

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.6
第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征 张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)

北京城郊 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价 徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘水桥, 赵清 (2501)

上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响 高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)

天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析 徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)

典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征 赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)

垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征 余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)

天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)

霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测 杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)

宁东能源化工基地大气 PM_{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险 刘攀亮, 剧媛丽, 毛满萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)

2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染的健康效益评估 韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)

1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)

北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析 王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)

江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征 徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)

亚热带稻区大气 NO₂、HNO₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降 欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)

长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)

基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建 梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)

青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征 罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)

鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)

三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析 江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)

水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响 范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪睿容 (2657)

水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示 张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)

崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)

云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)

鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征 陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)

合流制面源污染传输过程与污染源解析 房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)

强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果 段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)

水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响 邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)

巢湖十五里河沉积物磷吸附潜力及对外源碳的响应 李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈志 (2730)

金盆水库沉积物磷的来源及分布特征 毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)

水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征 王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)

不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系 王慎, 张思思, 许允, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)

表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律 朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)

针铁矿改性生物炭对砷吸附性能 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)

改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制 史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)

厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性 闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)

污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除 王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)

碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响 王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)

活性污泥物理结构对呼吸过程的影响 郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)

好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性 廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)

快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素 刘婷婷, 王晓锋, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)

生物炭对潜流人工湿地污染物去除及NO_x排放影响 邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田N₂O排放的影响及其微生物机制 吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)

不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响 胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)

典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价 何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)

西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)

基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)

喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价 汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)

黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓁 (2904)

秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)

生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响 阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)

稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氮氧化过程 刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)

纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氮氧化速率的影响 伍玲丽, 张旭, 舒昆慧, 张丽, 司友斌 (2939)

农田沟道土壤中锰氨氧化(Mn-ANAMMOX)过程的探究 陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮琛, 陈志浩 (2948)

污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响 吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)

《环境科学》征订启事(2929) 《环境科学》征稿简则(2947) 信息(2646, 2656, 2857)

污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除

王小东¹, 王子文¹, 陈明飞¹, 王燕¹, 王硕^{1,2}, 李激^{1,2*}

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 无锡 214122; 2. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009)

摘要: 针对污水处理厂 (wastewater treatment plant, WWTP) 有机磷 (organic phosphorus, OP) 污染现状, 采用多种方法表征出水 OP 污染特性, 并开展强化去除研究. 结果表明, TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、聚磷酸盐 (Poly-P) 和 OP 的出水平均浓度分别为: 0.62、0.22、0.03 和 0.37 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, OP 占比达 59.7%. 工艺全流程分析结果表明, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、Poly-P 和 OP 在进、出水中的占比依次是 54.4%、6.3%、39.3% 和 16.9%、14.5%、68.6%. OP 和溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 存在正相关性, 相关系数为 0.65; 亲水性和疏水性 OP 的平均浓度分别是 0.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.31 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 疏水性 OP 的 C/P 比亲水性低, 说明疏水性 OP 生物利用度 (bioavailability, BA) 更高, 结果表明 OP 的 BA 约为 20.0%, OP 以难生物利用组分为主. 强化去除研究表明活性焦最佳投加量为 20 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 32.6%; O_3 最佳投加量为 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率高达 79.1%, 高级氧化技术较物理吸附更适合作为深度处理方式.

关键词: 污水处理厂 (WWTP); 有机磷 (OP); 工艺全流程; 生物利用度; 强化去除

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2800-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201811162

Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant

WANG Xiao-dong¹, WANG Zi-wen¹, CHEN Ming-fei¹, WANG Yan¹, WANG Shuo^{1,2}, LI Ji^{1,2*}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu College of Water Treatment Technology and Material Collaborative Innovation Center, Suzhou 215009, China)

Abstract: Given the presence of organic phosphorus (OP) pollution in wastewater treatment plant (WWTP) effluents, contaminant properties and enhanced removal approaches were investigated. The experimental results showed that the respective levels of effluent total phosphorus (TP), $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, Poly-P, and OP were 0.62, 0.22, 0.03, and 0.37 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, for which the ratio of OP reached up to 59.7%. Based on the flow analysis, the proportions of influent $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, Poly-P, and OP changed from 54.4%, 6.3%, and 39.3% to 16.9%, 14.5%, and 68.6% within the effluent. The OP content was positively correlated with the DOC content ($R^2 = 0.65$), and the average contents of hydrophilic and hydrophobic OP were 0.12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 0.31 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. C/P in hydrophobic OP was relatively lower than that in hydrophilic OP, which indicated that the bioavailability of hydrophobic OP was higher. However, the bioavailability of hydrophobic OP was only 20%, which implied that the effluent OP basically consisted of refractory components. A total of 32.6% of OP within the effluent was removed through bioadsorption reactions with activated coke, while the removal of OP was up to 79.1% when 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of O_3 was applied, which suggested that advanced oxidation was more beneficial for the enhancement of OP removal.

