

混凝-沉淀-砂滤工艺对污水中典型医药类物质的去除特性研究

卜龙利, 赵 佩, 高 宁, 孟海龙, 冯奇奇, 谭 娜

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:通过实验室模拟的混凝-沉淀-砂滤装置, 研究混凝剂聚合氯化铝 (PAC)、聚合硫酸铁 (PFS) 和絮凝剂聚丙烯酰胺 (PAM) 投加量和投加方式对污水中典型医药类物质萘酚酸 (CA)、卡马西平 (CBZ)、萘普生 (NAP) 和双氯芬酸 (DCF) 的去除特性。研究发现, 针对医药类物质总进水浓度 2 mg/L 的污水厂二级出水, 单独投加 PAC 60 mg/L 下混凝-沉淀-砂滤工艺对医药类目标物的去除效果最佳, 总去除率为 30.31%, 去除顺序为 CBZ>DCF>CA>NAP; PFS 单独投加量 100 mg/L 下的去除效果最好, 目标物总去除率为 28.96%, 去除率大小是 DCF>CA>CBZ>NAP。PAC 或 PFS 主要通过电性中和的方式来消除医药类物质所带电荷, 从而使其吸附凝聚于脱稳胶体和细微悬浮物上而被分离除去。少量 PAM 与 PAC 同时投加时医药类物质的去除效果明显提高, PAM 的吸附桥联作用促进了絮体的联结沉降和目标化合物的吸附去除。PAC 和 PFS 的同时投加可增强 NAP 的有效去除, 但两者的交互作用需通过投加量和配比的优化来实现。医药类物质主要是通过混凝-沉淀得以去除, 砂滤的去除效果微小, 有时甚至为零。

关键词:混凝剂; 絮凝剂; 投加量; 医药类物质; 去除特性

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)01-0120-05

Study on removal characteristics of typical pharmaceutical substances in wastewater treated by coagulation, precipitation and sand filtration

BO Longli, ZHAO Pei, GAO Ning, MENG Hailong, FENG Qiqi, TAN Na

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: Removal characteristics of pharmaceutical compounds in wastewater, clofibric acid (CA), carbamazepine (CBZ), naproxen (NAP) and diclofenac (DCF) were investigated by the change of dosage and dosing mode of poly aluminium chloride (PAC), polymeric ferric sulfate (PFS) and polyacrylamide (PAM) through an experimental setup of coagulation, precipitation and sand filtration. The research indicated that removal efficiencies of four target pharmaceuticals reached 30.31% in total initial concentration of 2 mg/L and PAC dosage of 60 mg/L, and the sequence of removal rate was CBZ>DCF>CA>NAP. The best removal rate was up to 28.96% for PFS with the dosage of 100 mg/L, and the order of removal rate was DCF>CA>CBZ>NAP. Negative charges of target compounds can be neutralized by Al^{3+} or Fe^{3+} from PAC or PFS so that pharmaceutical substances are easily adsorbed onto the destabilized colloid and suspended microparticles, which could be removed in the process of precipitation and sand filtration. Removal efficiencies of pharmaceutical substances were improved obviously in the presence of PAC and PAM with dosage of 0.5 mg/L, which was due to adsorption and bridge effect of PAM. The removal of NAP was improved at dosing PAC and PFS simultaneously. However, the interaction effect between PAC and PFS needs to be optimized by the adjustment of their dosage and proportion. Coagulation and precipitation played important roles in the removal of pharmaceutical substances in wastewater, and the sand filtration was of little or sometimes even no effect in experiment.

