

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM _{2.5}	郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小文(817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究	林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷(826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析	浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔(835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析	路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明(842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量	何真, 陆小兰, 杨桂朋(849)
2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化	李绪录, 周毅频, 夏华永(857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析	周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文(864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化	王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼(874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选	徐华山, 徐宗学, 刘品(882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法	邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成(892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献	罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙(900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影(907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究	李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍(914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究	李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽(919)
城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险	温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲(927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价	孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华(933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究	李伟, 赵晶, 余健, 任文辉(943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究	范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军(950)
γ -Al ₂ O ₃ 负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究	岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛(955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学	杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可(962)
ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究	杨波, 钟启俊, 李方, 田晴(968)
O ₃ -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律	余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军(974)
规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究	王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥(979)
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	牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹(986)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立	张超, 陈银广(993)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟	张超, 陈银广(998)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用	张超, 陈银广(1004)
三峡水库两条支流水-气界面CO ₂ 、CH ₄ 通量比较初探	李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔(1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素	陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇(1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素	周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利(1026)
层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估	姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强(1034)
海州湾潮滩重金属污染的历史记录	张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威(1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价	张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波(1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析	程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅(1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估	李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶(1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估	李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏(1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究	陈秀端, 卢新卫, 杨光(1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义	龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲(1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究	张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水(1101)
三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究	孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉(1107)
Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素	钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西(1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险	马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强(1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源	何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花(1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布	马召辉, 金军, 元学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆(1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析	刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍(1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性	谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明(1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究	牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强(1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较	崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶(1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响	刘敬勇, 孙水裕, 陈涛(1166)
铸造废砂的环境毒性研究	张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰(1174)
Cr ⁶⁺ 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征	侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强(1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析	于皓, 王爱杰, 陈川(1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响	胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明(1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应	林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲(1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究	周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明(1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究	贺桂珍, 吕永龙(1218)
《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)	

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

牛姝,段百川,张祚黧,刘士峰,张家铭,王聪,周丹丹*

(吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室,长春 130026)

摘要:在连续流气提式好氧颗粒污泥流化床(CAFB)反应器中,以低浓度的城市污水作为营养基质,絮状污泥作为接种污泥,采用逐级递增负荷的运行方式培养好氧颗粒污泥.研究了CAFB中颗粒污泥的形成过程、颗粒性质和污泥中生物多样性.结果表明,CAFB反应器启动的第6 d即有大量颗粒污泥形成,颗粒直径 $800 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$. CAFB运行12 d后,污泥浓度MLSS达到 $6\,000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,SVI值稳定在 $35\ \text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右,胞外聚合物的质量分数与接种前相比有了较大的增长,并具有丰富的生物相和较高的生物量,各项运行指标基本趋于稳定.扫描电镜观察颗粒污泥主要由球菌和杆菌组成,颗粒中含有大量的孔隙和通道.装置稳定运行后,对COD的去除率保持在70%~75%,出水COD的浓度维持在 $70\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.在装置运行32 d后,丝状菌大量繁殖,发生污泥膨胀.可见,在CAFB中可以快速形成好氧颗粒污泥,且对污染物具有良好的去除效果,但其运行稳定性还有待深入研究.

关键词:城市污水;颗粒化;好氧颗粒污泥;连续流;流化床

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2013)03-0986-07

Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow

NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, LIU Shi-feng, ZHANG Jia-ming, WANG Cong, ZHOU Dan-dan

(Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: The aerobic granular sludge was cultivated successfully in a continuous-flow airlift aerobic granular sludge fluidized bed (CAFB), with low-concentration municipal sewage as the influent and flocculent activated sludge as the seeding sludge. The formation, characteristics and the biological diversity of the aerobic granules in the CAFB were investigated and analyzed. Experimental results showed that many dense and compact granules with diameter of $800\sim 1\,000\ \mu\text{m}$ were formed as early as the 6th days operation. At the start-up stage, sludge volume index (SVI) decreased to $35\ \text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, the mixed liquor suspended solid (MLSS) concentration increased to $6\,000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and the mass fraction of extracellular polymeric substances increased significantly. The granules presented a good biological diversity and high biomass contents at the steady running stage. The aerobic granules were basically composed of coccid and bacillus as observed by the scanning electron microscope. A large number of voids and channels were found to be located on the surface of the granules. The removal rate of COD maintained at 70%-75% at the steady stage of CAFB running, and the effluent COD concentrations were $70\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. At the 32nd day of operation, filamentous bacteria grew apparently and sludge bulking happened. Above results showed the CAFB aerobic granules formed rapidly, and performed a good ability on the pollutant removal. However, more work is necessary on the steady running of this novel bioreactor in the future.

