

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筲箕湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响

马娟,宋璐,俞小军,孙雷军,孙洪伟

(兰州交通大学环境与市政工程学院,兰州 730070)

摘要: 实验采用交替厌氧/好氧 (An/O) 模式运行 SBR 反应器,考察控制 $DO = 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下提取侧流比为 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其对应的磷回收性能。整个实验阶段中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率较为稳定,但系统后期 COD 出水的残余量达到 $81.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在未提取侧流比阶段中,平均除磷率为 89.4%,提取 1/4、1/3 侧流比后除磷率不断上升,分别为 98.5%、99.0%,但在 1/2 侧流比之后,除磷性能开始波动,除磷率最低为 65.4%。提取侧流比各阶段中,1/3 侧流比条件下仅实验初期第一天出水磷浓度未达到一级 A 标准,该阶段出水达标率 93.3% 远远大于 1/2 侧流比的 45.5%,但侧流磷回收率随着侧流比的增大而不断升高。实验还发现,提取 1/2 侧流比后, TN 去除率迅速下降至 50.9%。因此,提取放磷上清液强化低好氧 EBPR 系统除磷性能的最优值为 1/3 侧流比,此时低好氧 EBPR 系统与侧流磷回收结合可以大大提高经济与环境效益。

关键词: 厌氧; 侧流比; 磷回收; 低溶解氧; 曝气

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1130-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201609183

Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition

MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, SUN Lei-jun, SUN Hong-wei

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A sequencing batch reactor (SBR) was operated with alternating anaerobic/oxic (An/O) condition to investigate the nitrogen and phosphorus removal performance of EBPR with $DO = 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and the phosphorus recovery effect at extracting side stream ratio of 0, 1/4, 1/3, 1/2 anaerobic phosphorus supernatant. The removal efficiency of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ was found to be relatively stable during all experimental stages but effluent COD of the system during later period remained as high as $81.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. In the absence of side stream, the average phosphorus removal efficiency was 89.4% and increased to 98.5% and 99.0% when the side stream ratio was 1/4 and 1/3, respectively. However, the phosphorus removal performance began to fluctuate with side stream ratio of 1/2 and the lowest phosphorus removal rate was 65.4%. During each experimental stage, only one day effluent TP failed to meet the national wastewater discharge standard A with side stream ratio of 1/3 in the initial period. Besides, 93.3% of effluent TP which could meet the national standard with side stream ratio of 1/3 was far better than 45.5% of that with side stream ratio of 1/2. Nevertheless, the phosphorus recovery rate improved with the increase of side stream ratio. It was also observed that the TN removal rate dramatically decreased to 50.9% when the side stream ratio increased to 1/2. Consequently, a side stream ratio of 1/3 was found to be the optimal condition in the whole experimental stage, and EBPR system under low dissolved oxygen condition combined with phosphorus recovery through extracting side stream could greatly improve the economic and environmental benefits.

Key words: anaerobic; side stream ratio; phosphate recovery; low dissolved oxygen condition; aeration

近年来我国水体富营养化问题频繁暴发,其中氮、磷为主要因素,对此我国针对氮、磷制定出了更为严格的排放标准。然而在实际工程中,污水生物除磷普遍面临碳源 (COD) 不足问题^[1~3],导致 EBPR (enhanced biological phosphorus removal) 系统不能高效稳定运行,进而出水水质未能达标,另一方面,磷是人们日常生活中不可缺少的自然资源,但在自然界中磷是起始于陆地归于海洋的单向迁移^[4~6]。在此情况下,把磷从污水中去除转变成回收利用已经受到国际社会的广泛关注。侧流磷回收将 SBR 反应器厌氧末期上清液按一定比例提取^[7~9],剥夺 EBPR 系统中的磷等污染物,污泥系统

中相应的 COD/P 比有所上升,一定程度缓解了除磷与脱氮在碳源上的竞争^[10],并且化学反应后可溶性磷酸盐易于结晶析出,以纯化学污泥形式 (金属沉淀物) 排出系统,利于回收,且回收量大,将预防水体富营养化和磷回收两者结合一体。