Key words: coagulant; flocculant; dosage; pharmaceutical substances; removal characteristics

医药类物质通过生活污水、动物养殖废水、医院和制药厂废水等途径而进入水环境^[1], 目前, 在中国、英国、美国、加拿大、韩国和西班牙等国的水环境中均检测到具有难降解性、持久性和亲水性等特征的医药类物质^[2-6]。尽管在河流、湖泊等地表水体、污水厂出水以及地下水体中检测到的医药类物质浓度通常为 ng/L~μg/L^[7-9], 但由于其生物累积特性, 能够通过食物链的富集而达到危害人类及其他生物健康的浓度水平。譬如, 水生动物虹鳟鱼在含 μg/L 级卡马西平 (CBZ) 或双氯芬酸 (DCF) 的

水体中暴露一段周期后, 会呈现出一定的生物毒性^[10-11]。城市污水处理厂是生活污水与工业废水的收集与集中处理场所, 其一级物理处理和二级生化处理工艺对污水中的医药类物质有一定的去除效果^[12-13], 但 CBZ 和 DCF 却几乎不能被微生物分解去除^[14]。因此, 污水处理厂二级出水中的医药类物质会直接影响到受纳水体的水质和生态环境, 同时也会影响到中水回用的水质安全。在污水厂的深度处理工艺中, 混凝-沉淀-砂滤工艺多被采用, 以去除二级出水中的胶体和悬浮性颗粒物质。Sui Qian^[15]

收稿日期: 2014-10-09

修改稿日期: 2015-02-01

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目 (12JK0640)

作者简介: 卜龙利 (1973-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制化学。E-mail: bolongli@xauat.edu.cn

等认为砂滤对污水厂二级出水中的 CBZ 等医药类物质几乎没有去除效果,周宁娟^[16]研究了给水处理中混凝-沉淀-砂滤对 CBZ 和磺胺嘧啶的去除却发现混凝和砂滤对它们均有一定的去除效果,Jonathan 等^[17]归纳总结了化学混凝对医药类物质的去除特性,发现国外关于混凝对医药类物质的去除效果报道不一. 因此,有必要开展混凝-沉淀-砂滤工艺对污水中医药类物质的去除特性研究,从而为后续的高级氧化处理等技术提供依据,以此提高中水回用水质、减轻医药类物质对水环境的危害.

本文选定西安市污水厂二级出水中检测到的降固醇酸 (CA)、萘普生 (NAP)^[13]和生物难降解的 CBZ、DCF 为研究对象,以西安市第三污水厂二级出水为原水,通过实验室模拟的混凝-斜板沉淀-砂滤工艺装置来考察混凝剂聚合氯化铝 (PAC)、聚合硫酸铁 (PFS) 和絮凝剂聚丙烯酰胺 (PAM) 不同投加量和投加方式下对 4 种医药类物质的去除特性.

1 材料与方法

1.1 实验材料

分析纯 CA (97%)、NAP (99%)、DCF (99%)、

五氟苄基溴 (99%)、2,4-二氯苯甲酸 (97%) 均购自美国 Sigma 公司; CBZ (99%), 北京百灵威; 色谱纯甲醇, 美国 Thermal; 实验用水为 Mili-Q 超纯水 (Milipore, USA); 工业级 PAC, 巩义市先科净水材料厂; 分析纯 PFS, 天津市鼎盛鑫化工有限公司; 工业级 PAM (阳离子型), 汽巴精化有限公司. 表 1 给出了医药类目标物的分子式、分子结构以及酸度系数 (pK_a)、辛醇-水分配系数 ($\log K_{ow}$) 等物化特性值, 并且列出了其在 GC-MS/MS 谱图分析中的特征离子、定量离子及保留时间, 以对目标化合物进行定性分析与定量分析.

GC (7890A) -MS/MS (7000B) (Agilent, USA) 气相色谱-三重四级杆质谱联用仪; AvantiJ-26XP 型高速冷冻离心机 (Beckman, USA); 固相萃取 (SPE) 仪 (Supelco, USA); QGC-12T 型氮吹仪 (青岛公司, 上海); 101-3AB 型电热鼓风干燥箱 (泰斯特仪器有限公司, 天津); SHB-III 型循环水式多用真空泵 (长城科工贸有限公司, 郑州); C9860A 超声清洗机 (科贝尔光电技术有限责任公司, 天津); FA2104N 型电子分析天平 (民桥精密科学仪器有限公司, 上海).