Key words: municipal sewage; granulation; aerobic granular sludge; continuous flow; fluidized bed

好氧颗粒污泥具有结构密实、沉降性能优异、生物密度高和较好的耐毒性.好氧颗粒污泥技术是一项具有较好应用前景的污水处理新技术^[1].据报道,水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)、选择压、废水组分、溶解氧(dissolved oxygen, DO)和流体剪切力等都对好氧颗粒污泥的形成有重要影响^[2].其中,流体剪切力对颗粒的形成速度、结构和稳定性影响显著,被认为是颗粒污泥形成最关键的影响因素之一^[3].

目前关于好氧颗粒污泥的研究和应用多是在序批式活性污泥反应器(sequencing batch reactor,

SBR)中开展的^[4,5].在SBR中所开展的大部分研究主要采用中、高有机物浓度的人工配水作为处理对象^[6,7],而对低有机物浓度的城市污水研究甚少.Ni等^[8]的研究结果表明以低浓度城市污水($\text{COD} < 200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)作为处理对象,在SBR反应器中进行好氧颗粒污泥培养时,在运行到第80 d才观察到直径为 $80\ \mu\text{m}$ 的颗粒污泥,颗粒形成速度明显较以人

收稿日期:2012-05-17;修订日期:2012-08-16

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:牛姝(1987~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境生物技术,E-mail:niushu@jlu.edu.cn

* 通讯联系人,E-mail:zhouddan415@163.com

工配水为处理对象时低. Moy 等^[9]的研究表明, 底物中的低有机物浓度是阻碍颗粒形成的重要因素, 也是好氧颗粒污泥处理污水技术推广应用的瓶颈问题. 值得关注的是, 广泛用于工业废水处理的厌氧颗粒污泥技术中, 常见的升流式厌氧污泥床 (up-flow anaerobic sludge blanket, UASB) 是连续流的生物反应器^[10], 并且好氧颗粒污泥最初也是在升流式好氧污泥床 (aerobic up-flow sludge blanket, AUSB) 中发现的^[11]. 近年来, 已有少量研究探讨了连续流好氧颗粒污泥反应器的设计, 但其结构和运行都非常复杂^[12,13], 难应用于实际工程. 和 UASB 一样结构简单, 且能实现好氧颗粒污泥连续流运行的工艺还鲜见报道.

本研究基于连续流气提式流化床 (continuous airlift fluidized bed, CAFB), 以较低有机物浓度的城市污水作为营养基质, 采用连续递增负荷的运行方式, 在连续流态下培养好氧颗粒污泥. CAFB 反应器中基本不存在 SBR 反应器中影响好氧颗粒污泥形成的一些关键条件, 包括选择压、污染物浓度变化周期和循环时间等, 而是以持续的液相剪切力代替 SBR 反应器中的气相剪切力强化颗粒快速聚集. 本研究着重探讨了 CAFB 中絮状污泥颗粒化过程、颗粒性质和除污染行为, 以期为连续流好氧颗粒污泥技术应用于实际工程奠定理论基础.

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示. CAFB 由有机玻璃柱构成, 总高 1 450 mm, 有效容积 5.6 L. 该反应器由 3 部分组成: 升流区 I (内径 60 mm, 高 1 350 mm), 底部安装直径为 60 mm 的微孔曝气盘向反应器供氧, 混合液呈上向流; 降流区 II (内径 100 mm, 高 1 200 mm), 泥水混合液呈下向流, 并在底部回流至升流区; 三相分离区 III (直径 280 mm, 高 25 mm), 泥、水、气在此发生分离, 气体溢出装置, 污泥沉降至降流区, 上清液由出水口排出. 由于气体密度小, 且占据了 CAFB 反应器升流区域的部分空间, 使床体内外环形成压力差, 导致泥水混合液在床体内部发生内循环. CAFB 是以提供液相剪切力为促进污泥聚集的主要手段^[14]、以实现颗粒污泥工艺连续运行为目的的新型好氧颗粒污泥生物反应器, 目前对其运行特征及控制策略的研究仍处于初步阶段, 相关研究鲜见报道.

