

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H ₂ O ₂ 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N ₂ O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O ₃ 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响

刘孟媛¹, 周丹丹^{1*}, 高琳琳¹, 马德方¹, 张予萌¹, 李克宇²

(1. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130026; 2. 中国市政工程东北设计研究总院, 长春 130026)

摘要: 在 R1、R2 和 R3 共 3 组气提式内循环序批式反应器中启动好氧颗粒污泥工艺, 探讨在无选择压作用下有机负荷对好氧颗粒污泥的形成及稳定性的影响。其中, R1、R2 分别以 $7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的目标 COD 负荷直接启动, R3 以 $1.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 逐步增加至 $3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的递增 COD 负荷方式启动。结果表明, 3 组反应器在启动期中均能快速形成好氧颗粒污泥, 但以目标负荷启动方式易使好氧颗粒污泥反应器产生丝状菌污泥膨胀。通过对颗粒形成过程、粒径、性质以及胞外多聚物等指标分析, 认为递增负荷的启动方式可有效抑制启动初期丝状菌污泥膨胀, 且形成的颗粒更为稳定, 生物降解效率更高。

关键词: 好氧颗粒污泥; 有机负荷; 启动; 气提式; 稳定性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3529-06

Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor

LIU Meng-yuan¹, ZHOU Dan-dan¹, GAO Lin-lin¹, MA De-fang¹, ZHANG Yu-meng¹, LI Ke-yu²

(1. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. China Northeast Municipal Engineering Design and Research Institute, Changchun 130026, China)

Abstract: The cultivation and stability of aerobic granular sludge in a three sequencing airlift internal-loop aerobic granular fluidized beds (R1-R3) under different organic loading rates (OLR) were investigated, where the selective pressure was un-controlled. R1 and R2 were start-up at the COD loading of $7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ and $3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ respectively, and R3 was start-up at an increasing COD loading rates of $1.5-3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. The results showed that the aerobic granules could be formed successfully in all the reactors, however, filamentous bulking happened as the reactor was start-up at an aimed OLR (R1 and R2). It seems the overgrowth of filamentous could be controlled effectively by means of increasing OLR gradually. The granular development characteristics, the physical characteristics and extracellular polymeric substances contents were analyzed especially during the aerobic granules cultivation. Compared with the granules in R1 and R2, aerobic granules formed in R3 presented clearer outer morphology and compact structure, advanced COD removal efficiency and a significant increase in polysaccharides, resulted an enhanced stability.

Key words: aerobic granular sludge; organic loading rate; start-up; airlift reactor; stabilization

对于好氧颗粒污泥的研究始于 20 世纪 90 年代, 该工艺具有启动速度快、形成的颗粒结构致密、沉降性能好、生物浓度高、生物相丰富等特点。颗粒污泥是通过微生物自凝聚作用形成的一类特殊的生物膜, 其形成机制涉及到物理、化学和生物等多种反应的共同作用。废水组分、流体剪切力、选择压和有机负荷等^[1,2]都对好氧颗粒污泥的形成有重要影响。与传统的活性污泥法相比, 好氧颗粒污泥工艺能够高效脱氮除磷、吸附重金属废水和处理难生物降解有机废水^[3,4]。因此, 好氧颗粒污泥工艺被认为是一种极具潜力的废水生物处理技术。

好氧颗粒污泥稳定性较差^[5~7], 目前关于好氧颗粒污泥反应器工程化的研究还鲜见报道。好氧颗粒污泥运行中易出现颗粒解体、污泥膨胀等现象。有机负荷条件是影响颗粒污泥稳定性的关键工艺参

数之一, 对菌群类别和生物活性影响显著。不同的有机负荷条件下颗粒的形态、性质和稳定性见表 1。然而, 关于有机负荷对好氧颗粒污泥形成稳定性的影响多集中于选择适宜的有机负荷范围上, 关于有机负荷负载方式对好氧颗粒污泥形成和稳定性的影响还不够系统。本研究在气提式好氧颗粒污泥反应器启动过程中, 忽略选择压的影响, 通过探讨以目标有机负荷直接启动方式和逐步递增至目标有机负荷的启动方式对好氧颗粒污泥的形成过程、性质及稳定性的影响, 以期为提高好氧颗粒污泥工艺的启动和运行奠定一定的理论基础。