表 1 医药类物质的物理化学特性
Tab.1 Physicochemical properties of pharmaceutical substances

化合物	分子式	分子结构	特征离子	定量离子	保留时间	pK_a	$\log K_{ow}$
CA	$C_{10}H_{11}ClO_3$		128,169,228	128	7.5	2.95	2.57
CBZ	$C_{15}H_{12}N_2O$		73,165,193	193	18.0	13.9	2.45
NAP	$C_{14}H_{14}O_3$		170,185,224	185	19.2	4.2	3.2
DCF	$C_{14}H_{11}Cl_2NO_2$		214,242,309	214	24.6	4.15	4.51

1.2 实验方案

实验室建立的混凝-斜板沉淀-砂滤工艺装置流程以及采样点位置如图 1 所示. 混凝池和斜板沉淀池水力停留时间 (HRT) 分别为 30 min 和 130 min, 砂滤池滤速为 3.16 m/h, 日处理水量 30 L/d. 将含 4 种医药类物质的甲醇溶液加入取来的西安市第三污水处理厂二级出水 ($COD < 30 \text{ mg/L}$, $SS \text{ } 5 \text{ mg/L}$, $NH_4^+-N < 5 \text{ mg/L}$, $TP < 0.2 \text{ mg/L}$ $pH = 7.0 \sim 7.5$) 中, 配制成每种目标物初始浓度为 $500 \text{ }\mu\text{g/L}$ 的实验进水.

实验过程中, 进水与混凝剂、絮凝剂一起进入混凝池, 180 r/min 转速下搅拌反应, 然后由底部进入斜板沉淀池, 混凝产生的较大絮体被斜板阻挡而

附着其上, 在达到一定重量后滑入池底沉淀, 澄清后的出水自上而下经砂滤柱过滤后排出. 每次实验时, 同一条件下做 3 组平行实验, 最终实验数据取其平均值.

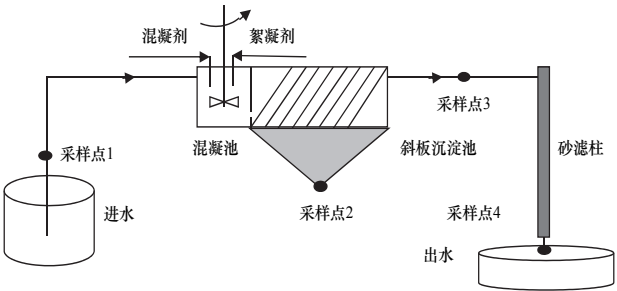


图 1 实验装置流程图
Fig.1 The diagram of experimental setup

1.3 样品预处理及分析方法

所采水样先用盐酸酸化至 $\text{pH}=2.0\sim 2.5$ 后加入内标物 2, 4-二氯苯甲酸(甲醇配制的 2, 4-二氯苯甲酸标准储备液), 然后 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 滤液通过经 10 mL 丙酮、甲醇及超纯水依次活化的 C18 小柱进行固相萃取, 随后用 10 mL 甲醇洗脱, 所得液样在 $60\ ^\circ\text{C}$ 下氮吹至 1 mL 后密封、低温保存待测. 测试前, 待测样品中加入 100 μL 五氟苯基溴衍生物, 于 $100\ ^\circ\text{C}$ 烘箱中衍生 90 min, 然后经 GC-MS/MS 定量测定. GC-MS/MS 分析测定目标物的设置参数为: 载气(氦气, 99.999%) 流速 1.35 mL/min, 色谱柱 HP-5MS ($325\ ^\circ\text{C}$: $30\ \text{m}\times 250\ \mu\text{m}\times 0.25\ \mu\text{m}$), 进样口温度 $270\ ^\circ\text{C}$, 手动进样不分流恒流模式下运行, 进样量 1 μL . 质谱离子源温度 $230\ ^\circ\text{C}$, 离子源电压 $-70\ \text{eV}$, 扫描范围 $50\sim 450\ \text{m/z}$. 升温程序为: 起始温度 $100\ ^\circ\text{C}$, 保持 1 min; 然后以 $30\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 速率升至 $155\ ^\circ\text{C}$; 接着以 $3\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 $220\ ^\circ\text{C}$, 保持 2 min; 最后以 $12\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 $260\ ^\circ\text{C}$. 为了提高检测灵敏度, 本实验采取选择性离子扫描(SIM), 4 种医药类化合物在 GC-MS/MS 中的出峰时间如图 2 所示.