Key words: wastewater treatment plant (WWTP); organic phosphorus (OP); process analysis; bioavailability; enhanced removal

水体富营养化及水资源短缺问题迫使污水处理厂的总磷排放标准愈来愈严. 2007年无锡市发生供水危机事件后, 国家对太湖流域城镇污水处理厂的尾水排放提出了更加严格的要求^[1]. 引起富营养化的主要因素是氮、磷, 其中磷对水体富营养化更具有显著影响^[2], 文献[3]表明, 根据 Liebig 最低营养学限制定律, 磷浓度的高低是控制藻类生长丰度的最重要因子. 而随着我国工业化的迅猛发展, 含磷污染物被大量排入市政污水管网, 磷的高效去除成为制约污水处理厂尾水水质进一步提高的关键因素.

污水中磷的深度去除成为近年来污水处理领域的研究重点, 但现有技术对特殊含磷废水的去除效果有限, 因此, 通过磷组分分析强化除磷成为有效

方法, 而磷组分或存在形式的研究是表征其污染特征的关键. 相关研究结果表明, 污水中的磷以 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、Poly-P 和 OP 的形态存在, Poly-P 主要包括焦磷酸盐、偏磷酸盐等^[4]. 在市政污水处理厂中, Poly-P 含量一般较低, 污水处理厂化学除磷的方法是投加铁盐、铝盐等混凝剂与磷酸盐形成不溶性沉淀物, 最终通过固液分离的方法使磷从污水中被去

收稿日期: 2018-11-21; 修订日期: 2018-12-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07202-001); 江苏省重点研发计划 (社会发展) 科技示范工程项目 (BE2015622)

作者简介: 王小东 (1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向是污水深度除磷脱氮, E-mail: 18762463512@163.com

* 通信作者, E-mail: lij@jiangnan.edu.cn

除^[2], $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 可以经过生物除磷和化学除磷的协同作用实现极限去除^[5], 但针对 OP 污染及强化去除问题的研究相对较少. Qin 等^[6]指出在 Loudoun 和 Pinery 的两座污水处理厂二级出水中, 疏水性 OP 占比分别为 64.8% 和 76.7%; Liu 等^[7]利用藻类生物测定法提出了 OP 生物利用度, 其代表污水中易于微生物利用的 OP 比例. Li 等^[8]利用藻类生长曲线法研究亲疏水性 OP 的生物利用度, 发现疏水性 OP 更易被藻类等微生物利用, 进而促进出水中磷的去除. 微生物首先通过碱性磷酸酶将污水中有机磷水解为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, 而后以聚磷酸盐的形式储存于胞内^[9]. 一般常使用藻类生物测定法确定微生物对有机磷等底物的生物利用度^[8], 但是存在实验周期长、可操作性差的弊端. 因此, 本研究使用活性污泥作为实验对象, 分析生物处理过程中 OP 在水相和泥相中的迁移和转化规律, 从活性污泥的角度阐述 OP 的生物利用度.

针对 OP 的强化去除, 活性炭吸附是较为可行的处理方式^[10~12], 薛爽^[13]的研究发现活性炭吸附对洗消废水中的特征污染物甲基磷酸二甲酯 (dimethyl methyl phosphonate, DMMP) 去除效率可达 25%, 但活性炭应用成本较高, 会加重污水处理厂的运行负担. 而褐煤制备的活性焦作为一种新型的吸附材料, 其性质与活性炭相似, 但来源更广且成本更低, 具有比表面积大、中孔发达的特点, 对难降解的大分子有机物具有良好的吸附性能^[14]. 王东等^[15]的研究发现活性焦用于处理垃圾渗滤液, 垃圾渗滤液中产生恶臭和色度的物质被有效去除, COD 去除率高达 73.6%. O_3 氧化是污水处理厂常规消毒措施, 宋淑静等^[16]的研究表明臭氧氧化法对污水中有机磷具有较好的降解作用, OP 的去除率为 78.46%. 因此研究在适当的 O_3 浓度下, 污水中有机磷的强化去除对于污水总磷超低排放具有现实意义.

本研究从污水处理厂 OP 污染特征及强化去除两个方面出发, 阐述了 OP 的分布特性、亲疏水特性、生物利用度等污染特征, 并针对性开展基于静态吸附和高级氧化技术的有机磷深度去除技术分析, 以期为污水处理厂实现总磷超低排放奠定基础.

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

水样采集于无锡某工业园区污水处理厂, 日处理规模为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 工业废水占比 30%, 采用 AAO + MBR 工艺, 出水将达到 DB 32/1072-2018

(总氮 $< 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总磷 $< 0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 进出水及各工艺单元水样均采用棕色玻璃瓶收集, 同时采集 3 组平行水样, 经 $0.45 \mu\text{m}$ 的无机纤维膜过滤后避光保存在 4°C 条件下, 并尽快完成相关水质指标测试. 水样采集于污水处理厂受到明显有机磷废水冲击的 1 ~ 15 d.

1.2 分析方法

水样预处理后, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 等指标均采用国标法测定^[17], Poly-P 的测定方法是将水样一式两份, 一份测定 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, 另一份加等体积 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 保持沸水水浴 10 min 后测定 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, 前后两次浓度差即 Poly-P^[18], OP 的检测方法是差值法, 计算公式为:

$$\rho(\text{OP}) = \rho(\text{TP}) - \rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P}) - \rho(\text{Poly-P})$$

DOC 测定采用岛津 Shimadzu TOC 进行分析, 真空冷冻干燥机采用 LABCONCO 型, 臭氧发生器采用 TOG C2B 型, 磁力搅拌器型号为 CJJ-843.