1.2 原水及种泥

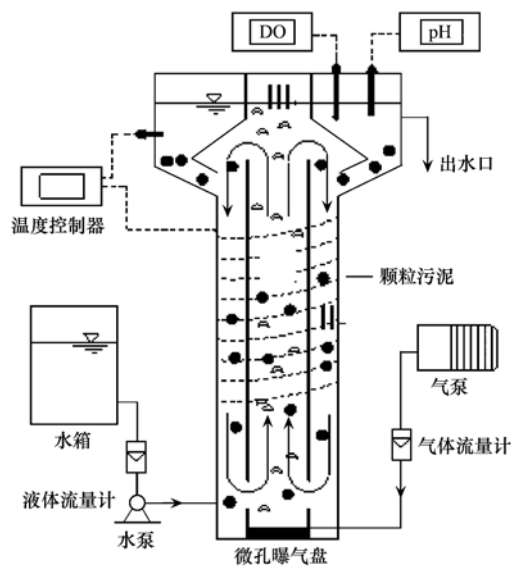


图 1 连续流气提式好氧颗粒污泥流化床装置

Fig. 1 Schematic diagram of continuous airlift aerobic granular fluidized bed

原水取自长春市天嘉污水处理厂未经预处理的城市污水. 实验阶段原水的 COD 为 $180 \sim 350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 接种污泥取自长春市第二污水处理厂的回流污泥. 由于取泥时间在冬季 (室外温度低于 -10°C), 污泥活性较差, 呈深棕色絮体, 结构松散, 污泥面积当量直径为 $80 \mu\text{m}$ 左右, 混合液中未见原后生动物. 接种后装置内混合液中污泥浓度 (mixed liquor suspended solids, MLSS) 为 $3\,850 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 污泥指数 (sludge volume index, SVI) 为 $65 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$.

1.3 控制指标与运行参数

实验过程中用 NaHCO_3 调节 pH 为 7 ± 1 , 用 NH_4Cl 和 K_2HPO_4 调节氮磷浓度, 控制 COD/N/P 为 100/10/2. 表面气速 (superficial up-flow air velocity, SUVA) 通过气体流量调节阀控制在 $16 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. 进水有机物负荷初始时为 $1.6 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 采用连续递增负荷的运行方式, 最终保持在 $4.8 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右. 有机负荷的控制通过进水有机物浓度和进水流量控制. 在 CAFB 运行稳定阶段, 典型进水流量为 $2.8 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, 此时水力停留时间 (HRT) 为 2 h. 应该指出的是由于原水为市政污水, 因此每天的进水水质有一定的波动. 每天取水后都及时测量 COD 浓度, 结合设计的进水负荷调节进水流量. 反应器内溶解氧浓度 (DO) 的平均值为 $(3.5 \pm 0.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. CAFB 运行温度为室温 (20 ± 1) $^\circ\text{C}$.

1.4 分析项目与检测方法

COD、MLSS 和 SVI 的分析方法均采用美国

APHA 标准方法^[15]. 好氧颗粒胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 的提取采用甲醛-氢氧化钠法^[16]. 多聚糖 (polysaccharides, PS) 测定采用蒽酮-硫酸法^[17], 蛋白质 (protein, PN) 的测定采用 Folin-酚法^[18]. 微生物相及颗粒污泥形态采用配备 Pro-micro Scan 数码摄像系统的光学显微镜观察.

