

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

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

我国城市 PM _{2.5} 污染的健康风险及经济损失评价	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (3467)
冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响	孙晓伟, 郭秀锐, 程水源 (3476)
基于区域传输矩阵和 PM _{2.5} 达标约束的大气容量计算方法	李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌 (3485)
利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征	温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂 (3492)
重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征	彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜 (3502)
杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析	徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光 (3511)
城市生活垃圾露天焚烧 PM _{2.5} 及其组分排放特征	王艳, 郝伟伟, 程珂, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋 (3518)
民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子	杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢 (3524)
大连地区夏季非甲烷烃 (NMHC) 特征及其来源解析	纪德钰 (3535)
“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析	张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (3544)
浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数	王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平 (3552)
有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别	翟增秀, 孟洁, 王巨, 翟友存, 曹阳, 邹克华 (3557)
基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征	胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼 (3563)
基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (3571)
北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露	陶双成, 高硕吟, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙 (3580)
丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化	李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英 (3591)
太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华 (3601)
太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价	朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯 (3614)
台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性	姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳 (3622)
珠江三角洲高碑地下水赋存环境特征及成因分析	张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华 (3631)
有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响	宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波 (3640)
澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析	程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (3649)
碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子	王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋 (3660)
浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析	张亚迪, 宋永会, 彭剑桥, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强 (3670)
人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响	刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利 (3677)
外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N ₂ O 排放影响	余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋 (3689)
雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布	尚宇, 周毅, 廖安意, 方正 (3696)
水体中 Cr(VI) 对不同混凝剂混凝过程的影响	高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升 (3704)
Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A	李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭 (3713)
海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能和机制	于长江, 董心雨, 王苗, 林强 (3719)
磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制	赵华轩, 郎印海 (3729)
污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证	陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青 (3736)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解	关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾 (3744)
阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮	叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民 (3753)
普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能	陈思, 白波, 王洪林, 索有瑞 (3759)
PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能	许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕峰, 夏四清 (3767)
苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用	马娟, 王瑾, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟 (3775)
反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能	王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇 (3782)
好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因	康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 刘珍芳, 王跃, 谭欣林 (3789)
苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性	吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (3797)
污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析	刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂 (3807)
生物炭对华北农田土壤 N ₂ O 通量及相关功能基因丰度的影响	刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平 (3816)
设施菜田土壤 N ₂ O 产生对 O ₂ 的响应	陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国 (3826)
利用 μ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性	孙晓艳, 柳检, 罗立强 (3835)
南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征	李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录 (3845)
Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果	杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄 (3854)
基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移	李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新 (3867)
生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程	赵鹏宇, 李鑫, 柴宝峰 (3876)
转 cry1Ab 和 epsps 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响	王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林 (3885)
脱硫石膏对稻田 CH ₄ 释放及其功能微生物种群的影响	胡翔宇, 向秋洁, 木志坚 (3894)
长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征	杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水 (3901)
黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响	宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛 (3910)
黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价	康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航 (3917)
氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响	涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民 (3927)
有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响	祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许君 (3937)
中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO ₂ 排放	林婷, 吴焯, 何晓婧, 张少君, 郝吉明 (3946)
气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展	叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊 (3954)
《环境科学》征订启事 (3543)	
《环境科学》征稿简则 (3570)	
信息 (3600, 3728, 3844)	

苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用

马娟^{1,2}, 王谨¹, 俞小军¹, 周猛¹, 李光银¹, 孙洪伟^{1,2}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省污水处理行业技术中心, 兰州 730070)

摘要: 采用 SBR 反应器考察了投加不同浓度苯酚(5、10、30、50、100、150、200 mg·L⁻¹)对强化生物除磷工艺(EBPR)系统除磷性能的影响。结果表明, 苯酚浓度≤50 mg·L⁻¹时, COD 及 PO₄³⁻-P 的去除率均在 85% 以上, 系统具有较好的污染物去除性能; 而投加高浓度苯酚(≥100 mg·L⁻¹), 反应器除磷性能大幅降低; 当苯酚浓度为 200 mg·L⁻¹时, 系统仅经过 22 个周期便丧失除磷性能, COD 平均去除率降至 61.3%, 且在短期内难以恢复。同时发现, 长期投加苯酚导致 EBPR 系统污泥除磷性能受到抑制, 且对好氧吸磷的抑制作用大于厌氧释磷。此外, 低浓度苯酚条件下(≤50 mg·L⁻¹), 因污泥对苯酚毒性逐渐适应, 系统污泥微膨胀现象逐渐消失, 而由高浓度苯酚引发的污泥膨胀却难以恢复。短期冲击实验表明, 由投加苯酚导致的出水 COD 和磷浓度的波动可随着苯酚撤去而逐渐恢复, 由此可知, 苯酚冲击对系统除磷性能的抑制可逆。

关键词: 苯酚; 强化生物除磷工艺(EBPR); 除磷性能; 污泥膨胀

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3775-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201801204

Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System

MA Juan^{1,2}, WANG Jin¹, YU Xiao-jun¹, ZHOU Meng¹, LI Guang-yin¹, SUN Hong-wei^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Sewage Treatment Industry Technical Center of Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: An SBR reactor was operated to study the inhibitory effect of different concentrations of phenol (5, 10, 30, 50, 100, 150, and 200 mg·L⁻¹) on the phosphorus removal performance of an EBPR system. The results showed that when the phenol concentration was no higher than 50 mg·L⁻¹, the removal efficiencies of COD and PO₄³⁻-P were above 85%. The system showed efficient pollutant removal performance. However, when phenol was higher than 100 mg·L⁻¹, phosphorus removal performance of the reactor decreased drastically. When phenol concentration was 200 mg·L⁻¹, the system lost phosphorus removal performance after only 22 cycles. The average COD removal efficiency dropped to 61.3%, and high removal performance recovery was not observed in the short term. Meanwhile, it was found that long-term dosing of phenol inhibited phosphorus removal of the sludge subjected to EBPR. Furthermore, the inhibition on aerobic phosphate uptake was greater than that on anaerobic phosphate release. In addition, the limited sludge bulking disappeared gradually owing to acclimation of the sludge to toxicity with a low phenol concentration (≤50 mg·L⁻¹). However, high concentration of phenol induced sludge bulking was difficult to recover. The short-term impact experiments showed that effluent COD and phosphorus fluctuation caused by phenol could be recovered gradually by removing phenol, suggesting that the inhibitory effect of phenol on phosphorus removal was reversible.

Key words: phenol; enhanced biological phosphorus removal(EBPR); phosphorus removal performance; sludge bulking

近年来, 我国水体富营养化问题加剧, 而磷是造成该问题的关键元素^[1,2]。因此我国污水排放标准中对总磷的控制极为严格, 这使水体水质得到有力保障的同时也对污水生物除磷技术提出了更高的要求。强化生物除磷工艺(enhanced biological phosphorus removal, EBPR)因经济有效, 可持续运行等优点在世界范围内被广泛接受并应用。该工艺通过厌氧段和好氧段的交替运行, 在活性污泥中能富集一类聚磷微生物——聚磷菌(polyphosphate accumulating organisms, PAOs), 通过好氧段末期排放富磷剩余污泥达到除磷目的^[3,4]。

苯酚是工业废水中常见的高毒性酚类有机物, 常被用于生产粘合剂、合成橡胶、油漆以及染料等

工业生产。在废水处理领域, 苯酚已被我国环保总局纳入“水中优先控制的污染物黑名单”^[5~8]。工业废水时常由于各种原因进入城市污水处理系统, 对生物脱氮除磷系统造成冲击, 甚至抑制微生物活性, 影响处理效果^[9]。近年来, 关于苯酚对硝化、反硝化过程抑制的研究和对活性污泥菌群结构、代谢机制等方面的研究颇多, 而关于苯酚对生物除磷过程方面的影响研究却鲜见报道^[10~17]。因此, 考察苯酚对生物除磷的长期抑制及冲击作用尤为

收稿日期: 2018-01-23; 修订日期: 2018-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51168027, 51668031); 甘肃省大学生创新创业训练计划项目(201610732009)

作者简介: 马娟(1978~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: meggyma@163.com

必要。

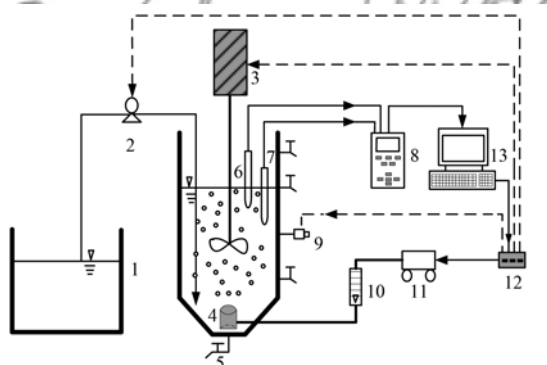
本实验通过向 EBPR 系统投加苯酚,考察其对该系统除磷性能的长期抑制作用及短期冲击影响,同时分析对系统活性污泥沉降性能的影响,以期为城市污水生物除磷系统应对苯酚的冲击提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行

SBR 反应器由有机玻璃制成,反应器总容积 5.4 L,有效容积 4.2 L。反应器的运行由定时器控制,根据需要对反应器的进水、搅拌、曝气、沉淀的启动和停止进行控制。其中溶解氧由 Labview 软件编程的计算机系统与便携式溶解氧测定仪进行在线监测控制。

SBR 反应器每天连续运行 4 个周期,每个周期运行 6 h,其中每周期进水为瞬时进水,厌氧运行 2 h,好氧运行 3 h,沉淀、排水和闲置共耗时 1 h。反应器排水比为 1/3,污泥龄均为 15 d,温度控制在 18~23℃,DO 控制在 2 mg·L⁻¹左右。反应器如图 1 所示。



1. 水箱; 2. 蠕动泵; 3. 搅拌装置; 4. 黏砂块曝气头; 5. 排泥口; 6. pH 探头; 7. DO 探头; 8. Multi 3420 在线测定仪; 9. 电磁阀; 10. 流量计; 11. 空气压缩机; 12. 控制系统; 13. 计算机

图 1 SBR 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the SBR experimental setup