溶解氧 (DO) 浓度是活性污泥法运行中的重要因素^[11,12],EBPR 系统中,生物曝气是最大的

收稿日期: 2016-09-22; 修订日期: 2016-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51168027, 51668031); 甘肃省自然科学基金项目 (145RJZA093, 1606RJZA009); 兰州交通大学研究生教改项目 (160012)

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

耗能单元,调研结果表明曝气成本占实际污水厂总运营支出的 50% ~ 80% 且大部分污水厂存在过量曝气现象^[13],此情况下不仅增加曝气成本,过曝气也容易引发系统失效^[14,15].若污水厂在低 DO 浓度条件下稳定达标运行,整个污水厂的能耗可降低 10% 左右^[16].若能将侧流磷回收与低好氧条件下的 EBPR 系统联合起来,则在预防水体富营养化和磷回收的基础上又可大大节约污水生物除磷成本.

本研究在低 DO 浓度 ($\text{DO} = 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 下的 EBPR 系统内提取不同侧流比 (0、1/4、1/3、1/2) 厌氧上清液进行磷回收,通过分析实施侧流磷回收时主流系统的各项出水指标及其相应侧流比磷回收率,探究低 DO 条件下 EBPR 系统与侧流磷回收结合的可行性,并确定最佳侧流比.

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行

实验所用 SBR 反应器由有机玻璃制成,总有效容积为 5.4 L. 在反应器壁上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;反应器好氧段的溶解氧浓度采用带有 Labview 软件编程的计算机系统加以控制. 实验装置如图 1 所示.

反应器每天共运行 3 个周期,每周期 8 h,包括 2 h 厌氧(厌氧最后 15 min 静置沉淀,由此可将富磷上清液通过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,污泥龄为 10 d,实验温度始终为

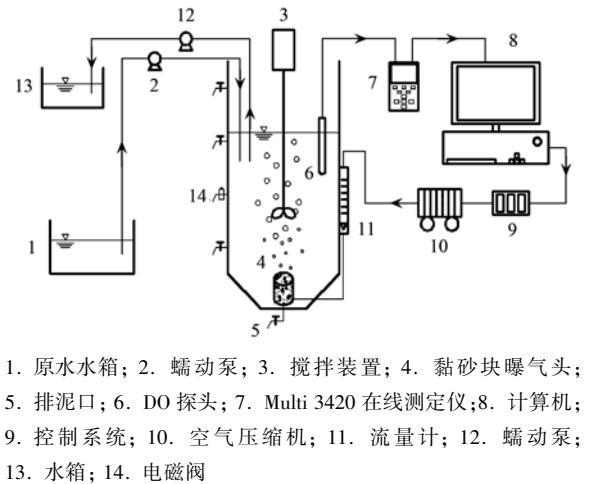


图 1 SBR 实验装置示意
Fig. 1 Schematic diagram of SBR experimental setup

16℃. 厌氧末期聚磷菌充分释磷,磷浓度为原污水磷浓度的数倍,因此在厌氧末期提取上清液并引入旁路进行化学磷回收是一个有利的回收点,这与 Kuba 等^[17]的观点一致. 引出上清液,配水中的钙、镁离子浓度较高,投加 NaOH 调节 pH (>9.0) 后沉淀反应 40 min 可实现磷回收^[18]. 反应器运行工况见表 1,其中溶解氧为理论控制值,实际 DO 浓度因控制系统的滞后性略低于控制值. 混合液悬浮固体浓度 MLSS 是系统的重要设计运行参数,MLSS 太高说明生化池中的活性污泥过剩,超出生化处理的需求而影响出水水质,MLSS 太低则说明生化池中的污泥负荷不够,出水各项指标将不达标,因此,MLSS 只有在合理范围 ($2\,500 \sim 4\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 之内,系统才能正常运行. 由表 1 可得,MLSS 随侧流比的增大不断减小,保持在 $2\,700 \sim 3\,600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,系统 MLSS 波动范围正常.

