

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

**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

|                                                        |                                                       |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 .....                              | 黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)                                    |
| 基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率 .....                    | 李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)                          |
| 上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析 .....                               | 杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)                            |
| 广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 .....                        | 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)                   |
| 重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布 .....                    | 李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)              |
| 济南市夏、冬季 PM <sub>2.5</sub> 中化学组分的季节变化特征及来源解析 .....      | 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)      |
| 聊城冬季一重污染过程 PM <sub>2.5</sub> 污染特征及成因分析 .....           | 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)   |
| 夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量 .....                       | 王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)                          |
| 晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析 .....                       | 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)                |
| 北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 .....                             | 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)                              |
| 合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析 .....                              | 孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060) |
| 填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质 .....                        | 李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)                |
| 北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征 .....                                | 李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)                |
| 基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析 .....                         | 高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)              |
| 透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 .....                      | 官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)               |
| 黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 .....                   | 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)                              |
| 黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性 .....                     | 席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)          |
| 伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比 .....                             | 李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)                     |
| 马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素 .....                              | 王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)                             |
| 柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析 .....                             | 徐进, 何江涛, 彭毅, 曾颖 (4142)                                |
| 地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性 .....                    | 张雯, 尹琳, 周念清 (4150)                                    |
| 三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 .....                         | 张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)               |
| 蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算 .....                     | 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)      |
| 锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响 .....                         | 何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)      |
| 洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响 .....                           | 李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)          |
| 我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应 .....                            | 聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)                     |
| 东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响 .....                           | 储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)                  |
| 处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程 .....                              | 汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)                      |
| 华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征 .....                          | 胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)           |
| 制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征 .....                        | 花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)                                    |
| 人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较 .....                            | 赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)                         |
| 城市污水管网中不同生化作用的基质流向 .....                               | 姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)                         |
| 微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性 .....                              | 王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)                         |
| UV 强化草酸络合 Fe <sup>3+</sup> 活化过硫酸盐氧化降解苯胺 .....          | 韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)                              |
| 焦化废水 A/O <sup>2</sup> 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析 ..... | 吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)         |
| 长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 .....                      | 俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)              |
| NaCl 盐度对 A <sup>2</sup> /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响 .....   | 张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)                |
| 温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响 .....                         | 陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)                       |
| 游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验 .....                   | 孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)                     |
| HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响 .....                           | 安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)                    |
| 长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 .....                                 | 李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)                     |
| 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 .....                           | 宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)                 |
| 紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 .....                            | 罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)                                 |
| 秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响 .....                    | 李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)                  |
| 低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力 .....                  | 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)                          |
| 臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 .....                          | 周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)                          |
| 再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响 .....                      | 韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)                      |
| 黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险 .....                           | 李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)                |
| 村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析 .....                                | 靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)            |
| 《环境科学》征订启事 (3986) .....                                | 《环境科学》征订简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)               |

# 长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响

俞小军<sup>1</sup>, 李杰<sup>1</sup>, 周猛<sup>1</sup>, 宋璐<sup>1</sup>, 李维维<sup>2</sup>, 王亚娥<sup>1</sup>, 马娟<sup>1,3\*</sup>, 吕慧<sup>4</sup>

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省轻工研究院, 兰州 730070; 3. 甘肃省污水处理行业技术中心, 兰州 730070; 4. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510006)

**摘要:** 实验采用交替厌氧/好氧 (An/O) 运行模式的 SBR 反应器, 考察 310 d 内分 3 个批次提取侧流比为 0、1/4、1/3、1/2 的厌氧放磷上清液后 EBPR 系统的脱氮除磷效果及相应的磷回收性能。结果表明, 整个实验阶段系统对 COD 和氨氮的去除较为稳定, 出水均能满足《城镇污水处理厂污染物综合排放标准》一级 A 标准, 总氮去除因厌氧阶段反硝化不断增强有所提升, 达标率由 88.2% 显著上升至 98.6%。然而, 随着厌氧上清液提取次数的增多, 系统释磷能力整体下降, 但前两个批次中系统除磷均稳定高效, 去除率在 90% 以上, 相应地出水磷达标率大于 75%, 仅第 3 批次实验中侧流比为 1/2 时系统除磷率出现大幅波动, 最低降为 54.2%, 并贡献该批次出水磷不达标率的 60%, 说明长期提取 1/2 侧流比不利于主流工艺出水稳定维持。研究还发现, 长期进行侧流磷回收实验有利于污泥减量, 且对污泥沉降性能影响不大。因此, 在 EBPR 系统内长期提取适当侧流比的厌氧上清液以进行磷回收与主流工艺同步高效脱氮除磷具有可行性。

**关键词:** 强化生物除磷 (EBPR); 厌氧上清液; 侧流比; 磷回收; 长期

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4274-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201802039

## Effects of Long-term Side Stream Extracton on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System

YU Xiao-jun<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1</sup>, ZHOU Meng<sup>1</sup>, SONG Lu<sup>1</sup>, LI Wei-wei<sup>2</sup>, WANG Ya-e<sup>1</sup>, MA Juan<sup>1,3\*</sup>, LÜ Hui<sup>4</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Light Industry Research Institute, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Wastewater Treatment Industry Technology Center, Lanzhou 730070, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** A sequencing batch reactor (SBR) with alternating anaerobic/oxic (An/O) operation was employed to investigate nitrogen and phosphorus removal performance and corresponding phosphate recovery effect of an enhanced biological phosphorus removal (EBPR) system when extracting side stream ratios of 0, 1/4, 1/3, 1/2 anaerobic phosphorus supernatant. The operation involved three runs within 310 days. Removal efficiencies of COD and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  were found to be relatively stable over the entire experimental period and effluent could meet standard A of the national discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plants. Total nitrogen removal improved due to enhancement of denitrification capability during the anaerobic phase, and the standard-reaching rate increased from 88.2% to 98.6%. Although phosphate releasing capability gradually decreased, phosphorus removal performances of the former two runs were stable and efficient. The removal rate was >90% and the corresponding standard-reaching rate was >75%. Nevertheless, phosphorus removal performance began to fluctuate with a side stream ratio of 1/2 during the third run. The lowest phosphorus removal rate was 54.2%, contributing to a 60% non-standard-reaching rate in this run. This suggests that long-term extraction of 1/2 side stream supernatant is not favorable for maintaining stable effluent of the main process. It was also found that long-term phosphate recovery through side stream extraction allowed reduction of sludge mass and had little impact on sludge settling performance. As a result, it is feasible to extract an appropriate side stream ratio of anaerobic supernatant to recover phosphate, combined with efficient removal of both nitrogen and phosphorus in the main process.