收稿日期: 2011-12-21; 修订日期: 2012-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908096, 50908097); 吉林省环境保护厅项目(2009_24)

作者简介: 刘孟媛(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: notatall_student@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: zhouddandan415@163.com

表 1 有机负荷对颗粒稳定性的影响对比

Table 1 Comparison of stability of aerobic granular sludge under different OLRs in sequencing batch reactors					
有机负荷 /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	碳源 类型	COD 去除率/%	稳定性	颗粒形态及性能	文献
1,2	醋酸钠	—	—	未形成颗粒	[8]
1.8~0.67	葡萄糖	约 90	颗粒解体,污泥流失	大颗粒变小,颜色灰黑,呈杆状、星形等	[9]
4	醋酸钠	99	趋于平稳	第 14 d 出现,形态密实、完整,比重大,强度高,PS/PN 高	[8]
6	蔗糖	90~96	出现丝状菌后发生颗粒裂解、污泥流失	30 d 形成颗粒,沉降性差,结构疏松、多孔	[10]
6~9	醋酸钠	95~99	运行平稳,无丝状菌	颗粒规则密实	[11]
8	醋酸钠	—	不稳定,颗粒流失	颗粒形成后迅速破碎	[8]
6~15	葡萄糖	89~98	随负荷增加而增加	松散、绒毛状(低负荷);紧致、平滑、不规则(高负荷)	[11]

1 材料与方法

1.1 实验装置

3 个实验装置结构与尺寸相同,如图 1 所示. 气提式内循环好氧颗粒污泥反应器由有机玻璃柱构成,总高1 050 mm,有效容积 8 L. 反应器内置的气提管将反应区分为两部分:升流区 I (内径 60 mm,高 950 mm) 和降流区 II (内径 100 mm,高 1 000 mm). 升流区底部安装直径 60 mm 的微孔曝气盘向反应器供氧. 由于气体密度小,且占据了反应器升流区的部分空间,床体内外区形成的压力差,导致泥水混合液在床体内部发生规则内循环流动. 由于水的密度大于气体的密度,气提式反应器所特有的内循环运动持续向颗粒施加液相剪切力,从而加速絮体聚集和颗粒形成.

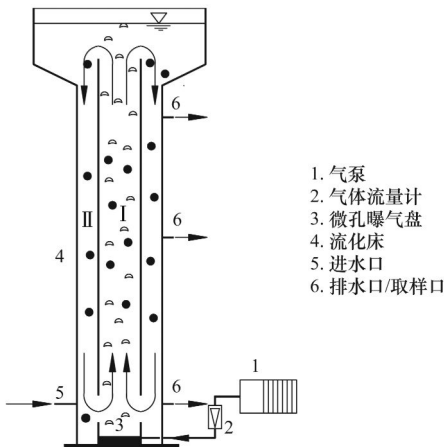


图 1 气提式内循环好氧颗粒污泥流化床装置
Fig. 1 Schematic diagram of airlift internal-loop aerobic granular fluidized bed

1.2 运行方式

3 个装置均为序批式反应器. 为着重探讨有机负荷对启动期颗粒污泥形成及稳定性的影响,忽略

短沉降时间下小絮体从反应器中流失的贡献(选择压),将沉降时间设定为 30 min. 运行周期为 6 h,其中进水 1 min,曝气 328 min,沉淀 30 min,排水 1 min. 其他运行参数如下:表面气速通过流量调节阀控制在 25 mm·s⁻¹,换水率为 50%,污泥龄为 7 d, pH 值为 7±1,运行温度为 20℃±1℃.

为探索不同有机负荷(organic loading rate, OLR)启动方式对气提式反应器中颗粒污泥形成和性质的影响,采用如表 2 所示的有机负荷条件对 R1~R3 启动. 其中,R1、R2 采用直接以目标负荷启动的方式,设计目标 COD 负荷分别为 7 kg·(m³·d)⁻¹和 3 kg·(m³·d)⁻¹; R3 采用逐步递增有机负荷方式,COD 负荷从 1.5 kg·(m³·d)⁻¹逐步升至 3 kg·(m³·d)⁻¹.