1.3 OP 亲疏水性分布及 C/P

用 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸溶液将水样 pH 调至 2, 然后将水样通入离子树脂分级装置中, 首先依次通过串联的 XAD-8 和阴离子交换树脂柱, 此时控制水样流速为 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 阴离子交换树脂的作用为吸附无机磷组分, 其流出溶液为亲水性 OP, 然后将串联的 XAD-8 和阴离子交换树脂柱分离开, 并采用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液对 XAD-8 树脂柱进行反冲, 控制水样流速为 $0.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, XAD-8 树脂柱流出溶液为疏水性 OP^[7]. 采用树脂分离 OP 需进行回收率分析, 以 OP、DOC 计, 其回收率在 80% ~ 113% 之间. C/P 采用 DOC/OP 的计算方法^[7].

1.4 OP 可生物利用性

为考察 OP 可生物利用性, 排除无机磷的干扰, 出水水样需先以 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速通过阴离子交换树脂柱^[7]. 水样预处理后, 取等体积出水和经过反复漂洗的活性污泥于 1 L 烧杯内, 曝气维持 $\text{DO} 3 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 水相磷组分研究方法是定点取混合液并经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤完成指标测定, 泥相磷组分研究方法是定点取混合液, 经冷冻干燥后采用酸提法测定污泥絮体吸附的 OP 和无机磷 (inorganic phosphorus, IP) 含量^[19].

1.5 静态吸附和臭氧氧化实验

为考察 OP 强化去除效果, 排除无机磷的干扰, 出水水样需先以 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速通过阴离子交换树脂柱^[7].

在 25°C 条件下, 在 250 mL 的锥形瓶分别加入不同量活性焦和 150 mL 出水水样, 放置在摇床上振荡一定时间, 过滤后, 取 20 mL 滤液, 测定各种

磷组分浓度, 每组实验进行 3 次平行实验, 取 3 次实验的平均值. 计算活性焦吸附处理对出水 OP 去除率:

$$\eta = \frac{c_0 - c_1}{c_0} \times 100\%$$

式中, η 为 OP 去除率, %, c_0 为出水初始 OP 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, c_1 为吸附后 OP 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

在 25°C 、初始 $\text{pH}=7.0$ 条件下, 分别在装有 1 L 出水水样的烧杯中通入不同浓度的 O_3 , 设置为 5、10、15、20、25、30、50 和 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 用磁力搅拌器混合烧杯内水样, 并分别在反应过程中的 0、5、10、15 和 20 min 时刻取 20 mL 样品. 其他实验设置和计算方法同静态吸附实验.

2 结果与讨论

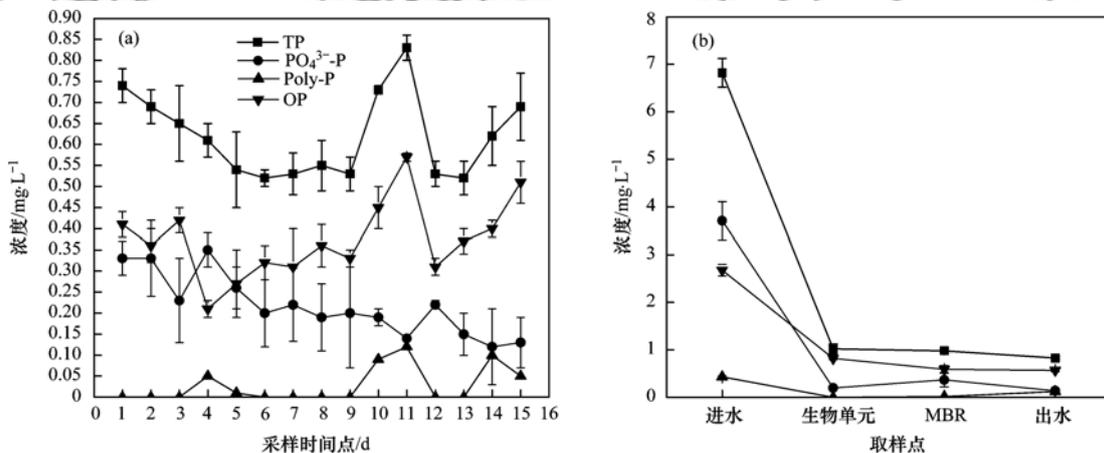
2.1 污水处理厂各形态磷污染特征分析

2.1.1 各形态磷浓度分布及 OP 与 DOC 相关性分析

图 1(a) 为采样周期内该污水处理厂二级出水磷组分的变化情况, 其中 TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、Poly-P 和 OP 的出水平均浓度分别为 0.62 、 0.22 、 0.03 和 $0.37\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 指标均超过现行标准 ($\text{TP} < 0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 出水 TP 中 60% 以上为 OP, 其他形态磷