**Key words:** enhanced biological phosphorus removal (EBPR); anaerobic supernatant; side stream ratio; phosphate recovery; long-term

磷是组成生命物质不可缺少的元素之一<sup>[1]</sup>, 且现代人日常生活使用的洗涤剂、食品添加剂、半导体材料和化肥等必需品中都有磷元素的介入和组成。由于人们需求的不断提高, 促使磷矿石数量下降; 此外, 由于目前开采技术与有毒重金属影响等因素, 国内外对磷矿石开采难度逐渐加大<sup>[2]</sup>。而在磷的自然循环中, 磷矿资源又是由陆地向海洋的单

向迁移, 以目前的开采速度计算且不加回收, 100 a 后地球上的磷矿产将消耗殆尽<sup>[3]</sup>。

另一方面, 由磷元素引发的水体富营养化问题

收稿日期: 2018-02-05; 修订日期: 2018-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51168027, 51468030); 深圳市科技计划项目 (JSGG20170824101458515)

作者简介: 俞小军 (1978 ~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: jorkyu@163.com

\* 通信作者, E-mail: meggyma@163.com

已成为制约我国社会经济发展的重要因素之一，为此，我国针对磷的排放逐步制定出了更为严格的标准。然而，在实际的城市污水处理厂，污水生物除磷普遍面临有机物不足的问题<sup>[4-6]</sup>，导致 EBPR (enhanced biological phosphorus removal) 系统容易失效，且难以保证出水水质达标。此外，在自然环境中磷的污染规律是由地表流向水体，造成一定水域污染后又通过径流灌溉进入农业面积，从而污染了大片土地。在此情况下，寻找合适的磷回收点与回收方法尤为必要。侧流磷回收技术是将 EBPR 系统厌氧末期上清液按一定比例提取以剥夺系统中磷等污染物，使其发生化学反应并生成可溶性磷酸盐结晶体，最终以纯化学污泥形式沉淀后排除系统<sup>[7-9]</sup>。在此过程中，既实现了点源污染磷的相对高效回收，且系统 COD/P 比值有所上升，又可在一定程度上缓解实际工程中污水生物除磷普遍面临的进水碳源 (COD) 不足问题<sup>[10-12]</sup>。因此，侧流磷回收技术与 EBPR 系统耦合以实现系统内磷的高效去除及磷资源的回收再利用具有一定的理论研究价值和工程指导意义。

大量研究表明，间歇性或持续 2~5 个污泥龄内提取厌氧末期释磷上清液，系统具有磷回收量大、纯度高等优点，可同时达到磷的高效回收与主流工艺磷的稳定去除<sup>[13-16]</sup>。然而，关于长期侧流提取 EBPR 反应器厌氧上清液进行磷回收对系统主流工艺影响的研究却鲜有报道。基于上述情况，本研究通过不断提取 EBPR 系统内不同侧流比 (0、1/4、1/3、1/2) 厌氧上清液，分析实施侧流磷回收后主流系统的各项出水指标及其相应的磷回收率，探究长期侧流提取条件下磷回收耦合 EBPR 系统高效除磷的可行性，并确定出最佳侧流比，以期为实际工程进行长期侧流磷回收并实现环境与经济双赢提供理论依据与数据支持。

表 1 反应器运行工况

Table 1 Experimental parameters of the reactor

| 第一批次             |     |        | 第二批次             |     |         | 第三批次             |     |         |
|------------------|-----|--------|------------------|-----|---------|------------------|-----|---------|
| 编号               | 侧流比 | 运行时间/d | 编号               | 侧流比 | 运行时间/d  | 编号               | 侧流比 | 运行时间/d  |
| I <sub>1</sub>   | 0   | 1~22   | I <sub>2</sub>   | 0   | 112~141 | I <sub>3</sub>   | 0   | 208~232 |
| II <sub>1</sub>  | 1/4 | 23~65  | II <sub>2</sub>  | 1/4 | 142~166 | II <sub>3</sub>  | 1/4 | 233~258 |
| III <sub>1</sub> | 1/3 | 66~91  | III <sub>2</sub> | 1/3 | 167~191 | III <sub>3</sub> | 1/3 | 259~283 |
| IV <sub>1</sub>  | 1/2 | 92~111 | IV <sub>2</sub>  | 1/2 | 192~207 | IV <sub>3</sub>  | 1/2 | 284~310 |

1.2 实验水质及接种污泥

本实验所用模拟废水由碳源液、磷液、氮液、浓缩液及微量元素配制而成，pH 平均值为 6.76。原水碳、磷、氮分别由无水乙酸钠 (COD = 400

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行

本实验所用 SBR 反应器由有机玻璃制成，总有效容积为 5.4 L。在反应器壁的垂直方向设置一排间距 10 cm 的取样口，用于取样和排水，底部设有排泥口；以黏砂块作为微孔曝气器，采用鼓风机曝气，气量由转子流量计调节。本实验装置如图 1 所示。

