

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

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

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花 (1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明 (1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云, 于兴修, 泮雪芹 (1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许玫英 (1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡 (1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹, 臧淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗 (1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚, 乔永民 (1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈全震, 江志兵 (1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂 (1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏 (1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青 (1852)
五氯酚对稀有鮐鲫卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力, 马永鹏, 张晓峥, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰 (1858)
全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明 (1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉亮 (1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建, 高金华, 常江 (1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽 (1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳, 李鑫, 胡洪管, 于茵, 巫寅虎 (1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超 (1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军 (1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环, 周兴求, 伍健东 (1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏 (1923)
非离子表面活性剂对污泥调质脱水效果的影响	侯海攀, 濮文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽 (1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊 (1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰 (1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生, 邝元成, 刘欣, 戴飞鸿 (1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣, 杨志琴 (1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平, 陈竞翱, 徐明亮, 艾平, 张衍林 (1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪 (1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权 (1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中 (1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹 (2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷 (2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林 (2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川 (2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成 (2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰 (2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳, 赵宏, 王建龙 (2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉 (2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮 (2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌 (2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清 (2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武, 何苗, 施汉昌 (2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东 (2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东 (2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬 (2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华 (2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云 (2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮 (2139)
《环境科学》征稿简则 (1877)	
《环境科学》征订启事 (1890)	
信息 (1822, 1857, 1896, 2138)	

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制

李志华¹, 杨帆¹, 李胜², 谢磊³, 王晓昌¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 2. 西安市污水处理有限责任公司, 西安 710025; 3. 西安市水业运营有限公司南郊水厂, 西安 710054)

摘要: 为避免好氧颗粒污泥随着粒径和密度的变化屡次出现其稳定性失去控制, 导致好氧颗粒污泥系统运行失败的状况发生, 开发了一种新型反应器能够很好地控制好氧颗粒污泥的粒径和密度. 新反应器结合旋流器的使用提供了2种排泥方式, 其一是短的沉淀时间, 将大粒径和高密度的颗粒污泥存留在反应器中; 其二是一种专有的污泥排除工艺, 选择出反应器内潜在的可能存在进一步粒径增长和密度扩大从而破坏反应器运行稳定的大粒径和高密度的颗粒, 并将其排除. 以上2种方式保证了反应器内颗粒污泥的粒径长期维持在300~1 000 μm , 进而维持整个系统的稳定性. 对新型反应器生成的颗粒污泥进行动力学参数的测定, 该工艺所形成颗粒的能量维持系数为0.08~0.10, 就新陈代谢活动的代谢途径而言, 相比传统颗粒污泥系统发生较大改变, 维持新陈代谢活动所消耗COD较传统工艺偏高. 另外, 出水水质COD的降解率平均达到92%, 氨氮降解率平均达到60%.

关键词: 好氧颗粒污泥; 密度; 粒径; 排泥; 旋流器; 稳定性

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1907-06

Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor

LI Zhi-hua¹, YANG Fan¹, LI Sheng², XIE Lei³, WANG Xiao-chang¹

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Wastewater Treatment Ltd., Xi'an 710025, China; 3. Southern Facility of Xi'an Water Operation Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Uncontrolled variation of diameter and density of aerobic granules frequently resulted in instability and thus brought about operation failure. An innovative reactor was therefore developed for the control of diameter and density of aerobic granules. There were two ways to select the sludge, one was the short settling time select the big and dense granules in the reactor, and the other was the hydro cyclone that washed out the big and compact granules preventing big and compact fourthly growth in the reactor. By these means, the diameter of granules could maintained in the range of 300-1 000 μm for a long time, consequently, the long term stability could be obtained. According to the kinetic analysis, it was found that the energy maintenance coefficient was 0.08-0.10, which was much higher than the conventional granular system (0.06), and the ratio of the COD used for maintenance to the influent was higher than the conventional one. Additionally, the removal efficiencies of COD and ammonia were 92% and 60%, respectively.