则以 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为主. 高洋等^[20]的研究表明, 太湖流域污水处理厂二级出水磷组分以 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为主, 其他形态的磷则以 OP 存在, 但本研究发现出水 Poly-P 含量最高达到 $0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 因此出水磷组分的划分和测定需更加严谨. 无锡地区市政污水处理厂进水 TP 范围为 $2\sim 4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[21], 而该污水处理厂该段时间内 TP 和 OP 进水平均浓度分别达到 $8.45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 明显超出其设计进水负荷. 进水磷浓度出现明显异常的原因是该污水处理厂位于无锡市某工业园区内, 工业废水占比约 30%, 且园区内有大量的金属、机械加工类等企业, 该类企业在工件加工过程中的漂洗环节, 会产生大量富含磷酸单酯、磷酸二酯和其他难生物降解有机磷的废水^[22, 23].

图 1(b) 为工艺流程中磷组分的变化情况, 其中进出水 TP 浓度分别达到 $6.82\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.83\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、Poly-P 和 OP 在进出水中的占比依次是 54.4%、6.3%、39.3% 和 16.9%、14.5%、68.6%. 经过生物除磷和化学除磷的协同作用, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率达到了 96.2%, OP 的去除率却仅为 78.7%, 出水 OP 以难生物降解磷形态为主.



(a) 二级出水磷组分的变化情况; (b) 工艺流程中磷组分的变化情况

图 1 磷组分的变化情况

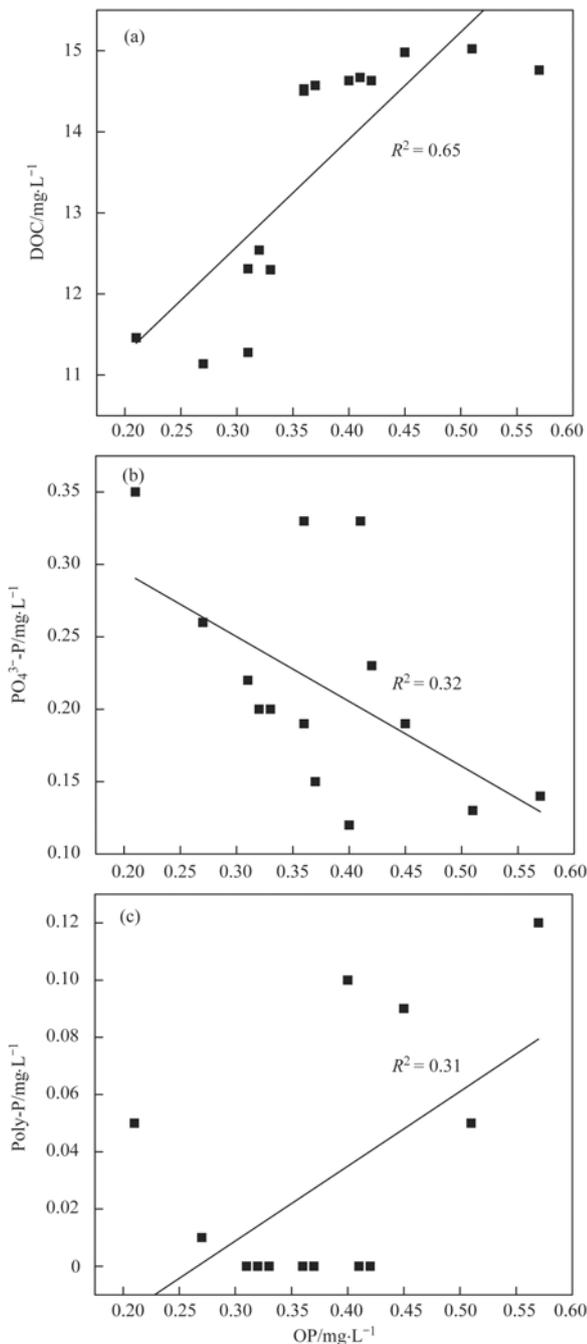
Fig. 1 Changes in the phosphorus composition

对污水处理厂出水 OP 和 DOC 指标之间进行了统计学相关性分析, 发现出水 OP 和 DOC 存在正相关性, 相关系数为 0.65 [图 2(a)]. 说明使用 DOC 指标间接反映典型有机磷废水冲击污水处理厂 OP 的污染程度是较为可行的. 同时发现, OP 与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 Poly-P 之间缺乏线性相关性 [图 2(b) 和 2(c)].

2.1.2 OP 亲疏水性规律及 C/P 分析

出水 OP 的亲疏水性组分及总体分布如图 3 所

示. 亲水性和疏水性 OP 的平均含量分别是 $0.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.31\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其在 OP 中的占比 (质量分数, 下同) 分别达 28% 和 72%, 出水 OP 以疏水性组分为主, 这与 Liu 等^[7]的研究结果较为一致. Gigliotti 等^[24]利用 ^{31}P -NMR 光谱证明了活性污泥中疏水性 OP 主要成分为磷酸单酯和磷酸二酯等, 而亲水性 OP 则主要包含 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、少量磷酸单酯和 Poly-P 等. Monbet 等^[25]指出在污水处理过程中, 60% ~ 95% 的有机磷酸盐会在水解酶作用下降解为