表 1 反应器运行工况¹⁾
Table 1 Operation conditions of the reactor

编号	溶解氧(DO)/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	工况	运行时间/d	MLSS/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
I	1.0	无侧流比	1 ~ 22	3 597
II	1.0	1/4 侧流比	23 ~ 65	3 441
III	1.0	1/3 侧流比	66 ~ 91	2 825
IV	1.0	1/2 侧流比	92 ~ 110	2 758

1) 表中 MLSS 为各工况下所有 MLSS 的平均值

1.2 实验水质及接种污泥

本实验采用模拟废水,由碳源液、磷液、氮液、浓缩液及微量元素配制而成,模拟废水 pH 平均值为 6.760. 无水乙酸钠为碳源 ($\text{COD} = 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),磷酸二氢钾 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、氯化铵 ($\text{NH}_4^+ - \text{N} = 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、浓缩液 (1 L) 由 45 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、

80 g $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、21 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、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七里河城市污水处理厂 4 号曝气池,该污水厂采用 A²/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 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用钼锑抗分光光度法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 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、ORP(氧化还原电位)值和 DO 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 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除性能

图 2 为不同侧流比条件下系统 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除性能。控制 $\text{DO} = 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在提取侧流比为 0、1/4、1/3、1/2 的 4 个阶段监测日常运行时反应器进、出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度及其去除率。图 2(a) 中, 反应器在 I 阶段与 II 阶段对 COD 的去除率均高于 81.9%, 出水 COD 浓度平均值为 $24.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 得以稳定去除。但在后两个阶段, COD 出水浓度与去除率有所波动, III、IV 阶段中, COD 最低去除

率均为 79.7%, 出水 COD 的残余量达到 $81.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。与文献[20]给出的侧流除磷对 COD 去除效果几乎无影响不同, 分析认为, 郝晓地等^[18]的研究表明, 在不断增大侧流比时, 生物除磷所需最低 COD/P 值会不断下降(侧流比从 0 增大至 20% 时, 所需最低 COD/P 值随之由 20 降至 15), 即侧流比不断增大时, 整个生物反应过程所需 COD 不断减小, 本实验 COD/P 值并未随相应的 COD/P 有所降低且始终为 50, 因此在 III 阶段与 IV 阶段出水有些许 COD 残留。

由图 2(b) 中可得, 各阶段下 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率仅在改变不同侧流比初期略有降低, 之后快速回升至 100% 并实现氨氮的稳定去除。反应器在整个实验阶段(110 d)对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率均值为 98.1%, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度平均值为 $0.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 工艺去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 性能高效稳定, 说明反应器中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除不受侧流比影响, 类似的研究结论也有报道^[21,22]。且此时反应器在低好氧($\text{DO} = 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的情况下, 证明侧流比磷回收与低 DO 浓度($\text{DO} = 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)条件下的 EBPR 系统结合运行对去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 影响甚微。

