲恶唑等易降解的新污染物有效,但对卡马西平等难降解的新污染物去除有限;生物慢滤通过生物膜与吸附协同作用实现高效深度净化,但在低温下挂膜时间延长,稳定性也受到抑制;普通快滤池以物理截留为主,新污染物去除不足,结合化学预处理,新污染物的去除效率可显著提升;活性炭滤池凭借高吸附性能对双酚A等疏水性新污染物去除率超90%,但吸附周期短、运行成本较高。【结论】单一颗粒过滤技术难以满足对新污染物全谱系的有效去除。开发利用协同效应的组合工艺,实现新污染物的高效降解与去除,将成为该领域研究的重要方向,为新污染物控制提供关键理论支撑。

关键词 新污染物; 颗粒过滤; 去除效能; 作用机制; 协同效应

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)09-0010-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.09.002

Research Progress of Efficiency and Mechanism of Particle Filtration Process for Novel Contaminants Removal

Gao Jiaxin¹, Zhang Xinyan¹, Wang Shan^{1,2,*}

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract [Objective] Novel contaminants pose a severe challenge to the ecological environment and human health due to their persistence, bioaccumulation and potential health hazards. Traditional water treatment processes are difficult to effectively control such contaminants. Particle filtration technology, through the synergistic effects of physics, chemistry and microbiology, has demonstrated significant application potential and has become a research hotspot. This paper aims to systematically explore the removal efficiency and mechanism of action of riverbank filtration, biological slow filtration, rapid filter and activated carbon filter for novel contaminants, providing a reference for the technological research and application of controlling novel contaminants in water. [Methods] This paper adopts bibliometric method to conduct a comprehensive and systematic review of the action mechanisms, application status and the latest research progress of four filtration technologies. [Results] Different filtration processes show significant differences in the removal efficiency of novel contaminants due to the differences in their action mechanisms. Riverbank filtration mainly relies on natural

[收稿日期] 2025-09-23

[基金项目] 国家重点研发计划(2022YFC3203705); 山东建筑大学博士科研基金(X20037Z)

[作者简介] 高加新(2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水处理理论与技术, E-mail: 2409626255@qq.com。

[通信作者] 王珊(1987—), 女, 副研究员, 研究方向为水处理理论与技术, E-mail: wangshan1@sdjzu.edu.cn。

hydrological processes and microbial degradation. It is effective against easily degradable novel contaminants such as sulfamethoxazole, but has limited removal of refractory novel contaminants such as carbamazepine. Biological slow filtration achieves efficient and deep purification through the synergistic effect of biofilms and adsorption. However, at low temperature, the biofilm formation time is prolonged and its stability is also inhibited. The conventional rapid filter mainly relies on physical interception, and the removal of novel contaminants is insufficient. By combining chemical pretreatment, the removal efficiency of novel contaminants can be significantly improved. The activated carbon filter can remove over 90% of hydrophobic novel contaminants such as bisphenol A due to its high adsorption performance, but it has a short adsorption cycle and relatively high operating costs. [**Conclusion**] Single-particle filtration technology is difficult to effectively remove the entire spectrum of novel contaminants. The development and utilization of combined processes with synergistic effects to achieve efficient degradation and removal of novel contaminants will become an important research direction in this field, providing key theoretical support for the control of novel contaminants.

Keywords novel contaminant; particle filtration; removal efficiency; action mechanism; synergistic effect

新污染物是指近年来因生产生活活动产生或新近被识别的,但尚未被纳入常规环境监测与治理体系的污染物^[1],主要包括药物及个人护理品(PPCPs)、全氟/多氟烷基化合物(PFASs)、微塑料(MPs)、内分泌干扰物^[2]。新污染物具有环境持久性、生物蓄积性和生物毒性等特点,如全氟化合物和多溴联苯醚可以在环境中长期存留并长距离迁移^[3],有机氯农药和MPs会通过食物链富集威胁生态安全^[4],双酚A和新烟碱类农药存在一些潜在的健康风险,包括致癌、干扰内分泌等^[5]。新污染物具有的这些特性使其在传统的水处理工艺中难以被去除,如MPs通过污水处理厂排放后可以在海洋中存续数百年^[6],而PFASs因其碳氟键(C—F)稳定性极强,常规生物降解的效率不足5%^[7]。

随着新污染物的不断出现,地球的环境受到愈发严重的威胁,目前已发现的新污染物超过20大类,且每一类还包含数十种甚至上百种化合物^[8]。新污染物的种类繁多、来源广泛,对环境和人类健康都已构成严重的威胁^[9],许多新污染物尚未受到充分监管,需要进一步研究其环境行为、生态效应和健康风险,并开发高效的检测和治理技术^[10]。我国《重点管控新污染物清单(2023年版)》明确将抗生素、MPs等14类物质纳入管控^[11]。国际组织联合国环境规划署(UNEP)将新污染物纳入《斯德哥尔摩公约》重点管控,强调其对全球生态系统的跨介质影响^[12]。面对新污染物带来的污染和危害,针对水中新污染物的去除,融合了物理、化学与生物协同作用的过滤技术成为提升新污染物去除效能的关键突破口^[13],过滤是最早的水处理技术之一,至今仍是世界范围内重要的水处理工艺。目前,有关过滤技术对不同新污染物的去除性能分析研究较少,因

此,本文研究总结了近年来过滤技术对新污染物去除过程的发展,综述了岸滤、生物慢滤、普通快滤池和活性炭滤池及其在新污染物去除中的应用。

1 计量研究

对近10年有关过滤去除新污染物的文献进行计量学研究分析,选取Web of Science核心集合数据库作为数据来源,在以各种新污染物为主题的论文中检索与过滤技术相关的文献。通过高级检索,主题词设置为“emerging contaminants”“microplastics”“antibiotics”“persistent organic contaminants”“endocrine disrupting chemicals”和“filtration”,时间跨度为2015年1月—2024年12月,文献类型选择“articles”和“review articles”,分析过滤技术在去除新污染物中的发展历程。