(a) OP 与 DOC 相关性; (b) OP 与 PO₄³⁻-P 相关性; (c) OP 与 Poly-P 相关性

图 2 出水 OP 与 DOC、PO₄³⁻-P 和 Poly-P 相关性

Fig. 2 Correlation among effluent OP and DOC, PO₄³⁻-P, and Poly-P concentrations

低分子有机磷, 因此出水中 OP 可能主要以低分子磷酸单酯和磷酸二酯等形式存在^[6]. 亲水性和疏水性组分的 C/P 如图 4 所示. C/P 可以在一定程度上代表污水中 OP 的生物利用度, 从而对后续深度处理技术的选择具有指导意义. 结果显示疏水性组分的 C/P 均低于亲水性, 表明疏水性组分的有机碳含量相对较低、有机磷含量相对较高, 意味着疏水性组分的 OP 具有较高的生物利用度^[26]. Qin 等^[6]的

研究发现, 污水处理厂出水中 OP 生物利用性较高的 C/P 范围是 15 ~ 20, 该污水处理厂出水 OP 的 C/P 处于较高水平, 生物利用度可能较低, 因此其出水 OP 可能以难生物降解形态为主.

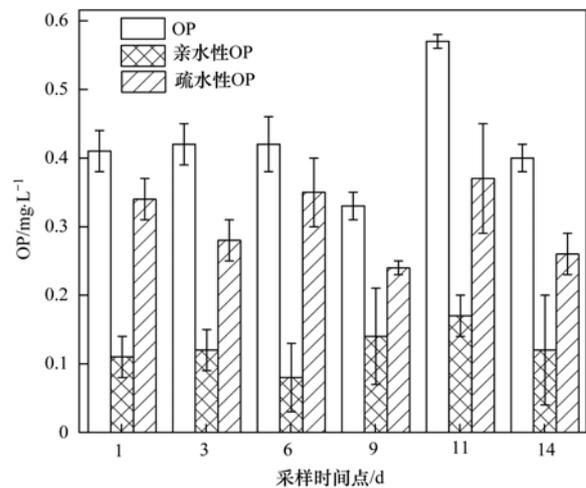


图 3 出水 OP 亲疏水分布规律

Fig. 3 Distribution of hydrophilic and hydrophobic OP in the effluent

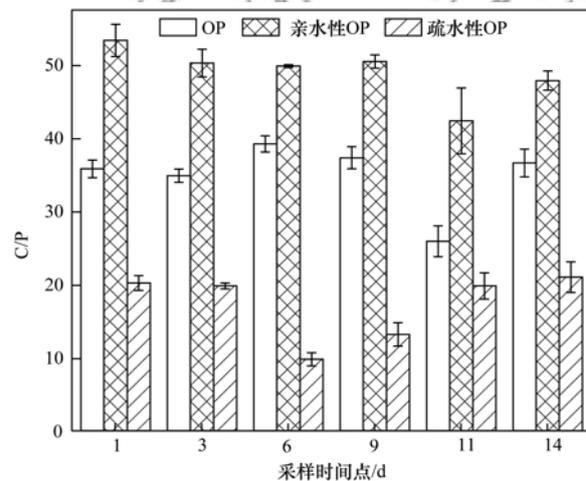


图 4 OP 及亲疏水性 OP 的 C/P

Fig. 4 Ratio of carbon to phosphorus in the hydrophilic and hydrophobic OP

2.1.3 OP 生物利用度分析

OP 的生物利用度结果如图 5 所示. 图 5 (a) 表示在 24 h 实验周期内水相中各种磷组分的变化情况, TP 和 OP 浓度均降低了 0.15 mg·L⁻¹. 反应初期 (2 h), PO₄³⁻-P 含量出现了一定程度上升, 由初始 0 mg·L⁻¹ 增加至 0.09 mg·L⁻¹, 这是由于部分易生物降解 OP 在碱性磷酸酶的作用下转化为 PO₄³⁻-P^[9], 6 h 后水相中的 PO₄³⁻-P 降为 0 mg·L⁻¹, 推测是 PO₄³⁻-P 在好氧条件下被微生物所利用. 同时 6 h 后水相中的 TP 和 OP 含量处于稳定状态, 表明此时污水中磷的赋存状态基本都是难生物降解有机磷. 图 5 (b) 表示泥相中 IP 和

OP 组分的变化情况, 其中 IP 含量比较稳定, 反应期间维持在 $3.4 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 而 OP 含量则呈现增加趋势, 由初期的 $30.4 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加至 $31.0 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 经与 MLSS 核算可知, 泥相中 OP 含量增加了 0.61 mg , 推测该部分 OP 是被活性污泥

吸附^[27]. 综上, 出水 OP 在生物处理过程中的归趋可分为 3 种途径: ①仍残留在污水中, 占比 66.7%, ②被水解为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 而生物利用, 占比 20.0%, 即 OP 生物利用度为 20%, ③OP 会被活性污泥所吸附, 占比 13.3%.