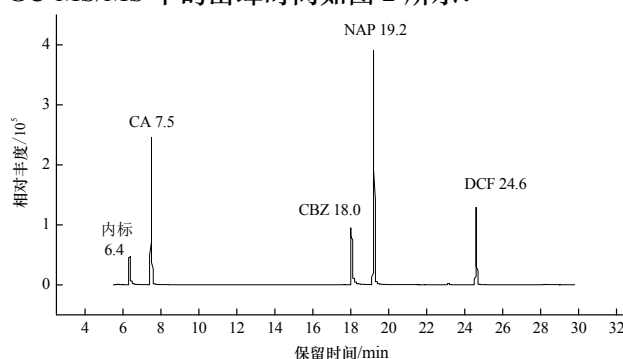


图2 医药类目标物总离子流谱图

Fig.2 Total ion spectra of target pharmaceutical compounds

本实验采用内标法进行定量分析, 为了保证分析方法的可靠性和准确性, 通过不同浓度的加标回收实验测定目标物的回收率, 测定结果如表 2 所示.

表2 加标回收率

Tab.2 Recovery

	300 $\mu\text{g/L}$ 回收率/%	500 $\mu\text{g/L}$ 回收率/%	平均回收率/%
CA	112.77	88.60	100.69
CBZ	94.34	98.00	96.17
NAP	123.53	101.43	112.48
DCF	127.45	114.32	120.89

2 结果与讨论

2.1 PAC 投加量的影响分析

实验所用 PAC 取自西安市第三污水处理厂, 通

常污水厂的 PAC 投加量为 $15\sim 20\ \text{mg/L}$ 左右, 考虑到过高的医药类目标物进水浓度(总浓度 $2\ \text{mg/L}$, 每种物质 $500\ \mu\text{g/L}$), 实验考察了 20、40、60、80 和 $100\ \text{mg/L}$ PAC 投加量对 4 种医药类目标物的去除效果, 结果如图 3 所示.

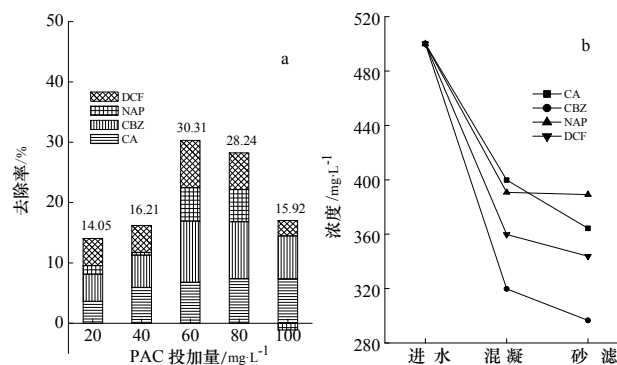


图3 PAC 投加量对医药类物质的去除影响

Fig.3 The influence of PAC dosage in the removal of pharmaceutical substances

由图 3a 可知, 5 种 PAC 投加量下存在最佳值, PAC 投加量在 $60\ \text{mg/L}$ 时医药类物质总去除率为 30.31%; PAC 对 CBZ、DCF 和 CA 有一定的去除率, 而且 CA 的去除随 PAC 投加量的增大而增大, 但 PAC 对 NAP 的去除效果较差甚至没有. 分析认为, 无机混凝剂 PAC 主要以电性中和的方式使水中胶体脱稳而凝聚沉淀, 但过多的 PAC 会使脱稳的胶体发生再稳而导致混凝效果变差^[18]; 由表 1 的 pK_a 和 $\log K_{ow}$ 数值分析可知, CBZ 以分子态溶于水中, CA、DCF 和 NAP 以离子态存在于水中, 而且 CBZ 和 DCF 易于被颗粒吸附, 因此 CA、DCF 和 NAP 的负离子电性在被 PAC 中和后, 医药类目标物主要被脱稳的胶体絮体吸附后除去. 因此, 综合考虑 PAC 对胶体的作用和胶体在去除医药类化合物过程中的作用, PAC 的投加量存在一最佳值 $60\ \text{mg/L}$. CBZ 的去除与脱稳的胶体絮体吸附有关, DCF、CA 的去除则是电性中和及絮体吸附共同作用的结果, 而 CA 的去除随 PAC 投加量的增加而增加则推测可能是 CA 与 PAC 直接电中和而生成絮体沉淀. NAP 的去除效果差可能与其电中和后的易电离或与胶体絮体结合力小而容易脱附有关.