1.1 年度发文量分析

发文量在一定程度上能够反映该方向在本研究领域的被重视程度,并揭示该研究领域未来可能的发展趋势。图1为2015年1月1日—2024年12月31日期间在该研究领域的年发文量,这10年间发文量共计2 515篇,整体上过滤技术去除新污染物这一研究领域的年发文量呈现出不断增长的趋势,2015年发文105篇,2024年发文量高达436篇(增长315%),其中2020年发文量突破200篇成为转折点,反映出过滤去除新污染物研究从“基础探索”进入“技术优化”的快速发展阶段。这一趋势可能与全球范围内对新污染物环境风险的日益重视,以及《斯德哥尔摩公约》和中国《重点管控新污染物清单(2023年版)》等政策法规的推动密切相关。

1.2 主要来源国家和研究主题分析

对参与文献发表的作者所属国家进行分析,根

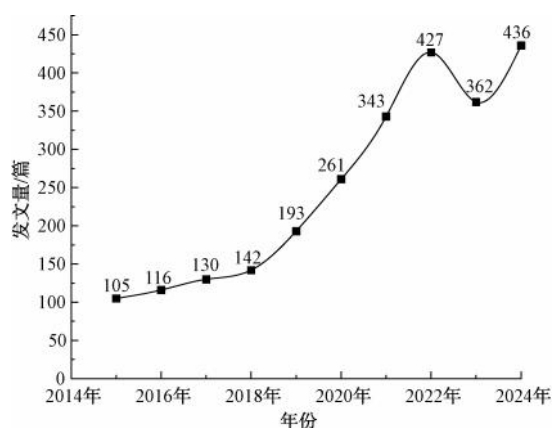


图 1 2015 年 1 月—2024 年 12 月相关文献的年度发文趋势
Fig. 1 Annual Publication Trend of Relevant Literatures
during January 2015 to December 2024

据统计结果可知,共有 111 个国家从事过滤去除新污染物领域相关研究,表明该研究领域已在全球范围内得到广泛关注。由表 1 可知,我国发文数量居首位,共发表文献 730 篇,占有所有国家发文总量的 29.03%,其次是美国和印度,发文数量分别为 380 篇和 189 篇,占比分别为 15.11%和 7.51%,这表明我国在该研究领域占据重要地位,但同时也暴露出我国新污染物污染问题的严重性。图 2 为各国家与研究主题之间的共现图,可以看到新污染物研究的地理分布呈现出显著的区域差异,这与各地区的实际污染问题和环境法规体系等有关系。以磺胺甲恶唑(SMX)为代表的抗生素类污染物,集中于我国和印度等农业养殖密集地区,这对应于其养殖废水与农业面源排放的现实污染需求;卡马西平(CMZ)等药物类污染物是欧美国家依托其科研优势较早开展的研究,同时我国也随着医疗水平的提升与城市化进程同步加大关注;双酚 A 等与工业相关的污染物,在美国和我国等制造业相对活跃地区研究较多,更贴合工业污染排放现状;MPs 研究以我国、英国、澳大利亚等沿海或水环境研究优势地区为核心,针对水体中去除与海洋生态风险。这种分布差异既为各地区精准制定污染治理方案提供了依据,也为全球性污染物的跨区域联合研究与治理合作奠定了基础。

1.3 研究热点发展趋势分析

对论文中的关键词进行研究分析,可为该领域未来的研究方向提供相应的参考依据。图 3 为近 10 年来对过滤技术去除新污染物这一研究发表文章中的关键词聚类分布,在该研究领域中,关键词“removal”

表 1 2015 年 1 月—2024 年 12 月发文量前 10 的国家
Tab. 1 Top 10 Countries in Terms of Number of Published
Papers during January 2015 to December 2024

国家	发文量	被引用次数
中国	730	27 274
美国	380	18 394
印度	189	6 561
德国	172	8 446
西班牙	151	8 563
意大利	126	6 370
韩国	115	6 277
英格兰	104	7 157
澳大利亚	102	4 852
加拿大	102	4 280

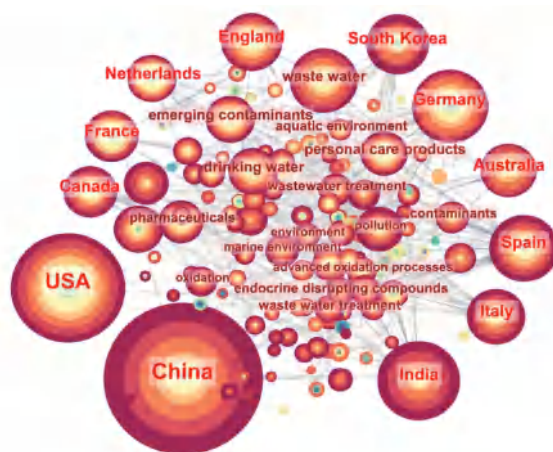


图 2 2015 年 1 月—2024 年 12 月相关文献的国家
来源和研究主题共现图

Fig. 2 National Sources of Relevant Literatures and
Co-Occurrence Chart of Research Topics during January
2015 to December 2024

出现的频率最高,“microplastic”“efficiency”“antibiotic”等关键词也是高频出现。由此可见,关于过滤去除新污染物的研究具有一定的共性焦点,具体可以分为以下 3 类:不同新污染物的去除方法和效能评估;致力于新型过滤材料的研究;生物过滤过程中微生物群落的降解机制与调控策略。该关键词共现图展示了过滤去除新污染物领域从单一技术探索到多学科交叉的演变路径,未来的研究趋势可能需要结合高级氧化与生物降解,构建“物理化学+生物”协同处理工艺,以提高去除的彻底性和过程的可持续性。CiteSpace 中的突显词能够揭示突然暴发的关键词

及其突显历史和突显强度,表 2 为针对新污染物作为关键词的突显分析,突显词为灰色的部分代表在该时间段内研究较少,同样黑色部分表示研究人员在该时间段对该领域的研究兴趣增加,因此突发较近的关键词可被视为 1 种新的研究趋势。在这 10

