

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市区土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑菌活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

连续流好氧颗粒污泥系统处理低 COD/N 实际生活污水的工艺优化

鲁磊, 信欣*, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇

(成都信息工程大学资源环境学院, 成都 610225)

摘要: 在连续流合建式反应器中接种成熟好氧颗粒污泥处理低碳氮比 (COD/N) 的实际生活污水, 研究了曝气量和水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT) 对连续流好氧颗粒污泥系统脱氮除磷和颗粒污泥稳定性的影响。结果表明, 当曝气量为 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (表观气速为 $1.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)、HRT 为 7.5 h 时, 反应器对化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD)、总氮 (total nitrogen, TN) 和总磷 (total phosphorus, TP) 去除率达到最高, 分别为 76.34%、51.23% 和 53.70%。整个系统在此条件下能够稳定运行, 污泥浓度 (mixed liquor suspended solids, MLSS) 为 $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 污泥体积指数 (sludge volume index, SVI) 保持在 $50 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下, 好氧颗粒污泥形态完整, 沉降性能良好。低 COD/N 的实际生活污水促进了好氧颗粒污泥胞外多聚物 (extracellular polymeric substance, EPS) 的增长, 蛋白质 (protein, PN) 和多聚糖 (polysaccharide, PS) 的比值高达 17.9, 相对于 PS, PN 对颗粒污泥的稳定性有更大的促进作用。

关键词: 连续流; 好氧颗粒污泥; 低 COD/N; 实际生活污水; 工艺优化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3778-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.029

Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage

LU Lei, XIN Xin*, LU Hang, ZHU Liao-dong, XIE Si-jian, WU Yong

(College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: The mature aerobic granular sludge (AGS) was inoculated in a continuous-flow joint constructor reactor to treat low chemical oxygen demand/nitrogen (COD/N) ratio sewage. The effects of aeration intensity and hydraulic retention time (HRT) on the denitrification and phosphorus removal efficiencies and the granular sludge stabilization were investigated. When the aeration intensity was $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ (superficial air upflow velocity of $1.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) and the HRT was 7.5 h, the average removal efficiencies of COD, TN and TP were 76.34%, 51.23% and 53.70%, respectively. The mixed liquor suspended solids (MLSS) was only about $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the sludge volume index (SVI) was below $50 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, and the AGS exhibited complete forms and good settling performances. Additionally, the low COD/N ratios sewage could promote the production of extracellular polymeric substances (EPS) of AGS, and the PN proteins in EPS played a pivotal role in the maintenance of AGS stabilization.

Key words: continuous-flow; aerobic granular sludge; low COD/N ratio; actual sewage; process optimization

好氧颗粒污泥是在好氧条件下自发形成的细胞自身固定化颗粒, 与絮状污泥相比, 具有沉降性能好、污泥浓度高, 易于固液分离, 便于提高污水处理效率, 降低污水处理成本等优点^[1,2], 具有较好的应用前景^[3]。

国内外学者在好氧颗粒污泥工艺优化及其应用方面作了大量研究。有研究利用序批式好氧颗粒污泥反应器 (aerobic granular sequencing batch reactors, GSBRS) 处理高氨氮废水^[4], 考察了 HRT 和运行方式对脱氮菌群的活性和数量变化的影响。结果表明, 当 HRT 为 13 h 时, 脱氮菌群的活性最高; 缩短 HRT 导致了更高的 COD 和氨氮负荷, 有利于厌氧氨氧化菌的生长, 同时也抑制了氨氧化细菌的生长。Luo 等^[5]在两个相同的反应器里分别投加好氧颗粒

污泥和普通絮状污泥, 考察了 COD/N 分别为 4、2、1 时, 对颗粒污泥解体的影响。结果表明, COD/N 由 4 减小到 2 和 1 后, 对好氧颗粒污泥的物理性质和硝化效率有很大的影响, 当 COD/N 为 1 时, 颗粒污泥全部解体。EPS 中酪氨酸净产量的减少和包括丝状菌在内的主要微生物菌群的变化被认为是造成颗粒污泥解体的两个主要原因。张雯等^[6]在连续流反应器中接种厌氧颗粒污泥, 成功培养出好氧颗粒污泥, 考察了温度、COD/N、HRT、溶解氧 (dissolved

收稿日期: 2015-03-25; 修订日期: 2015-05-26

基金项目: 四川省科技支撑计划项目 (2013GZ0067); 大气环境模拟与污染控制四川省高校重点实验室开放基金项目 (ZZKT2014003)

作者简介: 鲁磊 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污染控制与资源化, E-mail: 549216623@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: xx@cuit.edu.cn

oxygen, DO)质量浓度、pH、间歇曝气周期等对好氧颗粒污泥脱氮的影响,并确定最佳工艺参数:温度为25℃、COD/N 为6~8、HRT 为8 h 左右、DO 质量浓度为2 mg·L⁻¹、pH 为7.5~8.0、曝气3 h 及缺氧搅拌3 h 和曝气4 h 及缺氧搅拌3 h. 张睿^[7]研究表明,进水 COD/N≤5 时,丝状菌大量生长,颗粒污泥开始解体,颗粒粒径变大,部分颗粒从球状变成长条杆状. 随着 COD/N 的降低,系统对有机物去除效果影响不大,去除率保持在80%以上;但总磷和氮的去除效果变差,游离氨浓度的增加抑制了硝化菌和反硝化菌的活性,当 COD/N 为3 时,系统对总磷、氨氮、总氮的去除率分别为47.98%、38.56%和27.90%.