Key words: aerobic granules; density; diameter; select the sludge; hydrocyclone; stability

好氧颗粒污泥可认为是污水生物处理系统中微生物聚集体聚集度(污泥空间上的物理聚集与微生物种类的聚集)最大的一种污泥形态^[1]. 与传统活性污泥法相比, 沉降性能良好, 含有较多生物量, 含水率低, 剩余污泥量少, 具有同步硝化反硝化及除氮脱磷等功能, 并且对于抑制物和毒物具有很好的抵抗力, 在工业废水和城市污水处理中, 好氧颗粒污泥法成为非常具有潜力的生物处理工艺^[2,3].

然而, 好氧颗粒污泥系统均面临着一个主要问题就是系统的不稳定性, 随着学者不断的探索研究发现, 与系统稳定性相联系的因素有粒径形态、沉淀性、密度、强度、表面疏水性、耗氧量、微生物结构差异、EPS等. 有研究指出, 随着颗粒密度和粒径的不断增大, 会加大颗粒由表面向内部的传质阻力, 使内部发生厌氧区域并不断加大, 同时

内部缺少营养物质, 进一步导致内部厌氧水解从而使污泥颗粒解体, 系统运行失败^[4~7]. 然而如何控制好氧颗粒污泥系统的粒径和密度, 使其在长期的运行过程中维持一个稳定的状态却鲜有报道^[8~10]. 为此, 本研究在实验室条件下, 通过一种新型的工艺培养出了颗粒污泥, 并在长期的运行过程中保证了颗粒污泥粒径和密度的相对稳定, 同时对其形态、密度、粒径进行了表征, 并对其动力学参数、水质参数进行了分析.

收稿日期: 2011-08-04; 修订日期: 2011-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078303); 陕西省青年科技新星项目(2010KJXX-07); 陕西省教育厅专项科研计划项目(11JK0764)

作者简介: 李志华(1976~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向污水生物处理理论与技术, E-mail: lizhihua@gmail.com; lizhihua@xauat.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行参数

本试验所用的新型气升式内循环间歇反应器由有机玻璃圆筒制成,装置结构如图 1 所示. 新型反应器总有效容积 3.8 L, 高 600 mm, 内部套筒高 500 mm, 外筒内径 120 mm, 内筒内径 65 mm. 气体由反应器底部内筒与外筒之间通入, 带动污泥由外部套管上升, 污泥到顶端后由漏斗进入旋流装置^[11~13]进而溢流进内筒作下降运动, 从而在反应器内形成循环流动. 排水口设置在距离底部 290 mm 处, 并在出水口上下 50 mm 均设有取样口.

装置为间歇进水, 一个周期 240 min, 其中进水 2 min, 曝气 234 min, 沉淀 2 min, 出水 2 min, 反应器采用室温运行, 启动时间为 9 月 10 日, 冬季反应器最低温度 4.7℃, 曝气量通过流量计控制为 8 L·min⁻¹.

为了对比分析新反应器颗粒污泥的稳定性, 将同一实验室有厌氧搅拌的异养菌颗粒污泥 R1 进行了动力学参数分析. 其运行条件为进水 COD 浓度 600 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 浓度 60 mg·L⁻¹, TP 浓度 40 mg·L⁻¹, 按 SBR 操作模式进行, 运行周期 4 h, 其中进水 4 min, 搅拌 90 min, 曝气 140 min, 沉淀 4 min, 排水 2 min. 厌氧搅拌桨转速为 60 r·min⁻¹, 采用玻璃砂芯从反应器底部曝气, 气体流量为 4 L·min⁻¹, 上升流速为 0.35 m·min⁻¹. 反应器从底部进水, 中部排水, 每周期进水量、排水量均为 4 L, 反应器控制温度为 (25 ± 1)℃.

