

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌	(5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红	(5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉	(5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧	(5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东	(5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明	(5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲	(5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊	(5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波	(5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志	(5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平	(5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波	(5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标	(5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁	(5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄	(5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭	(5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天	(5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓	(5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博	(5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明	(5473)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰	(5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强	(5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏	(5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊	(5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐	(5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因子分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅	(5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫	(5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军	(5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学	(5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博	(5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清	(5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐	(5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军	(5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅	(5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹	(5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润	(5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳	(5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发	(5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源	(5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝	(5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强	(5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧	(5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正	(5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水	(5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水	(5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠	(5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲	(5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水	(5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠	(5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田	(5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年)总目录		(5740)
《环境科学》征订启事(5343)		
《环境科学》征稿简则(5439)		
信息(5595, 5619, 5638)		

臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果

兰亚琼¹, 刘锐^{1*}, 马正杰^{1,2}, 陈吕军^{1,3}

(1. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 浙江省水质科学与技术重点实验室, 嘉兴 314006; 2. 浙江工业大学建筑工程学院, 杭州 310014; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要:以长三角地区 J 市典型有机微污染源 P 水厂为研究对象, 考察了臭氧-生物活性炭深度处理工艺对微污染水源水中有机物的去除效果. 结果表明, 臭氧-生物活性炭深度处理使高锰酸盐指数、总有机碳(TOC)和 UV₂₅₄ 的平均去除率分别提升 19.2%、10.4% 和 23.0%. 水厂原水中检出 8 种多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs)、16 种有机氯农药(organochlorine pesticides, OCPs)、5 种卤乙酸(haloacetic acids, HAAs), 其总浓度分别为 53.9~100.0、6.5~41.8、 $2.5 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 臭氧-生物活性炭深度处理对多环芳烃和有机氯农药的平均去除率分别为 32.5% 和 25.9%, 比常规处理工艺出水的水质有显著提升. 卤乙酸的去除率为 33.8%~87.0%, 主要通过常规处理工艺去除; 臭氧-生物活性炭深度处理对氯乙酸略有去除, 溴代乙酸有少量生成.

关键词:臭氧-生物活性炭(O₃-BAC); 多环芳烃(PAHs); 有机氯农药(OCPs); 卤乙酸(HAAs); 长三角地区; 持久性有机物
中图分类号: X131.2; TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5541-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201712003

Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region

LAN Ya-qiong¹, LIU Rui^{1*}, MA Zheng-jie^{1,2}, CHEN Lü-jun^{1,3}

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of Environment in Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University of Zhejiang, Jiaxing 314006, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Ozone-biological activated carbon (O₃-BAC) was studied for the advanced removal of organics from micro-polluted source water in the water supply plant P located in J City in the Yangtze Delta Region. The results show that 19.2% of the permanganate index, 10.4% of total organic carbon, and 23.0% of UV₂₅₄ were removed by the advanced treatment of O₃-BAC. Eight types of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH), 16 types of organochlorinated pesticides (OCPs), and five types of haloacetic acids (HAAs) were detected in the source water. The total concentrations were 53.9-100.0, 6.5-41.8, and $2.5 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^4 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The advanced O₃-BAC treatment removed 32.5% of PAHs and 25.9% of OCPs, greatly improving the effluent of the conventional water supply process. However, HAAs were mainly removed with the conventional process, with a removal rate of 33.8%-87.0%. After the advanced treatment with O₃-BAC, the amount of chloroacetic acid slightly decreased, while the concentration of bromoacetic acid slightly increased.

Key words: ozone-biological activated carbon (O₃-BAC); polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); organochlorine pesticides (OCPs); haloacetic acids (HAAs); Yangtze Delta Region; persistent organic pollutants (POPs)

随着工农业的高度发展, 水源水有机污染日趋严重, 尤其是具有生物蓄积性、难降解性、高毒性的持久性有机物(persistent organic pollutants, POPs)受到广泛关注^[1]. 暴志蕾^[2]于 2016 年对长江、太湖、钱塘江、嘉兴河网、黄浦江等长三角地区饮用水源水中典型持久性有机物分析表明, 挥发性有机污染物(VOCs)、有机氯农药(OCPs)、多环芳烃(PAHs)检出浓度范围分别为 $0.5 \times 10^3 \sim 4.2 \times 10^4$ 、 $1.5 \sim 339$ 、 $4.3 \sim 406 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中太湖 VOCs 污染最高, 嘉兴河网 OCPs、PAHs 高于长江下游和

其他水源地. 李维美等^[3]在黄河下游和长江下游水体中分别检出 95 和 121 种有机物, 主要包括多环芳烃、酚类、农药等持久性有机物. 王成龙等^[4]的研究表明长江流域水体中 16 种 PAHs 浓度在 $17.7 \sim 110 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 下游比上游污染水平高. 持久性有

收稿日期: 2017-12-01; 修订日期: 2018-05-25

基金项目: 嘉兴市科技计划项目(2016AY23103)

作者简介: 兰亚琼(1985~), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为饮用水安全保障技术, E-mail: 939161594@qq.com

* 通信作者, E-mail: liuruitsinghuazj@gmail.com

机物由于稳定性强难生物降解, 水厂常规处理工艺或强化生物处理工艺不能有效去除^[5,6]. 宋瀚文等^[7]报道我国 36 个重点城市 98 座水厂出水 PAHs 检出浓度范围为 17.5 ~ 408 ng·L⁻¹. 陈锡超等^[8]在连云港市饮用水中检出有机物 30 种, 其中优先控制的持久性有机物 10 种. 因此对微污染原水中持久性有机物的深度去除尤为重要和紧迫.

臭氧-生物活性炭 (O₃-BAC) 工艺是集臭氧氧化、活性炭吸附、生物降解、臭氧消毒于一体, 能够有效去除水中的氨氮、高锰酸盐指数、总有机碳 (TOC) 等, 改善色度、嗅和味等多项水质感官指标, 提升水质, 因此, 在国内外饮用水深度处理领域得到广泛应用^[9~11]. 以往 O₃-BAC 工艺对常规指标的去除和改善已有不少报道, 但关于 O₃-BAC 对有机微污染原水中持久性有机物的去除效果研究较少. 本文以长三角地区 J 市典型微污染水源 P 水厂臭氧-生物活性炭深度处理工艺 (O₃-BAC) 为研究对象, 探讨其对原水中典型持久性有机物 (多环芳烃、有机氯农药) 和卤乙酸的去除效果, 以为微污染原水自来水管网的升级改造提供数据基础.