上述关于好氧颗粒污泥的工艺参数研究大多是在序批式活性污泥反应器(sequencing batch reactor, SBR)内进行的. 并且大部分研究主要采用较高有机物浓度的人工配水作为处理对象^[8,9]. 近年来,也有少量的研究探讨了连续流好氧颗粒污泥反应器的优化和设计,但其结构和运行方式复杂且稳定性差^[10~13],难以应用于实际工程. 据相关报道^[14],流体剪切力、HRT、DO、选择压和废水组分都对好氧颗粒污泥的形成具有重要的影响. 其中,流体剪切力和 HRT 对颗粒的形成速度、结构和稳定性影响显著,被认为是影响好氧颗粒污泥形成和稳定性的最关键因素^[15]. 因此,本研究基于合建式反应器,采用较低 COD/N 实际生活污水为进水基质和连续进水方式,着重考察曝气量和 HRT 对好氧颗粒

污泥的形态变化和除污能力的影响,以期为连续流好氧颗粒污泥技术应用于实际工程提供可靠的实验依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验采用的合建式反应器是由有机玻璃制成的立方体,中间由一块隔板隔开,底部连通,分为反应区和沉淀区两部分,有效容积分别为1.5 L 和0.3 L. 反应器通过曝气泵和曝气盘提供曝气,由转子流量计控制曝气量. 进水由反应区上方进入,由恒流泵控制进水流量,在上升气泡的作用下与颗粒污泥充分接触反应后由底部进入沉淀区,在重力的作用下,经过泥水分离最终从沉淀区上方流出(实验装置示意图见图1).

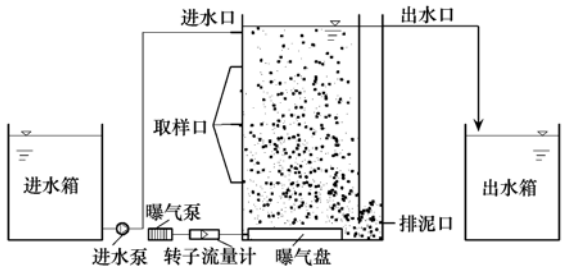


图1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experiment device

1.2 实验用水

生活污水取自成都信息工程大学地下污水总排放口,其水质波动较大,如表1 所示.

表1 生活污水水质特征

Table 1 Characteristics of actual sewage

名称	COD /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	氨氮 /mg·L ⁻¹	pH
量值	150~300	30~53	2~6	18~42	7.0~7.5

为了考察连续流好氧颗粒污泥系统对低 COD/N 生活污水的处理效果及其长期稳定运行的可行性,实验通过向实际生活污水中添加少量的化学试剂调节平均进水水质如下:ρ(COD)为160 mg·L⁻¹, ρ(TN)为40 mg·L⁻¹, ρ(TP)为4 mg·L⁻¹, pH 为7.0~7.5(COD/N 约为4:1).

1.3 接种污泥

接种污泥为本课题组事先培养的好氧颗粒污泥^[16],接种量为反应器有效体积的40%左右,接种后污泥浓度 MLSS 为4 200 mg·L⁻¹,污泥体积指数 SVI=38.1 mL·g⁻¹.

1.4 反应器的运行和实验过程

实验分为对曝气量和 HRT 的优化两个部分,每个部分又分为3 个阶段,各阶段采用不同的曝气量或 HRT,连续运行15 d,总计连续运行90 d. 具体的运行条件及各阶段表观气速和 DO 质量浓度如表2 所示.

1.5 实验方法

COD、氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、TN、TP、MLSS、污泥沉降比(settling velocity, SV)、SVI 等,均采用国家标准方法测定^[17],EPS 的提取采用甲醛-氢氧化钠法^[18].

表 2 实验运行阶段及条件
Table 2 Experimental operation stages and conditions

项目	运行阶段					
	1	2	3	4	5	6
运行天数/d	1~15	16~30	31~45	46~60	61~75	75~90
曝气量/mL·min ⁻¹	200	300	400	300	300	300
HRT/h	6.2	6.2	6.2	6.67	7.5	8.0
表观气速/cm·s ⁻¹	0.8	1.2	1.6	1.2	1.2	1.2
DO/mg·L ⁻¹	2.8~3.1	3.9~4.0	4.8~5.0	3.9~4.0	3.9~4.0	3.9~4.0

PS 的测定采用蒽酮-硫酸法^[19], PN 的测定采用 Folin-酚法^[20]. 微生物相及颗粒污泥形态采用配备数码摄像系统的光学显微镜观察.