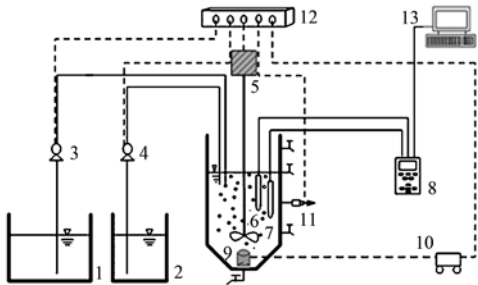


图 1 EBPR 生物除磷及磷回收装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of EBPR biological phosphorus removal and recovery reactor

反应器日常运行由控制系统自动控制，每天共进行 3 个周期，每周期 8 h，包括 2 h 厌氧 (厌氧末期 15 min 静置沉淀后，富磷上清液经蠕动泵按比例精准抽出 0、1/4、1/3、1/2 侧流比)，5 h 好氧及 1 h 沉淀、排水、闲置，反应器排水比 1/3，污泥龄 10 d，实验温度始终保持在 16℃ 左右。厌氧末期聚磷菌充分释磷，磷浓度为原水的数倍，此时提取上清液并引入旁路进行化学磷回收较为有利，这与 Kuba 等<sup>[17]</sup>的观点一致。由于配水中的钙、镁离子浓度较高，向上清液投加 NaOH 并调节 pH 值 (>9.0) 后沉淀反应 40 min 即可实现磷回收<sup>[18]</sup>。反应器运行工况见表 1。

mg·L<sup>-1</sup>)、磷酸二氢钾 (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P = 8 mg·L<sup>-1</sup>)、氯化铵 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N = 40 mg·L<sup>-1</sup>) 组成，浓缩液 (1 L) 由 45 g MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O、80 g MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O、21 g CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O、10 g 酵母浸膏、61 g 蛋白胨组成，微量元素组成参

照文献[19]. 为满足微生物生长需要, 1 L 模拟废水加入 1 mL 浓缩液及 1 mL 微量元素液.

实验所用污泥接种自兰州市安宁七里河污水处理厂 4 号曝气池, 该污水厂采用  $A^2/O$  工艺, 污泥具有一定脱氮除磷性能, 污泥各项指标性能良好.

### 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  $PO_4^{3-}-P$  采用钼锑抗分光光度法测定,  $NH_4^+-N$  采用纳氏试剂分光光度法, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, COD 采用 COD 快速测定仪测定, MLSS (混合液悬浮固体浓度) 采用滤纸重量法测定. 温度、溶解氧和 pH 值由德国 Multi 3420 在线测定仪在线监测.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同侧流比条件下 EBPR 系统污染物去除性能

图 2 为各工况不同侧流比条件下系统的污染物去除性能. 从中可知, 反应器在整个实验阶段 COD

均能得以稳定去除, COD 的去除率均高于 90%. 第一、二、三批次出水 COD 浓度略有降低, 平均值分别为 27.2、24.2 和 23.2  $mg \cdot L^{-1}$ , 说明提取厌氧上清液进行磷回收对 COD 的去除几乎没有影响. 对图 2 中 3 个批次出水  $NH_4^+-N$  分析可见, 尽管实验温度一直恒定为 16℃ 左右, 出水  $NH_4^+-N$  浓度平均值分别为 0.6、2.3、2.6  $mg \cdot L^{-1}$ , 工艺去除  $NH_4^+-N$  性能随着提取侧流比的次数增多略有降低, 但总的去除率均值为 93.6%, 说明侧流磷回收条件下的主流工艺仍能实现稳定的氨氮去除效果. 同时发现, 各阶段  $NH_4^+-N$  去除仅在改变侧流比初期略有降低, 之后很快便能升高到 100%, 这是因为不断提取侧流比意味着系统内更多氮源被剥夺, 而由于供氧量等条件不变, 因此不断增大侧流比  $NH_4^+-N$  的硝化不受影响, 对其去除影响也较小, 类似的研究结论也有报道<sup>[20, 21]</sup>. 从图 2 还可以发现, 3 个批次侧流比的 TN 去除效果逐渐提升, 各批次平均去除率分别为 70.1%、75.2%、78.7%, 说明侧流磷回收可与提