图 3b 为 PAC 投加量 $60\ \text{mg/L}$ 下 4 种目标化合物的浓度变化曲线, 由图可知医药类目标物的去除率大小为 $\text{CBZ} > \text{DCF} > \text{CA} > \text{NAP}$; CBZ、DCF、CA 的去除主要以混凝沉淀为主, 砂滤对其也有一定的去除, 说明脱稳絮体和悬浮微粒对他们都有一定的吸附能力; NAP 的去除是混凝沉淀, 砂滤对其没有效果, 说明脱稳后的 NAP 不能被悬浮微粒吸附,

从而不能在砂滤工艺中将其消除。

2.2 PFS 投加量的影响分析

在每种医药类目标物进水浓度 500 $\mu\text{g/L}$ 下, 分别加入 20、40、60、80、100 mg/L 的 PFS, 以考察目标物的混凝-沉淀和砂滤效果, 去除效果如图 4 所示。

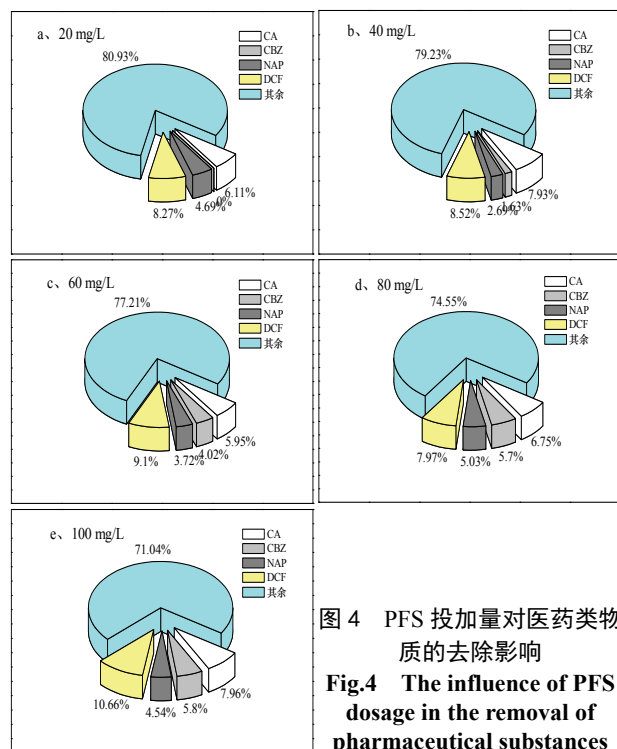


图 4 PFS 投加量对医药类物质的去除影响

Fig.4 The influence of PFS dosage in the removal of pharmaceutical substances

由图 4 可知, 增加 PFS 的投加量可以提高医药类物质的总去除率, 但总去除率增长缓慢; PFS 投加量 100 mg/L 下, 医药类物质总去除率为 28.96%, 其中 DCF、CA、CBZ 和 NAP 的去除效率分别为 10.66%、7.96%、5.8%和 4.54%。DCF 的 $\log K_{ow}$ 值较高, 具有明显的疏水性, 而 Westerhoff^[19]等认为混凝沉淀过程中药物的去除率与其疏水性之间存在一定关系, $\log K_{ow}$ 值越大, 混凝对药物的去除率越高。因此, PFS 投加量下 DCF 的去除效果最好。CA 的去除率受 PFS 投加量的影响不大, 说明脱稳后的胶体絮体与电性中和后 CA 之间的吸附起主要作用。CBZ 的去除随 PFS 投加量的增大而增大, 推测是分子态 CBZ 的吸附去除随絮体生成量的增多而增大。NAP 的去除效果依然最差, 说明絮体对 NAP 的吸附效果差, 这与 PAC 的作用效果是一致的。