年间,最初对新污染物的研究主要集中在内分泌干扰物、抗生素和个人护理用品,并且也持续了较长时间的热度,而近几年,SMX、CMZ、四环素等与医疗药物相关的新污染物,因长期存在的污染问题,研究频次逐步递增,成为当下新兴的热门研究话题。

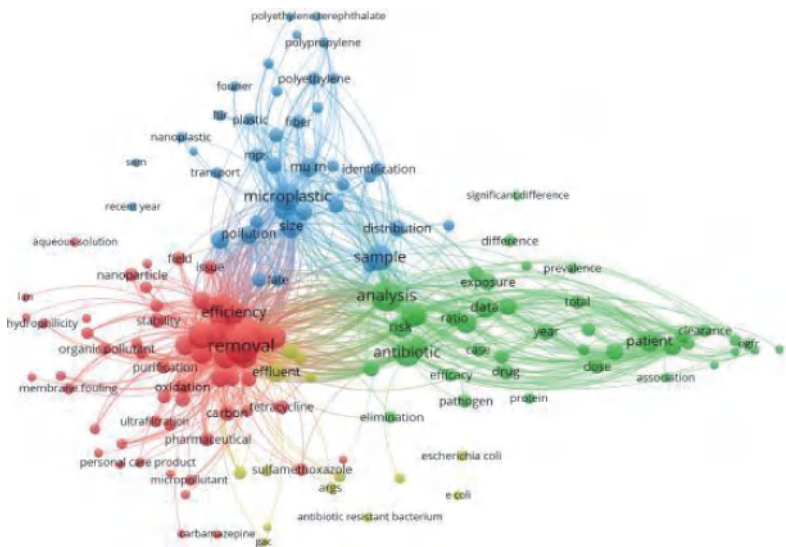


图 3 2015 年 1 月—2024 年 12 月相关文献的关键词

Fig. 3 Keywords of Relevant Literatures during January 2015 to December 2024

表 2 2015 年—2024 年相关文献的污染物关键词突现分析

Tab. 2 Analysis of Emergence of Pollutant Keywords in Relevant Literature during 2015 to 2024

关键词名称	年份	突显强度	开始年份	结束年份	2015 年—2024 年
endocrine disrupting chemicals	2015 年	4. 77	2015 年	2019 年	
antibiotics	2015 年	0. 93	2016 年	2016 年	
personal care products	2015 年	6. 78	2017 年	2019 年	
beta lactam antibiotics	2015 年	1. 64	2018 年	2019 年	
bisphenol A	2016 年	0. 85	2018 年	2018 年	
pharmaceutical residues	2015 年	1. 98	2020 年	2020 年	
plastic debris	2016 年	1. 41	2020 年	2021 年	
pharmaceutically active compounds	2016 年	0. 59	2020 年	2021 年	
microplastics	2017 年	3. 08	2022 年	2022 年	
polystyrene microplastics	2020 年	5. 04	2020 年	2021 年	
nanoplastics	2022 年	3. 06	2022 年	2022 年	
heavy metal ions	2021 年	1. 79	2023 年	2024 年	
tetracycline	2023 年	3. 15	2023 年	2024 年	
sulfamethoxazole	2023 年	3. 15	2023 年	2024 年	
carbamazepine	2023 年	2. 10	2023 年	2024 年	

2 过滤技术去除新污染物

近几年,针对新污染物的去除技术不断出现,通

过多孔介质分离悬浮颗粒的过滤技术展现出较好的去除效能,新污染物的去除效率主要取决于其理化

性质与过滤机制的匹配程度:大分子颗粒物(如MPs)更容易被物理过滤机制去除,但物理过滤对小分子污染物(如抗生素和内分泌干扰素)的去除效果较差,需要依赖吸附或生物降解;疏水性污染物(如持续性有机污染物和双酚A)也更容易被吸附去除,但亲水性污染物[如抗生素、二甲双胍和咖啡因(CFE)]的吸附作用弱,要通过生物降解去除。根据技术原理与运行方式的不同,过滤技术可分为岸滤、生物慢滤、普通快滤池和活性炭滤池等,针对各种新污染物的去除,这些方法也将表现出不一样的去除效果。

2.1 岸滤

岸滤是一种基于自然水文地质过程的绿色水处理技术,通过地表水在河岸沉积层和含水层中的渗透作用,利用泥沙介质的物理截留、吸附及微生物降解等机制去除污染物^[14]。岸滤的核心原理是通过水头差驱动地表水穿过河岸沉积层及含水层,其中污染物是通过物理过滤、化学吸附和生物降解3种途径被去除^[15]。岸滤的历史可追溯至19世纪的欧洲,因其不需要化学药剂且运行成本低,被广泛应用于饮用水预处理,现已在全球范围内推广,尤其在发展中国家和农村地区^[16]。然而传统的岸滤存在产水量低、抗水质冲击能力弱、滤层易板结等问题,经常要与膜滤技术联用以提升效能^[17]。

莫小好等^[18]模拟岸滤系统中厌氧环境的试验反应过程,发现岸滤系统中的反硝化和硫还原过程可以有效转化SMX及2种共存的PPCPs——CFE和CMZ。SMX在岸滤系统中的生物降解率达到100%,并且在反硝化过程中转化为2种衍生物,最终通过还原反应再次还原为SMX。其中岸滤系统是通过微生物活动和土壤吸附有效去除部分PPCPs,但会受到土壤理化性质、有机质类型及氧化还原条件的显著影响,且CMZ的难降解性提示可能需要结合人工处理工艺,而中间产物的潜在风险还需长期监测。周博宇^[19]模拟河岸过滤系统前50 cm流程的去除效能,发现河岸过滤系统通过吸附与生物降解协同作用,对SMZ和扑热息痛(PARA)等新污染物表现出显著的去除能力,且在无氧条件下去除率达到最高,吸附贡献占比显著,但微生物降解需要依赖特定功能的菌群,其效能也受环境条件和微生物群落结构的直接影响。Dragon等^[20]通过对波兰某河岸过滤场的垂直井和水平井两类井进行系统