1.2 实验水质及接种污泥

本实验用水采用模拟废水,由碳源液、磷液、浓缩液及微量元素配制而成。碳源由摩尔比为 3:1 的乙酸与丙酸配制, KH₂PO₄ 配制磷液, 1 L 的浓缩液中加入 21 g NH₄Cl, 45 g MgSO₄·7H₂O, 80 g MgCl₂·6H₂O, 21 g CaCl₂·2H₂O, 10 g 酵母浸膏, 61 g 蛋白胨和 0.25 g 硝化抑制剂(C₄H₈N₂S), 微量元素组成参照文献[18]。进水水质为: COD 400 mg·L⁻¹ 左右, PO₄³⁻-P 10 mg·L⁻¹ 左右, NH₄⁺-N 5.33

mg·L⁻¹左右。

本实验用的污泥取自兰州市七里河污水处理厂二沉池,采用非限制性曝气方式培养驯化 2 d,其后按照各自的实验方案运行,定期检测出水水质并记录。

1.3 分析项目及方法

所有水样均采用定性滤纸过滤后测定。水质分析项目中 PO₄³⁻-P 采用钼锑抗分光光度法测定, COD 采用 COD 快速测定仪测定, 苯酚采用 4-氨基安替比林分光光度法。MLSS(混合液悬浮固体浓度), MLVSS(混合液挥发性悬浮固体浓度)采用滤纸重量法测定, SV(污泥沉降比)采用 30 min 沉降法测定。温度和溶解氧(DO)由德国 Multi 3420 在线测定仪在线监测。

2 结果与讨论

2.1 苯酚浓度对 EBPR 系统污染物去除性能的长期影响

图 2 为长期投加不同浓度苯酚条件下系统 COD、PO₄³⁻-P 去除性能。

图 2 中对照组运行期间,出水 COD 稳定维持在 38.0 mg·L⁻¹, COD 去除率均值为 95%, 去除性能良好。苯酚毒性实验组中, 工况 II、III、IV、V、VI、VII、VIII 分别代表苯酚投加浓度为 5、10、30、50、100、150、200 mg·L⁻¹时的运行情况(工况 I 为污泥驯化阶段)。各工况下出水平均 COD 浓度分别为 43.9、49.9、41.5、47.4、68.8、109.6、154.9 mg·L⁻¹, 与之对应的去除率分别为 89%、87.5%、89.6%、88.1%、82.8%、72.6%、61.3%。同对照组相比, 苯酚毒性试验中 COD 去除性能有不同程度的降低。当苯酚浓度 ≤ 50 mg·L⁻¹, 系统 COD 去除率均能维持在 85% 以上, 平均出水 COD 低于 50 mg·L⁻¹; 而当苯酚浓度 ≥ 100 mg·L⁻¹, 系统出水 COD 浓度逐渐增加, 在工况 VIII 时平均去除率仅为 61.3%, 微生物降解有机物的性能急速恶化, 说明此时苯酚已严重抑制了微生物的活性。

由图 2 可知, 对照组运行期间, 出水 PO₄³⁻-P 浓度均值为 0.59 mg·L⁻¹, 除磷率稳定维持在 94.1% 左右, 除磷性能优良。苯酚毒性实验组中, 工况 II~VII 系统出水浓度分别为 0.6、0.82、0.84、1.21、2.5、5.1 mg·L⁻¹, 可知, 随着投加量的提高, 苯酚对系统的抑制作用逐渐增强, 尤其当苯酚投加量增加至 200 mg·L⁻¹时, 系统出水磷浓度迅速升至 6.5 mg·L⁻¹, 在该工况的第 22 个周期, 出水磷浓度 >