对照图 3 和图 4 可以发现, 最佳投加量下两种无机絮凝剂 PAC 和 PFS 对医药类物质的去除效率相近, 这与他们+3 价铝盐和铁盐相同的电性中和絮凝机理有关。但 PAC 的投加量要明显少于 PFS, 而且 PAC 的市场价格也比 PFS 稍便宜, 因此 PAC 的性价比高。

2.3 PAC 与 PAM 同时投加的效果分析

由于实际污水厂二级出水的混凝沉淀处理时会同时投加 PAC 和 PAM, 以增强对 SS 和总磷的去除。因此, 在固定 PAC 投加量 60 mg/L 条件下, 实验考察了 PAM 投加量 0.5、1.0 和 1.5 mg/L 下 4 种目标物的去除效果, 结果见图 5。

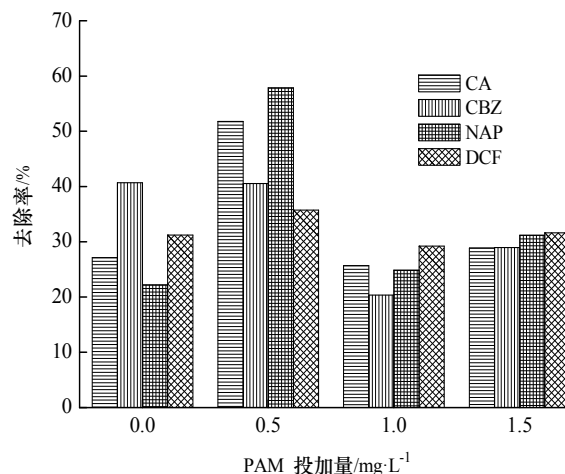


图 5 PAC 与 PAM 同时投加对医药类物质的去除效果
Fig.5 Removal efficiencies of pharmaceutical substances in the presence of PAC (60 mg/L) and PAM with different dosages

如图 5 所示, 与单独投加 PAC 相比, 加入 0.5 mg/L 的 PAM 后, CA 和 NAP 的去除率有了较大的提高, 分别达到了 51.79%和 57.87%; 对 CBZ 和 DCF 的去除率分别为 40.52%和 35.76%, 提高幅度较小。分析认为, PAM 作为一种水溶性的有机高分子聚合物, 能将水中松散的絮体通过吸附桥联而形成更大絮体, 从而提高混凝沉淀效果, 同时增强网捕卷扫作用。可见, PAC 结合少量 PAM 的使用, 可较大提高混凝工艺对医药类目标物的去除效果。但是进一步提高 PAM 的投加量并没有增加 4 种目标物的去除率, 反而随着 PAM 投加量的增加而减小。这与周宁娟^[16]研究给水处理系统中 PAM 投加量对药物去除的影响变化规律是一致的, 过多的 PAM 投加量会导致出水水质的恶化。

2.4 PAC 与 PFS 同时投加效果分析

单独 PAC 混凝时, 生成的矾花大, 出水浊度与色度较低, 但矾花疏松而沉降慢; 少量 PAM 加入后, 其吸附架桥作用将絮体结合而促进了沉降。PFS 水解快, 生成矾花小, 强度好而易沉降, 但出水浊度和色度偏高。商平等^[20]利用 PAC 与 PFS 复合混凝/沉淀法预处理垃圾渗滤液, 发现两者联合投加具有明显的交互作用而提高了混凝效果。因此, 在考虑 PAC 与 PFS 生成矾花的特点与出水水质状况基础上, 实验考察了同时投加 30 mg/L PAC 和 30 mg/L PFS 条件