1 材料与方法

1.1 P 水厂概况

J 市位于长三角地区中心地带, 地处太湖下游,

主要以河网水作为饮用水源水, 水质受上游污染和自身工农业发展影响, 水厂净水压力较大. P 水厂位于 J 市西南部, 供水规模为 10 万 m³·d⁻¹, 原水水质如表 1 所示.

表 1 原水水质 (2015 年 1 ~ 8 月)

Table 1 Raw water quality (January to August 2015)

检测指标	浓度范围	平均值
TOC/mg·L ⁻¹	3.1 ~ 4.2	3.8
UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	0.065 ~ 0.110	0.087
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	4.6 ~ 5.2	4.9
氨氮/mg·L ⁻¹	0.36 ~ 0.45	0.40
浊度/NTU	10.3 ~ 19.3	22.3
pH	7.3 ~ 7.8	7.6

2004 年在常规处理工艺基础上增加臭氧-生物活性炭深度处理设施, 现整个净水工艺为生物接触氧化预处理、加强常规处理和两级臭氧-生物活性炭深度处理, 如图 1 所示. 臭氧接触池采用对流接触方式, 臭氧接触时间 12 min. 一、二级臭氧接触池设计臭氧投加量分别为 3 mg·L⁻¹、2 mg·L⁻¹. 活性炭滤池采用 V 型滤池形式. 设计滤速 10 m·h⁻¹, 炭滤池采用炭、砂双层滤料, 上层采用 30 ~ 80 目破碎炭层, 厚度 2 m, 下层采用石英砂层, 厚度 0.3 m. 空床接触时间 12 min. 滤池反冲洗采用先气冲后水冲方式, 气冲强度 55 ~ 60 m³·(h·m²)⁻¹, 水冲强度 27 m³·(h·m²)⁻¹, 冲洗周期 5 ~ 7 d.

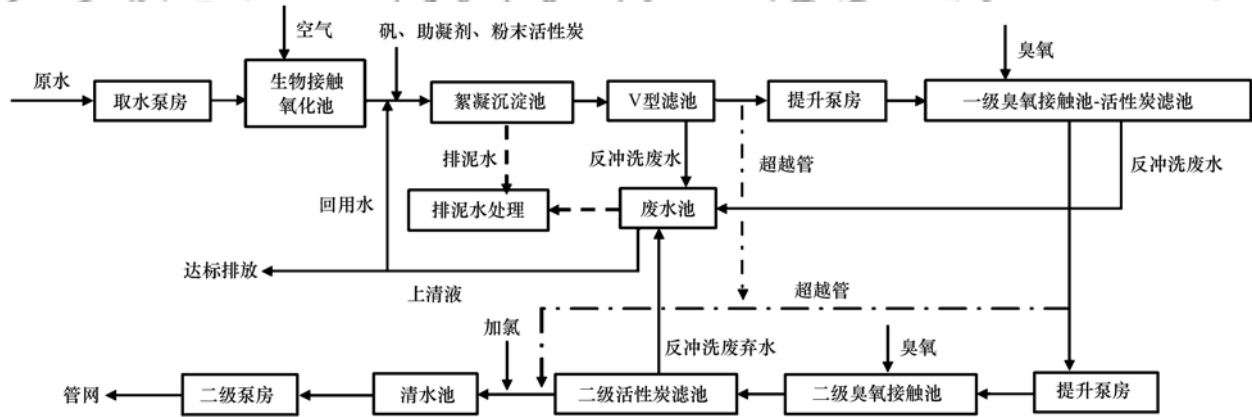


图 1 工艺流程示意

Fig. 1 Flow chart of the waterworks process

1.2 样品采集和保存方法

2015 年 1、4、6 和 8 月共 4 次采集 P 水厂原水、常规工艺滤池出水、一级 O₃-BAC 出水、二级 O₃-BAC 出水和出厂水, 检测水中的高锰酸盐指数、TOC、氨氮等常规指标, 16 种多环芳烃 (PAHs)、19 种有机氯农药 (OCPs) 和 9 种卤乙酸 (HAAs). 所有检测指标样品采集均参照国家标

准^[12]. PAHs 和 OCPs 样品采集用 10 L 细口棕色玻璃采样瓶, 10% 稀硝酸浸泡 8 h, 纯水冲洗晾干, 取满水密封后立即运往实验室避光 4℃ 冷藏, 7 d 内完成萃取和检测. 将 5 mg 氯化铵置于 50 mL 的玻璃封口瓶中, 取满水后加盖, 上下翻转振荡使晶体溶解, 用封口膜密封 4℃ 冷藏, 24 h 内完成萃取, 用于 HAAs 检测.

1.3 分析方法

1.3.1 常规水质指标

水样高锰酸盐指数、氨氮采用国标法测定^[13]; 总有机碳(TOC)采用高分辨率总有机碳分析仪(日本 SHIMADZU 公司, TOC-L_{CPH}); UV₂₅₄采用紫外分光光度计(日本 SHIMADZU 公司, UV-2450)测定^[14]; 浊度采用浊度仪(美国 HACH 公司, 2100N)测定; pH 采用 pH 计(瑞士 METTLER TOLEDO 公司, FE20)。

1.3.2 微量有机物指标

16 种多环芳烃(萘、苊、芴、苊烯、菲、蒽、荧蒽、芘、䓑、苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、苯并[a]芘、二苯并[a,h]蒽、苯并[ghi]花、茚并[1,2,3-cd]芘, PAHs)样品预处理方法和分析方法参照国家环境保护标准^[15]和文献^[16], 采用高效液相色谱仪(日本 SHIMADZU 公司, LC-2010A)分析。检测条件: UV 检测器; 检测波长为 220、254 和 295 nm; WondaCract ODS-2 (4.6 × 250 mm, 5 μm)色谱柱; 前处理方法: 固相萃取法, 采用 Waters Oasis HLB (500 mg/6 cc)固相萃取柱, 二氯甲烷洗脱, 甲醇定容至 1 mL。

19 种有机氯农药[六六六(α-BHC、β-BHC、γ-BHC、δ-BHC)、滴滴涕(*p*, *p'*-DDE、*p*, *p'*-DDD、*p*, *p'*-DDT)、七氯、艾氏剂、环氧七氯、硫丹 I、γ-氯丹、α-氯丹、狄氏剂、异狄氏剂、硫丹 II、异狄氏剂醛、异狄氏剂酮、甲氧滴滴涕, OCPs]样品预处理方法和分析方法参照国家标准^[12]和文献^[17], 采用气相色谱仪(日本 SHIMADZU 公司, GC-2010 Plus)检测。检测条件: 电子捕获检测器(ECD); 检测器温度 300℃; Agilent HP-5 色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm); 前处理方法: 正己烷液液萃取法, 内标法定量, 十氯联苯为内标物。