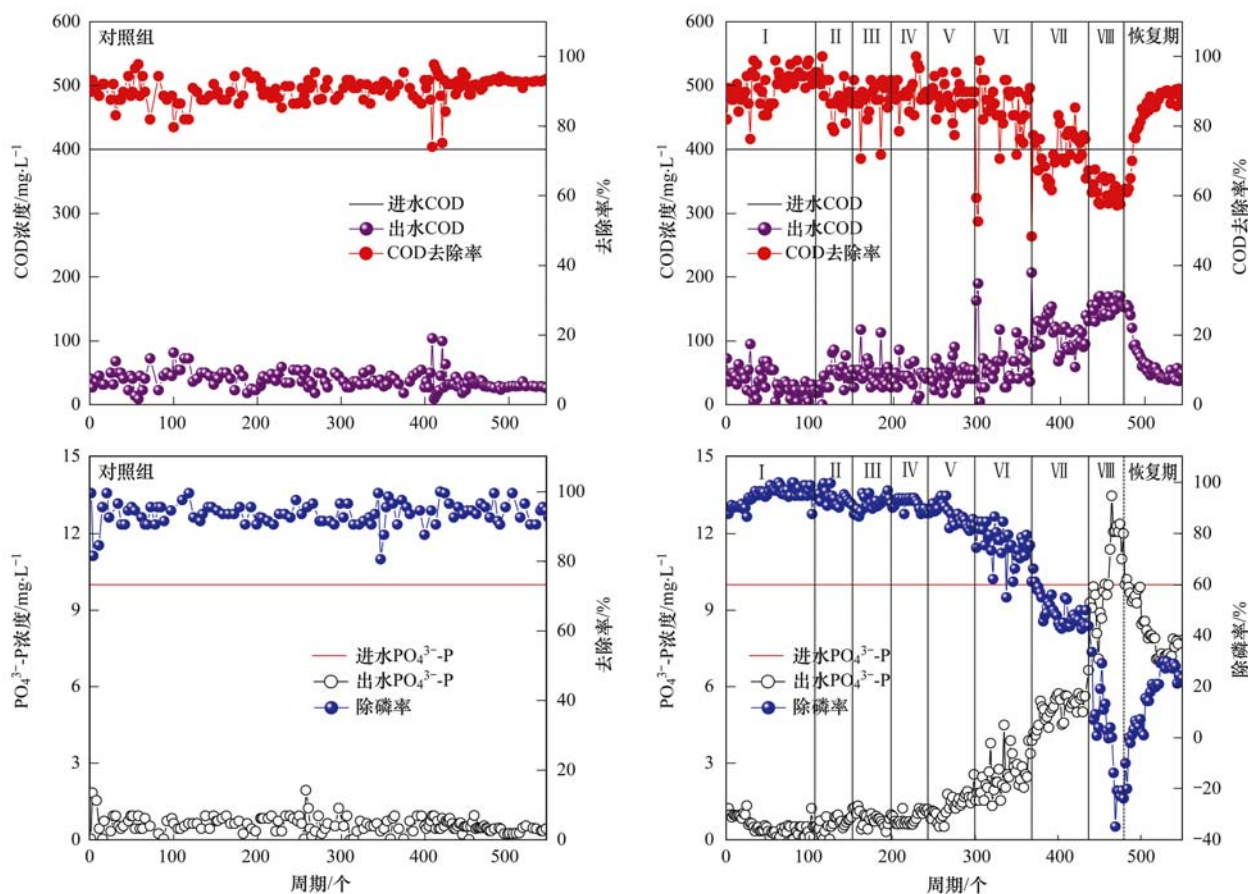


图2 不同苯酚浓度梯度下 EBPR 系统各污染物去除性能

Fig. 2 Removal of pollutants in EBPR system under different phenol concentrations

进水磷浓度 ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 表明此时污泥已丧失吸磷能力, 苯酚已严重抑制系统的除磷性能. 但苯酚投加浓度 $\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 除磷率均在 85% 以上, 说明, 苯酚虽然会引起微生物细胞蛋白质变性和凝固, 但因微生物对苯酚毒性的逐步适应, EBPR 系统仍具有良好的除磷性能. 有研究发现苯酚仅能与胞外酶或细胞膜上的氨氧化单加氧酶 (ammonia oxidation monooxygenase, AMO) 发生作用, 在细胞膜上, 渗透或分配到磷脂双分子层上的苯酚可能破坏细胞膜的完整性或改变跨膜 pH 值梯度, 引起细胞泄漏或酶蛋白主动运输及细胞呼吸和能量代谢的紊乱^[19~22]. 生物除磷过程中起关键作用的酶为聚磷酸激酶 (polyphosphate kinase, PPK), 在厌氧条件下, 细胞内会产生相当量的 PPK, 而苯酚对 PPK 活性的抑制影响导致了系统除磷性能的下降, 但具体的抑制机制还有待进一步研究.

为了考察苯酚的抑制是否可逆, 在反应器运行的第 475 个周期撤去苯酚, 系统进入恢复阶段. 在恢复期运行的第 7 个周期, 出水磷浓度低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 待该工况结束时 (共运行 70 个周期), 反

应器除磷性能虽有好转, 但仍有 $7.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷剩余, 未恢复至原有状态. 由此可知, 长期投加高浓度的苯酚 ($\geq 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 导致的除磷性能恶化在短期内难以恢复.

2.2 苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制

为进一步说明苯酚对 EBPR 系统污泥吸磷的抑制作用, 对长期投加实验各工况下系统释磷量及吸磷量进行整理得到图 3.

由图 3(a) 可知, 对各工况的比释磷、比吸磷速率 (污泥浓度以 MLVSS 计) 进行曲线拟合发现, 当苯酚投加浓度 $\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 苯酚投加量与比释磷速率呈负相关, 即增加苯酚浓度, 比释磷速率下降. 而继续增加苯酚浓度, 比释磷速率虽略有减少但仍基本保持不变. 对比吸磷速率进行曲线拟合表明, 苯酚浓度与比吸磷速率呈线性关系 (负相关), 随着苯酚浓度增加, 比吸磷速率逐渐降低. 对比两种比速率发现, 苯酚对好氧吸磷作用的抑制更为显著. 由此也验证了 2.1 节中的推测, 因苯酚不能直接作用于厌氧段产生的 PPK, 进而对厌氧释磷的抑制作用较小, 比释磷速率变化甚微.