2 结果与分析

2.1 运行各阶段反应器除污效果

2.1.1 对 COD 的去除效果

反应器进出水 COD 质量浓度及其去除率的变化情况如图 2 所示. 反应器启动阶段(1~3 d)COD 的去除率较低,只有 50% 左右,原因是好氧颗粒污泥在接种前是在进水 COD/N 为 10:1 的 SBR 反应器中培养的,接种到合建式反应器后,进水方式和水质都有较大的变化. 但是好氧颗粒污泥很快地适应了连续的进水方式和 COD/N 只有 4:1 的进水水质,在曝气量为 200 mL·min⁻¹、HRT 为 6.2 h 的条件下, COD 去除率逐渐提高至 70% 左右,说明好氧颗粒污泥系统有较强的适应进水方式和水质突变的能力. 在保持 HRT 不变,曝气量提高到 300 mL·min⁻¹后, COD 去除率进一步提高,最高达到了 75% 左右. 但随着曝气量进一步增大到 400 mL·min⁻¹后,COD 去除率又有所下降,逐渐降低到了初始接种阶段的 50% 左右. 说明曝气量对反应器的 COD 去除效果影响明显,适宜的曝气量既能提供充足的 DO,同时也能提供适宜的水力剪切力,促进好氧颗粒污泥的

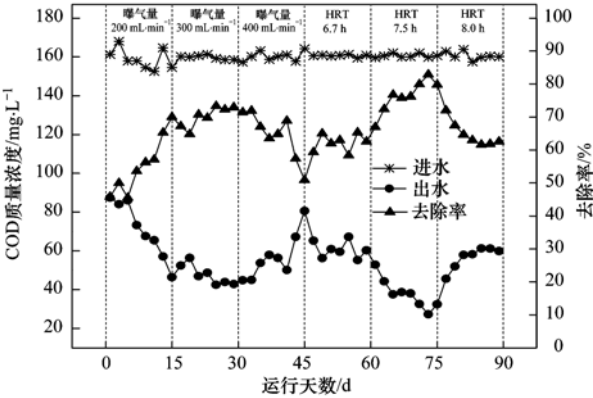


图 2 COD 及其去除率变化情况

Fig. 2 Changes in COD concentration and removal rate

形成和稳定,具有较高、稳定的 COD 去除率.

实验进行到 45 d 时,通过前面 3 个阶段对曝气量的优化,基本可以确定 300 mL·min⁻¹是最优的曝气量. 于是第二部分优化实验固定曝气量为 300 mL·min⁻¹,逐渐增大 HRT,考察 HRT 对反应器去除效果的影响. 从图 2 可以看出,HRT 对反应器的 COD 去除效果影响更为明显. 当 HRT 为 7.5 h,反应器 COD 去除率达到整个优化阶段的最高,平均去除率达 76.34%,平均出水 COD 质量浓度为 37.98 mg·L⁻¹,优于一级 A 排放标准.

2.1.2 对 NH₄⁺-N 的去除效果

反应器进出水 NH₄⁺-N 质量浓度及其去除率的变化情况如图 3 所示. 从中可以看出,反应器在整个优化阶段,始终保持着极高的 NH₄⁺-N 去除率,平均去除率在 99% 以上,出水 NH₄⁺-N 质量浓度始终在 1 mg·L⁻¹ 以下,优于一级 A 排放标准. 说明连续流好氧颗粒污泥系统对氨氮有着非常理想的去除效果. 这是因为好氧颗粒污泥的特殊结构,有利于硝化细菌的大量繁殖, NH₄⁺-N 在与颗粒污泥接触后,迅速被吸附到其表面,在充足的 DO 和大量硝化细菌的作用下,迅速被氧化为 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N.

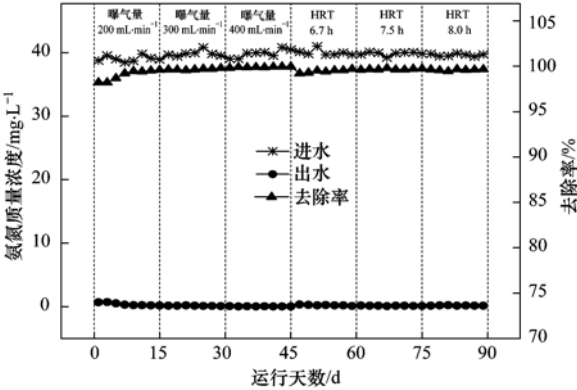


图 3 NH₄⁺-N 及其去除率变化情况

Fig. 3 Changes in NH₄⁺-N concentration and removal rate

2.1.3 反应器中 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 的变化情况

反应器中 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 的质量浓度变化情况如图 4 所示. 从中可以看出, NO₂⁻-N 在整个优化阶

段都保持着较低的质量浓度,平均质量浓度低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 随着曝气量的增大而增加,随着 HRT 的增大而减少,在图 4 中表现为先上升后下降的曲线,在曝气量最大且 HRT 最小的第 30 ~ 45 d 浓度最大,而在曝气量为 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、HRT 为 7.5 h 时浓度最低,平均质量浓度为 $16.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 结合图 3 可知,当进水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与好氧颗粒污泥充分接触后,迅速被颗粒表面的氨氧化细菌氧化为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$,由于颗粒污泥的特殊结构,颗粒污泥从内到外聚集了大量的适应各种环境的细菌,其中就包括亚硝酸盐氧化菌,在其作用下,大量的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 又被氧化为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$.