表 2 各启动方式下的有机负荷及启动时间

Table 2 Start-up method of each bioreactor and their running time							
工艺参数	R1	R2	R3	R3	R3	R3	R3
COD 负荷/kg·(m ³ ·d) ⁻¹	7	3.0	1.5	2.0	2.5	3.0	2.5 ¹⁾
运行周期/周	72	78	12	16	28	40	16

1) R3 中污泥在有机负荷递增至 3.0 kg·(m³·d)⁻¹时运行 40 周期后仍不稳定,又将负荷降至 2.5 kg·(m³·d)⁻¹运行,详见 2.1 节

1.3 配水及种泥

实验用水为人工配水(组分见表 3),包括碳、氮、磷源和微量元素. C/N/P 约为 100/10/2.

表 3 流化床配水组成成分¹⁾

Table 3 Composition of feed water for aerobic granular sludge			
成分	ρ/mg·L ⁻¹	成分	ρ/mg·L ⁻¹
NaAc·3H ₂ O	2 280	ZnCl ₂	0.05
NH ₄ Cl	615	CuCl ₂ ·2H ₂ O	0.06
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	210	MnSO ₄ ·H ₂ O	0.05
CaCl ₂	8.3	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	0.05
MgSO ₄ ·7H ₂ O	9.2	AlCl ₃ ·6H ₂ O	0.09
FeSO ₄ ·7H ₂ O	7.4	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.05
H ₃ BO ₃	0.05	NiCl ₂ ·6H ₂ O	0.09

1) 各组分浓度以有机负荷: 7 kg·(m³·d)⁻¹时为例

R1、R2、R3 接种污泥均为长春第二污水处理厂二沉池回流污泥, 初始混合液悬浮固体浓度 (mixed liquor suspended solids, MLSS) 约为 $3\,700\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 污泥容积指数 (sludge volume index, SVI) 为 $67.3\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 种泥絮体呈黑褐色, 结构较松散, 形态不规则, 菌胶团尺寸在 $50\sim 80\text{ }\mu\text{m}$, 存在丝状菌, 鲜见原生动物.

1.4 分析项目与检测方法

化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD)、混合液悬浮固体浓度 (MLSS)、混合液挥发性悬浮固体浓度 (mixed liquor volatile suspended solids, MLVSS) 和污泥指数 (SVI) 的分析方法均采用美国 APHA 标准方法^[12]. 胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 的提取采用甲醛-氢氧化钠法^[13], 其中多聚糖 (polysaccharides, PS) 的测定采用蒽酮-硫酸法^[14], 蛋白质 (protein, PN) 的测定采用 Folin-酚法^[15]. 混合液 pH 值和溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 分别以 pH S-25 型 pH 计和 JPSJ-605 型溶解氧测定仪进行测定. 微生物相及颗粒污泥形态均采用配备 Pro-Micro Scan 数码摄像系

统光学显微镜观察, 并采用 ScopePhoto 3.0 图像分析软件对颗粒粒径进行分析.

2 结果与讨论

2.1 有机负荷对颗粒污泥形成及稳定性的影响

2.1.1 有机负荷条件对颗粒形成的影响

(1) 颗粒污泥形成初期 3 个反应器在表 2 所示的运行方式下启动运行, 黑褐色的种泥逐渐转变为土黄色, 且松散的絮体开始粘连聚集, 尺寸迅速增加, 结构变得致密结实. 在第 8 周期左右, 3 个反应器中均出现了尺寸为 $150\sim 300\text{ }\mu\text{m}$ 的乳白色小颗粒, 颗粒中心密实, 边缘蓬松呈细小丝状, 推测丝状菌为颗粒最初形成提供基床. 到第 30 周期 [图 2 (a)], R1、R3 中污泥主要是大量形态规则的颗粒和少量絮状污泥的混合液, R2 中的菌胶团也存在明显的污泥核.

(2) 颗粒污泥成熟期 运行至 36 周期 (第 9 d), 各反应器中颗粒污泥形态清晰, 表面光滑, 结构密实, 颜色转变为黄棕色, 成熟的颗粒已经形成 [图 2 (b)]. 而据报道, SBR 反应器出现颗粒到颗粒成