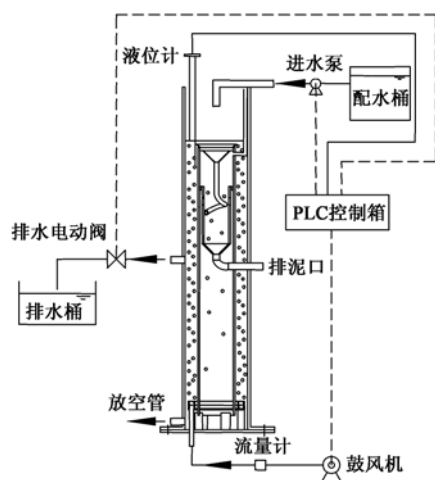


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Experiment setup

1.2 接种污泥及试验用水

本试验接种污泥为西安市邓家村污水厂 A²/O

二沉池回流污泥, 反应器进水为人工模拟废水, 试验配水以乙酸钠和葡萄糖混合作为碳源, 氯化铵作为氮源, 磷酸二氢钾作为磷源, 进水 pH 约为 6.5. 进水组成如表 1 所示.

表 1 模拟废水组成¹⁾

Table 1 Components of the synthetic wastewater

基质名称	浓度/mg·L ⁻¹	基质名称	浓度/mg·L ⁻¹
COD	1 200	MgSO ₄ · 7H ₂ O	180
NH ₄ ⁺ -N	120	CaCl ₂ · 2H ₂ O	28
TP	80	微量元素	0.3

1) 微量元素配方 (g·L⁻¹) 为 EDTA 10.00, FeCl₃ · 6H₂O 1.50, H₃BO₃ 0.15, CuSO₄ · 5H₂O 0.03, KI 0.18, MnCl₂ · H₂O 0.12, NaMoO₄ · 2H₂O 0.06, ZnSO₄ · 7H₂O 0.12, CoCl₂ · 6H₂O 0.15

1.3 测试与分析方法

(1) 颗粒形态、粒径、沉速及密度 根据颗粒的大小, 采用尼康 N90i 全自动显微镜和数码相机拍照记录粒径. 颗粒污泥的沉速采用自由沉淀法. 颗粒污泥的密度采用蔗糖梯度溶液法进行测定^[14].

(2) 最大比增长速率 μ_m 、内源呼吸速率 b_H 、产率系数 Y_H , 采用序批式呼吸计量法进行测定. 半饱和系数 K_s 、维持系数 m 、用于能量维持的基质消耗 S_{min} , 通过拟合进行测定^[15,16].

(3) COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP 等水质分析按国家标准方法进行^[17].

(4) 圆度的测定根据公式进行测定:

$$A_{fa} = \frac{4\pi S}{C^2}$$

式中, S 为颗粒污泥照片中污泥平面面积; C 为颗粒污泥照片中污泥周长; A_{fa} 为颗粒污泥的圆度, 其值越接近 1 圆度越好.

2 结果与讨论

2.1 好氧颗粒污泥颗粒化的实现

由图 2 可见, 新型反应器经过 24 d 的运行开始出现明显的黄色颗粒, 颗粒粒径通过显微镜观察维持在 0.1 ~ 0.5 mm 之间, 对颗粒圆度进行测定平均圆度达到 0.85 ~ 0.95, 由图 3 可见, 24 d 反应器内颗粒与絮体的质量比约为 1:7.

上述试验数据表明, 新型反应器系统中可以实现污泥的颗粒化, 60 d 后颗粒的质量才逐渐超过絮体的质量, 颗粒化进程较慢, 说明该系统是一慢速增长系统. 同时, 从图 2 照片中看出, 形成的颗粒表面光滑, 颗粒表面和絮体中均没有丝状菌的出现.