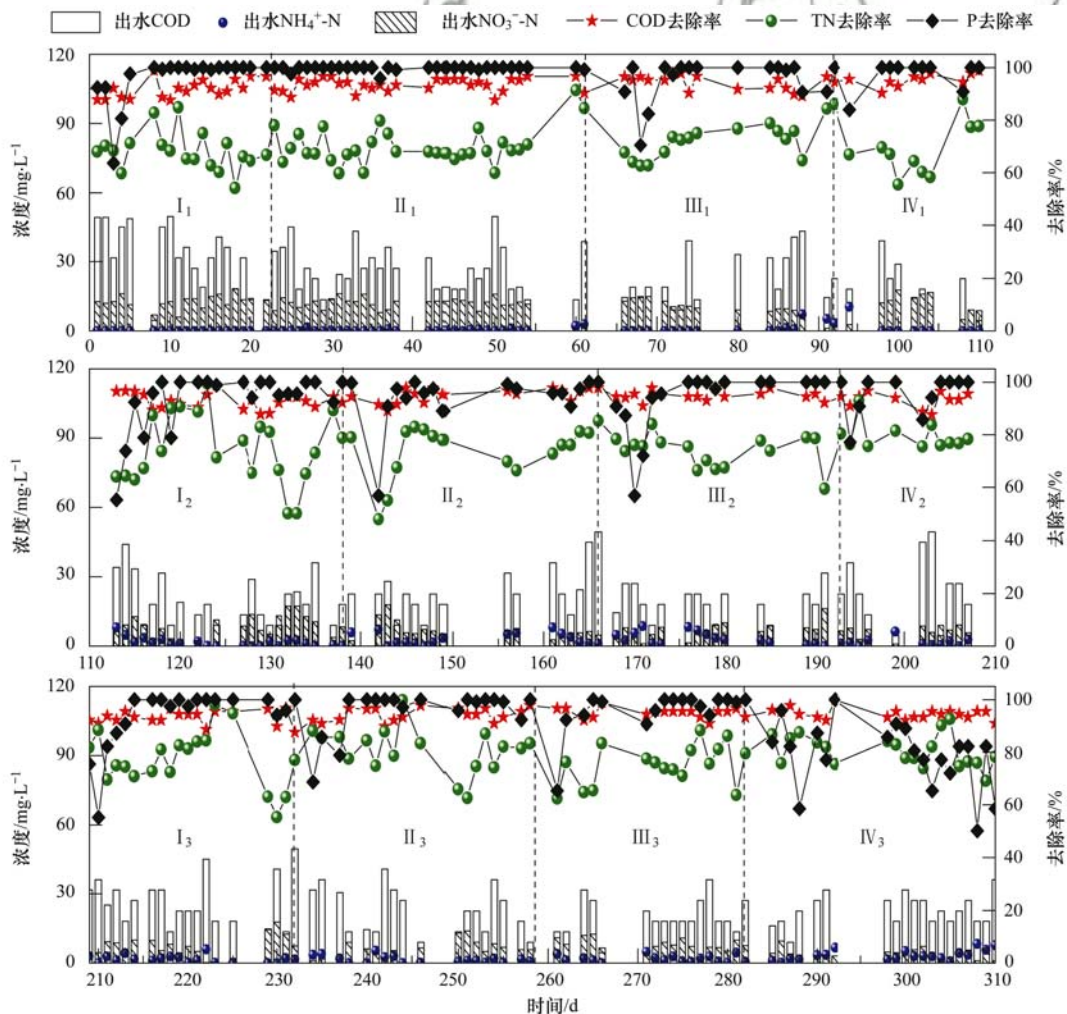
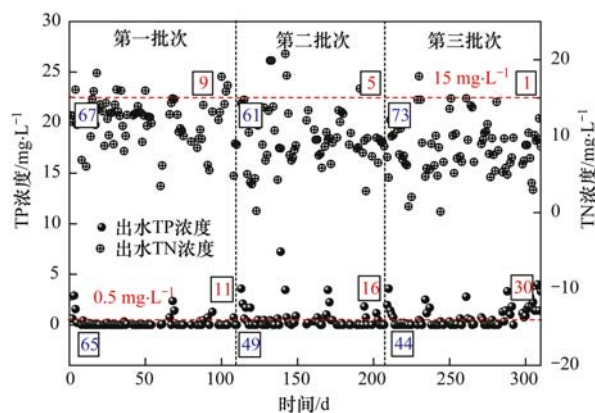


图 2 不同侧流比条件下系统的污染物去除性能

Fig. 2 Pollutant removal performance of system under different side stream ratios

高脱氮效果相结合. 相应地, 出水 $\text{NO}_3^-$ -N浓度逐渐降低, 各批次平均值分别为 11.5、7.4、6.3  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 分析可知, 出水 $\text{NO}_3^-$ -N由厌氧段反硝化残留量与好氧段硝化反应产生量两部分组成, 而在整个实验阶段 $\text{NH}_4^+$ -N去除稳定高效, 即好氧段硝化反应彻底, 保持进水 $\text{NH}_4^+$ -N浓度为 40  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 不变, 提取相同侧流比即相同浓度的 $\text{NH}_4^+$ -N时, 3 个批次同一侧流比系统中的硝态氮浓度理论上应保持一致, 而出水硝态氮浓度减小即意味着长期不断提取侧流进行磷回收, 厌氧阶段反硝化性能不断增强. 对图 2 中系统除磷率分析则发现, 实验各阶段除磷率仅在改变侧流比初期有较大幅度的波动, 之后系统便逐渐恢复除磷性能, 而其中最为显著的是 $\text{IV}_3$ 阶段除磷率不断降低, 最低降至 54.2%且在实验期内没有恢复.

结合图 3 对系统出水总磷及总氮的达标分析, 实验阶段 3 个批次出水总氮满足《城镇污水处理厂污染物综合排放标准》一级 A 标准的达标率分别为 88.2%、92.4%、98.6%, 呈逐步递增趋势, 相应地出水磷达标率分别为 85.5%、75.8%、59.5%, 这与图 2 中系统对总氮和磷的去除率一致, 而其中 $\text{IV}_3$ (第三批次 1/2 侧流比)阶段对该批次不达标率的贡献占 60%, 这与低溶解氧 EBPR 系统侧流磷回收研究结果一致<sup>[16]</sup>, 说明 1/2 侧流比条件下过量提取厌氧上清液并剥夺营养物质造成聚磷菌内生物动态平衡被破坏, 从而导致系统主流工艺除磷性能下降(如不统计 $\text{IV}_3$ 阶段, 总磷达标率可达 78.6%). 另一方面, 相比此前研究中 65 d 系统便逐渐丧失除磷效果<sup>[22]</sup>, 本研究在为期 310 d 的实验过程中, 系统除磷性能并未呈现不可逆转的恶化,



图中方框内蓝色和红色数字分别代表出水达标及未达标个数

图 3 不同侧流比条件下出水 TP 及 TN 分析

Fig. 3 Statistics of total phosphate and total nitrogen of effluent under different side stream ratios

即使在前两个批次 1/2 侧流比实验条件下除磷性能依然能够恢复, 因而, 提取厌氧上清液进行侧流磷回收是否更有助于 EBPR 系统的稳定维持还有待于进一步研究.