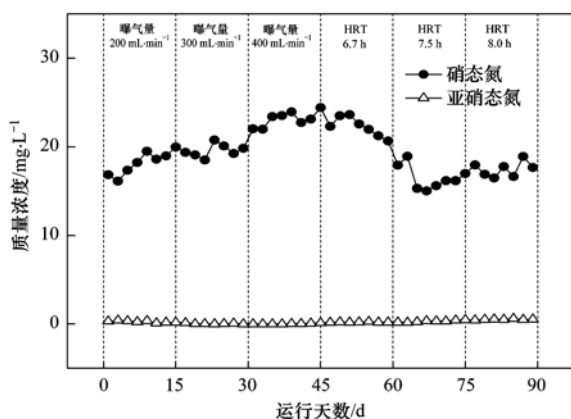


图 4 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的变化情况

Fig. 4 Changes in $\text{NO}_2^- \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentration

2.1.4 对 TN 的去除效果

反应器进出水 TN 质量浓度及其去除率的变化情况如图 5 所示. 出水 TN 质量浓度随曝气量和 HRT 的变化与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的变化一致. TN 平均去除率在曝气量为 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、HRT 为 7.5 h 的条件下(60 ~ 75 d)达到最高的 51.23%,出水质量浓度始终低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 说明即使在进水 COD/N 仅为 4:1 的极端恶劣情况下,好氧颗粒污泥由于其特殊的结构优势,为各种不同类型的细菌提供了良好的生长代谢场所,在这些细菌的联合作用下,在连续流的合建式反应器内,仍然具有较高的同步硝化反硝化效率,体现为较高的稳定的 TN 去除率.

2.1.5 对 TP 的去除效果

反应器进出水 TP 质量浓度及其去除率的变化情况如图 6 所示. 从中可以看出,在反应器启动阶段(1 ~ 3 d),反应器内的 TP 质量浓度逐渐降低,去除率由 50% 迅速降低至 10% 左右,这是因为颗粒污泥在接种前处于磷匮乏状态,当以连续进水的方式

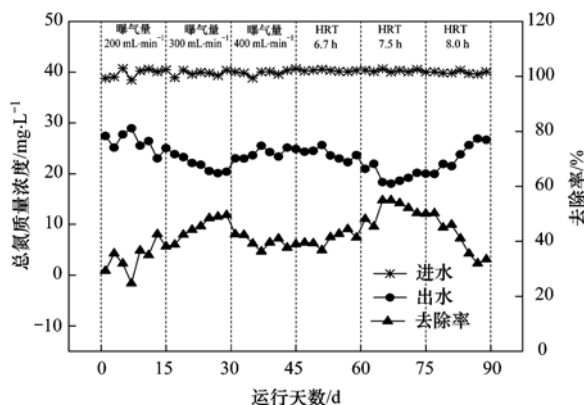


图 5 TN 及其去除率变化情况

Fig. 5 Changes in TN concentration and removal rate

接种运行后,颗粒污泥迅速将进水中 TP 吸附在其表面,表观上表现为较高的 TP 去除率. 随着实验的进行,污泥对 TP 的吸附达到饱和,过量的 TP 在颗粒污泥内部只能部分转化,大部分 TP 随出水悬浮物(suspended solids, SS)排出. 反应器对 TP 的去除率在曝气量为 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、HRT 为 7.5 h 的条件下(60 ~ 75 d)达到最高,平均去除率为 53.70%. 结合反应器对 TN 的去除效果,说明连续流好氧颗粒污泥系统有较高的同步脱氮除磷效率.

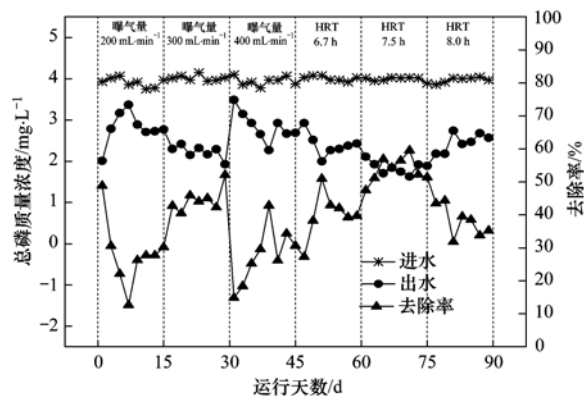


图 6 TP 及其去除率变化情况

Fig. 6 Changes in TP concentration and removal rate

2.2 污泥特性的变化

2.2.1 污泥外观形态的变化

在反应器的运行过程中,接种好氧颗粒污泥逐渐适应合建式反应器的结构、连续的进水方式、低 COD/N 的实际生活污水进水水质等环境并连续稳定运行,期间伴随着污泥外观形态的不断变化. 实验过程中通过数码相机和光学显微镜观察颗粒污泥的形态变化,如图 7 所示.