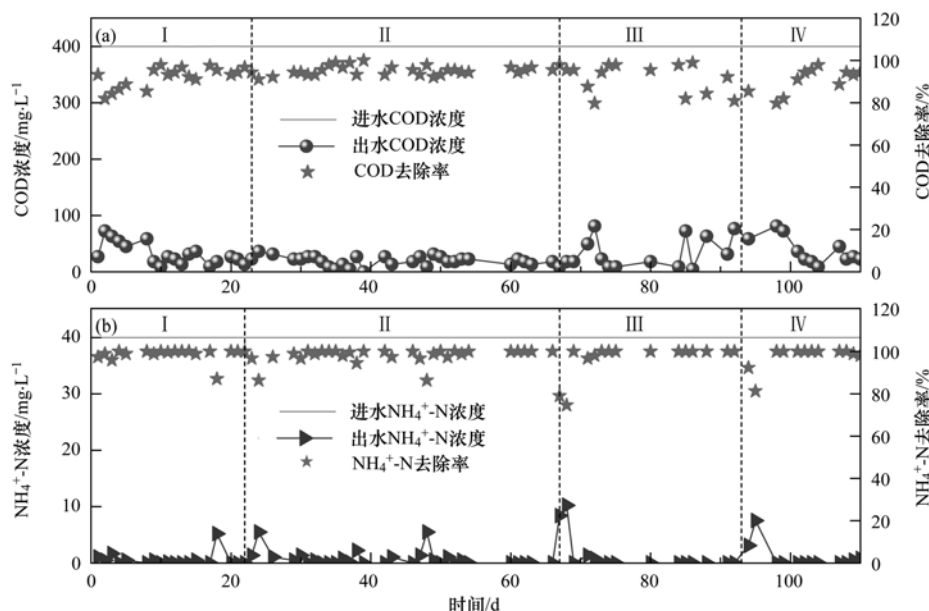


图 2 不同侧流比条件下系统 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除性能

Fig. 2 COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal performance of the system under different side stream ratios

2.2 不同侧流比条件下 EBPR 系统的除磷性能

图 3 为不同侧流比条件下系统的除磷性能。《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)规定一级 A 标准中总磷(以 P 计)排放应 $\leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由图 3 可见, 反应器 I 阶段(无侧流

比)出水磷的达标率为 52.9%, 该阶段初期系统因刚启动出水有 3 d 不稳定, 之后除磷率最低为 82.3%, 平均除磷率 89.4%; II、III 阶段(侧流比分别为 1/4、1/3)中, 平均除磷率分别为 98.5% 和 99.0%, 出水磷达标率均远远优于 I 阶段, 尤其是 III

阶段只有初期第一天未达到一级 A 标准,出水达标率为 93.3%,说明侧流比升高至 1/3,除磷效果也随之上升,出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度逐渐下降;Ⅳ阶段中除磷率不断波动,除磷率最低为 65.4%,出水磷的达标率仅为 45.5%,在 1/2 侧流比时,提取较多厌氧放磷上清液进行化学磷回收,此时聚磷菌在厌氧释磷和好氧吸磷的动态平衡被严重破坏,生物性能逐渐恶化,因此在 1/2 侧流比时抑制低好氧 EBPR 系统的除磷性能. 说明低好氧 EBPR 系统在 1/4、1/3 侧流比条件下于回收磷的同时 EBPR 系统可更加高效节能稳定运行.

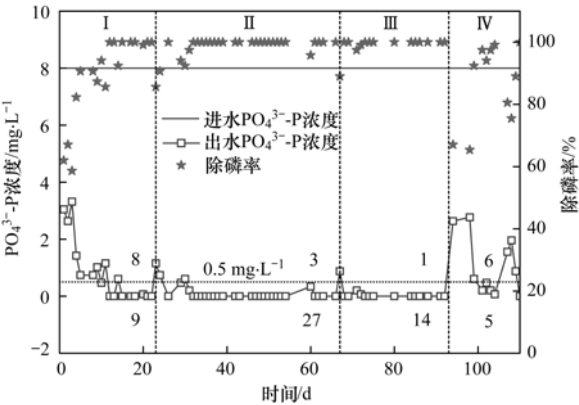


图3 不同侧流比条件下系统的除磷性能
Fig. 3 Phosphate removal performance of the system under different side stream ratios

2.3 不同侧流比条件下 EBPR 系统典型周期磷的变化规律

图 4 为不同侧流比条件下典型周期内 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、ORP 和 DO 的浓度变化规律. 从中可知,在 $\text{DO} = 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下,依次提取侧流比 0、1/4、1/3、1/2 后厌氧段释磷量呈递减趋势,对应厌氧末期磷浓度分别为 32.8 、 26.0 、 20.1 、 $18.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 分析原因为:①提取侧流比即人为剥夺生物反应过程中厌氧释磷量,随着不断的磷剥夺,聚磷菌胞内聚磷颗粒含量减少,厌氧释磷能力逐渐减弱^[20];②从图 4 中可以看出,厌氧阶段反硝化初期,氧化态的 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 被还原成 N_2 ,反应器中 ORP 不断下降,随后反应过程中氧化还原状态的变化幅度减小,ORP 下降速率变小并逐渐趋于平缓,厌氧段末期 ORP 最终分别为 -258.9 、 -233.7 、 -231.4 、 -217.8 mV . 王晓玲等^[23]研究表明,在低 ORP 情况下,相对 ORP 值越高则 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量越大,即各阶段中厌氧段后期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量依次升高. 随着厌氧段 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量升高,反硝化菌与聚磷菌在污水中竞争能力逐渐增强,聚磷菌处于劣势,导致聚磷菌释磷量减少^[24].