## 2.2 不同侧流比条件下 EBPR 系统的释、吸磷性能

图 4 为各工况不同侧流比条件下系统的释、吸磷变化.

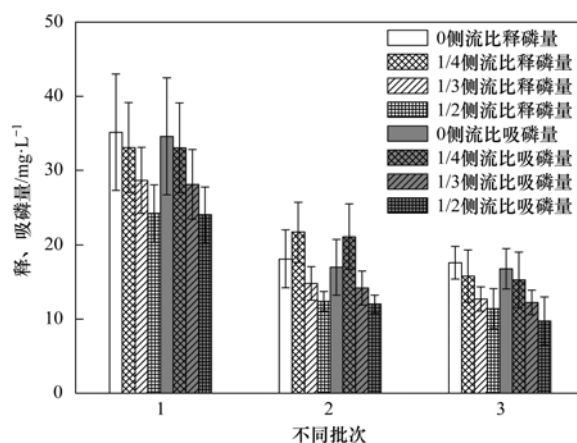


图 4 不同侧流比条件下系统的释、吸磷性能

Fig. 4 Phosphate release and uptake properties of the system under different side stream ratios

由图 4 可见, 除了 $\text{I}_2$ 阶段释、吸磷量较低, 系统在其余各阶段释、吸磷量均随着侧流比提高逐渐降低, 其中第一批次各侧流比条件下释磷量平均值分别为 34.6、33.3、28.6、24.2  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 第二批次释、吸磷量先增大后减小, 分析认为第一批次 1/2 侧流比之后 $\text{I}_2$ 阶段 EBPR 主流工艺突然遭遇较大的冲击负荷, 系统内聚磷菌不能立刻恢复其原有的厌氧释磷与好氧吸磷生物性能, 而延长该阶段运行时间释、吸磷性能逐步好转, 说明经侧流比磷回收影响的系统主流工艺除磷性能具有可恢复性, 图 2 中 $\text{I}_2$ 和 $\text{I}_3$ 后期稳定的除磷性能可进一步佐证这一现象. 此外, 反应器 $\text{IV}_1$ 、 $\text{IV}_2$ 、 $\text{IV}_3$ 阶段(1/2 侧流比)平均释磷量逐渐降低, 分别为 24.2、12.4、11.4  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 尤其是 $\text{IV}_3$ 阶段释磷量波动最大, 最低降至 5.8  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 说明随着提取 1/2 侧流比次数增多聚磷菌释磷性能逐渐下降甚至失效, 系统逐渐失去利用富磷上清液进行化学磷回收的优势.

图 5 给出了不同侧流比条件下的比吸磷速率及厌氧段 COD 消耗量与释磷量之比.

从图 5 中可知, 系统在第一批次侧流比实验中, 比吸磷速率随着侧流比的增大而减小且各批次系统比吸磷速率呈整体下降趋势, 说明聚磷菌在人为干预提取部分厌氧释磷量之后, 其自身在好氧阶

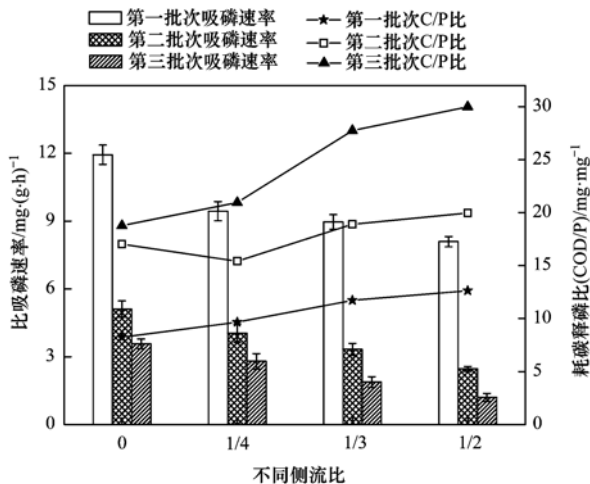


图 5 不同侧流比条件下比吸磷速率

Fig. 5 Specific phosphate uptake rate under different side stream ratios

段生理代谢需求的大量  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  长期不足影响其重新合成新的聚磷菌颗粒, 进而导致吸磷能力不断减弱. 而第二、三批次中所有阶段比吸磷速率均远远低于第一批次工况, 结合马娟等<sup>[16]</sup>的研究认为 1/2 侧流比破坏系统除磷性能和适当的侧流比可提高除磷效果<sup>[18, 20]</sup>, 推测如不进行 1/2 侧流比实验, 周期性提取侧流比具有一定可行性, 但具体结论仍需进一步探究分析. 此外, 实验还发现各批次增大侧流比厌氧末期系统内 COD 浓度表现为降低的规律(图 5 中未给出), 由图 5 可知, 各批次厌氧段 COD 消耗/释 P 整体比呈递增趋势且随着侧流比增大提

高, 根据释磷化学计量学并结合图 4 分析, 各批次释磷量不断下降, 厌氧段 COD 消耗量应该减小, 而结果恰恰相反进一步说明厌氧段系统的反硝化能力逐步增强, 进而解释了各批次系统对总氮去除效果增强的原因.

2.3 不同侧流比条件下 EBPR 系统生物除磷与磷回收的相互作用

图 6 为不同侧流比条件下主流工艺生物除磷与系统磷回收性能.