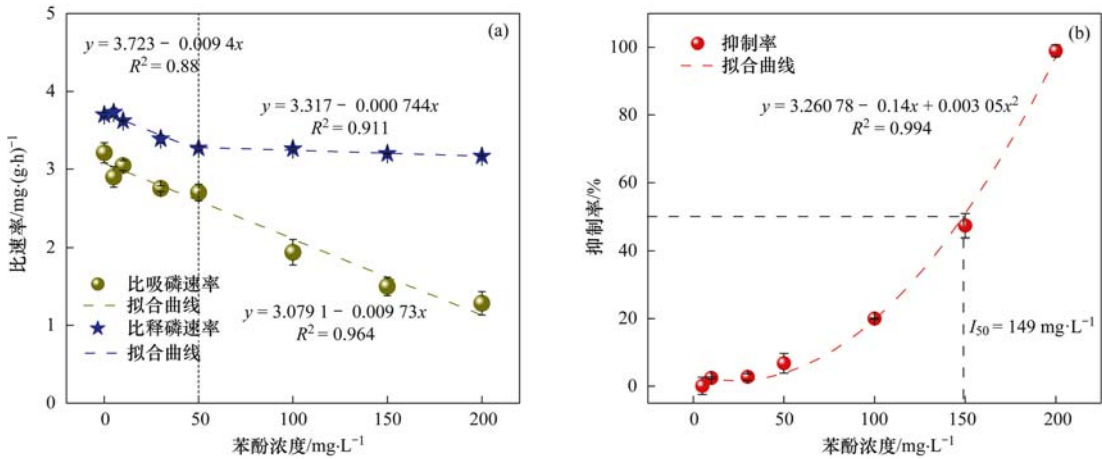


图3 各工况下苯酚对释磷及吸磷性能的抑制作用

Fig. 3 Inhibition of phosphorus release and phosphorus uptake by phenol under various operating conditions

苯酚抑制率计算公式:

$$I = (R_0 - R) / R_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中, R_0 为对照组中平均除磷率, R 为实验各工况系统平均除磷率. 根据公式(1), 求得不同苯酚浓度对系统除磷性能的抑制率. 从图 3(b) 可见, 苯酚抑制曲线具有较高的拟合度, R^2 值达 0.994. 根据拟合公式计算得出抑制率为 50% 和 100% 的苯酚质量浓度分别为 $149 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $203 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由苯酚的生物毒性机制可知, 苯酚仅与胞外酶或细胞膜上的酶发生作用, 而不会造成蛋白质的永久变性或细

胞的解体^[24,25], 因此, 投加较低浓度苯酚 ($\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 系统内微生物对其毒性具有较强的忍受能力, 除磷性能抑制率不足 10%; 而长期投加高浓度苯酚 ($\geq 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 致使微生物细胞蛋白质变性, 细胞死亡, 生物量逐渐减少进而不足以抵抗苯酚带来的毒性, 系统除磷性能恶化, 抑制率迅速增加. 表 1 汇总了其他相关研究与本实验得出的苯酚抑制浓度. 从中可知, 生物脱氮除磷菌群中微生物对苯酚的耐受能力大小依次为: 厌氧氨氧化菌 > 聚磷菌 > 硝化细菌.

表 1 苯酚对生物脱氮除磷过程的抑制浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Inhibitory concentration of phenol on biological nitrogen and phosphorus removal/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

生物脱氮除磷过程	硝化作用 AOB(长期) ^[13]		厌氧氨氧化作用 ^[26]		本研究除磷过程(长期)
	短期	长期	短期	长期	
I_{50}	50.87	71.57	400	149	
I_{100}	—	—	600	203	

2.3 不同苯酚浓度下 EBPR 系统污泥变化规律

图 4 为长期投加苯酚对 EBPR 系统污泥沉降性能的影响.

由图 4 可知, 系统污泥浓度在工况 I 时, 维持在 $3800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 但污泥沉降性能较差, SVI 较高, 均值为 $154.7 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 随着反应器的运行, 系统污泥沉降性能逐渐好转, 到工况结束时其值为 $83 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 工况 II 和工况 III, 苯酚投加浓度为 5 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 污泥浓度均维持在 $3500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, SVI 值稳定, 污泥沉降性能良好. 工况 IV 和 V 工况初期, SVI 值均有小幅增加, 但随着反应的运行, SVI 均能稳定在 $90 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右. 进一步增加苯酚浓度至 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SVI 值迅速增加至 $163.8 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 系统出现污泥膨胀并有部分污泥流失, 该工况运行期间, 污泥浓度均值为 $3200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SVI 为 260

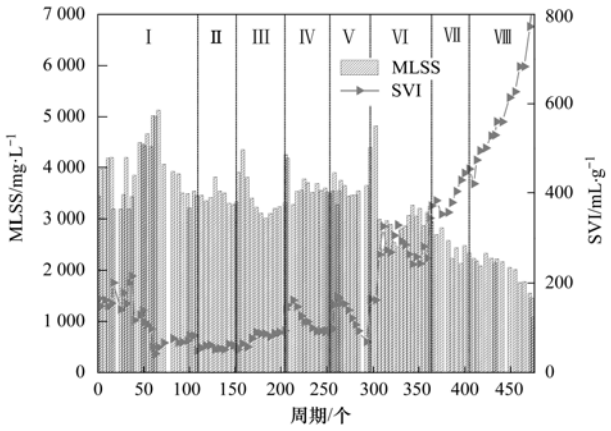


图4 不同苯酚浓度下 EBPR 系统的污泥变化规律

Fig. 4 Sludge variation in the EBPR system at different phenol concentrations

$\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 系统污泥沉降性能较差. 工况 VIII 时, 苯酚