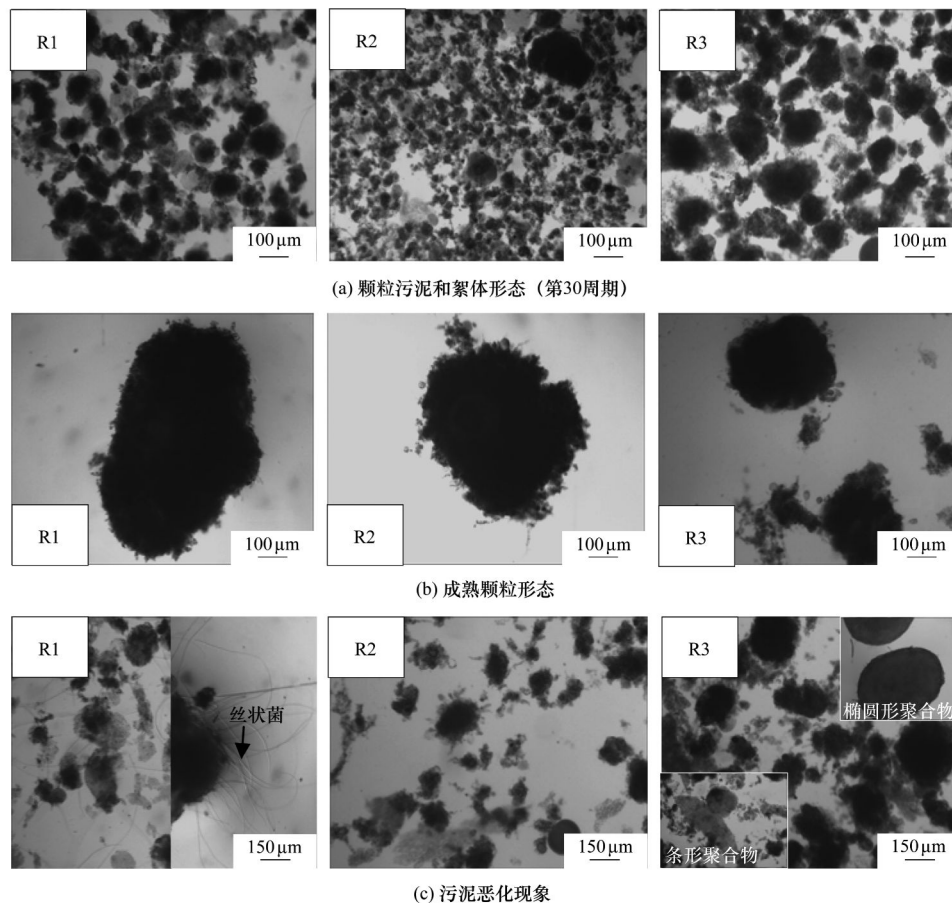


图2 R1、R2 和 R3 颗粒污泥形态演化同期比较

Fig. 2 Evolution of morphological observation of aerobic granular sludge in R1, R2 and R3

熟一般需要 20 d, 有的甚至 50 d^[4,11]. 可见, 好氧颗粒污泥在各启动方式下均可快速形成, 这与本研究所采用的气提式好氧颗粒污泥反应器的性质有关, 液相循环流动向污泥施加了较强的液相剪切力, 有效地促进了絮体的碰撞与颗粒的形成^[3,16,17].

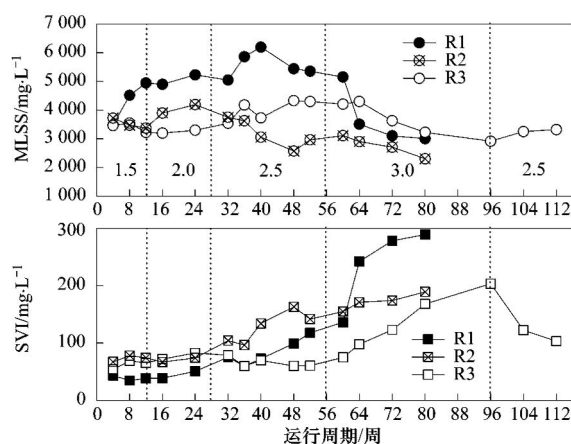
(3) 污泥恶化现象 运行至第 44 周期左右, R1、R2 中絮状污泥数量相继增多, 并且尺寸较大, 丝状菌开始出现, 污泥沉降性变差. 此后, 丝状菌生长迅速, 污泥发生膨胀, 颗粒表面可见一定数量的丝状菌[图 2(c)]. 在 R3 中, 当有机负荷 $\leq 2.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 污泥絮体和颗粒密实程度随着负荷的增加而逐步增加. 然而, 当负荷升至 $3.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 可观察到一定数量的大尺寸轻质聚合物, 其形态呈条形或光滑的椭圆形[图 2(c)], 导致颗粒密度较低, 不易沉降. 通过镜检, 并未观察到丝状菌, 并且溶解氧充足, 推断 R3 发生了非丝状菌膨胀, 负荷过高导致分泌的胞外聚合物在菌胶团外部聚集形成光滑椭圆形或条形聚合物. 经过 16 周期运行, 污泥性状不见好转. 遂将容积负荷降至 $2.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 后运行至第 104 周期污泥又恢复了良好的沉降性(详见 2.1.2 节). 可见, 好氧颗粒污泥反应器在启动期, 有机负荷的强度和有机负荷负载方式都对颗粒污泥的稳定性有显著影响.