导致颗粒形成缓慢, 颗粒圆度较好, 表面光滑的

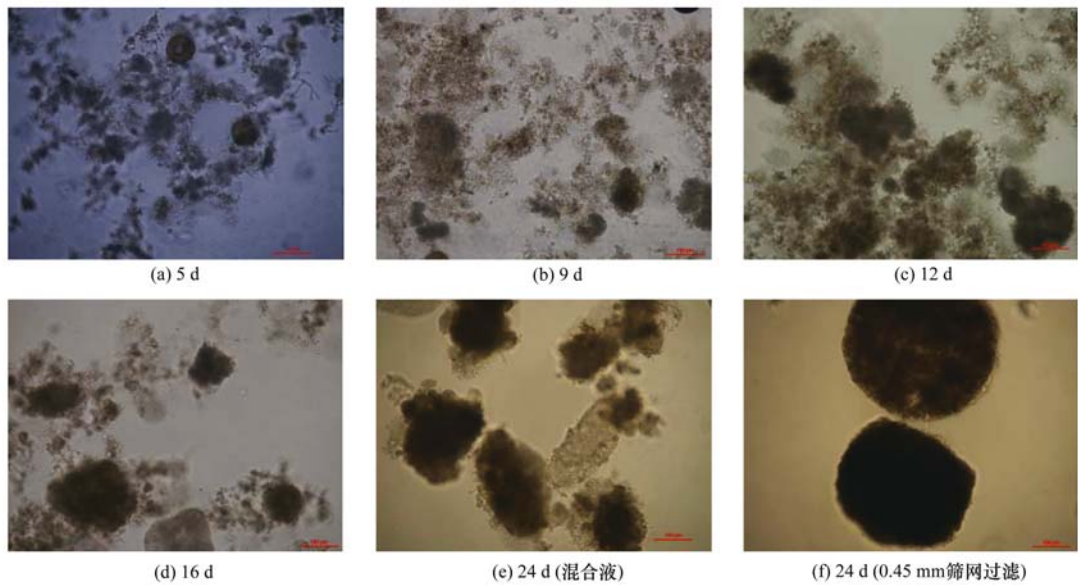


图 2 颗粒污泥形成过程形态

Fig. 2 Morphology of aerobic granulation

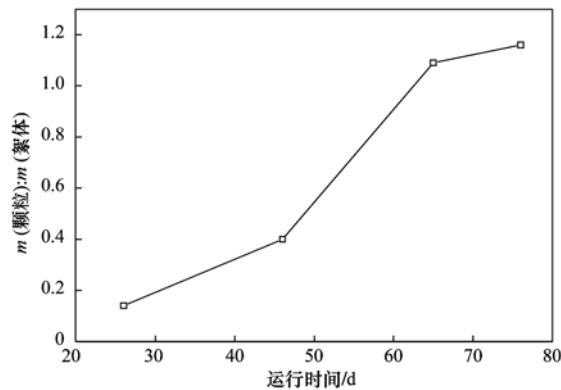


图 3 颗粒与絮体质量比值变化

Fig. 3 Variation of the mass ratio of granule and flocs

原因可能是由于旋流器的添加增大了整个系统的剪切力,同时旋流器提供的水平离心力使颗粒受力更为均匀,其原因有待更深入地研究.

2.2 系统所形成颗粒的粒径和密度稳定性控制

系统稳定运行 76 d 后,颗粒质量开始超过絮体的质量,系统颗粒化进程维持在一个缓慢的线性增长,如图 3,选取不同时间点对已经形成的颗粒污泥进行粒径分布的测定,如图 4.

随着系统稳定运行,颗粒化越来越明显,对比 76~108 d 3 次粒径分布,粒径的大小随系统运行周期的增长而逐渐增大,但增长速率缓慢,到 108 d,系统中 75% 的颗粒粒径维持在 1 000 μm 左右.