由图 4 还可以看出,随着侧流比不断增大,对应吸磷时间逐渐延长,系统Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ阶段的吸磷过程分别可以在 120、150、180 min 内完成,对应好氧吸磷速率变慢,但同时发现Ⅳ阶段(1/2 侧流比)吸

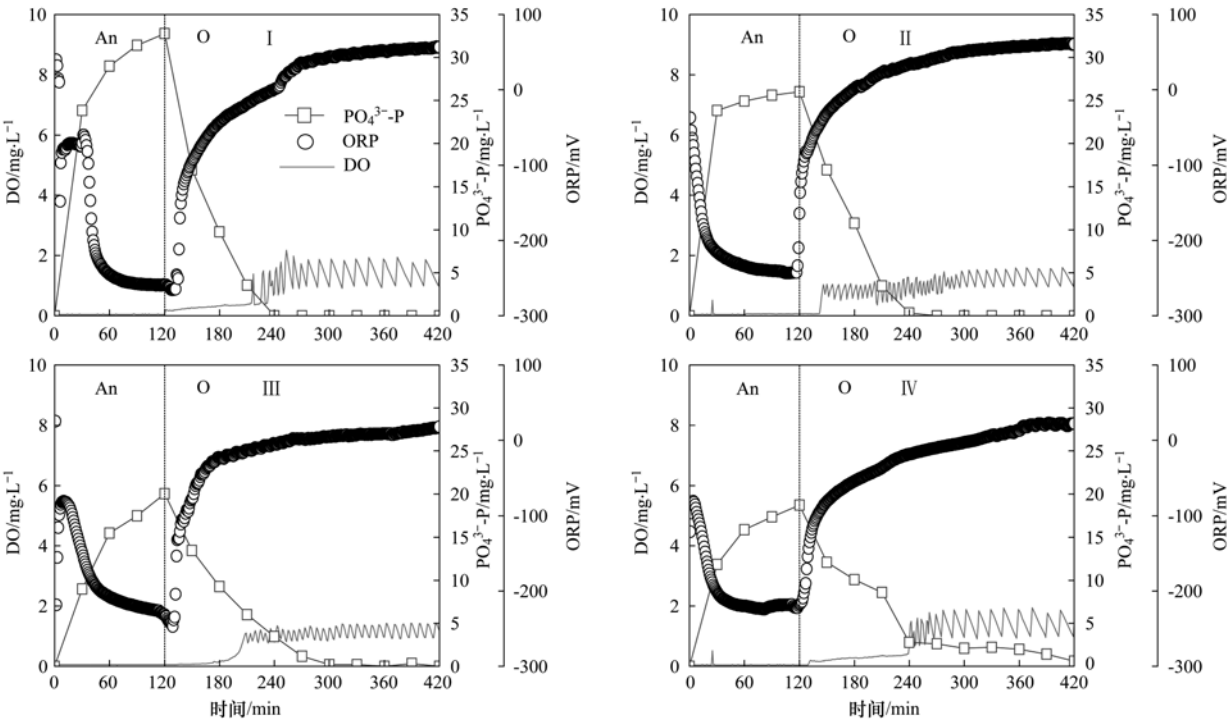


图4 不同侧流比条件下典型周期内 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、ORP 和 DO 的浓度变化规律
Fig. 4 Variation of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, ORP and DO concentration during typical cycles under different side stream ratios

磷过程并未完成, 在好氧末期系统磷浓度为 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 综合分析表明, 提取侧流比逐渐增大, 聚磷菌的厌氧释磷与好氧吸磷能力均逐渐减弱, 且 IV 阶段 (1/2 侧流比) 之前均可实现除磷效果, 说明在 1/4、1/3 侧流比条件下 EBPR 系统可实现磷的高效去除, 从节约能耗与磷回收方面考虑, 低好氧条件下生物除磷与侧流磷回收结合具有可行性.