9 种卤乙酸(一氯乙酸、一溴乙酸、二氯乙酸、三氯乙酸、一溴一氯乙酸、二溴乙酸、一溴二氯乙酸、二溴一氯乙酸、三溴乙酸, HAAs)样品预处理和分析方法分别参照国家标准^[12]和文献^[18], 采用气相色谱仪(日本 SHIMADZU 公司, GC-2010 plus)检测。HAAs 检测条件: ECD 检测器, 检测器温度 300℃, 进样口温度 250℃, Agilent HP-5 色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)。前处理采用液液萃取衍生法, 甲基叔丁醚萃取, 硫酸酸化的甲醇衍生 2 h, 内标法定量, 内标物为 1,2-二溴丙烷。

实验用二氯甲烷、甲醇、正己烷等有机溶剂均为色谱纯, PAHs、OCPs、HAAs 混标和内标物均购

于美国 AccuStandard 公司。

1.4 质量控制

为进行质量控制, 所有检测指标样品采集时每 5 个样品设置 1 个平行样, 样品分析时, PAHs、OCPs 和 HAAs 分别平行测试一个阴性对照样品(超纯水)和阳性对照样品(已知浓度的混标溶液), 将混标连续进样 7 次, 保证仪器精密度在国标方法规定范围内。在标准曲线上选取 2 个不同浓度值进行空白和样品加标分析, 16 种 PAHs、19 种 OCPs 和 9 种 HAAs 回收率分别为 77.6% ~ 93.2% (RSD 1.3% ~ 14.5%)、87.5% ~ 103.0% (RSD 5.8% ~ 15.5%)、82.4% ~ 107.2% (RSD 2.1% ~ 11.3%), 方法检出限分别为 0.37 ~ 1.87 ng·L⁻¹、0.02 ~ 0.17 ng·L⁻¹、0.01 ~ 0.08 μg·L⁻¹。平行样相对标准偏差在 0.5% ~ 8.0% 之间。空白均未检出目标污染物。

2 结果与讨论

2.1 常规水质指标变化

2015 年 1 月和 8 月 P 水厂原水、常规工艺出水、O₃-BAC 出水、出厂水常规水质指标检测结果如表 2 所示。原水水质随季节变化较为明显, 有机物指标(TOC、UV₂₅₄、高锰酸盐指数)、氨氮、浊度冬季(1 月)均比夏季(8 月)略高, 这与宋亚丽等^[19]报道黄浦江水源水结果一致, 由于 P 水厂水源水为河网水, 冬季为枯水期, 水温低、水量少加重了水体有机污染。出厂水高锰酸盐指数、氨氮、浊度、pH 均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)的要求。

P 水厂常规工艺对氨氮和浊度的去除率达到 95% 左右, 出水氨氮和浊度分别低至 0.02 mg·L⁻¹、0.4 NTU 以下。整个工艺对有机物指标 TOC、UV₂₅₄、高锰酸盐指数的平均去除率分别为 32.6%、58.5%、67.0%, 其中常规处理工艺平均去除率分别为 22.3%、27.8%、39.9%。O₃-BAC 深度处理出水 TOC、UV₂₅₄、高锰酸盐指数浓度分别降至 2.59 mg·L⁻¹、0.065 cm⁻¹、2.0 mg·L⁻¹, 平均去除率在常规处理工艺基础上分别提升了 10.4%、23.0%、19.2%, 可见 O₃-BAC 对于稳定和提升有机物去除效果显著。尤其是对 UV₂₅₄ 所代表的芳香环结构或共轭双键结构有机物的去除贡献较大, 这是由于臭氧能选择性地破坏不饱和键, 有利于其被生物降解或活性炭吸附, 使 UV₂₅₄ 值显著下降^[20]。

2.2 水中多环芳烃变化

多环芳烃因具有明显的“三致”危害而备受关

表 2 原水和各工艺单元出水常规水质变化

Table 2 Conventional indexes of raw water and effluent in different treatment units

检测指标	1 月				8 月			
	原水	常规工艺出水	O ₃ -BAC 出水	出厂水	原水	常规工艺出水	O ₃ -BAC 出水	出厂水
TOC/mg·L ⁻¹	4.6	3.7	3.2	3.1	3.1	2.3	2.0	2.1
UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	0.112	0.105	0.096	0.073	0.108	0.094	0.068	0.059
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	5.7	3.0	2.6	1.9	4.2	2.9	1.5	1.4
氨氮/mg·L ⁻¹	0.42	<0.02	<0.02	<0.02	0.36	<0.02	<0.02	<0.02
浊度/NTU	19.3	0.2	0.5	0.4	10.3	0.6	0.2	0.1
pH	7.3	7.5	7.5	7.4	7.8	7.9	7.8	7.7

注. 美国 EPA 将 16 种 PAHs 纳入优先控制污染物, 我国也对其中 12 种 PAHs 进行重点控制^[21~23]. 2015 年 1、4、6、8 月分别对 P 水厂原水和各工段出水中 EPA 优先控制的 16 种 PAHs 进行分析, 结果如图 2 和表 3 所示. 原水中 PAHs 总浓度在 53.9 ~ 100.0 ng·L⁻¹, 其中 1 月明显高于 8 月, 这与常规有机物检测结果一致. 不同月份原水中检出 PAHs 种类变化不大, 主要以 2~4 环的 PAHs 为主, 占总量的 80.6%~93.9%, 5 环的苯并[a]芘有少量检出. 高旭等^[24]研究报道三峡库区城市 6 个水厂 PAHs 原水中检出总浓度在 1~40 ng·L⁻¹, 检出种类主要为萘、蒽、荧蒽 2~3 环 PAHs. 与之相比, P 水厂原水 PAHs 的污染水平较高.