2.1.2 有机负荷条件对污泥行为的影响

装置启动后, 3 个反应器中的污泥逐渐恢复活性并增长, 沉降性明显改善. 在颗粒污泥初步形成期, MLSS 呈现 $R1 > R2 > R3$ (见图 3), 这与各反应器内营养物质丰富程度有关. 随着颗粒的出现, 各反应器中污泥沉降性逐渐改善, SVI 基本维持在 $30 \sim 80 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$.

40 周期后, R1、R2 中丝状菌开始大量增长, 导致污泥的沉降性能和颗粒污泥的稳定性开始变差. 由于部分污泥絮体和颗粒难于沉降而流失, R1 和 R2 污泥浓度逐渐降低. 与 R1、R2 相比, R3 的 MLSS、SVI 的数值较稳定. R3 在前 70 个周期中, MLSS 稳定在 $3500 \sim 4200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SVI 稳定在 $65 \sim 75 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 在颗粒污泥成熟期, R1 和 R2 的出水 COD 分别为 $390 \sim 410 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $400 \sim 430 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 去除率为 $85\% \pm 3\%$ 和 $67\% \pm 2\%$; 而 R3 同期出水浓度能够迅速降至 $70 \sim 85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 去除率达到 $90.5\% \pm 2\%$. 然而当 R3 中有机负荷增加至 $3.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 轻质聚合物数量开始增加, 污泥沉降性变差. 至 96 周期, MLSS 降至 $2918 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SVI 升至 $203 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 当有机负荷在第 112

周期降回到 $2.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 污泥沉降性迅速改善, 具体如图 3 所示.



虚线区间为 R3 递增负荷区间, 单位: $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$

图 3 R1、R2 和 R3 中 MLSS、SVI 随运行周期变化

Fig. 3 MLSS and SVI vs. the operation cycles in R1, R2 and R3

2.1.3 有机负荷条件对颗粒粒径分布的影响

选取颗粒污泥成熟期(第 36 周期)污泥样品, 通过光学显微镜及图像软件分析, 得出 R1 中形成的颗粒尺寸较 R2、R3 中形成的颗粒尺寸大, 平均面积当量直径在 $600 \sim 800 \mu\text{m}$, 最大面积当量直径达到 $1000 \sim 1300 \mu\text{m}$, 这与 R1 采用较高的有机负荷有关, 使大尺寸颗粒内部仍能获得一定的营养物质而不至于破碎. 然而, R3 形成颗粒数量多, 颗粒尺寸分布均一旦稳定维持在 $300 \sim 500 \mu\text{m}$, 详见图 4. 可见, 营养物质丰富程度影响着颗粒污泥的尺寸, 这与 Liu 等^[18]的研究结果类似.

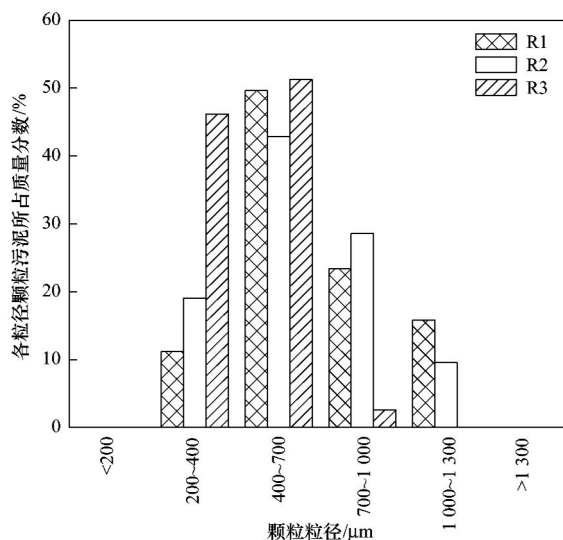


图 4 第 36 周期, R1、R2 和 R3 颗粒粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution of aerobic granules at cycle 36 in R1, R2 and R3