投加浓度为 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，系统污泥膨胀加剧，污泥严重流失，至反应结束时污泥浓度不足 $1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，SVI 增至 $833.3\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ，系统除磷性能已基本丧失。可见，低浓度苯酚条件下 ($\leq 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，因污泥对毒性具有一定的适应能力，系统污泥微膨胀现象逐渐消失。但高浓度苯酚 ($\geq 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 导致大量微生物死亡继而引起污泥解絮，且这 3 个工况下，污泥颜色逐渐呈灰白色，与对照组显著不同。

2.4 苯酚瞬间冲击对 EBPR 系统各污染物去除性能的影响

实验还考察了苯酚冲击对 EBPR 系统各污染物去除性能的影响。各工况开始时，瞬时投加苯酚浓度分别为 35 、 50 、 75 、 100 、 150 和 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

图 5 黑色箭头所指为冲击实验时间。由图 5 (a) 可知，当苯酚浓度 $\leq 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，冲击周期内，系统 COD 去除率均在 85% 以上，可见苯酚对出水 COD 影响甚微。当苯酚浓度为 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，冲击周期出水 COD 浓度均有增加为 $90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $135\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，但分别在之后的第 2

个和第 3 个周期恢复正常。由此可知，由苯酚冲击作用导致的 COD 去除性能的降低可在短期内得以恢复。由图 5(b) 可知，冲击实验中，苯酚浓度为 $35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，系统除磷性能良好，未受到苯酚的抑制影响；随着苯酚投加量的增加 (苯酚浓度为 $50\sim 200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，系统出水在投加初期均有波动，但随着反应器的运行，系统除磷性能均能得以恢复，恢复时间分别为 1、2、4、8、10 个周期。由此可知，苯酚冲击对系统除磷性能的抑制可逆。实验还发现，苯酚冲击周期内，随着投加量的提高，系统厌氧释磷量均有增加，随后释磷量恢复正常 (如图 5 蓝色箭头所示)，说明苯酚冲击周期内释磷量的增大仅是苯酚的瞬间刺激作用^[14]。由表 2 各冲击周期苯酚残余量可知，当苯酚质量浓度很低或接近于零时，抑制作用会相应减弱或消除，这也解释了为何长期实验中的除磷性能会随着苯酚的撤去而逐渐恢复。表 2 还总结了各工况下的苯酚冲击周期内释、吸磷量及其比值 i 。从中可知，随着苯酚投加量的增大，污泥释磷量和吸磷量均有提高，而 i 值也逐渐增大，说明好氧吸磷能力受苯酚抑制作用更大。

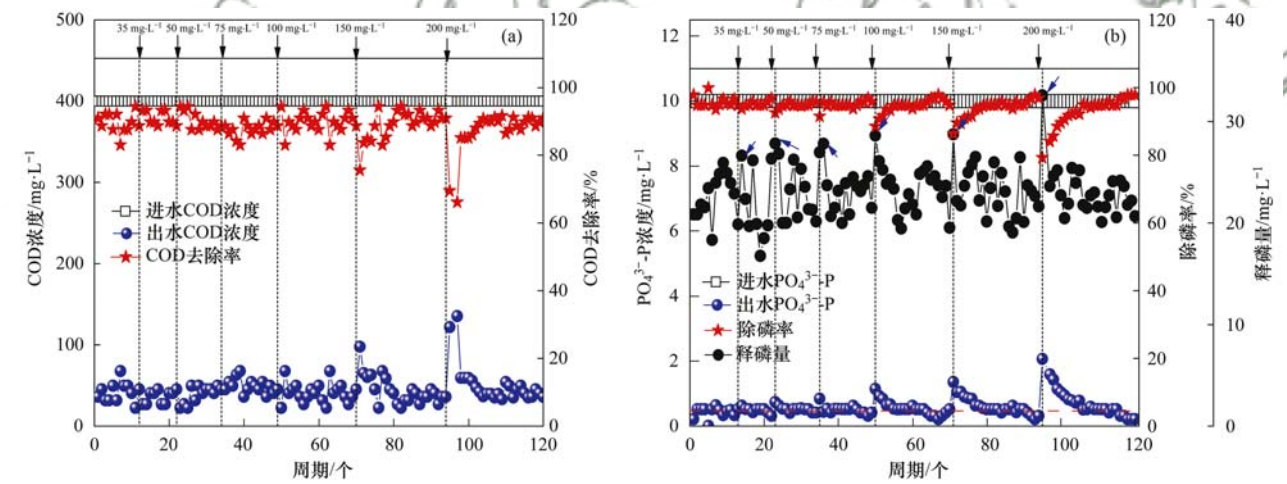


图 5 苯酚瞬时冲击对 EBPR 系统污染物去除性能影响
Fig. 5 Effect of instant phenol impact on pollutants removal performance in EBPR system

表 2 苯酚冲击实验系统释磷及吸磷性能

项目	苯酚投加浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						
	0	35	50	75	100	150	200
冲击周期苯酚残留量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0	0	2.5	7.32	11.6	23.47	35.63
释磷量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	22.5	26.5	27.8	27.0	28.6	28.7	32.6
吸磷量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	25.6	29.6	30.8	29.7	31.2	31.6	34.5
i	0.88	0.901	0.903	0.907	0.918	0.922	0.94