P 水厂整个工艺对 PAHs 的去除率为 45.7%~53.2%, 出厂水中检出 PAHs 总浓度在 29.3~46.8 ng·L⁻¹, 未超过《城市供水水质标准》(CJ/T 206-2005) PAHs 总浓度 2 μg·L⁻¹ 的限值, 满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 的要求. 8 月各工段 PAHs 去除率均较 1~6 月略差, 可能是受温度影响, 因为 PAHs 的吸附为放热过程, 温度升高, PAHs 被吸附性降低^[25]. 常规工艺对 PAHs 去除效果不佳, 去除率在 7.4%~15.0%, 其中萘烯、菲、苯并[a]芘甚至略有上升. 这是由于常规工艺对 PAHs 的去除主要通过颗粒物吸附和生物降解^[26],

但沉淀池或滤池中吸附 PAHs 的沉积物若不及时清理, 有可能重新释放到水体中^[27]. 二级 O₃-BAC 出水 PAHs 削减显著, 去除率提升了 21.6%~43.3%, 其中一级 O₃-BAC 和二级 O₃-BAC 分别提升去除率 12.8%~25.5%、8.8%~17.8%. 因为臭氧在反应过程产生的羟基自由基(·OH)使 PAHs 氧化分解, 而 PAHs 具有疏水性强和正辛醇-水分配系数高的特点, 能更好地被活性炭吸附去除^[28]. O₃-BAC 对 2~3 环 PAHs 去除效果优于 4~5 环 PAHs, 这与薛琦等^[11]的研究结果一致, 因为高环 PAHs 化学性质更加稳定, 降解性差. 氯消毒后出水 PAHs 略有降低, 刘祥^[29]的研究认为, 氯消毒时水中不同形态的氯会与 PAHs 发生取代、开环、加成等反应而转化为其他有机物.

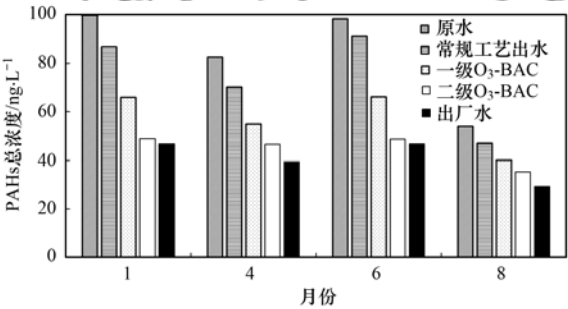


图 2 各工艺单元对 PAHs 的去除效果

Fig. 2 Removal efficiency of PAHs in different treatment units

表 3 原水和各工艺单元出水 PAHs 浓度¹⁾/ng·L⁻¹

Table 3 PAHs concentration in raw water and effluent of each unit/ng·L⁻¹

项目	原水		常规工艺出水		O ₃ -BAC 出水		出厂水	
	浓度范围	平均值 ± SD	浓度范围	平均值 ± SD	浓度范围	平均值 ± SD	浓度范围	平均值 ± SD
萘	9.9~14.6	14.1 ± 3.4	5.1~15.3	10.2 ± 4.1	0.9~7.3	4.1 ± 2.3	2.5~7.3	4.5 ± 1.7
萘烯	15.0~33.1	22.6 ± 6.6	15.3~27.6	21.5 ± 5.0	5.5~18.0	12.5 ± 4.8	6.19~16.3	11.7 ± 3.9
菲	10.2~23.3	15.7 ± 5.2	7.2~23.4	15.0 ± 5.7	5.1~11.9	8.4 ± 2.5	3.9~7.6	6.3 ± 1.5
蒽	ND~2.5	0.6 ± 1.1	ND~2.4	0.6 ± 1.0	ND~3.9	0.74 ± 1.3	ND~3.0	0.7 ± 1.3
芘	ND~21.5	13.4 ± 9.6	ND~20.0	8.1 ± 8.5	ND~16.1	5.8 ± 6.6	ND~7.1	2.9 ± 3.1
䓛	ND~19.1	11.5 ± 5.4	ND~18.7	8.4 ± 6.7	ND~14.3	6.0 ± 5.2	ND~14.7	6.5 ± 5.3
苯并[b]荧蒽	ND~19.1	11.7 ± 8.4	ND~16.0	7.9 ± 7.9	ND~14.1	6.3 ± 6.4	ND~16.5	6.9 ± 7.2
苯并[a]芘	ND~9.8	3.2 ± 4.0	ND~4.15	2.0 ± 2.0	ND~2.4	0.7 ± 1.0	ND~3.5	1.1 ± 1.4
∑ PAHs	53.9~100.0	83.7 ± 18.5	47.0~91.2	73.8 ± 17.3	35.3~48.8	44.8 ± 5.5	29.3~46.8	40.7 ± 7.1

1) ND 表示未检出; SD 表示标准偏差, 测试次数 n=4, 下同

2.3 有机氯农药变化

OCPs 是一种使用最早,应用最广、毒性强、残效期较长的化学杀虫剂^[30,31].多数已被联合国斯德哥尔摩公约列入重点控制的 21 种持久性有机物^[32].2015 年 1、4、6、8 月分别对 P 水厂原水和各工段出水中 19 种 OCPs 进行分析,结果如图 3 和表 4 所示. P 水厂原水 1~8 月 OCPs 均有检出,种类共计 16 种,总浓度在 6.5~41.8 ng·L⁻¹,以六六六、硫丹 I、异狄氏剂为主,约占总量的 63.2%~80.4%.其中 1、4、6 月与常规有机物和 PAHs 一致明显高于 8 月.蒋新等^[33]的研究发现,长江南京段水中包括多种 OCPs 在内的多氯有机污染物浓度范围在 14.6~15.8 ng·L⁻¹.原盛广等^[34]在北方某自来水厂原水中仅检出 3 种 OCPs,总浓度为 3.2 ng·L⁻¹.唐访良等^[35,36]报道千岛湖库区和钱塘江(杭州段)中 10 种有机氯农药总量分别在 1.9~7.6 ng·L⁻¹和 1.31~6.7 ng·L⁻¹.由此可见 P 水厂原水 OCPs 污染水平相对较高.

出厂水中仍有 12 种 OCPs 检出,总浓度在 7.4~13.6 ng·L⁻¹.整个工艺对 OCPs 的去除率在 20.0%~69.3%.常规处理工艺对 OCPs 去除率较低,仅 0.9%~26.8%.尤其是 8 月原水 OCPs 含量较低的情况下,常规工艺对 OCPs 几乎无去除效果.这与张铁山等^[37]的研究结果一致,当水厂原水中 OCPs 降低到一定程度后,常规水处理工艺并无明

显去除效果.刘鹏宇等^[38]的研究认为 OCPs 大多疏水性强,常规工艺主要通过混凝中与絮体发生吸附共沉降作用而被去除,而低温有利于吸附反应进行,温度升高使 OCPs 吸附量降低.O₃-BAC 深度处理对 OCPs 的去除效果显著,一级 O₃-BAC 对总 OCPs 的去除率为 5.4%~18.5%,二级 O₃-BAC 对总 OCPs 的去除率为 9.7%~18.2%,整个 O₃-BAC 深度处理对总 OCPs 的去除率在 15.1%~36.6%,稳定提升了出厂水的安全性,七氯、六六六、林丹、滴滴涕指标均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)的要求.刘超等^[39,40]发现臭氧作为亲电子反应剂通过攻击芳香环、不饱和双键与三键、以及含 N、S 等还原性化学基团等将 OCPs 分解为小分子有机物,提高 BAC 阶段生物降解性,但对活性炭吸附性会略有影响^[41].