2.1.4 颗粒失稳原因分析

本研究结果表明,直接以目标负荷启动好氧颗粒污泥反应器时易发生丝状菌膨胀. 一般认为,丝状菌的过量繁殖是由于溶解氧过低($<2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、营养基质匮乏($\text{C/N/P}<100/5/1$)、有机负荷过低或 pH 值小于 6 等因素之一或综合的结果^[19]. 然而本研究中 R1 和 R2 在溶解氧为 $2\sim5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, C/N/P 为 100/10/2, pH 值为 6.5~9.0 时仍发生了丝状菌型污泥膨胀. R1 中 COD 负荷高达 $7\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 时,出水 COD 浓度已超过 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,丝状菌过量繁殖的原因不应为有机负荷过低所引起. 分析认为,R1 和 R2 中接种污泥活性较差时,水质水量短时间内发生较大的变化,令原有生态系统平衡遭到破坏,生物相发生变化,此时丝状菌比细菌更容易适应新的营养环境. 渐增负荷启动方式使菌胶团中微生物组成根据外界环境变化进行相应调整筛选,有效抑制了丝状菌的过量增殖. Adav 等^[20]在报道中同样指出:递增负荷的启动方式产生的生物群可以有效承受外加负荷,维持系统长期稳定运行. 然而当负荷过高时,过量的胞外聚合物附着于絮体或颗粒表面,会导致沉降性恶化.

2.2 有机负荷条件对胞外聚合物影响

胞外聚合物(EPS)是细菌通过新陈代谢分泌到表面的黏性物质,其主要成分是蛋白质(PN)和多糖(PS),其在细胞间粘连聚集、立体结构形成以及颗粒稳定性上发挥重要作用,能改变污泥表面负荷、细胞疏水性、污泥沉降等性能^[21],是颗粒污泥形成的重要因素.

各反应器在启动期蛋白质和多糖含量的变化情况如图 5 所示(因 R1、R2 的变化情况类似,此处仅对比了 R1 和 R3 的变化). R1 和 R3 中蛋白质含量

范围基本稳定在 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, MLSS 含有 $20\sim45\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,可见以目标负荷和以递增负荷启动时对好氧颗粒污泥反应器中蛋白质浓度的影响比较小. 然而,R1 和 R3 中多聚糖与蛋白质的比值(PS/PN)分别为 2.5 左右和 1.0 左右,可见 R3 中多聚糖浓度明显高于 R1 中多聚糖浓度. 递增负荷的启动方式下多聚糖在胞外多聚物中占据主导地位,而直接以目标负荷启动时多聚糖和蛋白质占据相当的地位. 许多研究结果表明多糖对颗粒稳定性具有重要的影响^[22~24],这是因为多糖能够促进细胞的粘连聚集以维持颗粒结构完整^[25,26].

3 结论

(1)采用以目标负荷启动和以递增负荷方式启动好氧颗粒污泥反应器,均能够形成好氧颗粒污泥.

(2)采用以目标负荷启动方式易发生丝状菌性污泥膨胀. 采用逐步递增负荷启动的方式可有效抑制丝状菌性污泥膨胀,颗粒数量较多且性质相对稳定,平均直径为 $300\sim500\text{ }\mu\text{m}$,小于以目标负荷启动时形成颗粒的尺寸.

(3)采用递增负荷启动方式与以目标负荷启动方式相比,形成的颗粒污泥生物活性好,COD 去除效率高. 胞外聚合物中多聚糖占据主要地位,使得絮体更易相互聚集,好氧颗粒污泥形成快速且稳定性好.

参考文献:

- [1] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor [J]. Journal of Applied Microbiology, 2001, **91**(1): 168-175.
- [2] 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.
- [3] Liu Y, Tay J H. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment [J]. Biotechnology Advances, 2004, **22**(7): 533-563.
- [4] Adav S S, Lee D J, Show K Y, et al. Aerobic granular sludge: recent advances [J]. Biotechnology Advances, 2008, **26**(5): 411-423.
- [5] 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]. Environmental Biotechnology, 2007, **76**(5): 1199-1208.
- [6] Liu Y Q, Tay J H. Cultivation of aerobic granules in a bubble column and an airlift reactor with divided draft tubes at low aeration rate [J]. Biochemical Engineering Journal, 2007, **34**(1): 1-7.