由图 6 可知, 在 3 个批次周期性侧流比之后, 系统聚磷菌总释磷量呈下降趋势, 由第一批次的  $30.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  下降至第三批次的  $14.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; EBPR 系统生物吸磷量与总释磷量趋势几乎吻合, 仅第三批次系统吸磷能力略有下降. 然而, 从图 6 发现, 侧流比磷回收量却不断上升, 依次为 11.7、18.1、18.4  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 第二批次与第三批次仅相差 0.3  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 说明磷的资源再利用能力随着长期周期性提取侧流比释磷量的减小逐渐减缓. 分析认为, 为保证化学回收过程易于进行, 有必要满足镁离子与正磷酸盐一定的摩尔比,  $n(\text{Mg}):n(\text{P})$  在 1.3:1 ~ 2:1 之间比较合适<sup>[23]</sup>, 而本研究在保持进水镁离子浓度不变且总释磷量不断减小时, 镁离子与正磷酸盐摩尔比过大, 进而导致化学磷回收量无法提高. 由图 5 还可得出, EBPR 主流工艺生物除磷率呈线性减小但整个实验期间仍可达到除磷效果, 其生物除磷率分别为 95.9%、91.7%、89.2%, 其对应侧流比磷回收率呈

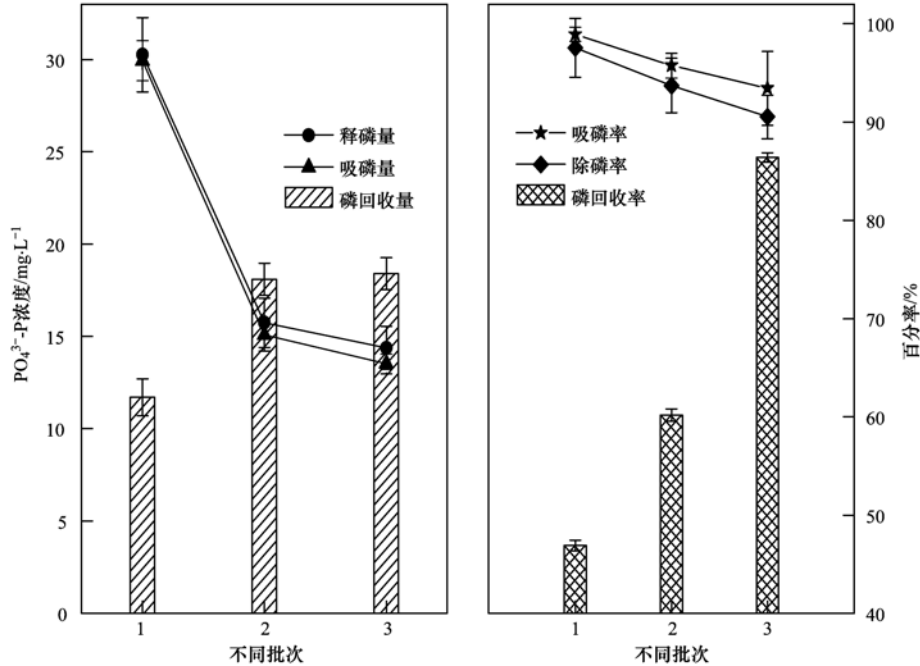


图 6 不同侧流比条件下磷回收、生物除磷性能

Fig. 6 Phosphate recovery and biological phosphate removal performance under different side stream ratios

现直线上升趋势，分析 3 个批次侧流比之后还可继续进行实验探究，为实现经济磷回收与稳定生物除磷的有效结合提供更加完整的理论依据。

### 2.4 不同侧流比条件下 EBPR 系统污泥性能

图 7 为不同侧流比条件下系统污泥沉降性能。从中可知，系统在  $I_1$ 、 $II_1$ 、 $III_1$ 、 $IV_1$  阶段时 SVI 稳定上升，SVI 平均值分别为 64.1、66.1、92.3、103.6  $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ；继续提取第二批侧流比后，SVI 基本稳定并维持在  $(102.5 \pm 5.2) \text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$  左右，分析认为，反应器系统内部的微生物生长逐渐被人为

提取侧流比这一外在因素驯化；进行第三批侧流比时，系统污泥 SVI 出现先减小后增大的趋势， $I_3$ 、 $II_3$ 、 $III_3$ 、 $IV_3$  阶段时 SVI 平均值分别为 80.2、50.8、54.8、90.8  $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 。污泥是否有良好的沉降性能，对反应器能够稳定高效运行至关重要，实际污水处理厂也因为出现污泥膨胀而无法正常运行<sup>[24, 25]</sup>，正常情况下城市污水厂中 SVI 值在 50 ~ 150  $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$  之间，本研究中污泥沉降性能一直稳定，污泥性能较好。同时发现，MLSS 与 MLVSS 均不断下降，说明长期提取侧流比有利于污泥减量。