下4种目标物的去除情况,结果如图6所示。

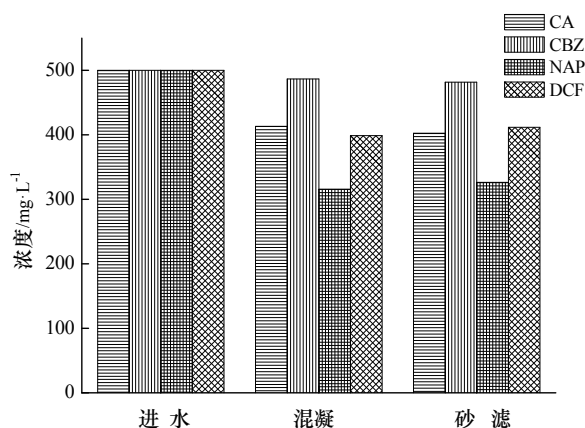


图6 同时加入 PAC 和 PFS 对医药类物质的去除效果

Fig.6 Removal efficiencies of pharmaceutical substances in the presence of PAC and PFS

由图6可以看出,同时加入等量的PAC和PFS,NAP的去除效果最明显,达到了34.77%,高于单独投加PAC(22.18%)或PFS(20.13%),表明两种无机絮凝剂的交互作用对NAP有作用,NAP可随着絮体的快速沉降而被吸附去除。但是,CBZ、CA和DCF的去除率仅为3.64%、19.53%和17.67%,不如单独投加PAC或PFS的去除效果,推测两者1:1的配比不是最佳,需通过投加量和配比的优化来增强两者间的交互作用,从而提高混凝沉淀和医药类目标物的去除效果。砂滤对目标物的去除几乎没有效果,这与PAC和PFS同时投加后矾花沉降性能增强、混凝沉淀效果变好,从而导致砂滤去除悬浮絮体量的减少有关。

3 结论

混凝-沉淀-砂滤工艺对污水中的医药类物质有一定的去除效果,PAC、PFS与PAM通过电性中和与吸附架桥作用可消除医药类物质的电性和增强絮体对其吸附去除作用,混凝-沉淀对医药类目标物的去除起主要作用,砂滤在去除悬浮微粒时有少许作用。PAC与PFS对医药类物质的去除率相近,但前者性价比更高。少量的PAM与PAC同时使用可明显提高医药类目标物的去除效率,而PAC和PFS的联合使用可提高NAP的去除效率。斜板沉淀池底部的沉积絮体通过超声萃取后检测到了4种医药类目标物的存在,如何降解沉积物中的医药类物质是彻底消除其污染的关键。由于医药类物质与絮体沉积物的结合受吸附力的强弱、污水水质条件以及水流扰动程度等诸多因素的影响,因此混凝-沉淀-砂滤工艺对污水中医药类物质的去除是有限的,可