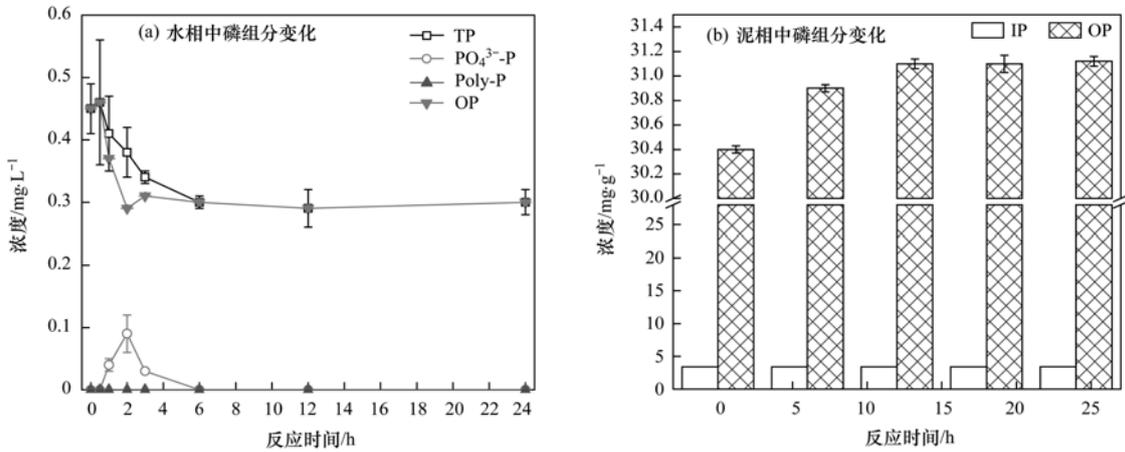


图 5 出水 OP 的可生物利用性
Fig. 5 Bioavailability of effluent OP

2.2 OP 强化去除效果研究

2.2.1 活性焦对 OP 的强化去除

如图 6 所示, 随着活性焦浓度的增加, OP 的去除效率先逐渐增加至 32.6% 左右, 后基本保持不变. 活性焦对 OP 的去除机理是其比表面积相对较大、中孔发达, 对难降解的大分子有机物具有良好的吸附性能^[4], 而出水 OP 以疏水性组分为主, 其与活性焦吸附结合的几率更大, 且随着活性焦浓度的增加, 提供的吸附点位增多, 所以 OP 呈现出浓度下降的趋势. 综上, 活性焦用于强化去除污水处理厂出水 OP, 最佳投加量是 $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 32.6%.

2.2.2 臭氧氧化对 OP 的强化去除

图 7(a) 所示为在不同 O₃ 投加量条件下, 反应

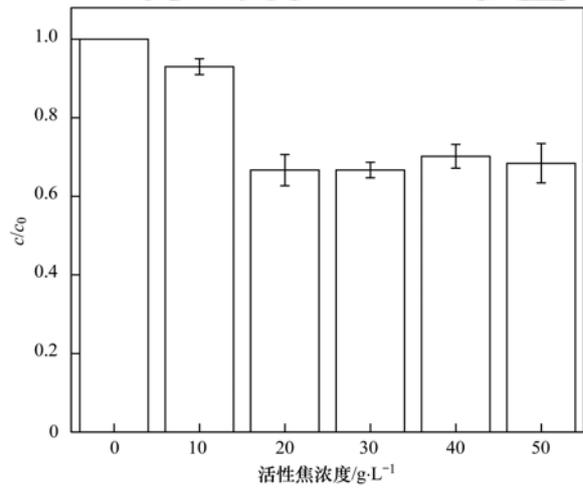


图 6 活性焦不同投加量下 OP 的变化
Fig. 6 Changes of OP under different dosages of activated coke

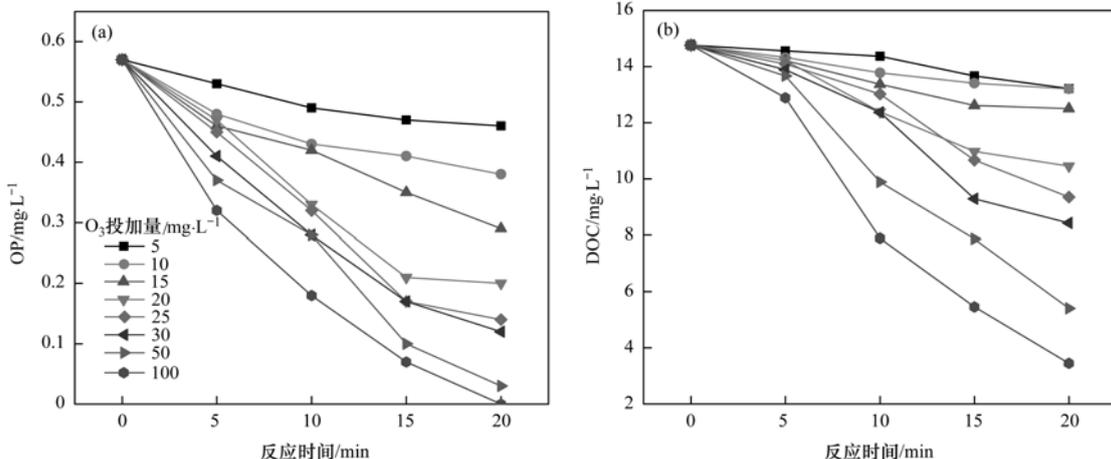


图 7 不同臭氧投加量下 OP 和 DOC 变化
Fig. 7 Changes of OP and DOC concentrations under different ozone dosages