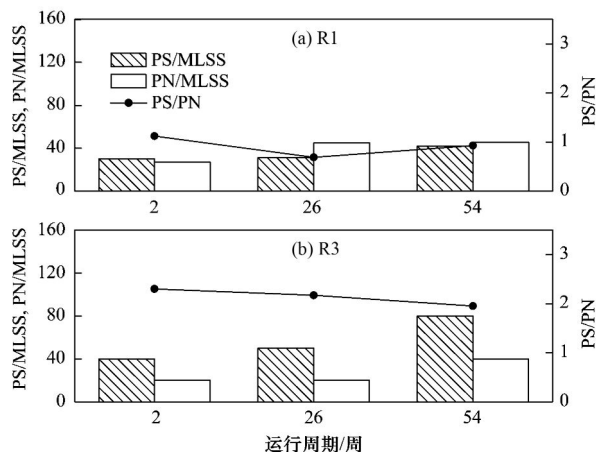


图 5 R1 和 R3 中多糖、蛋白质和 PS/PN 随运行周期变化趋势

Fig. 5 PS, PN and PS/PN vs. the operation cycles in R1 and R3

- [7] Morgenroth E, Sherden T, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor[J]. *Water Research*, 1997, **31**(12): 3191-3194.
- [8] Tay J H, Pan S, He Y X, *et al.* Effect of organic loading rate on aerobic granulation. I: reactor performance [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, **130**(10): 1094-1101.
- [9] 刘宏波, 杨昌柱, 濮文虹, 等. 有机负荷对颗粒化 SBR 反应器的影响研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1449-1453.
- [10] Zheng Y M, Yu H Q, Liu S J, *et al.* Formation and instability of aerobic granules under high organic loading conditions [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(10): 1791-1800.
- [11] Moy B Y P, Tay J H, Toh S K, *et al.* High organic loading influences the physical characteristics of aerobic sludge granules [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2002, **34**(6): 407-412.
- [12] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater [S]. Washington D C: American Public Health Association, 1998.
- [13] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **95**(3): 249-256.
- [14] Gaudy A F. Colorimetric determination of protein and carbohydrate[J]. *Industrial Water Wastes*, 1962, **7**: 17-22.
- [15] Frølund B, Griebe T, Nielsen P H. Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995, **43**(4): 755-761.
- [16] Li J Y, Chen Y, Li J, *et al.* Morphological and structural characteristics of aerobic granulation [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2006, **81**(5): 823-830.
- [17] 周丹丹, 刘孟媛, 侯典训, 等. 连续流气提式流化床启动过程中好氧颗粒污泥的形成机制 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2012, **42**(1): 212-219.
- [18] 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.
- [19] Sankaran S, Khanal S K, Jasti N, *et al.* Use of filamentous fungi for wastewater treatment and production of high value fungal byproducts: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2010, **40**(5): 400-449.
- [20] Adav S S, Lee D J, Lai J Y. Functional consortium from aerobic granules under high organic loading rates [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(14): 3465-3470.
- [21] Liu Y Q, Liu Y, Tay J H. The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules [J]. *Microbiology and Biotechnology*, 2004, **65**(2): 143-148.
- [22] McSwain B S, Irvine R L, Hausner M, *et al.* Composition and distribution of extracellular polymeric substances in aerobic flocs and granular sludge [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(2): 1051-1057.
- [23] Adav S S, Lee D J, Tay J H. Extracellular polymeric substances and structural stability of aerobic granule [J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1644-1650.
- [24] Wang Z W, Liu Y, Tay J H. Distribution of EPS and cell surface hydrophobicity in aerobic granules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005, **69**(4): 469-473.
- [25] Liu Y, Tay J H. Detachment forces and their influence on the structure and metabolic behaviour of biofilms [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2001, **17**(2): 111-117.
- [26] Vandevivere P, Kirchman D L. Attachment stimulates exopolysaccharide synthesis by a bacterium [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1993, **59**(10): 3280-3286.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17β-estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polycrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2012年10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行