2.4 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 5 为不同侧流比条件下磷回收、生物除磷性能. 由图 5(a) 可得, 在将侧流比变为 1/4 时, 系统聚磷菌总释磷量明显下降, 由侧流前的 $39.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 $23.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 1/3 侧流比时降低幅度较小, 在 1/2 侧流比时又加速下降; EBPR 系统生物除磷量与总释磷量趋势几乎吻合, 亦发现在 1/2 侧流比时两者差值最大, 分析原因与图 4 分析结果相同, 但侧流比磷回收量却不断上升. 由图 5(b) 可得, EBPR 系统生物除磷率呈先增加后减小的趋势, 在 1/3 侧流比阶段时生物除磷率最高, 可达到 99.0%, 侧流比磷回收率呈现直线上升趋势. 分析认为, 与无侧流比相比, 提取 1/4、1/3 侧流比进行侧流比磷回收对生物除磷具有一定的强化作用, 这与 Barat 等^[25] 的模拟评价相似, 但侧流比为 1/2 时, 生物除磷率迅速下降, 应该存在一个最佳侧流比, 实现了经济的磷回收与高效低耗生物除磷的有效结合. 其中偏差棒为各个工况对应数据的偏差, 由图 5 中所有阶段的各种指标可以明显看出, 在 1/3 侧流

比时所有指标偏差值均为最小值, 而 1/2 侧流比时所有指标偏差值均为最大值, 即在 1/3 侧流比时 EBPR 系统除磷性能与磷回收性能均为最稳定高效, 反之 1/2 侧流比抑制 EBPR 系统除磷性能.

综合图 5 可得, 1/3 侧流比为最佳侧流比, 实现了经济的磷回收与高效低耗生物除磷的有效结合. 主要原因有: ①在 1/3 侧流比阶段时生物除磷最为稳定高效, 去除率平均值为 99.0%; ②虽然侧流比磷回收率呈现直线上升趋势, 但图 5(a) 中可以看出, 侧流比磷回收量依次为 10.5、17.6、17.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 1/2 与 1/3 侧流比仅仅相差 0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 可见 1/2 侧流比时对于磷的资源再利用能力已经逐渐减缓.

2.5 不同侧流比条件下 EBPR 系统各形态氮的去除性能

图 6 为不同侧流比条件下 EBPR 系统各形态氮的去除性能. 从中可知, 各阶段出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度平均值依次为 10.0、11.4、11.5、14.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 同时可见, 系统在 I、II、III 阶段时 TN 去除率较为稳定并逐渐下降, 各阶段 TN 去除率平均值分别为 73.6%、69.8%、68.1%; IV 阶段 (1/2 侧流比) TN 去除率最小降至 50.9%. 由图 2(b) 可知, 系统所有阶段去除 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 性能高效稳定, 可见 TN 去除率降低主要是由于 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除降低. 同时由图 3 可得, IV 阶段 (1/2 侧流比) 除磷率最低为 65.4%, 综合证明, 系统在 1/2 侧流比时, 生物反应过程中脱氮除磷效果均有所下降.