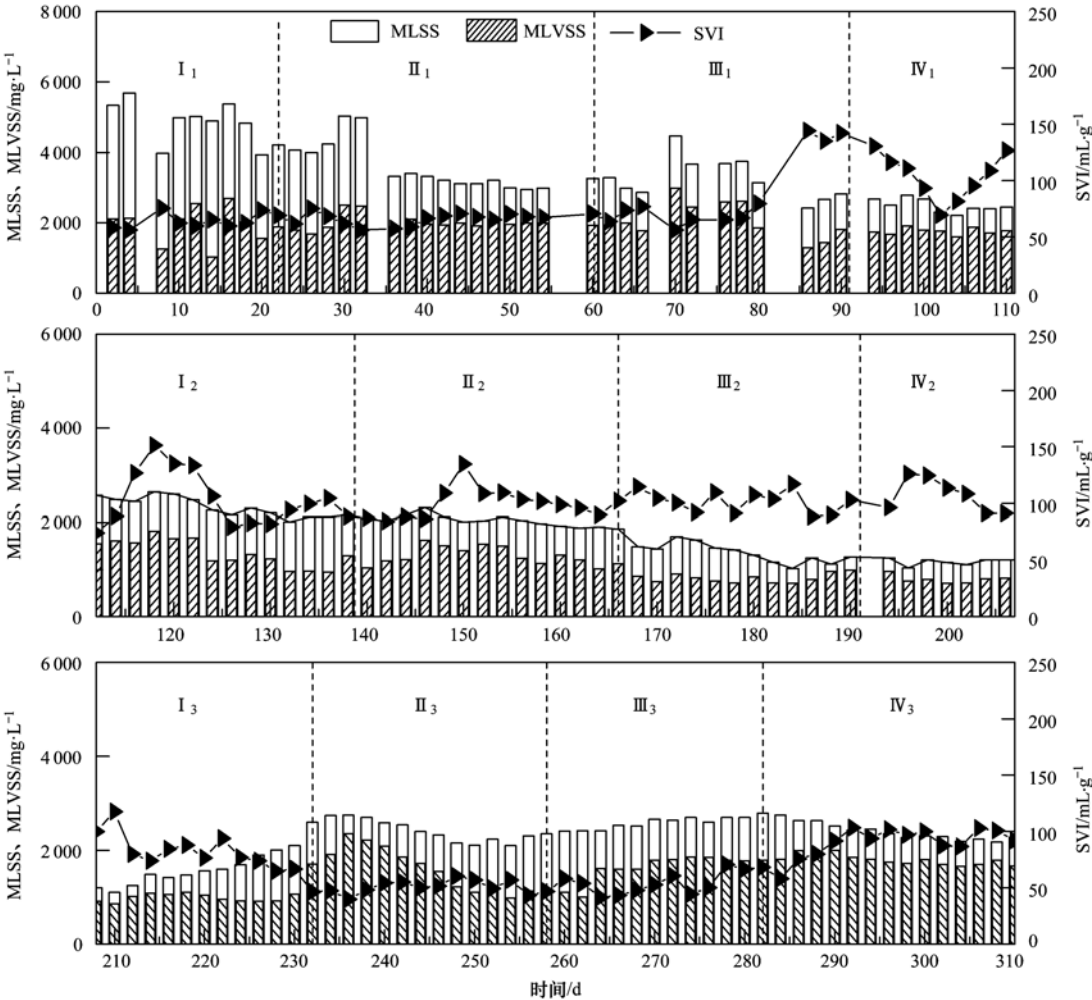


图 7 不同侧流比条件下系统污泥沉降性能

Fig. 7 Sludge sedimentation performance under different side stream ratios

### 3 结论

(1) 在传统 EBPR 系统中重复提取侧流比，对系统 COD 和氨氮的去除影响甚微。总氮去除效率则因系统厌氧段反硝化能力增强而逐步提升。

(2) 随着提取侧流比频次增多，聚磷菌释、吸磷性能逐渐下降，释磷过程碳源利用率降低，且长期提取 1/2 侧流比系统失去稳定高效除磷优势。

(3) 长期提取厌氧上清液进行磷回收有利于污泥减量，且对污泥沉降性能影响不大。

#### 参考文献：

[1] Lanham A B, Oehmen A, Saunders A M, et al. Metabolic versatility in full-scale wastewater treatment plants performing enhanced biological phosphorus removal[J]. Water Research, 2013, 47(19): 7032-7041.

[2] Van Vuuren D P, Bouwman A F, Beusen A H W. Phosphorus demand for the 1970-2100 period: a scenario analysis of resource