反应器从启动开始,为了保证污泥负荷的稳定,一直采用从取样口人工排泥的方式进行排泥,将整个反应器的污泥浓度控制在 3 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 从 100 d

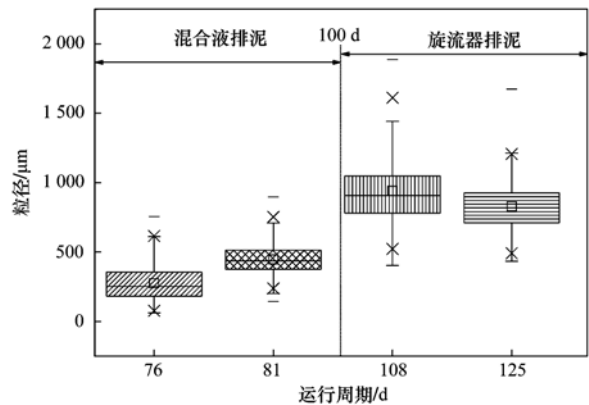


图 4 颗粒污泥的粒径分布

Fig. 4 Size distribution of aerobic granule

后,改变排泥方式,采用从旋流器底部排泥口进行排泥,所排污泥为旋流器底部沉积污泥,对比采用旋流器排泥前后粒径分布,如图 4,并结合 127 d 反应器内污泥形态及旋流器排出污泥形态对比发现,如图 5,粒径分布开始发生改变,对比 108 d 和 125 d 粒径分布,反应器内粒径缓慢增大的趋势开始改变,截止到 125 d,系统中 75% 的颗粒粒径维持在 1 000 μm 以下,相比 108 d,颗粒粒径变化得到稳定;对比反应器内污泥和旋流器排出污泥照片,旋流器排出污泥粒径明显大于反应器内污泥,并且旋流器排出污泥的密度和沉速均大于反应器内保留的颗粒污泥.

分析原因认为,反应器从启动到运行 100 d,相比传统 SBR 反应器除了结构上添加了旋流器外,控制方法上均按传统 SBR 方式运行,此时的运行方式只提供较短的沉淀时间这一种选择压,将大粒径和

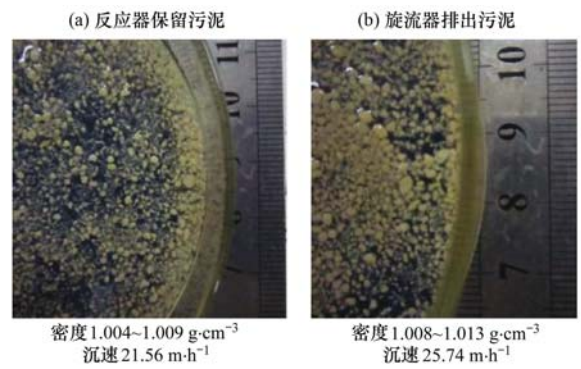


图 5 127 d 反应器内污泥及旋流器排出污泥对比

Fig. 5 Comparison of granules remained and washed out on day 127

高密度的颗粒保存在反应器内,同时人工所排污泥为反应器内混合液,在控制 MLSS 的同时不能改变污泥颗粒粒径的配比,虽然颗粒粒径增长缓慢,但不能改变其粒径增大的趋势.当 100 d 后采用旋流器的排泥口开始排泥时,旋流器开始发挥其所具有的旋流分离作用,当待分离的两相混合液以一定的压力从旋流器上部周边切向进入分离器后,产生强烈的旋转运动,由于固液两相之间的密度差,所受到的离心力、向心浮力、流体拽力的不相同,大粒径,高密度的颗粒会碰壁沉降在旋流器底部,而大部分不满足排除要求的颗粒则经过溢流孔排出,在反应器内继续循环^[18].此时通过改变排泥方式,使得该工艺提供了 2 种排泥方式,其一是短的沉淀时间,选择出大粒径和高密度的颗粒污泥存留在反应器中,其二是通过专有的污泥排除工艺,选择出反应器内潜在的可能存在进一步粒径增长和密度扩大从而破坏反应器运行稳定的大粒径和高密度的颗粒,并将其排除,实现了颗粒污泥一定程度上有选择性的排出,保证了反应器内颗粒污泥的粒径和密度在长期的运行过程中都维持在一个合理的范围内,有利于整个颗粒污泥系统的稳定运行.