3 结论

(1) 在 EBPR 系统中，投加低浓度苯酚 (≤ 50

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，系统 COD 及 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率均在 85% 以上，系统具有较好的污染物去除性能。而投加高浓度苯酚 ($\geq 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，反应器除磷性能大幅降

低;当苯酚浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,系统仅经过 22 个周期便丧失除磷性能,COD 平均去除率降至 61.3%,且在短期内难以恢复。

(2)长期投加苯酚,导致 EBPR 系统除磷性能受到抑制,但其对好氧吸磷的抑制作用更为显著。苯酚对系统除磷性能的半抑制浓度 $I_{50} = 149 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(3)因污泥对苯酚毒性具有一定的适应能力,投加低浓度苯酚 ($\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),系统污泥微膨胀现象可逐渐消失,但由高浓度苯酚引发的污泥膨胀却很难恢复。

参考文献:

- [1] Biswas B K, Inoue K, Ghimire K N, *et al.* Removal and recovery of phosphorus from water by means of adsorption onto orange waste gel loaded with zirconium [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(18): 8685-8690.
- [2] 张胜花,常军军,孙珮石. 水体藻类磷代谢及藻体磷矿化研究进展[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(7): 1250-1254.
- Zhang S H, Chang J J, Sun P S. Phosphorus cycle of algae during its growth and death process: phosphorus uptake and release [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(7): 1250-1254.
- [3] 赵永宏,邓祥征,战金艳,等. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(3): 92-98.
- Zhao Y H, Deng X Z, Zhan J Y, *et al.* Progress on preventing and controlling strategies of lake eutrophication in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(3): 92-98.
- [4] Zhang Z J, Li H, Zhu J, *et al.* Improvement strategy on enhanced biological phosphorus removal for municipal wastewater treatment plants: Full-scale operating parameters, sludge activities, and microbial features [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(7): 4646-4653.
- [5] 潘霞霞,李媛媛,黄会静,等. 焦化废水中硫氰化物的生物降解及其与苯酚、氨氮的交互影响[J]. *化工学报*, 2009, **60**(12): 3089-3096.
- Pan X X, Li Y Y, Huang H J, *et al.* Biodegradation of thiocyanate and inhibitory interaction with phenol, ammonia in coking wastewater [J]. *CIESC Journal*, 2009, **60**(12): 3089-3096.
- [6] 于萍,姚琳,罗运柏. 高浓度含酚废水处理的新工艺[J]. *工业水处理*, 2002, **22**(9): 5-8.
- Yu P, Yao L, Luo Y B. Degradation treatment of highly concentrated phenol-containing industrial wastewater [J]. *Industrial Water Treatment*, 2002, **22**(9): 5-8.
- [7] 柯水洲,张明,胡翔,等. 苯酚厌氧降解的研究及应用[J]. *工业水处理*, 2007, **27**(2): 9-12.
- Ke S Z, Zhang M, Hu X, *et al.* Research progress and application of anaerobic phenol degradation [J]. *Industrial Water Treatment*, 2007, **27**(2): 9-12.
- [8] 周文敏,傅德黔,孙宗光. 中国水中优先控制污染物黑名单的确定[J]. *环境科学研究*, 1991, **4**(6): 9-12.
- Zhou W M, Fu D Q, Sun Z G. Determination of black list of China's priority pollutants in water [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1991, **4**(6): 9-12.
- [9] 胡小兵,饶强,唐素兰,等. 苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3939-3948.
- Hu X B, Rao Q, Tang S L, *et al.* Effects of phenol on activity and microfauna community structure of activated sludge [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3939-3948.
- [10] 徐美燕,赵庆祥,刘颖. 苯酚对生物硝化过程的抑制[J]. *安全与环境学报*, 2005, **5**(1): 43-46.
- Xu M Y, Zhao Q X, Liu Y. Phenol inhibition to biological nitrification process [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, **5**(1): 43-46.
- [11] 李娟英,彭自然,赵庆祥. 苯酚对废水生物硝化过程的抑制[J]. *上海水产大学学报*, 2007, **16**(2): 192-195.
- Li J Y, Peng Z R, Zhao Q X. Study on phenol inhibition on nitrification [J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2007, **16**(2): 192-195.
- [12] 李娟英,赵庆祥,江敏. 氨氮生物硝化过程中苯酚的抑制作用[J]. *水处理技术*, 2007, **33**(2): 46-49.
- Li J Y, Peng Z R, Jiang M. Phenol inhibition in the course of biological nitrification of $\text{NH}_3\text{-N}$ [J]. *Technology of Water Treatment*, 2007, **33**(2): 46-49.
- [13] 路聪聪,葛士建,王淑莹,等. 苯酚对氨氧化菌硝化和污泥性能冲击影响[J]. *化工学报*, 2012, **63**(8): 2576-2583.
- Lu C C, Ge S J, Wang S Y, *et al.* Shock effect of phenol on nitrification by ammonia oxidation bacteria and sludge performance [J]. *CIESC Journal*, 2012, **63**(8): 2576-2583.
- [14] 路聪聪,王淑莹,葛士建,等. 苯酚冲击负荷对前置反硝化系统脱氮的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, **45**(6): 2130-2136.
- Lu C C, Wang S Y, Ge S J, *et al.* Effect of phenol load on nitrogen removal in pre-denitrification process [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, **45**(6): 2130-2136.
- [15] 宋嘉美. 典型有毒有机物苯酚对活性污泥代谢的影响及作用机制研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2014.
- Song J M. Effect of typical organic phenol on the metabolism of activated sludge and the mechanism [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2014.
- [16] Leong M L, Lee K M, Lai S O, *et al.* Sludge characteristics and performances of the sequencing batch reactor at different influent phenol concentrations [J]. *Desalination*, 2011, **270**(1-3): 181-187.
- [17] 段佩玲,孙瑞,王振宇. 含苯酚废水生物处理的细菌群落结构初探[J]. *基因组学与应用生物学*, 2015, **34**(1): 125-129.
- Duan P L, Sun R, Wang Z Y. Study on community structure during industrial phenol wastewater treatment process [J]. *Genomics and Applied Biology*, 2015, **34**(1): 125-129.
- [18] Hesselmann R P X, Werlen C, Hahn D, *et al.* Enrichment, phylogenetic analysis and detection of a bacterium that performs enhanced biological phosphate removal in activated sludge [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1999, **22**(3): 454-465.
- [19] 李娟英,赵庆祥,江敏. 苯酚及其衍生物对氨氮生物硝化的抑制研究[J]. *环境工程学报*, 2008, **2**(1): 27-30.
- Li J Y, Zhao Q X, Jiang M. Inhibition of phenol and its