1.5 扫描电镜预处理

扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 用来进行颗粒表面和内部微生物结构的观察, 对于颗粒内部的观察采取冷冻切片法 (Leica, CM1900, 德国) 切片法 (厚度在 200 μm). 然后对需要进行扫描电镜观察的污泥样品预处理. 具体方法如下: 用 Tissue-Tek O. C. T. (Sakura, USA) 包埋剂对缓冲液多次淋洗后颗粒污泥样品进行包埋, -20°C 冷冻过夜保存. 将包埋后的样品置于冰冻切片机上, 对样品进行迅速切割, 用包被有多聚赖氨酸的载玻片进行切片收集, 然后对该切片样品进行一系列的扫描电镜预处理: ① 2.5% 戊二醛固定 30 min; ② 25% 蔗糖沉淀; ③ 冷冻切片法切片; ④ 蒸馏水漂洗; ⑤ 1% 锇酸固定 4°C 、30 min; ⑥ 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ PBS 漂洗 2 次, 每次 10 min; ⑦ 梯度脱水: 50%、70%、80%、90% 乙醇依次梯度脱水 1 次及 100% 乙醇脱水 2 次, 每次 10 min; ⑧ 叔丁醇置换一次; ⑨ 浸透在叔丁醇中, -20°C 过夜; ⑩ 冷冻干燥仪干燥 (HITACHI, ES-2030), 离子溅射仪喷金镀膜 (HITACHI, E-1010).

2 结果与讨论

2.1 CAFB 对污染物的去除效果

CAFB 反应器进出水 COD 浓度及其去除率的变化情况如图 2 所示. 实验采取连续递增负荷的运行方式, 由开始时 $1.6 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 增加到第 14 d 时的 $4.8 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 此后进水负荷保持在 $4.8 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 左右. 在装置启动阶段, 为了保证较低的进水负荷, 并维持进水流量在 $2.8 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右, 对原水进行了适当的稀释. 在颗粒形成期, COD 的去除率较低, 但 COD 的去除率呈递增趋势. 待颗粒形成后, 对 COD 的去除率维持在 70% ~ 75% 之间, 出水 COD 平均保持在 $70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 部分天数出水在 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 可见, 在 CAFB 中好氧颗粒污泥对城市污水具有较高的代谢活性. 尽管有机负荷在启动期有较大的变化, 但是反应器在颗粒形成后对 COD 去除率基本上保持不变. 这是因为为了保

证 CAFB 中充足的水力停留时间, 设计的进水流量与反应器体积相比非常小, 可以将 CAFB 看成一个完全混合式的反应器. CAFB 稳定的出水水质和优异的抗冲击负荷能力正是完全混合式反应器的特征. 例如, CAFB 有效体积为 5.6 L, 为了保证水力停留时间为 2 h, 典型的进水流量仅为 $2.8 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$.

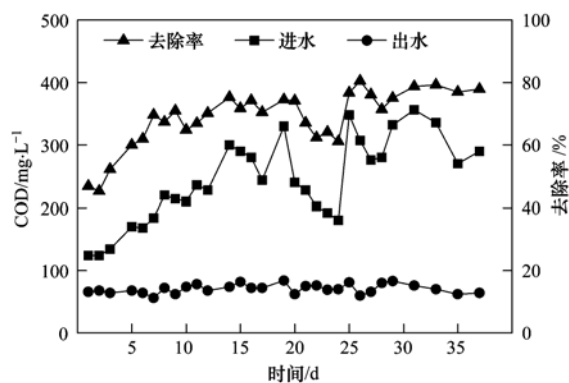


图2 CAFB 反应器对 COD 的去除效率

Fig. 2 COD removal efficiency of CAFB

2.2 好氧颗粒污泥的形成过程及机制分析

2.2.1 颗粒污泥形成过程

采用光学显微镜对颗粒污泥的形成及演化过程进行监测. 接种的污泥呈棕黑色, 絮体结构松散, 外形不规则, 平均粒径为 80 μm 左右, 沉降性能差, 如图 3(a) 所示. 反应器运行到第 2 d, 即可观察到少量细小颗粒物, 颗粒物成大小不一的棒状、椭球状, 絮体之间相互黏连. 反应器运行到第 3 d, 形成大量的细小颗粒污泥, 颗粒结构密实, 颜色变浅, 颗粒表面附着有丝状菌, 颗粒之间相互聚集在一起, 如图 3(b) 所示. 反应器运行到第 4 d, 肉眼可观察到尺寸为 200 ~ 300 μm 乳白色的颗粒污泥, 中心结构密实近似圆形, 边缘较松散, 外形不规则. 反应器运行到第 5 d, 颗粒的直径继续变大, 颗粒污泥形态趋于规则, 颗粒数量明显增加. 反应器运行到 6 d, 多数颗粒直径达到 600 ~ 800 μm , 颗粒表面光滑, 结构密实, 大部分呈椭圆形, 颜色也变为浅黄色, 成熟的颗粒污泥形成, 如图 3(c) 所示. 在此后一段的运行过程中, 大部分颗粒的直径仍保持在 600 ~ 800 μm , 少部分颗粒的直径有所增加, 最大达到 2 000 μm 左右. 可见, 在 CAFB 反应器中, 以低有机物浓度的城市污水作为营养基质能够快速形成好氧颗粒污泥.