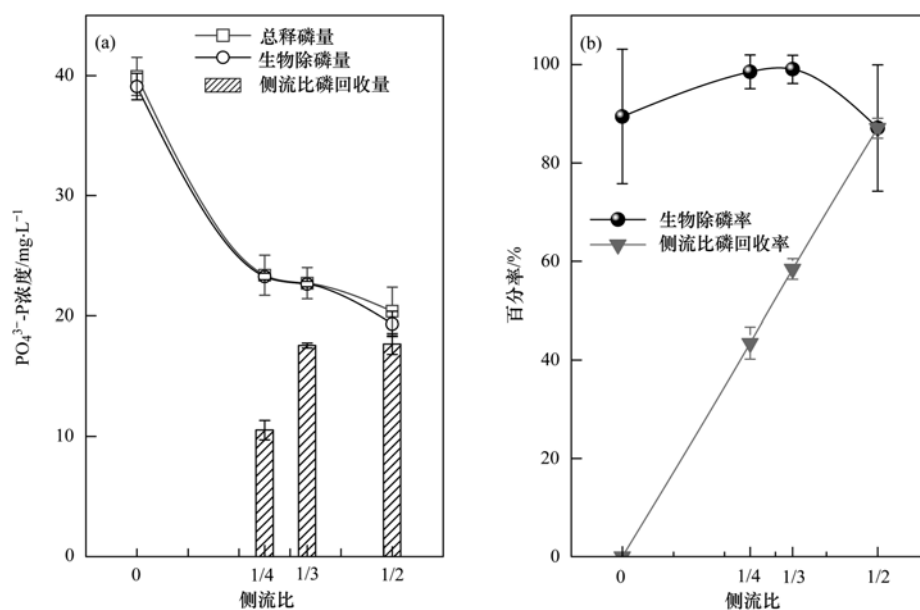


图 5 不同侧流比条件下磷回收、生物除磷性能

Fig. 5 Phosphate recovery, biological phosphate removal performance under different side stream ratios

反应器采用厌氧/好氧方式运行,出水 NO_3^- -N浓度来源于厌氧段未被完全反硝化的残留硝态氮与好氧段硝化反应的产物硝态氮. 本实验各阶段 NH_4^+ -N去除率稳定后均可达到100%,反应器好氧段发生明显的硝化反应. 进水 NH_4^+ -N浓度始终为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但随着侧流比增大厌氧末期逐渐剥夺更多

NH_4^+ -N,进入好氧阶段进行硝化反应的 NH_4^+ -N浓度逐渐减小,碳源充足的条件下各阶段产物硝态氮含量逐渐下降. 由图6可知,各阶段出水 NO_3^- -N浓度平均值依次为 10.0 、 11.4 、 11.5 、 $14.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,分析结果可知,厌氧末期残留硝态氮的变化导致出水 NO_3^- -N浓度变化(由图4已知残留硝态氮含量依次升高).

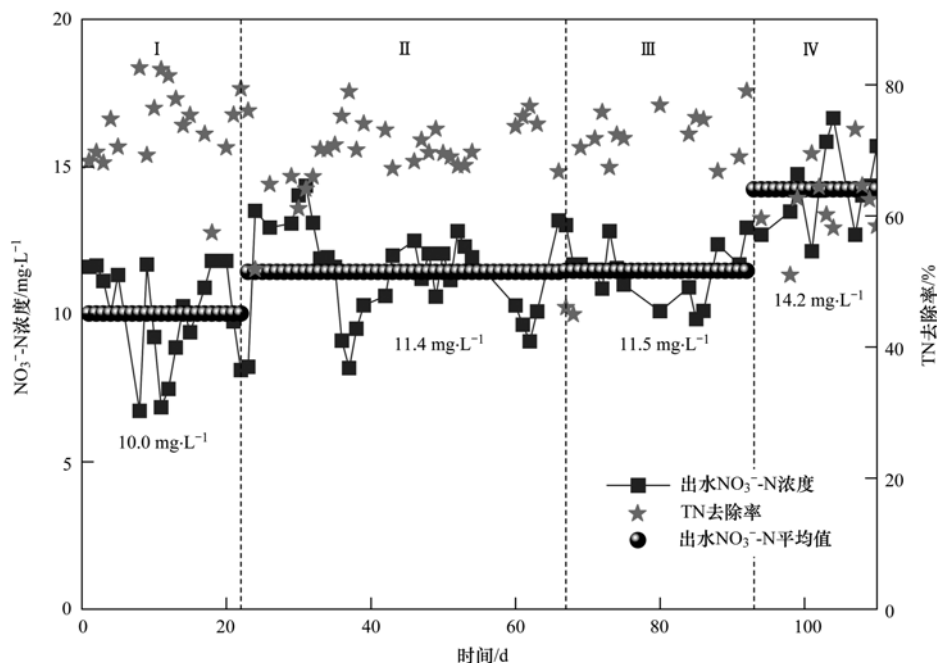


图6 不同侧流比条件下各形态氮的去除性能

Fig. 6 Removal performance of various forms of nitrogen under different side stream ratios

3 结论

(1)低好氧 EBPR 系统中,侧流比对 NH_4^+ -N去除影响甚微,但随着侧流比的增大且系统进水 COD 保持初始浓度 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,引发出水 COD 稍有波动.