性采样、先进分析技术和长期监测,证实了岸滤对农药的去除效率随距离增加而提升,最高可达66%以上,并在680 m处实现完全去除。甘振东^[21]研究发现,单一的岸滤技术对微量有机物的去除率有限,约为40%,但在与纳滤联用后可达74.09%,这主要是因为岸滤作为预处理屏障,依靠自然的沉积层和含水层介质进行物理过滤和生物降解,随后纳滤作为精细处理单元,通过膜分离技术进一步截留溶解性污染物。该组合工艺通过天然生物处理与高效膜分离的耦合,不仅实现了水质深度净化与运行稳定性的平衡,还减少了对化学药剂的依赖,更符合绿色工艺的理念。

以上研究^[22]都表明,岸滤系统是通过吸附作用与微生物降解的协同作用有效去除污染物,其中的影响因素主要有3点:氧化还原条件,在厌氧环境下反硝化菌的活性最高,SMX的降解率会比好氧环境提高40%~50%;土壤的理化性质,在有机质含量>2%的土壤中对疏水性新污染物的吸附容量比低有机质土壤高2~3倍;渗透速率带来的影响,渗透速率较低时新污染物能够与微生物有足够的接触时间,能够提升对新污染物的去除效率。这也揭示了岸滤去除的关键,岸滤对易降解PPCPs的去除率可达100%,但对难降解新污染物的去除有限,因此针对农药等顽固新污染物可能需要结合其他工艺一同进行去除,且须实时监控中间产物的产生风险及生物膜可能造成的污染,未来也需因地制宜优化系统设计以平衡效能与成本。

2.2 生物慢滤

生物慢滤是一种基于生物膜作用的水处理技术,通过滤料表面形成的微生物群落对污染物进行物理截留、吸附和生物降解^[23]。在运行初期,滤料表面逐渐形成由细菌、藻类、原生动物等组成的生物膜,其代谢活动可降解有机物等污染物,同时通过物理截留作用去除悬浮颗粒和病原微生物^[24]。与快滤技术相较而言,生物慢滤无需化学药剂投加和机械动力支持,结构简单,仅需滤池、承托层和滤料即可实现稳定运行。其核心特征是低滤速和无需化学药剂,适用于分散式供水场景,尤其是农村地区微污染水源的处理。该技术最早用于去除浊度和病原微生物,随着研究深入,其应用范围扩展至重金属、有机物及新污染物的去除^[25]。生物慢滤的核心在于滤料表面形成的生物膜,由细菌、真菌、藻类及原生

动物等构成的复杂生态系统,通过吸附代谢降解污染物,从而实现对污染物的多层次去除。

刘来胜等^[26]研究 30 cm 以上滤层的生物慢滤系统,将敌敌畏、萘等半挥发性污染物注入,控制滤速、温度。结果表明,生物膜成熟期需 30~40 d,此后假单胞菌等微生物分泌胞外酶降解有机物,2~3 d 的去除率稳定至 80%,即使质量浓度升至 10 $\mu\text{g/L}$,但依托石英砂/活性炭滤料的疏水吸附协同作用仍然可以辅助出水降至 0.1 $\mu\text{g/L}$ 以下,且去除率>70%,其中 30 cm 表层的滤层贡献了 80% 去除量,显著优于深层滤料,验证了该系统对高浓度新污染物的深度净化能力与工程应用潜力。徐海明等^[27]改进了生物滤池,引入活性氧化铝作为除氟剂,显著提升了对饮用水中氟离子及多种新污染物的协同去除能力,其中改性活性氧化铝对氟化物的瞬时去除率可达 73.17%,24 h 后的去除率提升至 87.57%,这表明其吸附容量大且作用持久。与传统除氟工艺相比较,活性氧化铝滤池除氟率更优于单独使用活性氧化铝的动态吸附柱(64%~90%),且该研究可同步去除多种污染物。对比骨炭、反渗透等技术,改进生物滤池的成本更低、操作简单,适合农村及分散式供水。汪光宗等^[28]针对低温融雪水环境,对比传统慢滤,电-生物耦合慢滤技术通过施加 10 V 电场显著提升了新污染物的去除效率,挂膜时间从传统慢滤的 35 d 缩短至 28 d,微生物代谢活性增强使高锰酸盐指数、氨氮去除率分别提高 36.38% 和 39.63%,荧光有机物去除率超 66%;对于高毒性污染物,微生物在 $\text{Ni}^{2+} \leq 0.12 \text{ mg/L}$ 时可短期抑制后恢复活性,但超过该阈值需预还原处理以保护生物膜,为高寒地区水源中新污染物的高效去除提供了技术支撑。冯岩等^[29]开发的三维电极+生物滤池(TDE-BAF)耦合工艺对布洛芬的去除率达 93.48%,这明显高于传统滤池,该工艺巧妙地将三维电催化与曝气生物滤池集成于同一反应系统内,通过 2 种技术的协同作用实现对污染物的高效降解。其核心构建原理基于电场对微生物群体的刺激效应,以及电催化反应与生物降解过程的互补优势,为解决城市污水中难降解有机物的处理提供了新的技术方向。

以上研究表明,生物慢滤对新污染物的去除主要通过生物降解与滤料吸附等多重作用机制协同实现,其处理效能受污染物的可生物降解性、分子结

构、滤料性质及温度、滤速等运行条件的共同影响。通过引入活性氧化铝、电场或三维电极等强化措施,可进一步提高污染物的去除效率,并在一定程度上缩短挂膜时间。对于难生物降解或具有较高生物毒性的污染物,单一生物慢滤仍存在去除能力有限、运行稳定性不足等问题。因此,未来可根据污染物特性优化滤料类型和运行参数,并通过与吸附、电化学等技术耦合,进一步强化生物慢滤对新污染物的深度净化能力和运行稳定性。