实验采用的接种污泥为颗粒状,呈黄褐色,结构较为紧密[见图 7(a)]. 实验以连续流的进水方式

运行 15 d 后,颗粒污泥有轻微解体的现象[见图 7(b)]. 当增大曝气量到 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 后,适宜的水力剪切力和 DO 质量浓度使得部分解体的颗粒污泥又重新聚集在一起,形成新的规则的颗粒污泥[见图 7(c)]. 但当曝气量继续增大至 $400 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 后,过大的水力剪切力造成污泥的颗粒结构被冲刷破坏加速了颗粒污泥的解体[见图 7(d)]. 鉴于曝气量过大,运行到第 46 d,将曝气量重新调整为 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,并增大 HRT 至 6.7 h,颗粒污泥迅速适应新的运行条件,形态也逐渐趋于规则完整[见图 7

(e)]. 保持曝气量不变,继续增大 HRT 至 7.5 h,颗粒污泥表面微生物增多,各种原生动物和后生动物附着在污泥表面,降低了污泥的疏水性,促进了颗粒污泥的黏结[见图 7(f)]. 反应器连续运行 90 d,运行过程中虽然始终有少量颗粒污泥老化解体的现象发生,但是解体后的颗粒污泥为新的颗粒污泥的形成提供了聚集初期必要的“晶核”,加速了新颗粒污泥的形成. 整个反应器内始终进行着少量老化污泥和新污泥的更新换代,但占主导地位的还是成熟的好氧颗粒污泥.

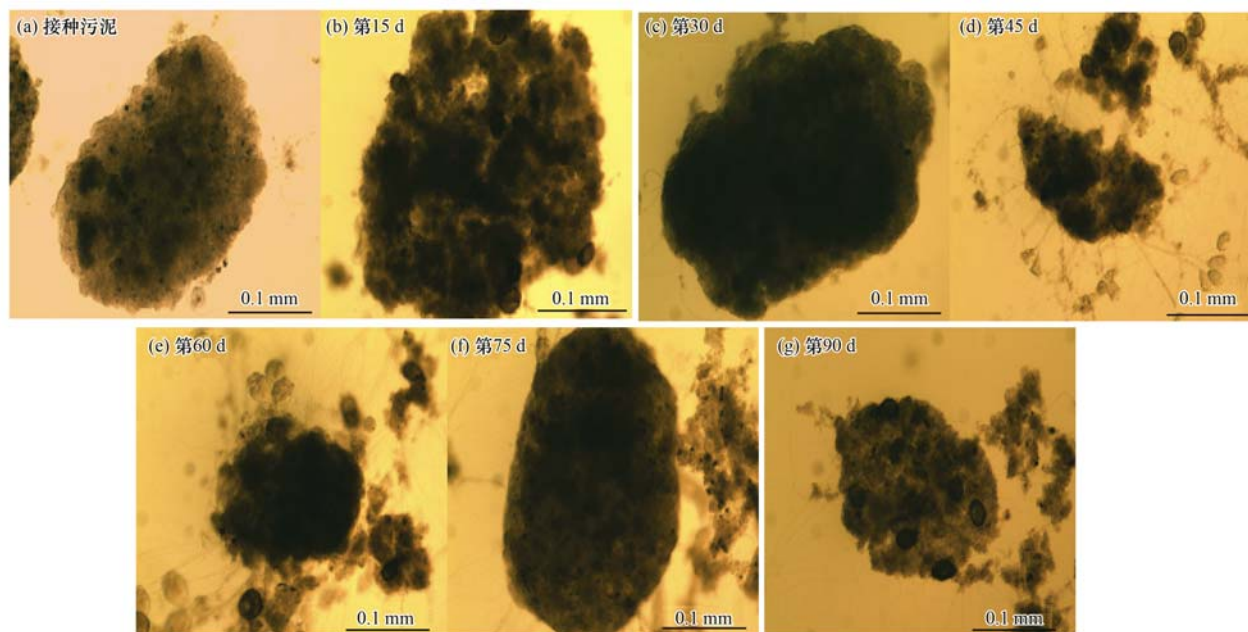


图 7 反应器不同运行阶段的污泥形态

Fig. 7 Morphological observation of sludge in reactor

2.2.2 污泥浓度及沉降性能的变化

生物处理系统中,污泥浓度及沉降性能反映了系统的处理能力及运行的稳定性. 反应器内污泥浓度及沉降性能的变化如图 8 所示.