(2)提取侧流比不断增大,则厌氧释磷量逐渐减小,出水磷浓度逐渐升高,在 $1/2$ 侧流比时,除磷性能不断恶化.

(3)低好氧 EBPR 系统中最优工况为提取 $1/3$ 侧流比,此时低好氧 EBPR 系统与侧流磷回收的结合兼顾了高效低耗除磷与磷资源回收利用,大大提高了经济与环境效益.

(4)系统在 0 、 $1/4$ 、 $1/3$ 侧流比时,TN 去除率较为稳定并逐渐下降,但在 $1/2$ 侧流比时,厌氧末期不完全反硝化导致 TN 去除率迅速下降至 50.9% .

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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 & Control*, 2014, **36**(4): 75-79.
- [7] 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.
- [8] 郝晓地, 戴吉, van Loosdrecht M C M. 采用数学模拟评价生物营养物质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.
- [9] Ueno Y, Fujii M. Three years experience of operating and selling recovered struvite from full-scale plant [J]. *Environmental Technology*, 2001, **22**(112): 1373-1381.
- [10] 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.
- [11] Mulkerrins D, Dobson A D W, Collieran E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters[J]. *Environment International*, 2004, **30**(2): 249-259.
- [12] 向沙, 陈洪波, 李小明, 等. 溶解氧对好氧/延长闲置SBR除磷性能的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(4): 1019-1025.
- Xiang S, Chen H B, Li X M, *et al.* Effect of dissolved oxygen concentration on biological phosphorus removal in oxic/extended-idle sequencing batch reactor[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(4): 1019-1025.
- [13] 马娟, 李璐, 俞小军, 等. 低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 597-603.
- Ma J, Li L, Yu X J, *et al.* Startup, stable operation and process failure of EBPR system under the low temperature and low dissolved oxygen condition [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 597-603.
- [14] 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.
- [15] Chen H B, Wang D B, Li X M, *et al.* Effect of dissolved oxygen on biological phosphorus removal induced by aerobic/extended-idle regime [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2014, **90**: 27-35.
- [16] Liu G Q, Wang J M. Long-term low DO enriches and shifts nitrifier community in activated sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(10): 5109-5117.
- [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] 席粉鹊, 袁林江, 吕景花. 侧流化学除磷对AO连续流生物除磷系统的影响[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(12): 5231-5236.
- Xi F Q, Yuan L J, Lv J H. Effects of anaerobic supernatant stripping process on AO phosphorus removal system[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(12): 5231-5236.
- [21] 胡猛, 曹军, 张艳, 等. 化学除磷辅助A²/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 A²/O process[J]. *Water Pollution Control*, 2014, **32**(3): 29-33.
- [22] 郝晓地, 戴吉, 胡沅胜, 等. C/P比与磷回收对生物营养物质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 R 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.
- [23] 王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 等. 利用主要缺氧段ORP作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2617-2625.
- Wang X L, Song T H, Yin B Y, *et al.* ORP in the main anoxic stage as the control parameter for nitrogen and phosphorus removal in the single sludge system with a continuous flow[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2617-2625.
- [24] Chuang S H, Ouyang C F, Wang Y B. Kinetic competition between phosphorus release and denitrification on sludge under anoxic condition[J]. *Water Research*, 1996, **30**(12): 2961-2968.
- [25] Barat R, van Loosdrecht M C M. Potential phosphorus recovery in a WWTP with the BCFS[®] process; interactions with the biological process[J]. *Water Research*, 2006, **40**(19): 3507-3516.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)