2.3 普通快滤池

普通快滤池是水处理领域中广泛应用的一种物理过滤工艺,是水处理工艺中的核心单元,主要用于通过物理截留和吸附作用去除水中的悬浮颗粒、胶体物质及部分溶解性污染物^[30]。其典型结构由滤料层、配水系统、反冲洗装置等组成,采用重力过滤或压力过滤方式运行,核心主要在于通过滤料截留悬浮物以提升水质^[31]。在给水处理中,普通快滤池常作为沉淀或澄清后的深度处理环节,确保出水浑浊度低于 1 NTU;在排水处理中,普通快滤池则用于去除生化处理后的残余悬浮物和部分污染物。普通快滤池通过多层滤料的级配设计实现逐级截留,主要通过物理截留和有限吸附作用去除污染物,但其效率受滤料特性与协同工艺影响显著。在处理新污染物方面,普通快滤池的处理能力有限,如抗生素、内分泌干扰物和微囊藻毒素等,都具有高溶解性和低生物降解性,难以通过传统的物理过滤方法去除^[32],因此普通快滤池需要结合其他高效处理技术以提高其水处理的能力。

符立松等^[33]基于 Meta 分析表明,在三级处理中过滤工艺对 MPs 的总去除率约为 58.45%,其中粒径>0.5 mm 的 MPs 在过滤中更容易被截留,尽管过滤工艺整体有效,但纤维类 MPs 因其形态特性,去除率仍然较低。因此,普通快滤池对 MPs 的截留效果与其滤料级配相关,均质滤料可以增强对小粒径 MPs 的拦截。普通快滤池需要与预处理或深度工艺结合以提升新污染物去除效果,蔡广强等^[34]串联了臭氧氧化、过氧化氢催化和生物活性炭 3 个单元,其核心目的是通过协同作用高效去除水中有机污染物及消毒副产物前体物,将三氯乙醛生成潜能(CHFP)的去除率提高至 79.10%,并协同降解抗生素等难降解有机物,研究表明,生物活性炭单元对 CHFP 的去除贡献占全工艺的 65% 以上,其中生物

降解为主导作用(占比约为 65%),吸附作用为辅(占比约为 35%)。王茜^[35]在研究耦合工艺去除微污染地表水中典型 PPCPs 时发现普通快滤池的生物降解作用微弱,仅依赖滤料吸附难以实现持久去除,部分疏水性较高的 PPCPs 可以通过滤料吸附实现一定去除。溶解性有机物如腐植酸,会占据滤料吸附位点,降低 PPCPs 的去除率,部分情况下吸附效率下降,去除率可达 47%。乔铁军^[36]在普通快滤池中引入活性炭层,显著提升了 PPCPs 的吸附效率,活性炭-超滤复合工艺对 CMZ 的去除率可达 75%~90%。超滤膜截留小分子 PPCPs,快滤池作为预处理单元可以减少膜污染,生物滤池-超滤耦合工艺对磺胺类 PPCPs 的综合去除率超过 85%。这些复合工艺通过吸附、生物降解和高级氧化的协同作用,显著提升了对典型 PPCPs 的去除效能。

以上研究表明,单一的普通快滤池工艺对新污染物的去除均存在局限,但引入活性炭进行强化能够显著提升 PPCPs 的吸附效率,在有干扰因素时也凸显出生物降解和化学氧化预处理的重要性,并且普通快滤池与混凝联用时,还可通过电荷中和捕获部分胶体污染物。不论是 MPs,还是 PPCPs,都需通过组合工艺发挥协同效应,并针对污染物特性继续优化针对滤料的设计和运行参数,比如大粒径的 MPs 更容易被截留去除,同时需解决溶解性有机物竞争吸附等共性干扰问题。因此普通快滤池需通过滤料优化和组合工艺提升对新污染物的协同去除能力,以应对纤维类 MPs 和疏水性 PPCPs 的去除挑战。

2.4 活性炭滤池

活性炭滤池是一种基于多孔吸附材料即活性炭的水处理技术,也是结合物理吸附、化学作用与生物降解的复合水处理技术,主要用于去除水中的溶解性有机物、重金属及新污染物^[37]。其核心结构通常由活性炭填料层、进水与出水管道组成,部分系统还结合生物降解单元^[38],形成物理-化学-生物协同作用机制,活性炭因其高比表面积和丰富的微孔结构,可以高效吸附分子质量为 100~1 000 u 的污染物^[39]。在深度处理工艺中,活性炭滤池常与臭氧氧化或砂滤联用,进一步提升对复杂污染物的去除能力,广泛应用于饮用水净化、工业废水处理和微污染水源修复等领域。活性炭滤池对新污染物去除机制主要是物理吸附,活性炭通过范德华力、 π - π 相互作

用等吸附有机分子,如蛋白质、氨基酸及疏水性污染物^[40]。活性炭滤池的性能受多种因素影响,包括活性炭的类型、粒径、孔隙结构、污染物的性质和浓度等^[41],滤池的核心在于活性炭的多孔结构与表面特性,以及微生物群落的协同作用,形成高效的污染物去除体系。

梁存峰^[42]对典型 PPCPs 吸附去除效果的研究显示,粒状活性炭在去除 PPCPs 方面表现出色,尤其是果壳活性炭对 SMX、磺胺二甲嘧啶和红霉素的去除效果最佳。研究表明,果壳活性炭对 3 种 PPCPs 的去除率可以提升 10% 左右,尤其是对红霉素的效果更为明显。粉末活性炭在去除 PPCPs 方面也表现出较好的效果,尤其是在低灰分条件下,其去除效果优于高灰分的粉末活性炭。Badawy 等^[43]的研究对实际污水处理厂进行检测,持久性有机污染物的微孔吸附特性对多环芳烃(PAHs)和有机氯农药(OCs)的去除率分别可以达到 32.5% 和 25.9%,尤其与臭氧联用后,通过预氧化将大分子有机物裂解为小分子,显著提升吸附效率,卤乙酸类污染物的降解率可升至 87%。Werkneh 等^[44]在去除内分泌干扰物时,发现是活性炭的疏水吸附作用起主导效果,且双酚 A 和邻苯二甲酸酯类污染物的去除率普遍超过 90%,其中双酚 A 在高比表面积活性炭上的吸附率可达 96.64%。Wang 等^[45]研究了生物活性炭和其他方法联用去除 PPCPs,发现也具有较好的性能,生物活性炭-超滤(BAC-UF)系统在去除 PPCPs 方面比传统活性炭-超滤(AC-UF)系统效果更好,总 PPCPs 平均去除率为 47.84%,大多数 PPCPs 通过 BAC 的微生物降解和吸附被去除,超滤膜表面的生物膜对部分 PPCPs 具有降解能力,说明超滤不仅是物理屏障,也参与生物处理,因此这是一种可靠、化学药剂零添加的绿色工艺,适用于饮用水预处理或深度处理。并且在持续 130 d 的运行中,该系统表现出良好的抗冲击负荷能力,尤其在季节性水温变化(1~25 ℃)下仍保持稳定。