2.3 污泥颗粒的动力学参数

如表 2 所示,对新型反应器内主要粒径范围 0.15~0.28 mm 和 0.28~0.45 mm 这 2 个区间的颗粒及传统 SBR 反应器 R1 中颗粒进行了动力学参数的测定.结果显示,在不同反应器颗粒污泥的动力学参数的对比中,R1 的最大比增长速率 μ_H 是新型反应器培养出的颗粒的 2~3 倍,它可以反映出新型反应器培养出的颗粒在特定废水中生存的难度要比 R1 的大,换言之,相对 R1 中的颗粒,新型反应器培养的颗粒生长受到抑制,属于慢速生长的系统,慢速生长的系统均较为稳定.同时对比产率系数 Y_H ,说

明新型反应器培养的颗粒对特定废水中有机物的降解效率较 R1 略有偏低,但相差不大.再者新型反应器培养的颗粒的维持系数 m 是 R1 颗粒的 1~2 倍,说明新型反应器相对传统 SBR 反应器培养出来的颗粒生长速度慢,系统也更加稳定.另外,将 $S_{min}/COD_{进水}$ 表示系统中用于维持新陈代谢的能量所占比例,R1 进水 COD 为 $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,新型反应器为 $1\,200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,从表 2 可以看出,相比传统颗粒污泥系统维持新陈代谢活动所消耗的 COD,新型反应器用来维持新陈代谢所消耗的 COD 较大^[19~22],说明新型反应器形成的颗粒较传统反应器形成的颗粒在 COD 的降解途径上发生了改变,有大量的 COD 被消耗来维持新陈代谢活动,因此使得用于颗粒污泥自身生长的 COD 消耗就会减少,促进了生长速率较小的微生物的存活,从而降低了颗粒污泥的生长速度. Liu 等^[9]和 De Kreuk^[23]等的研究发现,在好氧颗粒污泥培养系统中,促进生长速率较小的微生物存活,有利于好氧颗粒系统的稳定性维持.

表 2 新型反应器不同粒径颗粒及传统 SBR 反应器颗粒的动力学参数

Table 2 Kinetic parameters of aerobic granules with different size			
分类	小颗粒	大颗粒	传统颗粒
粒径/mm	0.15~0.28	0.28~0.45	0~2.2
异养菌增殖速率 μ_H/h^{-1}	0.12	0.15	0.33
内源呼吸速率 b_H/h^{-1}	0.07	0.06	0.11
产率系数 $Y_H/\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.78	0.74	0.67
表观增殖速率 $Y_{app}/\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.44	0.46	0.54
半饱和系数 $K_s/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	97	188	283
能量维持系数 m/h^{-1}	0.10	0.08	0.06
比维持系数 a/h^{-1}	0.08	0.06	0.05
用于能量维持的 基质消耗 $S_{min}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	157	123	47

上述分析认为,新型反应器形成的颗粒污泥系统相比传统的颗粒污泥系统是一个极度慢速的污泥生长系统,进而有利于好氧颗粒系统的稳定维持,同时新型反应器使得颗粒污泥对 COD 的降解途径上也发生了较大的改变,从污泥本身的特性上控制了粒径的不稳定增长.

以相同的方式分析发现,在同一反应器内不同粒径颗粒的对比中,小粒径的颗粒要比大粒径的颗粒稳定,而当配合新型反应器专有的排泥工艺,进行双选择压控制时,能够将粒径、密度较大的颗粒排出反应器,控制反应器中粒径、密度较大颗粒的数量,进而更有利于整个反应器系统的稳定性控制.