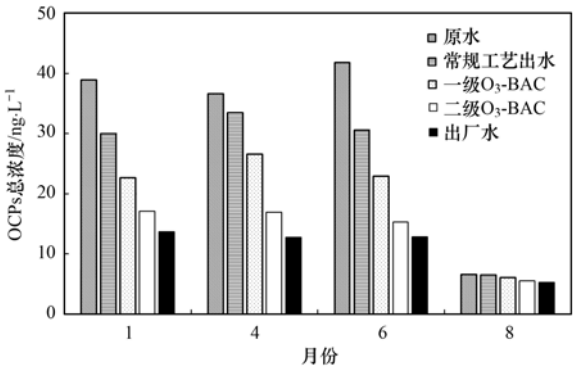


图3 不同工艺单元对 OCPs 的去除效果

Fig. 3 Removal efficiency of OCPs in different treatment units

表 4 原水和出厂水中 OCPs 浓度¹⁾/ng·L⁻¹

Table 4 OCPs concentrations in raw water and effluent/ng·L⁻¹

项目	原水		常规工艺出水		O ₃ -BAC 出水		出厂水	
	浓度范围	平均值±SD	浓度范围	平均值±SD	浓度范围	平均值±SD	浓度范围	平均值±SD
α-BHC	ND~17.5	11.4±6.8	ND~12.2	8.8±5.1	ND~5.1	2.3±1.8	ND~3.1	1.2±1.2
β-BHC	ND~1.7	1.0±0.7	ND~0.9	0.4±0.4	ND	ND	ND	ND
γ-BHC	ND~1.7	1.2±0.7	ND~1.4	0.6±0.6	ND~4.5	1.5±1.7	ND~5.4	1.8±2.2
δ-BHC	ND~2.1	1.0±1.0	ND~1.3	0.7±0.7	ND~1.5	0.5±0.6	ND~1.2	0.3±0.5
七氯	0.61~2.7	1.5±0.8	0.6~3.3	1.8±1.0	0.76~1.8	1.1±0.4	0.6~1.4	1.0±0.3
艾氏剂	ND~4.9	1.2±2.4	ND~1.7	0.4±0.7	ND~0.9	0.2±0.4	ND~0.4	0.1±0.2
环氧七氯	ND~1.0	0.4±0.4	ND~1.1	0.5±0.5	ND~0.8	0.4±0.4	ND~0.6	0.3±0.3
硫丹 I	ND~6.3	3.1±2.2	ND~9.2	3.5±3.4	ND~5.3	2.5±2.0	ND~3.6	1.7±1.3
α-氯丹	ND~0.8	0.2±0.4	ND~1.2	0.3±0.5	ND~0.9	0.2±0.4	ND~1.5	0.4±0.7
p,p'-DDE	ND~0.3	0.1±0.1	ND~0.2	0.1±0.1	ND	ND	ND	ND
狄氏剂	ND~0.3	0.1±0.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
异狄氏剂	1.35~11.2	6.3±3.7	3.0~8.9	5.4±2.3	1.5~5.8	3.1±1.7	1.4~6.1	3.1±1.7
硫丹 II	ND~1.4	0.7±0.6	ND~1.3	0.7±0.5	ND~1.6	1.0±0.6	ND~1.1	0.6±0.4
p,p'-DDD	ND~0.3	0.08±0.1	ND~0.4	0.09±0.2	ND	ND	ND	ND
p,p'-DDT	ND~3.8	1.8±1.6	ND~3.2	1.4±1.3	ND~0.9	0.6±0.4	ND~0.8	0.5±0.3
甲氧滴滴涕	ND~2.0	0.9±0.9	ND~2.0	0.8±0.9	ND~1.5	0.7±0.7	ND~1.4	0.5±0.6
∑ OCPs	6.5~38.9	31.0±14.2	8.0~33.4	25.5±10.2	7.5~17.1	14.2±4.0	7.4~13.6	11.6±2.5

2.4 水中卤乙酸变化

饮用水中卤乙酸(HAAs)主要来自于氯化消毒产生的消毒副产物(CI-DBPs)和工农业发展所带来的水源水污染^[42]。有研究表明 HAAs 具有胚胎毒性和致畸作用,主要表现为生殖损害和发育损害,而且不同 HAAs 之间具有加毒效应^[43],其中二氯乙酸和三氯乙酸的致癌性较强^[44]。Zhang 等^[45]对中国 13 个水源水中 CI-DBPs 前驱物调查发现 HAAs 均有检出,主要由三氯乙酸和二氯乙酸构成。

2015 年 1、4、6、8 月对 P 水厂原水和各工艺段出水 HAAs 进行分析,结果如图 4 和表 5 所示。1、4、6 月 P 水厂原水中检出 HAAs 浓度在 $8.6 \sim 10.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,由于水源水季节变化影响,8 月原水中 HAAs 低至 $2.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,共检出 5 种 HAAs,其中检出量以一氯乙酸、二氯乙酸为主,占原水 HAAs 总浓度的 74.9% ~ 91.5%。李金燕等^[46]对北方某城市以黄河源自来水厂原水中 4 种 HAAs 进行 8 次调研发现 HAAs 均未检出。P 水厂常规工艺出水 HAAs 浓度在 $0.3 \sim 7.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率在 33.8% ~ 87.0%,去除效果显著。两级 O_3 -BAC 深度处理对 HAAs 去除率在 8.1% ~ 17.7%,对氯代乙酸略有去除效果,但二溴乙酸、二溴一氯乙酸有少量生成。有研究发现,臭氧氧化能使消毒副产物生成势提高,因为臭氧与有机大分子反应生成小分子类物质,而小分子类物质是消毒副产物 HAAs 的主要前体物^[47,48]。

加氯消毒后出厂水中 HAAs 浓度增加至 $17.4 \sim 38.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,二氯乙酸、三氯乙酸满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)的要求。夏季(8 月)卤乙酸生成量高于冬季(1 月),这与莫云等^[49]的研究结果一致,由于 HAAs 的生成反应受温度影响较大,温度越高反应速度越快,HAAs 生成量增加^[50]。出厂水 HAAs 中含溴乙酸浓度在 $12.7 \sim 15.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,占卤乙酸总量的 38.7% ~ 55.3%,所占比例与浓度均高于上海、北京等城市^[51],一方面可能由于 P 水厂水源水质较差,消毒副产物前体物含量较高;另一方面可能是河网原水含有较高 Br^- ,在氯消毒过程中 Br^- 可与次氯酸(HOCl)反应生成 HOBr ,而 HOBr 比 HOCl 化学活性更强,更容易与有机物发生卤代反应,形成较多的溴代副产物^[51,52],对此需进行进一步地研究。