接种污泥后,反应器内 MLSS 为 $4000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SVI 为 $35 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 实验过程中,每天从位于反应器中间高度处的取样口取 100 mL 均质泥水混合样品进行监测分析,不再进行额外排泥,污泥龄 (sludge retention time, SRT) 为 20 d 左右. 运行开始后,MLSS 急剧下降至 $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,SVI 上升至 $60 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上. 随着实验的进一步进行,MLSS 继续减小至 $1800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,SVI 升高至 $80 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上. 运行 30 d 后,MLSS 才逐渐趋于稳定,保持在 $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,虽然随着 HRT 的不断增大,MLSS 有所增加,但仍未超过 $2500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,始终在 $2000 \sim 2500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内波动. 说明连续流好氧

颗粒污泥系统相对序批式活性污泥系统,污泥浓度较低(几乎为活性污泥法的一半),这也是该系统污泥龄较长、剩余污泥产量较少的原因. 从图 8 中还可以看出,在第 60 ~ 75 d,SVI 相对较低,保持在 $50 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下,结合反应器对各污染物的去除情况,说明较好的沉降性能是好氧颗粒污泥去除污染物质的必要条件. 一旦发生颗粒污泥解体,处理效果也随之恶化.

2.2.3 EPS 中 PN、PS 的变化

EPS 是污泥新陈代谢过程中分泌的高分子有机物,其主要成分包括 PN 和 PS^[21,22],二者的含量及比例对颗粒污泥的形态构成和稳定运行起着至关重要的作用^[23,24]. 反应器运行各阶段污泥中 PN 与 PS 含量的变化如图 9 所示.

从图 9 中可以看出,PS 在反应器运行过程中含量变化不大,始终保持在 $10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右. 而 PN 随

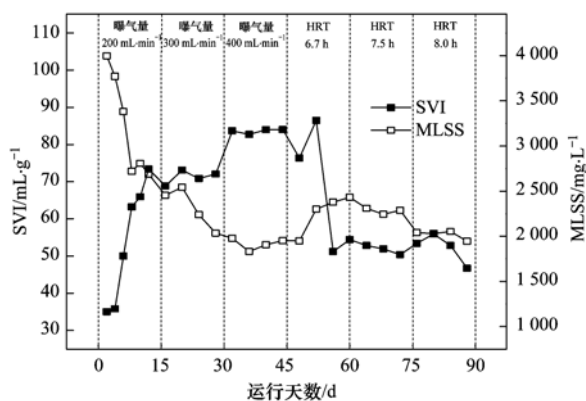


图8 反应器运行过程中 SVI 及 MLSS 的变化

Fig. 8 Changes in SVI and MLSS during reactor operationing

着反应器运行条件的变化不断变化. 从接种时的 $100 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右, 随着曝气量的不断增大, PN 的含量在一段小幅度的波动后持续增大, 在曝气量提高到 $400 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 后达到最高的 $140 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 当曝气量降到 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、HRT 提高到 6.67 h 后, PN 的含量急剧下降到 $50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 随着 HRT 的继续提高, 颗粒污泥也逐渐适应了新的运行条件, 在反应器处理效果最好且污泥 SVI 最低时 (60 ~ 75 d), PN 的含量和 PN/PS 又重新达到一个较高的水平, 分别达到 $130 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 16 以上. 说明相对于 PS, PN 含量的变化对好氧颗粒污泥的稳定运行和处理效果影响更为显著. 较高的 PN 含量和 PN/PS 有利于该系统的长期稳定运行.

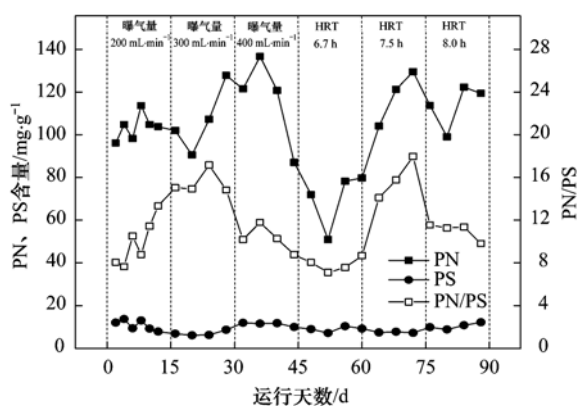


图9 反应器运行过程中 PN 及 PS 的变化

Fig. 9 Changes in PN and PS during reactor operationing

3 讨论

3.1 曝气量对系统脱氮除磷的影响

实验过程中, 曝气量的大小实际上反映的是反应器内水力剪切力和 DO 质量浓度的大小. Beun 等^[25] 和 Liu 等^[26] 均发现较强的剪切力能够促进好氧颗粒污泥的形成和稳定, 剪切力越强越有利于好