2.4 系统的水质参数

对该新型反应器系统进行了长期的水质数据监

测,数据如图 6 和图 7 所示。

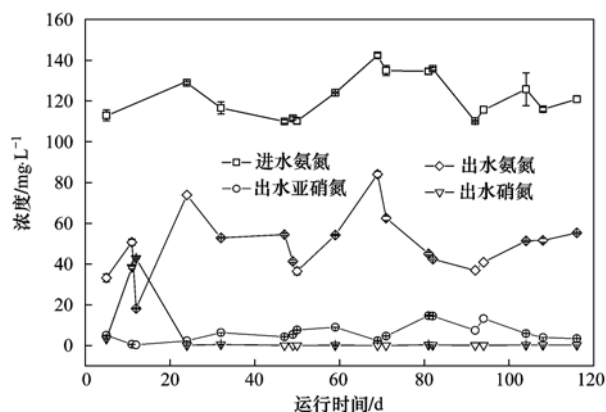


图 6 进出水中不同形态氮的变化

Fig. 6 Variation of various nitrogen concentrations in the influent and effluent

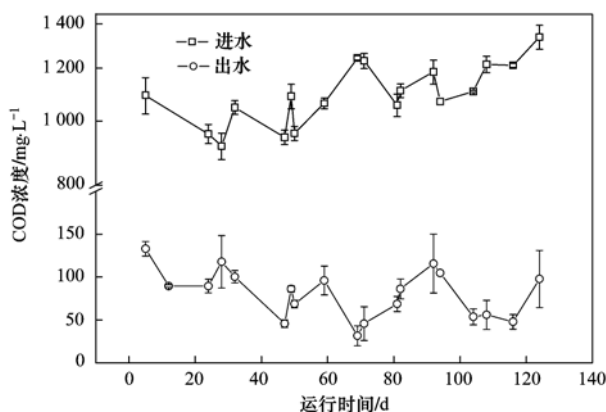


图 7 进出水中 COD 的变化

Fig. 7 Variation of COD in the influent and effluent

从图 6 和图 7 数据中可以看出,该新型反应器系统出水长期较为稳定, COD 平均去除率达 92%, 氨氮平均去除率达 60%。其中, COD 的去除率从启动开始没有明显的变化,但氮的形态随着培养时间的延长以及颗粒的不断形成存在着微小的变化。

在系统启动到颗粒形成的 20 d 里,污泥处在驯化培养期,由于接种污泥具有良好的硝化能力,出水硝氮浓度较高,不存在亚硝氮积累,氨氮转化率较高;但随着培养时间的延长,由于高的进水氨氮负荷,好氧缺氧的相互交替,以及 9 月启动室温培养所提供的高反应温度($30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$)等因素,导致硝化细菌不断被洗出,系统在运行 20 d 后出水中硝氮消失,开始出现亚硝氮的积累。从上述数据可以看出,亚硝氮的积累对氨氮的转化存在抑制作用,导致氨氮转化率不断降低最后维持在 60% 左右;随着系统的进一步运行,由于氨氧化细菌不断增长以及温度原因,运行到 120 d,系统氨氮转化率及出水亚

硝氮浓度略有变化,但变化不大,系统出水水质维持稳定。

3 结论

(1) 新型反应器可以成功培养出颗粒污泥,并且颗粒化进程缓慢,形成颗粒圆度高,表面光滑没有丝状菌生长。

(2) 新型反应器中旋流器的添加所提供的专有排泥工艺,有效保证了反应器内颗粒污泥有选择性的排除,使粒径和密度在长期的运行过程中都维持在一个合理的范围内,进而有利于颗粒污泥粒径和密度的控制。

(3) 新型反应器培养的颗粒污泥相比传统的颗粒污泥在动力学参数上有较大变化。动力学参数表征了新型反应器形成的颗粒污泥系统相比传统的颗粒污泥系统是一个极度慢速的污泥生长系统,同时新型反应器使得颗粒污泥对 COD 的降解途径上也发生了较大的改变,扩大了用于维持微生物新陈代谢所消耗 COD 的比例,从污泥本身的特性上控制住粒径的不稳定增长。