- depletion[J]. *Global Environmental Change*, 2010, **20**(3): 428-439.
- [3] Isherwood K F. Mineral fertilizer use and the environment[A]. In: *International Fertilizer Industry Association United Nations Environment Programme*[C]. Paris: IFA, UNEP, 2000: 106.
- [4] Wu C Y, Chen Z Q, Liu X H, *et al.* Nitrification-denitrification via nitrite in SBR using real-time control strategy when treating domestic wastewater[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2007, **36**(2): 87-92.
- [5] 王亚宜, 彭永臻, 殷芳芳, 等. 双污泥 SBR 工艺反硝化除磷脱氮特性及影响因素[J]. *环境科学*, 2008, **29**(6): 1526-1532. Wang Y Y, Peng Y Z, Yin F F, *et al.* Characteristics and affecting factors of denitrifying phosphorus removal in two-sludge sequencing batch reactor[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(6): 1526-1532.
- [6] 杨伟强, 王冬波, 李小明, 等. 低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1492-1498. Yang W Q, Wang D B, Li X M, *et al.* Optimization study on the nitrogen and phosphorus removal of modified two-sludge system under the condition of low carbon source[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1492-1498.
- [7] 鄢正华. 我国磷矿资源开发利用综述[J]. *矿冶*, 2011, **20**(3): 21-25. Yan Z H. Review of development and utilization of phosphate resources in China[J]. *Mining & Metallurgy*, 2011, **20**(3): 21-25.
- [8] Cordell D, Rosemarin A, Schröder J J, *et al.* Towards global phosphorus security: a systems framework for phosphorus recovery and reuse options[J]. *Chemosphere*, 2011, **84**(6): 747-758.
- [9] 王文瀚, 王林, 李咏梅. 富磷污泥厌氧消化磷释放与回收的研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2014, **36**(4): 75-79. Wang W H, Wang L, Li Y M. Phosphorus release and recycling during the anaerobic digestion of phosphorus-rich waste activated sludge-a review[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2014, **36**(4): 75-79.
- [10] Yoshino M, Yao M, Tsuno H, *et al.* Removal and recovery of phosphate and ammonium as struvite from supernatant in anaerobic digestion[J]. *Water Science and Technology*, 2003, **48**(1): 171-178.
- [11] 郝晓地, 戴吉, Van Loosdrecht M C M. 采用数学模拟评价生物营养物去除工艺的除磷效果[J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(5): 30-34. Hao X D, Dai J, Van Loosdrecht M C M. Model-based evaluation of phosphorus removal efficiency with BNR processes[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, **22**(5): 30-34.
- [12] Ueno Y, Fujii M. Three years experience of operating and selling recovered struvite from full-scale plant[J]. *Environmental Technology*, 2002, **22**(11): 1373-1381.
- [13] Mulkerrins D, Dobson A D W, Collieran E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters[J]. *Environment International*, 2004, **30**(2): 249-259.
- [14] 张顺, 田晴, 汤曼琳, 等. 磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 979-986. Zhang S, Tian Q, Tang M L, *et al.* Effect of phosphorus recovery on phosphorous bioaccumulation/harvesting in an alternating anaerobic/aerobic biofilter system[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 979-986.
- [15] Mayer B K, Baker L A, Boyer T H, *et al.* Total value of phosphorus recovery[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(13): 6606-6620.
- [16] 马娟, 宋璐, 俞小军, 等. 侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1130-1136. Ma J, Song L, Yu X J, *et al.* Effects of side-stream phosphorus recovery on the performance of EBPR system under low dissolved oxygen condition[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1130-1136.
- [17] Kuba T, Smolders G, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor[J]. *Water Science and Technology*, 1993, **27**(5-6): 241-252.
- [18] 郝晓地, 戴吉, 周军, 等. 磷回收提高生物除磷效果的验证[J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(17): 22-25. Hao X D, Dai J, Zhou J, *et al.* Experimental verification on enhancing bio-P removal by phosphorus recovery from anaerobic supernatant[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, **22**(17): 22-25.
- [19] 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.
- [20] 郝晓地, 戴吉, 胡沅胜, 等. C/P 比与磷回收对生物营养物去除系统影响的试验研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3098-3103. Hao X D, Dai J, Hu Y S, *et al.* Experimental study on the effect of COD/P ratios and phosphate recovery on a BNR system[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(11): 3098-3103.
- [21] 胡猛, 曹军, 张艳, 等. 化学除磷辅助 A<sup>2</sup>/O 工艺处理城市污水脱氮除磷研究[J]. *水污染防治*, 2014, **32**(3): 29-33. Hu M, Cao J, Zhang Y, *et al.* Study on denitrification and dephosphorization of municipal wastewater by chemical precipitation assisted A<sup>2</sup>/O process[J]. *Water Pollution Control*, 2014, **32**(3): 29-33.
- [22] 马娟, 宋璐, 俞小军, 等. 超低溶解氧条件下的 EBPR 系统除磷性能[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3128-3134. Ma J, Song L, Yu X J, *et al.* Phosphorus removal performance in EBPR system under extra-low dissolved oxygen condition[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3128-3134.
- [23] 梅翔, 陈林, 王照, 等. 城市污泥中磷的释放与回收[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(1): 80-84. Mei X, Chen L, Wang Z, *et al.* Release and recovery of phosphorus in municipal sludge[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(1): 80-84.
- [24] 左金龙, 王淑莹, 彭永臻, 等. 低溶解氧污泥微膨胀污染物去除性能的研究[J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(8): 1345-1349. Zuo J L, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* Study on pollutant removal performance with low DO and sludge micro-bulking[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, **3**(8): 1345-1349.
- [25] 王中玮, 彭永臻, 王淑莹, 等. 不同运行方式下低溶解氧污泥微膨胀的可行性研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2347-2352. Wang Z W, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Feasibility study for limited filamentous bulking under low dissolved oxygen at different operation regimes[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(8): 2347-2352.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                             |                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China .....                                                                    | HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)                                  |
| Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province .....                                                                                  | LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)                    |
| Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai .....                                                                          | YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)                     |
| Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province .....                                                          | SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)            |
| Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing .....                                      | LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)             |
| Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Summer and Winter in Ji'nan City .....                                  | LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)        |
| PM <sub>2.5</sub> Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City .....                                                     | ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)            |
| Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer .....                                                     | WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)                    |
| Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng .....                                                                  | YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)                 |
| Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing .....                                                                    | XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)             |
| Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City .....                                                                                                     | MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)             |
| Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face .....                                                                     | LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)                     |
| Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing .....                                                                                 | LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)             |
| Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment .....                                                         | GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)                    |
| Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads .....                                                       | GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)             |
| Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River .....               | ..... ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)       |
| Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions .....                                  | XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)                     |
| Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring .....                                                               | LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)            |
| Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin .....                                                            | WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)         |
| Characteristics and Genesis of NO <sub>3</sub> Type Water in Shallow Groundwater in Lujiang Basin .....                                                                     | XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)                   |
| Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution .....                            | ..... ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)                         |
| Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir .....       | ..... ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161) |
| Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment .....               | ..... LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)       |
| Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment .....                                             | HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)                 |
| Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin .....                                                          | LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)              |
| Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China .....                                                   | NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)               |
| Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu .....                                                                            | CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)                     |
| Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater .....                                                                                     | WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)                |
| Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China .....                                                      | HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)              |
| Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes .....                                        | HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)                                     |
| Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification .....                                                                                         | ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)                |
| Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network .....                                                                                        | YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)             |
| Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process .....                                                                             | WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)         |
| Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate .....                                                                              | HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)                |
| Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O <sup>2</sup> and A/O/H/O Processes .....                                    | WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)            |
| Effects of Long-term Side Stream Extract on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System .....                                                                | YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)                    |
| Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A <sup>2</sup> /O Process .....                                       | ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)               |
| Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process .....                                                                                                | CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)                  |
| Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB) .....                                                                                          | SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)                  |
| Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification .....                                                                                     | AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)             |
| Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage .....                                                                                     | LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)               |
| Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi .....                                                    | SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)                  |
| Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar .....                                                                                    | LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)                      |
| Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System .....                                         | LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)                    |
| Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite ..... | ..... XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)       |
| Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves .....                                                                            | ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)                    |
| Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms .....                                   | HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)                     |
| Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment .....                          | ..... LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)               |
| Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis .....                                                                          | JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)                          |