- derivatives on ammonia nitrification [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, **2**(1): 27-30.
- [20] Fang H H P, Chan O C. Toxicity of phenol towards anaerobic biogranules[J]. Water Research, 1997, **31**(9): 2229-2242.
- [21] Fang H H P, Lau I W C, Chung D W C. Inhibition of methanogenic activity of starch-degrading granules by aromatic pollutants[J]. Water Science and Technology, 1997, **35**(8): 247-253.
- [22] 王文斌, 祁佩时, 董有. 悬浮载体生物膜上苯酚的硝化抑制研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, **39**(8): 1253-1256.
- Wang W B, Qi P S, Dong Y. Study of phenol inhibition to the nitrification process on the suspended carrier biofilm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, **39**(8): 1253-1256.
- [23] 南亚萍, 周国标, 袁林江. 多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1529-1535.
- Nan Y P, Zhou G J, Yuan L J. Function of polyphosphate kinase gene in biological phosphate removal during the wastewater treatment process[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1529-1535.
- [24] Groeneweg J, Sellner B, Tappe W. Ammonia oxidation in nitrosomonas at NH_3 concentrations near k_m : effects of pH and temperature[J]. Water Research, 1994, **28**(12): 2561-2566.
- [25] Denyer S P, Stewart G S A B. Mechanisms of action of disinfectants [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 1998, **41**(3-4): 261-268.
- [26] 杨朋兵, 李祥, 黄勇, 等. 苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(10): 3771-3777.
- Yang P B, Li X, Huang Y, *et al.* Short or long term influence of phenol on nitrogen removal efficiency of ANAMMOX sludge[J]. Environmental Science, 2015, **36**(10): 3771-3777.



CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River	SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM _{2.5} Concentration Target Constraint	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, <i>et al.</i> (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, <i>et al.</i> (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo	XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, <i>et al.</i> (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste	WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, <i>et al.</i> (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China	YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, <i>et al.</i> (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian	Ji De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period	ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province	WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents	ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, <i>et al.</i> (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006	HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing	TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, <i>et al.</i> (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project	LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, <i>et al.</i> (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake	ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, <i>et al.</i> (3614)
Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall	YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, <i>et al.</i> (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta	ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay	XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, <i>et al.</i> (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors	CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, <i>et al.</i> (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors	WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, <i>et al.</i> (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors	ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, <i>et al.</i> (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal	LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N ₂ O Emissions in Ditches Under Different Land Uses	SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, <i>et al.</i> (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments	SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, <i>et al.</i> (3696)
Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants	GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, <i>et al.</i> (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ Composite Photoanode	LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(II)	YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, <i>et al.</i> (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar	ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater	CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, <i>et al.</i> (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control	GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, <i>et al.</i> (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal	YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, <i>et al.</i> (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance	CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, <i>et al.</i> (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process	XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, <i>et al.</i> (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process	WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, <i>et al.</i> (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions	KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3789)
Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge	WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, <i>et al.</i> (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge	LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, <i>et al.</i> (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain	LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i> (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil	CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, <i>et al.</i> (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure	SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing	LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, <i>et al.</i> (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil	YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique	LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains	ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria	WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, <i>et al.</i> (3885)
Effects of Gypsum on CH ₄ Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil	HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles	DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta	SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, <i>et al.</i> (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River	KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, <i>et al.</i> (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate	TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance	ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, <i>et al.</i> (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO ₂ Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China	LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, <i>et al.</i> (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water	YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (3954)