过程中出水的各种磷组分变化规律, 随着 O_3 浓度的不断增加, OP 含量呈现快速降低的趋势, 相应地 PO_4^{3-} -P 含量呈现快速升高的趋势, 说明在臭氧产生的 $(\cdot OH)$ 氧化作用下^[28~30], 生物利用性较差的 OP 被逐步降解为 PO_4^{3-} -P. 考虑实际工程应用中 O_3 浓度不宜过大^[31], 故 O_3 的最佳投加量为 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应时间为 20 min, OP 的去除率高达 79.1%, 此后随着 O_3 含量的继续增加 ($100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 出水 OP 完全被氧化为无机磷. 此外, 当 O_3 浓度增加时, DOC 也呈现出一定程度的降低趋势[图 7(b)], 说明在实现 OP 的臭氧氧化过程中, 有机碳也被部分矿化成无机碳. 在 O_3 浓度为 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, DOC 的矿化率为 43.9%, 同步实现了有机物的深度去除. O_3 作为污水处理厂提标改造的常规工艺, 进行 OP 的氧化去除研究, 对其实际应用具有一定的指导和借鉴意义.

3 结论

(1) 污水处理厂受到明显的外部有机磷废水冲击, TP、 PO_4^{3-} -P、Poly-P 和 OP 的出水平均浓度分别为 0.62 、 0.22 、 0.03 和 $0.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, OP 占比达 60%, 且 Poly-P 含量最高达到 $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 工艺全流程分析表明, PO_4^{3-} -P、Poly-P 和 OP 在进出水中的占比依次是 54.4%、6.3%、39.3% 和 16.9%、14.5%、68.6%, 出水 OP 以难生物降解组分为主.

(2) 出水 OP 和 DOC 存在正相关性, 相关系数为 0.65, 使用 DOC 指标来间接反映 OP 的污染程度较为可行; OP 以疏水性组分为主, 且疏水性 OP 的 C/P 比亲水性低, 说明疏水性组分生物利用度更高, 进一步研究表明 OP 的生物利用度约为 20.0%. 出水 OP 在生物处理过程中的归趋可分为 3 种途径: ①仍残留在污水中, 占比 66.7%, ②被水解为 PO_4^{3-} -P 而生物利用, OP 生物利用度为 20%, ③OP 会被活性污泥所吸附, 占比 13.3%.

(3) 污水处理厂出水 OP 强化去除结果表明, 活性焦最佳投加量是 $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率为 32.6%; O_3 的最佳投加量为 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应时间为 20 min, 去除率可达 79.1%, 且最佳投加量下, DOC 的矿化率为 43.9%, 实现了有机物深度去除. 高级氧化技术较物理吸附更适合出水 OP 的深度处理.

参考文献:

[1] 孔繁翔. 太湖水危机的警示[J]. 中国科学院院刊, 2007, 22(4): 267-268.
Kong F X. The caution for the crises of the water in the Taihu lake[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2007, 22(4): 267-268.

[2] 徐伟勇. 城市污水处理厂尾水中磷的形态分析及除磷研究

[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009.

Xu W Y. Study on speciation and removal of phosphorus in tail water from municipal wastewater treatment plant[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009.

- [3] 丁照兵. 某湖泊水环境现状调查及水质保持技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
Ding Z B. Study on the investigation of the water environment actuality and the maintenance technology of the water quality in a certain lake[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [4] Tarayre C, Nguyen H T, Brognaux A, *et al.* Characterisation of phosphate accumulating organisms and techniques for polyphosphate detection: a review[J]. Sensors, 2016, 16: 797.
- [5] 周峰. 生物脱氮除磷工艺中的化学辅助除磷试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2010.
Zhou F. Research on the chemical-aid phosphorus removal in biological nutrient removal technology[D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2010.
- [6] Qin C, Liu H Z, Liu L, *et al.* Bioavailability and characterization of dissolved organic nitrogen and dissolved organic phosphorus in wastewater effluents[J]. Science of the Total Environment, 2015, 511: 47-53.
- [7] Liu H Z, Jeong J, Gray H, *et al.* Algal uptake of hydrophobic and hydrophilic dissolved organic nitrogen in effluent from biological nutrient removal municipal wastewater treatment systems[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(2): 713-721.
- [8] Li B, Brett M T. The influence of dissolved phosphorus molecular form on recalcitrance and bioavailability [J]. Environmental Pollution, 2013, 182: 37-44.
- [9] Hong H S, Wang H L, Huang B Q. The availability of dissolved organic phosphorus compounds to marine phytoplankton [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1995, 13(2): 169-176.
- [10] Li W, Hua T, Zhou Q X, *et al.* Treatment of stabilized landfill leachate by the combined process of coagulation/flocculation and powder activated carbon adsorption[J]. Desalination, 2010, 264(1-2): 56-62.
- [11] Dałbrowski A, Podkościelny P, Hubicki Z, *et al.* Adsorption of phenolic compounds by activated carbon—a critical review [J]. Chemosphere, 2005, 58(8): 1049-1070.
- [12] Bhatnagar A, Hogland W, Marques M, *et al.* An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 219: 499-511.
- [13] 薛爽. 基于活性炭吸附及组合工艺对洗消废水处理的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
Xue S. Application research of decontamination wastewater treatment based on activated carbon adsorption and Combined Process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [14] Shlewit H, Alibrahim M. Extraction of sulfur and vanadium from petroleum coke by means of salt-roasting treatment [J]. Fuel, 2006, 85(5-6): 878-880.
- [15] 王东, 庞之鹏, 沈斐, 等. 活性焦对垃圾渗滤液中难降解有机物的吸附及影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4653-4661.
Wang D, Pang Z P, Shen F, *et al.* Adsorption of refractory organics in landfill leachate by activated coke and its influencing factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(12): 4653-4661.
- [16] 宋淑静, 刘雪娟. 污水中残留有机磷的深度氧化及分析测定