氧颗粒污泥密度和颗粒强度的增加, 但二者都是基于 SBR 反应器得到的结论. 本研究发现, 过大或过小的剪切力都不利于好氧颗粒污泥的稳定运行和除污性能. 当曝气量为 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 剪切力较小, 不能有效地将颗粒污泥表面少量松散的絮状污泥冲洗下来, 造成丝状菌大量繁殖, 同时 DO 浓度较低, 不能满足颗粒污泥表面好氧菌的生长繁殖, 污泥逐渐老化解体. 当 DO 扩散在颗粒内部受到限制时, 颗粒中心形成的厌氧层不利于颗粒污泥的长期稳定运行, 造成污泥膨胀, 系统的脱氮除碳效能也随之降低, TN 的平均去除率只有 21.19%. 而当曝气量为 $400 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 部分结构较为松散的颗粒污泥在过大的剪切力作用下逐渐分解, 同时 DO 质量浓度较高, 迅速往颗粒污泥内部传递, 造成好氧层不断增大, 缺氧层和厌氧层逐渐减小甚至消失, 破坏了颗粒污泥的微环境, 从而导致其自身的分解, 此时 TN 平均去除率也只有 32.92%, 说明高曝气量带来的高 DO 质量浓度不利于氨氮通过同步硝化反硝化 (simultaneous nitrification and denitrification, SND) 去除^[27]. 本实验中, 当曝气量为 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 水力剪切力和 DO 质量浓度才最为适宜, TN 平均去除率达到了 40% 以上. 整个曝气量优化阶段, TP 的去除率变化不大, 在 31% ~ 38% 之间. 这是因为反应器内磷的去除主要是通过一类统称为聚磷菌的微生物完成的, 聚磷菌必须在厌氧状态下同化发酵产物, 然后在好氧或缺氧条件下, 以分子氧或化合态氧做为电子受体, 氧化代谢胞内贮存物聚羟基丁酸酯 (polyhydroxybutyrate, PHB) 或聚羟基戊酸酯 (polyhydroxyvalerate, PHV) 等, 过量地从污水中摄取磷酸盐. 当污水中有机物浓度过低时, 聚磷菌缺乏碳源, 导致 TP 的去除率一直较低, 这是低基质低 COD/N 生活污水 TP 去除率较低的根本原因.

3.2 HRT 对系统脱氮除磷的影响

HRT 是指待处理污水在反应器内的平均停留时间, 也就是污水与生物反应器内微生物作用的平均反应时间, 在处理能力上则表现为反应器的容积负荷. 在进水水质保持稳定时, HRT 越大, 容积负荷越小. 李媛等^[28] 研究发现, 采用连续流完全混合反应器 (continuous stirred-tank reactor, CSTR), 以人工配水为原水, 反应器对污染物的去除负荷随着容积负荷的升高而升高, 即反应器的处理能力随着容积负荷的升高而加强. 但该实验采用的进水为人工配水, 且进水 COD 质量浓度从 $177 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高到 $708 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 TN 质量浓度只有 $60 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD/

N 为 10:1 左右. 而本研究采用的是低基质的实际生活污水,其 COD 质量浓度只有 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TN 质量浓度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,COD/N 仅为 4:1. 针对这种进水水质,不断地减小 HRT,提高反应器容积负荷是不利于该系统长期稳定运行和脱氮除磷的. 研究发现,只有当反应器在适宜的 HRT 为 7.5h 时,反应器的脱氮除磷效果最好,TN 和 TP 的去除率均达到 51.23% 和 53.70%.

3.3 EPS 对好氧颗粒污泥稳定性的作用

EPS 普遍存在于生物絮凝体内部及表面,其在细胞间黏连聚集、立体结构形成、颗粒化过程以及颗粒长期稳定性上发挥重要作用. 目前关于 EPS 的组成对颗粒污泥稳定性的作用还存在着较大的争论,尤其是 PN 与 PS 的比例问题^[13].

本实验接种的成熟好氧颗粒污泥,PN 和 PS 的含量分别为 $90 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 经过一段时间的稳定运行后,PN 和 PS 都有了一定幅度的提高,在最佳运行工况下 (60 ~ 75 d),分别达到了 $133.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $12.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 均远高于 Qi 等^[29] 在 SBR 反应器中测得的 PN 质量分数 4.1 ~ 5.4 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 PS 质量分数 7.8 ~ 11.3 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 可见,在低基质低 COD/N 的生活污水的促进作用下,合建式连续流反应器中的好氧颗粒污泥可以产生大量的 PN 和 PS. PN 的疏水特性和 PS 的卷扫作用都为颗粒污泥的稳定起到促进作用. 在反应器脱氮除磷效果较好,颗粒污泥形态较为规则完整的时期,PN 的质量分数大量增加,PS 则处于较稳定水平,因此 PN/PS 由 8.0 升高到 17.9. 可见,PN 作为疏水性物质,增强了微生物细胞的疏水性,有利于微生物间的黏结. 相对于 PS,PN 对颗粒污泥的稳定性有更大的促进作用.

4 结论

(1)连续流好氧颗粒污泥处理低基质低 COD/N 的实际生活污水的最优运行工况为曝气量为 $300 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 、HRT 为 7.5h. 整个系统在此条件下能够稳定运行,好氧颗粒污泥形态完整,沉降性能良好. 进水 COD、TN 和 TP 平均浓度分别为 160、40 和 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水平均浓度分别为 37.98、19.64 和 $1.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率分别为 76.34%、51.23% 和 53.70%.

(2)对于连续流好氧颗粒污泥系统,相对于 HRT,曝气量对系统稳定运行具有更大的影响.