采用扫描电镜对成熟颗粒的表面和内部微观结构进行观察, 如图 3(d) ~ 3(f). 可以看出, 颗粒表面主要以球菌和短杆菌组成, 其紧密地包覆在颗粒表面, 菌体间可见大量胞外多聚物. 同时, 在

成熟的颗粒中还可以观察到一定数量的孔隙和通道,以利于基质和氧气向内部传递和代谢物质的排出. 将成熟颗粒污泥在 1.5 节所描述的方法下进行切割,再置于扫描电镜下观察,发现颗粒污泥

靠近边缘处孔隙和通道明显比靠近颗粒中心区域的数量多,见图 3(e)和 3(f). 这是因为颗粒表层需要更多空隙率为颗粒中心的细菌提供氧和营养物质的传质路径.

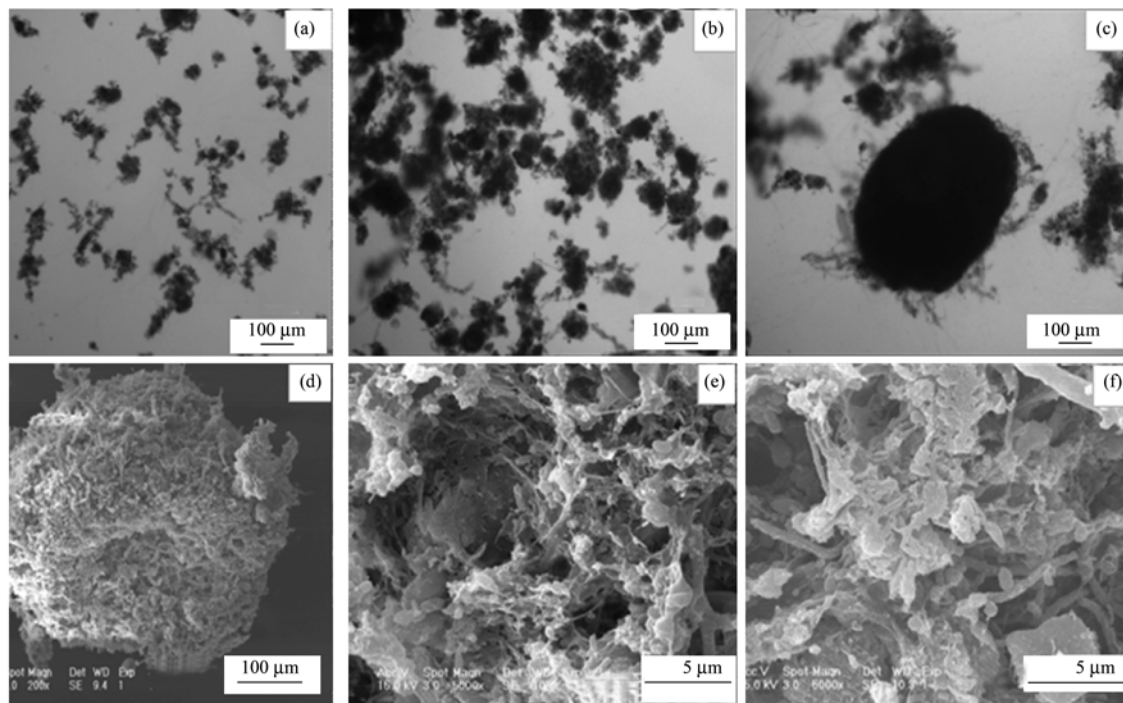


图 3 CAFB 反应器中好氧颗粒污泥的形成过程及成熟颗粒的微观特征

Fig. 3 Formation of aerobic granules and the microstructure characteristics of mature granules in the CAFB