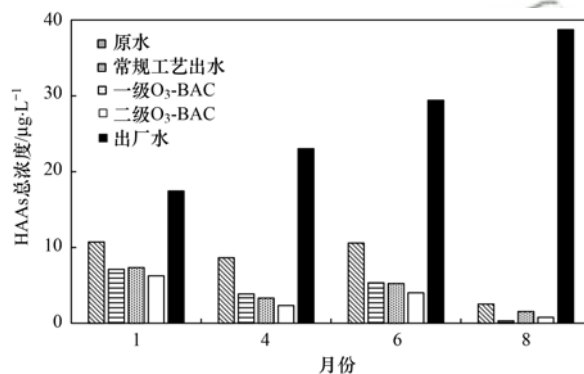


图4 不同工艺单元对 HAAs 去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of HAAs in different treatment units

表5 原水和各工艺单元出水 HAAs 浓度¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 5 HAAs concentrations in raw water and effluent/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	原水		常规工艺出水		O_3 -BAC 出水		出厂水	
	浓度范围	平均值 $\pm$ SD	浓度范围	平均值 $\pm$ SD	浓度范围	平均值 $\pm$ SD	浓度范围	平均值 $\pm$ SD
一氯乙酸	1.3 ~ 7.8	4.7 ± 2.3	ND ~ 4.6	2.2 ± 1.6	ND ~ 4.2	2.0 ± 1.5	6.7 ~ 19.2	11.2 ± 4.7
一溴乙酸	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.2 ~ 1.2	0.7 ± 0.4
二氯乙酸	0.2 ~ 1.4	0.8 ± 0.5	ND ~ 0.9	0.5 ± 0.3	0.3 ~ 0.5	0.4 ± 0.1	1.7 ~ 4.2	2.9 ± 1.1
三氯乙酸	0.7 ~ 2.7	1.8 ± 0.8	0.3 ~ 1.6	1.1 ± 0.5	0.3 ~ 1.3	0.6 ± 0.4	0.4 ~ 2.1	1.4 ± 0.7
一溴一氯乙酸	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3.3 ~ 6.7	4.5 ± 1.5
二溴乙酸	ND	ND	ND	ND	ND ~ 0.4	ND	4.0 ~ 5.9	5.0 ± 0.7
一溴二氯乙酸	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.3 ~ 0.9	0.6 ± 0.3
二溴一氯乙酸	ND ~ 0.3	0.1 ± 0.1	ND	ND	ND ~ 0.2	0.1 ± 0.1	0.6 ~ 1.9	1.3 ± 0.5
三溴乙酸	ND ~ 1.3	0.9 ± 0.7	ND ~ 0.9	0.5 ± 0.4	ND ~ 0.3	0.1 ± 0.2	0.4 ~ 2.14	1.5 ± 0.8
$\sum$ HAAs	2.5 ~ 10.7	8.1 ± 3.3	0.3 ~ 7.1	4.2 ± 2.5	0.8 ~ 6.3	3.3 ± 2.0	17.4 ~ 38.7	27.2 ± 7.9

3 结论

(1) P 水厂以河网水作为水源水,原水水质受季节影响加大,冬季水质明显差于夏季。 O_3 -BAC 深度处理工艺对常规有机物指标的提升具有重要作用,TOC、 UV_{254} 、高锰酸盐指数平均去除率分别提

升了 10.4%、23.0%、19.2%。

(2) P 水厂原水中检出 8 种 PAHs 和 16 种 OCPs,总浓度分别为 $53.9 \sim 100.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.5 \sim 41.8 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,PAHs 主要以 2 ~ 4 环为主,占总 PAHs 的 80.6% ~ 93.9%,OCPs 主要以六六六、硫丹 I、异狄氏剂为主,约占总 OCPs 的 63.2% ~

80.4%。O₃-BAC 深度处理对 PAHs 和 OCPs 的去除效果均显著优于常规工艺, 去除率分别提升 21.6% ~ 43.3%、15.1% ~ 36.6%, 出水稳定达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)的要求。

(3) P 水厂原水中检出 5 种 HAAs, 总浓度为 2.5 ~ 10.7 μg·L⁻¹, 以一氯乙酸、二氯乙酸为主。HAAs 削减以常规工艺为主, 去除率为 33.8% ~ 87.0%。O₃-BAC 深度处理对氯代乙酸略有去除, 但溴代乙酸会有少量生成。加氯消毒后出厂水中 HAAs 总浓度在 17.4 ~ 38.7 μg·L⁻¹, 其中含溴乙酸占总 HAAs 的 38.7% ~ 55.3%。

参考文献:

- [1] 李霞, 王东红, 王金生, 等. 北京市枯水季和丰水季水源水中持久性有机污染物的水平分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(2): 437-442.
- Li X, Wang D H, Wang J S, *et al.* Analysis of persistent organic pollutants (POPs) levels in dry and wet seasons in source water of municipal waterworks in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(2): 437-442.
- [2] 暴志蕾. 长三角地区饮用水源地有机污染物特征分析研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2016.
- Bao Z L. Characteristics of organic pollutants in drinking water sources of the Yangtze River Delta Region [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2016.
- [3] 李维美, 李雪花, 蔡喜运, 等. 应用自动识别与定量分析数据库筛查黄河和长江水中有机污染物[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2627-2632.
- Li W M, Li X H, Cai X Y, *et al.* Application of automated identification and quantification system with a database (AIQS-DB) to screen organic pollutants in surface waters from Yellow River and Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(11): 2627-2632.
- [4] 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 等. 基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3789-3797.
- Wang C L, Zou X Q, Zhao Y F, *et al.* Source apportionment and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Yangtze River, China: based on PMF model [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(10): 3789-3797.
- [5] 韩晓刚, 黄廷林. 水厂常规工艺去除有机物和总磷[J]. 环境工程学报, 2013, 7(5): 1616-1620.
- Han X G, Huang Y L. Removal efficiency of organics and total phosphorus in conventional process of water plants [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(5): 1616-1620.
- [6] 张冬, 刘芳蕾, 刘武平, 等. 饮用水中持久性有机污染物的去除效能[J]. 净水技术, 2015, 34(1): 38-45.
- Zhang D, Liu F L, Liu W P, *et al.* Effectiveness of persistent organic pollutants (POPs) removal in drinking water [J]. *Water Purification Technology*, 2015, 34(1): 38-45.
- [7] 宋瀚文, 张博, 王东红, 等. 我国 36 个重点城市饮用水中多环芳烃健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(1): 42-48.
- Song H W, Zhang B, Wang D H, *et al.* Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking waters of 36 major cities in China [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, 9(1): 42-48.
- [8] 陈锡超, 罗茜, 陈虎, 等. 自来水常规和深度处理工艺中挥发性有机物的变化规律[J]. 环境科学, 2013, 34(12): 4642-4648.
- Chen X C, Luo Q, Chen H, *et al.* Occurrence and distribution of volatile organic compounds in conventional and advanced drinking water treatment processes [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(12): 4642-4648.
- [9] Feng L, Watts M J, Yeh D, *et al.* The efficacy of ozone/BAC treatment on non-steroidal anti-inflammatory drug removal from drinking water and surface water [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2015, 37(4): 343-356.
- [10] 陈义春, 戴盛, 朱永林, 等. 臭氧/生物活性炭深度去除有机物的效果研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(23): 51-53.
- Chen Y C, Dai S, Zhu Y L, *et al.* Advanced removal of organics by ozone/biological activated carbon treatment process [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(23): 51-53.
- [11] 薛琦, 朱光灿, 戴小冬, 等. 臭氧-生物活性炭工艺对微污染长江原水中有机物的去除特性[J]. 净水技术, 2015, 34(4): 36-41.
- Xue Q, Zhu G C, Dai X D, *et al.* Characteristics of organic matter removal of micro-polluted raw water from Yangtze River with ozone-biological activated carbon (O₃-BAC) treatment processes [J]. *Water Purification Technology*, 2015, 34(4): 36-41.
- [12] GB/T 5750-2006, 生活饮用水标准检验方法[S].
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 211-213, 566-574.
- [14] 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 等. 黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 958-963.
- Dong Q Q, Zhang A, Li Y M, *et al.* Linking optical properties of dissolved organic matter with NDMA formation potential in the Huangpu River [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3): 958-963.
- [15] HJ 478-2009, 水质 多环芳烃的测定 液液萃取和固相萃取高效液相色谱法[S].
- [16] 刘新, 王东红, 马梅, 等. 中国饮用水中多环芳烃的分布和健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(2): 207-214.
- Liu X, Wang D H, Ma M, *et al.* Distribution and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water of China [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2011, 6(2): 207-214.
- [17] 蒋煜峰, 王学彤, 孙阳昭, 等. 上海市城区土壤中有机关农药残留研究[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 409-414.
- Jiang Y F, Wang X T, Sun Y Z, *et al.* Residues of organochlorine pesticides in urban soil of Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(2): 409-414.
- [18] 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 等. J 市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3474-3479.
- Li X L, Liu R, Lan Y Q, *et al.* Study on chlorinated disinfection byproducts and the relevant health risk in tap water of J city [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(9): 3474-3479.
- [19] 宋亚丽, 王奇梁, 董秉直, 等. 微污染水源水中有机物的分

- 布特征及微滤膜对其的影响作用[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(10): 3623-3628.
- Song Y L, Wang Q L, Dong B Z, *et al.* Distribution characteristics of organic matters in micro-polluted water and variation after microfiltration[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(10): 3623-3628.
- [20] Kong L Y, Zheng X J, Wang Z S. Pilot plant study on ozonation and biological activated carbon process for drinking water treatment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, **18**(2): 232-235.
- [21] 昌盛, 耿梦娇, 刘琰, 等. 淳陀河冲洪积扇地下水中多环芳烃的污染特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 2058-2066.
- Chang S, Geng M J, Liu Y, *et al.* Pollution characteristic of polycyclic aromatic hydrocarbons in the groundwater of Hutuo River pluvial fan[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 2058-2066.
- [22] Zhang Z L, Huang J, Yu G, *et al.* Occurrence of PAHs, PCBs and organochlorine pesticides in the Tonghui River of Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2004, **130**(2): 249-261.
- [23] 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 等. 某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3466-3472.
- Wu Y C, Chen L J, Lan Y Q, *et al.* Performance of nanofiltration for improving the drinking water quality in a water supply plant with micropolluted water resource [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3466-3472.
- [24] 高旭, 王侠, 熊毅, 等. 三峡库区城市给水厂多环芳烃分布变化评价[J]. 安全与环境学报, 2007, **7**(4): 77-80.
- Gao X, Wang X, Xiong Y, *et al.* Varieties of PAHs' distribution among water purification plants in Three Gorges Reservoir Region [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, **7**(4): 77-80.
- [25] 乔梦, 齐维晓, 赵旭, 等. 多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1451-1459.
- Qiao M, Qi W X, Zhao X, *et al.* Occurrence and removal of polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives in typical wastewater treatment plants in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2017, **37**(4): 1451-1459.
- [26] 许晓伟, 黄岁樑. 地表水中多环芳烃迁移转化研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(1): 26-33, 37.
- Xu X W, Huang S L. Transport-transformation of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface waters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(1): 26-33, 37.
- [27] 王淑娟, 周翔, 许宜平, 等. 北方某城市饮用水中多环芳烃的来源及其在水处理过程中的行为研究[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(8): 52-56.
- Wang S J, Zhou X, Xu Y P, *et al.* Study on source of polycyclic aromatic hydrocarbons and its behavior in drinking water treatment process in a city of North China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, **1**(8): 52-56.
- [28] 王卫, 朱光灿, 周圣东, 等. 微污染原水在原水输送及后续工艺中的水质变化[J]. 中国给水排水, 2016, **32**(7): 10-13, 23.
- Wang W, Zhu G C, Zhou S D, *et al.* Changes of water quality during micro-polluted raw water transport and following process [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(7): 10-13, 23.
- [29] 刘祥. 氯消毒工艺对饮用水中多环芳烃的去除规律[J]. 净水技术, 2017, **36**(4): 15-20.
- Liu X. PAHs removal rule by chlorine disinfection process in drinking water [J]. *Water Purification Technology*, 2017, **36**(4): 15-20.
- [30] 席北斗, 虞敏达, 张媛, 等. 华北典型污灌区有机氯农药残留特征及健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2016, **11**(2): 453-464.
- Xi B D, Yu M D, Zhang Y, *et al.* Residues and health risk assessments of organochlorine pesticides in a typical wastewater irrigation area of North China [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, **11**(2): 453-464.
- [31] 王乙震, 张世禄, 孔凡青, 等. 滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4194-4211.
- Wang Y Z, Zhang S L, Kong F Q, *et al.* Seasonal distribution, composition, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in the main stream of the Luanhe River [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4194-4211.
- [32] 杨清书, 麦碧娟, 傅家谟, 等. 珠江干流河口水体有机氯农药的时空分布特征[J]. 环境科学, 2004, **25**(2): 150-156.
- Yang Q S, Mai B X, Fu J M, *et al.* Spatial and temporal distribution of organochlorine pesticides (OCPs) in Surface water from the Pearl River artery estuary [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(2): 150-156.
- [33] 蒋新, 许士奋, Martens D, 等. 长江南京段水、悬浮物及沉积物中多氯有毒有机污染物[J]. 中国环境科学, 2000, **20**(3): 193-197.
- Jiang X, Xu S F, Martens D, *et al.* Polychlorinated organic contaminants in waters, suspended solids and sediments of the Nanjing Section, Yangtze River [J]. *China Environmental Science*, 2000, **20**(3): 193-197.
- [34] 原盛广, 王东红, 马梅, 等. 自来水厂不同净水工艺对持久性有机物的去除效果试验研究[J]. 环境工程学报, 2008, **2**(5): 586-590.
- Yuan S G, Wang D H, Ma M, *et al.* Assessment on removal effect of different advanced treatment techniques in waterworks [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, **2**(5): 586-590.
- [35] 唐访良, 张明, 徐建芬, 等. 千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1735-1741.
- Tang F L, Zhang M, Xu J F, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of organochlorine pesticides (OCPs) in the water of Lake Qiandao and its major input rivers [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1735-1741.
- [36] 唐访良, 张明, 徐建芬, 等. 钱塘江(杭州段)水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3595-3603.
- Tang F L, Zhang M, Xu J F, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of organochlorine pesticides (OCPs) in Qiantang River, Hangzhou section [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3595-3603.
- [37] 张铁山, 许宜平, 黄圣彪, 等. 原水水质对南方某给水厂处理有机氯农药效果的影响[J]. 给水排水, 2005, **31**(3): 5-8.