以上研究证明,活性炭过滤技术对水体新污染物的去除效果受材料类型、结构特性、操作条件及组合工艺等因素共同影响。其中果壳活性炭对新污染物的去除效果较好,尤其是低温条件下,这是因为低温吸附反应以放热为主,粉末活性炭也优于粒状活性炭,且低灰分活性炭因吸附位点更多,性能更佳。活性炭滤池在与臭氧、超滤联用后去除率也都有显

著的提升,因此活性炭需结合类型优化、低温条件及深度工艺联用以提升污染物去除效率,其中对难降解有机物的强化效果显著。

2.5 不同过滤技术的对比分析

过滤技术因其起源、设计与目标的不同,在基本定义和工作原理上展现出根本性的差异,以及在新污染物去除中也呈现出显著差异化的效能与局限性。岸滤通过自然水文过程的物理截留、吸附与微生物降解协同作用进行对新污染物的去除,该技术属被动自然过程,依赖地质条件,预处理能力强,但是受限于产水量低与滤层板结,对 CMZ 等顽固污染物的去除率较低,这暴露出其对难降解物质的局限性,并且可能需要与纳滤联用来提升效能。生物慢滤依赖于滤料表面生物膜,无需动力和药剂,流速慢,能耗低,由生物作用主导,能够结合疏水吸附实现深度净化,且改良工艺可以提升氟化物去除率,然而低温环境会使挂膜时间延长、高毒性金属还需还原处理,制约其稳定性,适用于分散式供水,在低温或高流速条件下可能导致性能波动。普通快滤池作为物理拦截主力,滤速快,主要依赖滤料级配截留悬浮颗粒,对溶解性新污染物的吸附易受溶解性有机物竞争,必须结合化学预处理或深度工艺弥补短板。活性炭滤池凭借高比表面积吸附,能够高效去除溶解态污染物,低温条件下效能更优,但运行成本高且受活性炭类型调控,与臭氧联用会裂解大分子有机物,并且粉末活性炭的低灰分特性及低温放热效应揭示其效能对材料参数的敏感性,高成本和频繁维护形成应用壁垒。

同时,这些过滤技术的机制也存在本质区别,这些区别直接决定了它们的工艺设计、运行方式和适用场景,其机制差异主要源于不同的驱动力、过滤介质和核心净化过程。岸滤的过滤介质为天然的河岸土壤和含水层材料,驱动力完全来自自然水位差,即河流与地下水井之间的水力梯度,水流在土壤孔隙中缓慢运移,停留时间较长,运行过程完全被动,且无需外部能量输入。生物慢滤的过滤介质为粒径较细的石英砂,主要依靠重力流运行,滤速极低,旨在确保水流与生物膜有充足的接触时间以实现有效的生物降解,在运行过程中无需反冲洗,仅需定期刮除表层已堵塞的滤料并补充新滤料即可恢复过滤能力。普通快滤池的过滤介质为粒径相对较粗的石英砂,通常在压力或重力驱动下以高速率运行,空床接

触时间很短,其运行是周期性的,当水头损失达到设定值或出水水质超标时,必须进行反冲洗以清除滤层中截留的杂质,恢复过滤功能。活性炭滤池以颗粒活性炭作为过滤介质,其运行方式与普通快滤池相似,但空床接触时间更长,以提供足够的吸附时间,反冲洗频率略低于普通快滤池,但核心问题在于活性炭吸附容量会随时间耗尽,因此需要定期进行热再生或完全更换,这构成了其主要的运行成本。

3 结论与展望

颗粒过滤技术作为新污染物治理的关键手段,多技术耦合提升其处理效能的同时必须兼顾可持续性,将成为研究的主要路径。

(1)不同颗粒过滤技术特性差异显著。岸滤/生物慢滤依赖生物降解选择性去除 PPCPs(如阿特拉津去除率为 89%),但受限于环境敏感性;快滤池可高效截留微塑料(>95%)对溶解性新污染物去除效果有限;活性炭滤池对疏水性污染物(双酚 A 等)吸附显著(>90%)但再生成本高。

(2)未来需通过多技术耦合(如预氧化-吸附、生物-物化协同)实现新污染物和常规污染物同步全谱高效去除,并开发智能响应滤材与低碳工艺,推动跨学科交叉的水处理技术体系构建,保障水环境长效安全。

参考文献

- [1] 《中华环境》编辑部. 加强新污染物管控持续改善生态环境质量[J]. 中华环境, 2023(5): 1.
Editorial Department of *Chinese Environment*. Strengthening the control of emerging contaminants and continuously improving ecological environment quality [J]. *China Environment*, 2023 (5): 1.
- [2] 吴颖娟, 王龙, 李志梅, 等. 新污染物以及其在水环境中的检测技术综述[J]. 广东化工, 2024, 51(16): 128-131, 147.
Wu Y J, Wang L, Li Z M, et al. Review of new pollutants and detection of new pollutants in water [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2024, 51(16): 128-131, 147.
- [3] 董姝君, 李晓敏, 李桐, 等. 饲料中新型持久性有机污染物分析方法与污染特征研究进展[J]. 环境化学, 2021, 40(1): 132-140.
Dong S J, Li X M, Li T, et al. Progress on analysis methods and characteristics of emerging persistent organic pollutants in animal feed [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(1): 132-140.
- [4] 王龙玮, 赵静, 王欣雨, 等. 微塑料与化学污染物的环境吸附及联合毒性效应[J]. 上海第二工业大学学报, 2024, 41(1): 54-61.