2.2.2 颗粒形成机制分析

目前关于好氧颗粒污泥的形成影响因子多是基于 SBR 反应器开展的,主要包括表面电荷、流体力学条件、微生物表面的疏水性、进水底物种类、有机负荷、循环时间和沉降时间等. 其中,流体剪切力被认为是颗粒污泥形成的重要条件. 比如,Beun 等^[4]和 Liu 等^[19]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; Tay 等^[20]发现在 SBR 中气速为 $8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时只能观察到呈绒毛状的絮体,而将气速提高至 $12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,即可快速形成大量的颗粒污泥. 对比 SBR 好氧颗粒污泥反应器的运行工况,连续运行的 CAFB 反应器中不存在循环时间和沉降时间的控制,分析认为促进好氧颗粒污泥形成的主要因子为剪切力. 由于水的密度远大于气体密度,依据 Cher 等^[21]的流体剪切力模型可知,CAFB 反应器由于液相内循环作用施加于颗粒或絮体表面的剪切力远大于 SBR 反应器中气相施加于颗粒或絮体的剪切力. 可见,CAFB 中较强的液相剪切力促进了污泥絮体之间的相互接触和碰撞,

加速了生物絮体的凝聚,使颗粒污泥得以快速形成. 较强的剪切力也使微生物易于形成大量的多糖和蛋白质等黏性分泌物,促进了细胞间的相互聚集黏附(见 2.4 节). 另外,从颗粒污泥的内部微观结构可知[图 3(e)和 3(f)],颗粒内部的丝状菌为颗粒污泥的最初形成提供了支撑和骨架的作用. 这与 SBR 反应器中颗粒污泥形成的“丝状菌假说”有相似之处^[22].

2.3 污泥物理性质的变化

如图 4 所示,接种污泥后,CAFB 反应器中污泥的浓度 (MLSS) 为 $3850 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,污泥指数 (SVI) 为 $65 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 实验过程中,每天从位于反应器中间高度处的取样口取 500 ~ 600 mL 均质泥水混合样品进行分析和检测,不再进行额外排泥,污泥龄为 10 d 左右. 装置启动后,污泥絮体开始增长并大量聚集,污泥浓度逐渐上升,污泥指数开始下降. 装置运行到第 6 d 时,颗粒污泥已基本形成,颗粒结构密实,形态趋于稳定,此时反应器中的 MLSS 增长到 $5900 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,较接种时有了较大的增加,SVI 值下降到 $40 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,污泥的沉降性能良好,装置已完成启动

阶段,开始稳定运行.在稳定运行阶段,反应器中的 MLSS 略有增加,保持在 $6\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,SVI 保持在 $35\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右.说明在 CAFB 中,用城市污水培养的成熟颗粒污泥具有极好的沉降性能和高的生物量.装置运行到第 32 d 时,反应器中丝状菌大量繁殖,发生污泥膨胀现象,污泥的沉降性能变差,SVI 值快速上升,导致大量污泥从反应器中流失,MLSS 也逐渐下降.在装置运行到第 36 d 时,由于污泥的沉降性能仍较差,污泥浓度急剧降低,反应器停止运行.本研究对 CAFB 的运行还仅处于初步阶段.尽管当前研究结果证实 CAFB 中可以快速形成颗粒污泥,但是关于 CAFB 在设计、运行和稳定性方面的研究还亟待开展.

CAFB 为完全混合式反应器,生物反应的动力梯度较小.依据 Monod 方程,在该运行模式下易诱发生长速率缓慢的丝状菌的大量繁殖.另外,由于在 CAFB 运行后期,出水 COD 浓度稳定保持在 $60\sim 70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而 CAFB 中液相内循环流动而导致 CAFB 中 COD 浓度接近于出水浓度,过低的底物浓度使颗粒内部营养基质匮乏,易诱发丝状菌性污泥膨胀.因此,在后续研究中应注意合理控制污泥负荷和水力停留时间,抑制丝状菌的过量繁殖.