考虑通过后续的高级氧化技术、膜处理技术^[21]等进一步降低其水中含量,以消除医药类物质对人体健康和自然水体的积累性危害。

参考文献 References

- [1] 周雪飞, 张亚雷, 代朝猛. 城市污水处理系统去除药物和个人护理用品(PPCPs)的机理研究[J]. 环境保护科学, 2009, 35(2): 15-18.
ZHOU Xuefei, ZHANG Yalei, DAI Chaomeng. Studies on the removal mechanism of PPCPs in the municipal wastewater treatment[J]. Environmental Protection Science, 2009, 35(2): 15-18.
- [2] LIU Jinlin, WONG Minghong. Pharmaceuticals and personal care products(PPCPs): A review on environmental contamination in China[J]. Environment International, 2013, 59: 208-224.
- [3] HORDERN B K, DINSDALE R M, GUWY A J. The occurrence of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs in surface water in South Wales, UK[J]. Water Research, 2008, 42(13): 3498-3518.
- [4] BOYD G R, REEMTSMA H, GRIMM D A, et al. Pharmaceuticals and personal care products(PPCPs)in surface and treated waters of Louisiana, USA and Ontario, Canada[J]. The Science of the Total Environment, 2003, 311(1/3): 135-149.
- [5] KIM S D, CHO J, KIM I S, et al. Occurrence and removal of pharmaceuticals and endocrine disruptors in South Korean surface, drinking, and waste waters[J]. Water Research, 2007, 41(5): 1013-1021.
- [6] KUSTER M, DE ALDAM J L, HERNANDO M D, et al. Analysis and occurrence of pharmaceuticals, estrogens, progestogens and polar pesticides in sewage treatment plant effluents, river water and drinking water in the Llobregat river basin(Barcelona, Spain)[J]. Journal of Hydrology, 2008, 358(1/2): 112-123.
- [7] BU Qingwei, WANG Bin, HUANG Jun, et al. Pharmaceuticals and personal care products in the aquatic environment in China: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 262: 189-211.
- [8] YUAN Shengliu, JIANG Xiaoman, XIA Xinghui, et al. Detection, occurrence and fate of 22 psychiatric pharmaceuticals in psychiatric hospital and municipal wastewater treatment plants in Beijing, China[J]. Chemosphere, 2013, 90(10): 2520-2525.
- [9] PENG Xianzhi, OU Weihui, WANG Chunwei, et al. Occurrence and ecological potential of pharmaceuticals and personal care products in groundwater and reservoirs in the vicinity of municipal landfills in China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 490: 889-898.
- [10] LI Zhihua, VELISEK J, ZLABEK V, et al. Hepatic anti-oxidant status and hematological parameters in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, after chronic exposure to carbamazepine[J]. Chemico-Biological Interactions, 2010, 183(1): 98-104.
- [11] SCHWAIGER J, FERLING H, MALLOW U, et al. Toxic effects of the non-steroidal anti-inflammatory drug diclofenac Part I: histopathological alterations and bioaccumulation in rainbow trout[J]. Aquatic Toxicology, 2004, 68(2): 141-150.

(下转第135页)

(上接第124页)

- [12] 李萍, 卜龙利, 李薛刚, 等. 某污水处理厂倒置 A²/O 工艺中制药类污染物的去除规律分析[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4): 796-801.
- LI Ping, BO Longli, LI Xuegang, et al. Study on the removal mechanism of pharmaceutical pollutants in wastewater by the reversed A²/O process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(4): 796-801.
- [13] 张爱涛, 卜龙利, 李薛刚, 等. 西安市某污水处理厂医药类污染物的分布与迁移转化规律[J]. 化工学报, 2011, 62(12): 3518-3524.
- ZHANG Aitao, BO Longli, LI Xuegang, et al. Distribution and transformation regularity of pharmaceutical pollutants in a Xi'an sewage treatment works[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2011, 62(12): 3518-3524.
- [14] BO Longli, TARO U, WANG Xiaochang. Biodegradation of trace pharmaceutical substances in wastewater by a membrane bioreactor[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2009, 3(2): 236-240.
- [15] SUI Qian, HUANG Jun, DENG Shubo, et al. Occurrence and removal of pharmaceuticals, caffeine and DEET in wastewater treatment plants of Beijing, China[J]. Water Research, 2010, 44(2): 417-426.
- [16] 周宁娟. 典型 PPCPs 在给水处理系统中的变化规律及调控技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2010.
- ZHOU Ningjuan. Study on removal and regulation techniques of typical PPCPs in water treatment system[D]. Shanghai: Dong Hua University, 2010.
- [17] ALEXANDER J T, HAI F I, AL-ABOUD T M. Chemical coagulation-based processes for trace organic contaminant removal: Current state and future potential[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 111: 195-207.
- [18] 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 Tiejun. Performance and mechanism of typical pharmaceuticals and personal care products removal from water by the hybrid processes of granular activated carbon and ultra filtration[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [19] WESTERH P, YOON Y, SNYDER S, et al. Fate of endocrine-disruptor, pharmaceutical and personal care product chemicals during simulated drinking water treatment processes[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(17): 6649-6663.
- [20] 商平, 刘涛利, 孔祥军. PAC 与 PFS 复合混凝/沉淀法预处理垃圾渗滤液[J]. 中国给水排水, 2011, 27(1): 65-67, 71.
- SHANG Ping, LIU Taoli, KONG Xiangjun. Pretreatment of landfill leachate using PAC, PFS coagulation and chemical precipitation[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(1): 65-67, 71.
- [21] SNYDER S A, ADHAM S, REDDING A M, et al. Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals[J]. Desalination, 2007, 202(1/3): 156-181.

(本文编辑 桂智刚)