- Wang L W, Zhao J, Wang X Y, et al. The environmental adsorption and combined toxic effects of microplastics and chemical pollutants[J]. Journal of Shanghai Second Polytechnic University, 2024, 41(1): 54–61.
- [5] 王啸宇, 张亚辉, 张瑾, 等. 基于文献计量学的新烟碱类农药毒性研究进展[J]. 环境科学研究, 2024, 37(9): 2042–2053.
- Wang X Y, Zhang Y H, Zhang J, et al. Progress in research on toxicity of neonicotinoid insecticides based on bibliometrics[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(9): 2042–2053.
- [6] Acarer S. Microplastics in wastewater treatment plants: Sources, properties, removal efficiency, removal mechanisms, and interactions with pollutants[J]. Water Science and Technology, 2023, 87(3): 685–710.
- [7] Grgas D, Petrina A, Štefanac T, et al. A review: Per- and polyfluoroalkyl substances—Biological degradation[J]. Toxics, 2023, 11(5): 446. DOI: 10.3390/toxics11050446.
- [8] 刘沛, 黄慧敏, 余涛, 等. 我国新污染物污染现状、问题及治理对策[J]. 环境监控与预警, 2022, 14(5): 27–30, 70.
- Liu P, Huang H M, Yu T, et al. Present situation, problems and treatment countermeasures of emerging pollutants in China[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2022, 14(5): 27–30, 70.
- [9] 周顺桂. 前言——环境中新污染物[J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54(10): 1837.
- Zhou S G. Preface: Emerging contaminants in the environment[J]. Scientia Sinica Technologica, 2024, 54(10): 1837.
- [10] 邓启红, 于云江, 康乐. 新污染物健康风险需高度重视与有效防范[J]. 科学通报, 2024, 69(6): 645–647.
- Deng Q H, Yu Y J, Kang L. The health risks of new pollutants need to be highly valued and effectively prevented[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(6): 645–647.
- [11] 王建平, 封梅. 《重点管控新污染物清单(2023年版)》解读[J]. 印染助剂, 2023, 40(2): 1–5, 33.
- Wang J P, Feng M. Interpretation of the *List of New Pollutants under Key Control* (2023 edition)[J]. Textile Auxiliaries, 2023, 40(2): 1–5, 33.
- [12] Sharkey M, Harrad S, Abou-Elwafa Abdallah M, et al. Phasing-out of legacy brominated flame retardants: The UNEP Stockholm Convention and other legislative action worldwide[J]. Environment International, 2020, 144: 106041. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106041.
- [13] Dewi R, Shamsuddin N, Abu Bakar M S, et al. Progress in emerging contaminants removal by adsorption/membrane filtration-based technologies: A review[J]. Indonesian Journal of Science and Technology, 2021, 6(3): 577–618.
- [14] Ahmed A K A, Marhaba F T. Review on river bank filtration as an in situ water treatment process[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2017, 19(2): 349–359.
- [15] 李夜瑞, 毛德发, 付昆明, 等. 河岸过滤在我国农村供水的未来应用展望[J]. 中国农村水利水电, 2025(1): 149–154.
- Li Z R, Mao D F, Fu K M, et al. Prospects for the future application of riverbank filtration in China's rural water supply[J]. China Rural Water and Hydropower, 2025(1): 149–154.
- [16] Uwimpaye F, Twagirayezu G, Aghamu I O, et al. Riverbank filtration: A frontline treatment method for surface and groundwater—African perspective[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2025, 197(2): 160. DOI: 10.1007/s10661-024-13413-4.
- [17] 廖孟哲. 岸滤-超滤组合工艺及缓解膜污染机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- Liao M Z. Study on riverbank filtration-ultrafiltration combined process and mechanism of membrane fouling mitigation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [18] 莫小好. 厌氧/好氧条件下水土界面中磺胺甲恶唑的转化研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- Mo X Y. Study on the transformation of sulfamethoxazole at the water-soil interface under anaerobic/aerobic conditions[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.
- [19] 周博宇. 河岸过滤系统处理有机污染物的效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- Zhou B Y. Research on the efficiency of riverbank filtration system in treating organic pollutants[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [20] Dragon K, Górski J, Kruć R, et al. Removal of natural organic matter and organic micropollutants during riverbank filtration in Krajewo, Poland[J]. Water, 2018, 10(10): 1457. DOI: 10.3390/w10101457.
- [21] 甘振东. 岸滤/纳滤组合过滤技术净水特性与运行稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- Gan Z D. Study on water purification characteristics and operational stabilization of combined filtration technology constructed by bank filtration and nanofiltration[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [22] 陈文文, 李蕊, 李晓明, 等. 河岸过滤系统中新污染物的生物降解机制研究进展[J]. 环境科学学报, 2023, 43(7): 1–9.
- Chen W W, Li R, Li X M, et al. Microbial degradation mechanism of emerging contaminants in the riverbank filtration system: A review[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(7): 1–9.
- [23] 刘来胜. 生物慢滤技术研究及其在集雨水饮用安全保障中的应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- Liu L S. Research and application of bio-slow sand filtration for rainwater drinking safety[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013.
- [24] 孙丽华, 张钊晔, 朱珺瑶, 等. 慢滤对二级出水中条件致病菌和有机物的去除效能及机制[J]. 中国农村水利水电, 2023(12): 85–93.
- Sun L H, Zhang M X, Zhu J Y, et al. The removal efficiency and mechanisms of opportunistic pathogens and organic matters in the secondary effluent by slow filtration[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(12): 85–93.
- [25] 邢娜, 韩佳, 金林, 等. 生物慢滤技术用于饮用水水质净化的研究进展[J]. 当代化工研究, 2021(21): 158–160.