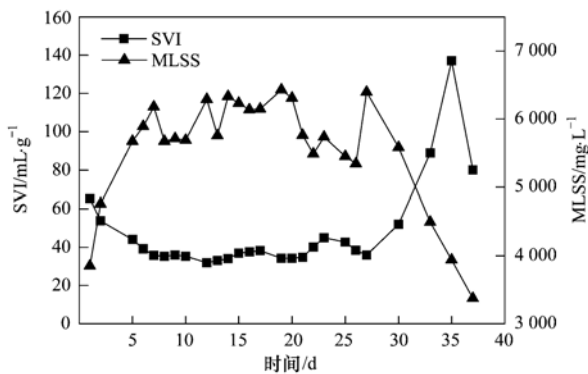


图4 CAFB 反应器运行过程中 MLSS 及 SVI 的变化

Fig. 4 Variation of SVI and MLSS during the entire operation of CAFB

2.4 污泥化学性质的变化

胞外聚合物(EPS)是在一定的环境条件下细菌通过新陈代谢分泌到细胞表面的高分子物质,其主要成分是蛋白质和多糖^[24,25]. 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 的组成对颗粒污泥形成的贡献还存在着较大的争论,尤其是多糖与蛋白质的比例问题^[26,27].

在 CAFB 中用城市污水培养的好氧颗粒污泥中 (MLSS) 多糖(PS)和蛋白质(PN)的质量分数如图 5 所示. PS 和 PN 的质量分数在初始时均较低,分别为 $10\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $20\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$.经过一段时间的稳定运行后,PS 和 PN 都大幅提高,分别为 $35\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $77\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$.均远高于 Qi 等^[23]在 SBR 反应器中测得 PS 质量分数 $7.8\sim 11.3\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 PN 质量分数 $4.1\sim 5.4\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$.可见,CAFB 中在液相循环提供的较强剪切力的作用下,可以产生大量的蛋白质和多聚糖.蛋白质的疏水特性和多聚糖的卷扫作用都为颗粒污泥的快速形成起到促进作用.在颗粒形成期,PS 的质量分数增长较快,PS/PN 由接种时的 0.49 增长到了颗粒形成时的 0.8.在颗粒形成后,PN 的质量分数大量增加,PS 则处于较稳定水平,因此 PS/PN 由 0.8 降低到 0.4.可见,PN 作为疏水性物质,增强了细胞的疏水性,有利于细菌间的粘连,对颗粒污泥的稳定性起着更大的贡献作用.

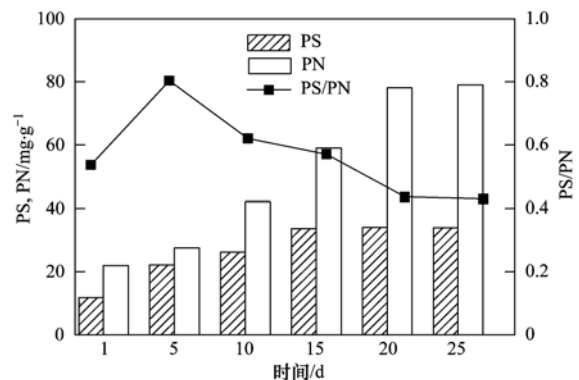


图5 CAFB 反应器运行过程中污泥中多糖与蛋白质随时间的变化

Fig. 5 Changes of polysaccharides and proteins during the entire operation of CAFB

2.5 颗粒污泥的生物相

定期取实验装置内混合液做镜检,可观察到用城市污水培养的颗粒污泥在其颗粒形成前后都具有丰富的生物相.颗粒形成初期,混合液中有大量的游泳型纤毛虫类原生动物,而且在污泥絮体之间及颗粒上附着生长着丝状菌,它为颗粒最初的形成提供了支撑和骨架的作用,使颗粒能够迅速地聚集一起.随着颗粒的形成以及微生物菌群对污水的不断适应,系统中开始出现大量原生动物,主要为变形虫、纤毛虫、累枝虫等.大量存在的原生动物吞食污水中游离的细菌和悬浮性污染物,强化有机物的分解代谢反应,提高反应器的处理能力和处理效率.此外,大量微型后生动物也开始出现,主要为轮虫类.后生动物的出现,表明了出水水质情况良好.