(4) 新型反应器能够保证良好的出水水质并维持水质长期的稳定。

参考文献:

- [1] 李志华, 刘芳, 王晓昌. 影响微生物聚集体的聚集度的因素分析 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(3): 456-462.
- [2] 张丽丽, 陈效, 陈建孟, 等. 胞外多聚物在好氧颗粒污泥形成中的作用机制 [J]. 环境科学, 2007, 28(4): 795-799.
- [3] 王建龙, 张子健, 吴伟伟. 好氧颗粒污泥的研究进展 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 449-473.
- [4] Lee D J, Chen Y Y, Show K Y, et al. Advances in aerobic granule formation and granule stability in the course of storage and reactor operation [J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(6): 919-934.
- [5] 周健, 龙腾锐, 苗利利. 胞外聚合物 EPS 对活性污泥沉降性能的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 613-618.
- [6] Tian Y, Zheng L, Sun D Z. Functions and behaviors of activated sludge extracellular polymeric substances (EPS): a promising environmental interest [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(3): 420-427.
- [7] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review [J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(6): 882-894.
- [8] Xu H C, He P J, Wang G Z, et al. Enhanced storage stability of aerobic granules seeded with pellets [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(21): 8031-8037.
- [9] Liu Y, Yang S F, Tay J H. Improved stability of aerobic granules by selecting slow-growing nitrifying bacteria [J]. Journal of

- Biotechnology, 2004, **108**(2): 161-169.
- [10] Lee D J, Chen Y Y, Show K Y, *et al.* Advances in aerobic granule formation and granule stability in the course of storage and reactor operation [J]. Biotechnology Advances, 2010, **28**(6): 919-934.
- [11] 蒋明虎, 蒋巍, 张国云, 等. 细颗粒分离水力旋流器的结构设计及试验 [J]. 大庆石油学院学报, 2005, **29**(1): 58-60.
- [12] 孙肇淑, 胡岳华. 旋流器参数的合理选择 [J]. 矿冶工程, 2003, **23**(6): 38-40.
- [13] 庞学诗. 水力旋流器工艺计算 [M]. 北京: 中国石化出版社, 1997.
- [14] Etterer T, Wilderer P A. Generation and properties of aerobic granular sludge [J]. Water Science and Technology, 2001, **43**(3): 19-26.
- [15] Van Bodegom P. Microbial maintenance: a critical review on its quantification [J]. Microbial Ecology, 2007, **53**(4): 513-523.
- [16] IWA. IWA task group on mathematical modeling for design and operation of biological wastewater treatment, activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d, and ASM3 [R]. London: IWA, 2000.
- [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] 赵庆国, 张明贤. 水力旋流器分离技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [19] 游桂林, 樊杰. 呼吸计量法测定安庆市城东污水厂污泥特性参数 [J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(7): 144-147.
- [20] Petersen B, Vanrolleghem P A, Gernaey K, *et al.* Evaluation of an ASM1 model calibration procedure on a municipal-industrial wastewater treatment plant [J]. Journal of Hydroinformatics, 2002, **4**: 15-38.
- [21] 刘芳, 周雪飞, 蓝梅, 等. 活性污泥 1 号模型废水特性的测定研究 [J]. 环境污染与防治, 2004, **26**(2): 92-94.
- [22] 刘芳, 顾国维. ASM1 模型中主要动力学参数的测定方法 [J]. 中国给水排水, 2004, **20**(2): 37-40.
- [23] De Kreuk M K, Van Loosdrecht M C M. Selection of slow growing organisms as a means for improving aerobic granular sludge stability [J]. Water Science and Technology, 2004, **49**(11-12): 9-17.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cai, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 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. 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人