(3)低基质低 COD/N 的实际生活污水促进了反应器内好氧颗粒污泥 EPS 的增长,在反应器污水

处理效果较好的阶段,EPS 中 PN 质量分数的增加量明显高于 PS,PN/PS 高达 17.9. 相对于 PS,PN 对颗粒污泥的稳定性有更大的促进作用.

参考文献:

- [1] Nanchaiah Y V, Venugopalan V P. Denitrification of synthetic concentrated nitrate wastes by aerobic granular sludge under anoxic conditions [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(4): 683-688.
- [2] Lotito A M, Fratino U, Mancini A, *et al.* Effective aerobic granular sludge treatment of a real dyeing textile wastewater [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2012, **69**: 62-68.
- [3] de Bruin L M M, de Kreuk M, van der Roest H F R, *et al.* Aerobic granular sludge technology: an alternative to activated sludge? [J]. *Water Science & Technology*, 2004, **49**(11-12): 1-7.
- [4] Cydzik-Kwiatkowska A, Wojnowska-Baryła I. Nitrogen-converting communities in aerobic granules at different hydraulic retention times (HRTs) and operational modes [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2015, **31**(1): 75-83.
- [5] Luo J H, Hao T W, Li W, *et al.* Impact of influent COD/N ratio on disintegration of aerobic granular sludge [J]. *Water Research*, 2014, **62**: 127-135.
- [6] 张雯, 邓风, 何超群. CSTR 反应器好氧颗粒污泥脱氮影响因素研究[J]. *水处理技术*, 2011, **37**(1): 116-120.
- [7] 张睿. 进水 C/N 对 SBR 中好氧颗粒污泥稳定性的影响[J]. *西南给排水*, 2013, **35**(4): 31-35.
- [8] Zheng Y M, Yu H Q, Sheng G P. Physical and chemical characteristics of granular activated sludge from a sequencing batch airlift reactor [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(2): 645-650.
- [9] Chen Y, Jiang W J, Liang D T, *et al.* Structure and stability of aerobic granules cultivated under different shear force in sequencing batch reactors [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **76**(5): 1199-1208.
- [10] Chen Y C, Lin C J, Chen H L, *et al.* Cultivation of bio-granules in a continuous flow reactor at low dissolved oxygen [J]. *Water Air & Soil Pollution: Focus*, 2009, **9**(3-4): 213-221.
- [11] Zhou J H, Wei S, Li J, *et al.* Aerobic granulation in a modified continuous flow system [A]. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering* [C]. Wuhan, China: IEEE, 2011. 1-5.
- [12] Zhou D D, Liu M Y, Wang J, *et al.* Granulation of activated sludge in a continuous flow airlift reactor by strong drag force [J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. 2013, **18**(2): 289-299.
- [13] 牛姝, 段百川, 张祚薰, 等. 连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 986-992.
- [14] Qin L, Tay J H, Liu Y. Selection pressure is a driving force of aerobic granulation in sequencing batch reactors [J]. *Process Biochemistry*, 2004, **39**(5): 579-584.

- [15] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, **57**(1-2): 227-233.
- [16] 姚力, 信欣, 周迎芹, 等. 好氧反硝化菌强化序批式活性污泥反应器处理生活污水[J]. *环境污染与防治*, 2014, **36**(3): 73-77, 81.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **95**(3): 249-256.
- [19] Gaudy A F. Colorimetric determination of protein and carbohydrate [J]. *Water Wastes*, 1962, **7**: 17-22.
- [20] Frølund B, Griebe T, Nielsen P H. Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995, **43**(2): 755-761.
- [21] Horan N J, Eccles C R. Purification and characterization of extracellular polysaccharide from activated sludges [J]. *Water Research*, 1986, **20**(11): 1427-1432.
- [22] Frølund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin [J]. *Water Research*, 1996, **30**(8): 1749-1758.
- [23] 刘倩倩, 李小明, 杨麒, 等. 好氧污泥颗粒化的影响因素[J]. *工业水处理*, 2009, **29**(2): 22-25.
- [24] 蔡春光, 刘军深, 蔡伟民. 胞外多聚物在好氧颗粒化中的作用机理[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(5): 623-626.
- [25] Beun J J, Hendriks A, van Loosdrecht M C M, *et al.* Aerobic granulation in a sequencing batch reactor [J]. *Water Research*, 1999, **33**(10): 2283-2290.
- [26] Liu Q S, Tay J H, Liu Y. Substrate concentration-independent aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor [J]. *Environmental Technology*, 2003, **24**(10): 1235-1242.
- [27] 陈寰. 溶解氧对好氧颗粒污泥影响的研究进展[J]. *四川环境*, 2010, **29**(2): 109-112.
- [28] 李媛, 沈耀良, 孙立柱. 不同容积负荷下培养好氧颗粒污泥的 CSTR 反应器运行效能的研究[J]. *苏州科技学院学报(工程技术版)*, 2009, **22**(3): 5-8.
- [29] Qi P S, Wang W B, Wang H Y, *et al.* Effect of COD concentration and shear stress on secretion of extracellular polymeric substances [J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)*, 2008, **24**(6): 682-686.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行