可见,用城市污水培养的颗粒污泥内有着丰富的微生物相、高的生物量,它们提高了反应器的处理负荷,增强了反应器的耐冲击能力,同时对颗粒形成也起重要作用。然而,在发生污泥膨胀后,系统中出现大量的丝状菌,水中的原后生动物大量减少,只有极少量的钟虫、线虫等。

3 结论

(1)在 CAFB 反应器中,采用低有机物浓度的城市生活污水培养好氧颗粒污泥,装置在运行后第 6 d 时即形成大量平均粒径为 600 ~ 800 μm 的好氧污泥颗粒。成熟的好氧颗粒污泥以杆菌和球菌为主。颗粒形成时间明显小于已报道的其他好氧颗粒污泥装置。

(2)CAFB 反应器中生物相丰富,对低浓度的城市污水中的 COD 具有良好的去除效果。在装置稳定运行后,CAFB 的出水 COD 平均值为 70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,相应的去除率为 75% 左右。

(3)CAFB 为连续流完全混合式反应器,由液相剪切力作用于污泥絮体或颗粒表面,其特殊的工况条件有利于颗粒污泥快速形成。出水水质稳定,抗冲击负荷能力强,但条件控制不当时,很容易造成丝状菌型污泥膨胀。

参考文献:

- [1] De Bruin L M M, De Kreuk M K, Van Der Roest H F, *et al.* Aerobic granular sludge technology: an alternative to activated sludge? [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **49** (11-12): 1-7.
- [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] 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.
- [4] 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.
- [5] Liu Y, Tay J H. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge [J]. *Water Research*, 2002, **36** (7): 1653-1665.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Ni B J, Xie W M, Liu S G, *et al.* Granulation of activated sludge in a pilot-scale sequencing batch reactor for the treatment of low-strength municipal wastewater [J]. *Water Research*, 2009, **43** (3): 751-761.
- [9] 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.
- [10] Tay J H, Tan Y G. Influence of substrate concentration on microbial selection and granulation during start-up of up-flow anaerobic sludge blanket reactors [J]. *Water Environmental Research*, 1996, **68** (7): 1140-1150.
- [11] Mishima K, Nakamura M. Self-immobilization of aerobic activated sludge. A pilot study of the aerobic up-flow sludge blanket process in municipal sewage treatment [J]. *Water Science and Technology*, 1991, **23** (4): 981-990.
- [12] 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 and Soil Pollution*, 2009, **9** (3-4): 213-221.
- [13] 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, 2011.5-6.
- [14] 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.
- [15] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. Baltimore: Port City Press, 1998.
- [16] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of Sludge [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **95** (3): 249-256.
- [17] Gaudy A F. Colorimetric determination of protein and carbohydrate [J]. *Water Wastes*, 1962, **7** (2): 17-22.
- [18] Frølund B, Grebe T, Nielsen P H. Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix [J]. *Applied Microbiological and Biotechnology*, 1995, **43** (2): 755-761.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Cher S H, Murayama K, Fan L S. Hydrodynamics of constrained inverse fluidization and semifluidization in a gas-liquid-solid system [J]. *Chemical Engineering Science*, 1983, **38** (8): 1167-1174.
- [22] Liu Y, Liu Q S. Causes and control of filamentous growth in aerobic granular sludge sequencing batch reactors [J]. *Biotechnology Advances*, 2006, **24** (1): 115-127.
- [23] Qi P S, Wang W B, Wang H, *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.
- [24] Horan N J, Eccles C R. Purification and characterization of extracellular polysaccharide from activated sludge [J]. Water Research, 1986, **20**(11): 1427-1432.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过20字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式, 左起顶格书写, 3级以下标题可用(1), (2)……表示, 后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.

图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.

学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在3个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市2871信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjks@rcees.ac.cn; 网址: www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> (835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> (842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> (864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> (892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland	LUO Zhuan-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> (900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> (914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> (919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> (927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> (933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> (943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> (950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> (962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> (968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> (974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> (979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> (986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> (1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> (1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> (1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> (1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> (1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> (1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> (1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang (1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> (1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> (1101)
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> (1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> (1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> (1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> (1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> (1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> (1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> (1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> (1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《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)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人