- Xing N, Han J, Jin L, et al. Research progress of biological slow filter technology for drinking water purification [J]. *Modern Chemical Research*, 2021(21): 158-160.
- [26] 刘来胜, 吴雷祥, 刘玲花, 等. 生物慢滤降解微污染水中半挥发性有机物的实验研究[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(增刊1): 1-4.
- Liu L S, Wu L X, Liu L H, et al. Study on the treatment of semi volatile organic compounds (SVOC) in micro-polluted raw water by slow sand filtration [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(S1): 1-4.
- [27] 徐海明, 金林, 张凡, 等. 改进型生物慢滤池对饮用水中氟及相关污染物的去除效果研究[J]. *癌变·畸变·突变*, 2019, 31(3): 238-241, 248.
- Xu H M, Jin L, Zhang F, et al. Effects of modified biological slow filter on removal of fluoride and related pollutants in drinking water[J]. *Carcinogenesis, Teratogenesis & Mutagenesis*, 2019, 31(3): 238-241, 248.
- [28] 汪光宗, 王宝山, 张继成, 等. 电-生物耦合慢滤处理高寒牧区融雪水的效能[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(17): 42-48.
- Wang G Z, Wang B S, Zhang J C, et al. Efficacy of electro-biological coupling slow filtration for treatment of snowmelt water in alpine pastoral area[J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(17): 42-48.
- [29] 冯岩. TDE-BAF 工艺去除城市污水中布洛芬的效能及其微生物多样性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Feng Y. Research on the removal efficiency of ibuprofen and microbial diversity of urban sewage treatment by TDE-BAF[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [30] Zielina M. Analysis of the influence of rapid filter cycle interruption on filtrate quality [J]. *Applied Water Science*, 2021, 11(9): 155. DOI:10.1007/S13201-021-01489-Z.
- [31] Issa B C, Khudair B H. Design comparison between the gravity and pressure sand filters for water treatment, review[J]. *Journal of Engineering*, 2023, 29(5): 49-62.
- [32] Xu L K, Campos L C, Li J N, et al. Removal of antibiotics in sand, GAC, GAC sandwich and anthracite/sand biofiltration systems [J]. *Chemosphere*, 2021, 275: 130004. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130004.
- [33] 符立松, 侯磊, 王艳霞, 等. 基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 [J]. *环境科学*, 2023, 44(6): 3309-3320.
- Fu L S, Hou L, Wang Y X, et al. Effects of wastewater treatment processes on the removal efficiency of microplastics based on Meta-analysis[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(6): 3309-3320.
- [34] 蔡广强, 刘伟, 张金松, 等. O_3/H_2O_2 -BAC 深度处理工艺对三氯乙醛生成潜能的去除[J]. *给水排水*, 2018, 54(8): 13-18.
- Cai G Q, Liu W, Zhang J S, et al. Removal of chloral hydrate formation potential by O_3/H_2O_2 -BAC advanced treatment process[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 54(8): 13-18.
- [35] 王茜. 生物滤池-超滤耦合工艺去除微污染地表水中典型 PPCPs 的机制及调控研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- Wang Q. Mechanism and regulation of biological filter and ultrafiltration hybrid process for removing typical PPCPs in micro-polluted surface water [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [36] 乔铁军. 活性炭-超滤复合工艺去除水中典型 PPCPs 的效能与机理[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- Qiao T J. Performance and mechanism of typical pharmaceuticals and personal care products removal from water by the hybrid processes of granular activated carbon and ultrafiltration [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [37] Hess A, Morgenroth E. Biological activated carbon filter for greywater post-treatment: Long-term TOC removal with adsorption and biodegradation[J]. *Water Research X*, 2021, 13: 100113. DOI: 10.1016/j.wroa.2021.100113.
- [38] Haziq J M, Amalina I F, Abdul Syukor A R, et al. Peat swamp groundwater treatment: Efficiency of mixed citrus peel and kernel activated carbon layer [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 736(2): 022113. DOI: 10.1088/1757-899X/736/2/022113
- [39] Acevedo Alonso V, Kaiser T, Babist R, et al. A multi-component model for granular activated carbon filters combining biofilm and adsorption kinetics [J]. *Water Research*, 2021, 197: 117079. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117079.
- [40] Jari Y, Roche N, Necibi M C, et al. Porous activated carbons derived from waste Moroccan pine cones for high-performance adsorption of bisphenol A from water[J]. *Heliyon*, 2024, 10(9): e29645. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29645.
- [41] 刘清华, 陈卓华, 何嘉莉. 基于 O_3 -BAC 深度处理水厂的活性炭运行情况研究[J]. *城镇供水*, 2020(6): 34-39.
- Liu Q H, Chen Z H, He J L. Study on the operation of activated carbon based on O_3 -BAC advanced treatment water plant [J]. *Journal of China Urban Water Association*, 2020(6): 34-39.
- [42] 梁存峰. 活性炭对水中典型 PPCPs 吸附去除效果的研究 [J]. *北京石油化工学院学报*, 2019, 27(3): 8-11, 43.
- Liang C F. Removal of classic PPCPs in the water by the activated carbon [J]. *Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology*, 2019, 27(3): 8-11, 43.
- [43] Badawy M I, Ali M E M. Removal of some of priority organic contaminants (POPs) in conventionally treated wastewater [J]. *Afinidad. Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, 2010, 67: 547.
- [44] Werkneh A A, Gebre S B, Redae G H, et al. Removal of endocrine disruptors from the contaminated environment: Public health concerns, treatment strategies and future perspectives - A review[J]. *Heliyon*, 2022, 8(4): e09206. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09206.
- [45] Wang Q, Tang X B, Zeng W C, et al. Pilot-scale biological activated carbon filtration-ultrafiltration system for removing pharmaceutical and personal care products from river water [J]. *Water*, 2022, 14(3): 367. DOI: 10.3390/w14030367.