- [A]. 第七届全国磷化学化工暨第四届海峡化学生物学、生物技术与医药发展讨论会论文集[C]. 郑州: 中国化学会, 2006.
- [17] 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. 120-246.
- [18] Tarayre C, De Clercq L, Charlier R, *et al.* New perspectives for the design of sustainable bioprocesses for phosphorus recovery from waste [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **206**: 264-274.
- [19] 杨柳, 唐振, 郝原芳. 化学连续提取法对太湖沉积物中磷的各种形态测定[J]. *世界地质*, 2013, **32**(3): 634-639.
Yang L, Tang Z, Hao Y F. Morphometry of phosphorus in the lake sediments of Taihu by chemical sequential extraction method [J]. *World Geology*, 2013, **32**(3): 634-639.
- [20] 高洋, 程洁红. 太湖流域污水处理厂氮磷去除现状及效能的研究[J]. *江苏理工学院学报*, 2016, **22**(2): 55-60.
Gao Y, Cheng J H. Characteristics of influent water quality of wastewater treatment plants and its effect on biological nitrogen and phosphorus removal [J]. *Journal of Jiangsu University of Technology*, 2016, **22**(2): 55-60.
- [21] 徐琰, 徐祥, 陈宇, 等. 无锡主城区污水厂升级改造脱氮除磷与污泥产量分析[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(10): 32-35.
Xu Y, Xu X, Chen Y, *et al.* Analysis of nitrogen and phosphorus removal and sludge yield in upgrading and reconstruction of WWTPs in Wuxi main city zone [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, **28**(10): 32-35.
- [22] Zhang Y, Xia S B, He F, *et al.* Phosphate removal of acid wastewater from high-phosphate hematite pickling process by in-situ self-formed dynamic membrane technology [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2012, **37**(1-3): 77-83.
- [23] 李京, 李可, 赵仕林, 等. 多元磷酸酯洗缓蚀剂的合成与应用[J]. *天然气工业*, 2004, **24**(11): 79-81.
Li J, Li K, Zhao S L, *et al.* Synthesis of poly-phosphate acid-washing inhibitor and its application [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, **24**(11): 79-81.
- [24] Gigliotti G, Kaiser K, Guggenberger G, *et al.* Differences in the chemical composition of dissolved organic matter from waste material of different sources [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, **36**(5): 321-329.
- [25] Monbet P, McKelvie I D, Saefumillah A, *et al.* A protocol to assess the enzymatic release of dissolved organic phosphorus species in waters under environmentally relevant conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(21): 7479-7485.
- [26] Cotner J B Jr, Wetzel R G. Uptake of dissolved inorganic and organic phosphorus compounds by phytoplankton and bacterioplankton [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(2): 232-243.
- [27] 王超, 冯士龙, 王沛芳, 等. 污泥中磷的形态与生物可利用磷的分布及相互关系 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(6): 1593-1597.
Wang C, Feng S L, Wang P F, *et al.* Distribution of phosphorus fractions and bio-available phosphorus forms and their relationships in sewage sludge [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(6): 1593-1597.
- [28] 朱秋实, 陈进富, 姜海洋, 等. 臭氧催化氧化机理及其技术研究进展 [J]. *化工进展*, 2014, **33**(4): 1010-1014, 1034.
Zhu Q S, Chen J F, Jiang H Y, *et al.* A review of catalytic ozonation: mechanisms and efficiency [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2014, **33**(4): 1010-1014, 1034.
- [29] 张志伟. 臭氧氧化深度处理煤化工废水的应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Zhang Z W. The research and application of ozonation for the advanced treatment of coal chemical wastewater [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [30] 竹湘锋. 有机废水的催化臭氧氧化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
Zhu X F. Catalytic ozonation of the organic wastewater [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [31] 郑志洋. 城镇污水厂二级生化出水臭氧深度处理技术研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2017.
Zheng Z Y. Advanced wastewater treatment technology based on ozone treating urban sewage secondary biochemical effluent [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2017.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHOU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jimpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹⁵ N-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonification	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)