- Zhang T S, Xu Y P, Huang S B, *et al.* The effect of raw water quality on the removal efficiency of organochlorine pesticides in a waterworks in South China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2005, **31**(3): 5-8.
- [38] 刘鹏宇, 夏传, 常青, 等. 聚合硫酸铁混凝消除水中有机氯的研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(8): 2382-2392.
- Liu P Y, Xia C, Chang Q, *et al.* The removal of OCPs in water by coagulation with poly ferric sulfate[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(8): 2382-2392.
- [39] 刘超, 强志民, 张涛, 等. 臭氧和基于臭氧的高级氧化工艺降解农药的研究进展[J]. *环境化学*, 2011, **30**(7): 1225-1235.
- Liu C, Qiang Z M, Zhang T, *et al.* Degradation of pesticides by ozone and ozone-based advanced oxidation processes: state-of-the-art [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(7): 1225-1235.
- [40] 刘超, 强志民, 田芳, 等. 多类农药与紫外光、臭氧和高锰酸钾的反应活性研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 127-133.
- Liu C, Qiang Z M, Tian F, *et al.* Reactivity of several classes of pesticides with UV, ozone and permanganate[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 127-133.
- [41] 孔令宇, 张晓健, 王占生. 生物活性炭内吸附与生物降解协同去除有机污染物[J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 777-780.
- Kong L Y, Zhang X J, Wang Z S. Removal of organic pollutants by adsorption cooperated with biodegradation in BAC [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(4): 777-780.
- [42] 赵玉丽, 李杏放. 饮用水消毒副产物: 化学特征与毒性[J]. *环境化学*, 2011, **30**(1): 20-33.
- Zhao Y L, Li X F. Drinking water disinfection byproducts: chemical characterization and toxicity [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(1): 20-33.
- [43] 杨帆, 楚文海, 张永吉, 等. 饮用水有机类消毒副产物毒理学研究方法进展[J]. *生态毒理学报*, 2012, **7**(1): 35-43.
- Yang F, Chu W H, Zhang Y J, *et al.* Recent advances in toxicological methods for testing toxicity of organic disinfection by-products (DBPs) in drinking water [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, **7**(1): 35-43.
- [44] 郭改梅, 覃琼霞. 饮用水源水氯化消毒副产物的特征与风险评估[J]. *中国农村水利水电*, 2015, (10): 96-99.
- Guo G M, Qin Q X. The characteristics and risk assessment of chlorinated disinfection by-products of drinking source water[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2015, (10): 96-99.
- [45] Zhang J Z, Yu J W, An W, *et al.* Characterization of disinfection byproduct formation potential in 13 source waters in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(2): 183-188.
- [46] 李金燕, 金芬, 金晓辉, 等. 北方某城市饮用水处理中卤乙酸浓度水平的调查研究[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(8): 1091-1095.
- Li J Y, Jin F, Jin X H, *et al.* Occurrence of haloacetic acids in water treatment processes of a water supply works, North China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(8): 1091-1095.
- [47] 曹雯蓉, 于水利, 李攀, 等. 东太湖水源臭氧-活性炭工艺消毒副产物的生成规律与控制[J]. *给水排水*, 2015, **51**(4): 34-37.
- [48] 陈丽珠, 巢猛, 刘清华, 等. 臭氧-生物活性炭控制有机物和消毒副产物研究[J]. *给水排水*, 2015, **41**(11): 37-40.
- Chen L Z, Chao M, Liu Q H, *et al.* Study on ozone-biological activated carbon to control organics and disinfection by-products [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, **41**(11): 37-40.
- [49] 莫云, 杨小丽, 陆继来, 等. 饮用水中卤乙酸生成的影响因素及检测方法[J]. *安全与环境工程*, 2010, **17**(2): 73-76.
- Mo Y, Yang X L, Lu J L, *et al.* Influential factors and analysis method of the formation of haloacetic acids in drinking water[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2010, **17**(2): 73-76.
- [50] 张小璐, 杨宏伟, 王小, 等. 消毒副产物生成的温度影响和动力学模型[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 4046-4051.
- Zhang X L, Yang H W, Wang X M, *et al.* Formation of disinfection by-products: temperature effect and kinetic modeling [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(11): 4046-4051.
- [51] 孟丽苹, 董兆敏, 胡建英. 全国自来水厂卤乙酸浓度调查、风险评估与标准建议[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(4): 721-726.
- Meng L P, Dong Z M, Hu J Y. National survey and risk assessment of haloacetic acids in drinking water in China for reevaluation of the drinking water standards [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(4): 721-726.
- [52] 林涛, 陈卫, 王磊磊. 臭氧-生物活性炭对南方河网典型污染物的去除特性[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1397-1401.
- Lin T, Chen W, Wang L L. Removal characters of ozone-biological activated carbon process for typical pollutants in southern brooky regions of China [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(5): 1397-1401.

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)