

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)

南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析 薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)

2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征 李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)

结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟 郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)

2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析 沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翡 (1662)

移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO₂ 的时空分布 李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)

秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成 刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)

连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制 窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)

我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平 于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)

巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响 马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)

京杭大运河(杭州段)典型断面水生生物多样性调查及其与水环境相关性研究 陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)

合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)

重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算 潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)

千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价 唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)

九龙江流域潜在病原菌污染分析 侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)

江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响 刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)

鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征 简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)

典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征 姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)

基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析 席庆, 李兆富, 罗川 (1773)

混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究 孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)

不同波长和强度光照对水体汞还原的影响 李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)

地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的研究 杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)

溴化铋可见光催化降解高效氯氟菊酯的研究 彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)

石墨烯磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究 常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)

电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究 卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)

典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋 甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)

颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制 何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)

石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究 周贵忠, 王兆丰, 王绚, 李文倩, 李少香 (1832)

靛基氯甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用 张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)

FePMo₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究 王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)

实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究 杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)

SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究 龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)

不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响 尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)

黄原酸化废弃污泥吸附 Cu²⁺ 研究 岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)

轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究 薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)

不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对萘的吸附性能 黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)

北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究 李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)

泰州市区重金属污染的藜袋法与路尘法评价研究 陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)

放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响 王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)

苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)

重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究 王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)

上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征 奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)

不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³C 连续标记法 谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)

污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究 郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)

石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究 李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)

大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究 虞俊超, 王宝盛, 王亚韡, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)

应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性 周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)

氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究 王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)

吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制 黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立涛, 王惜若 (1974)

牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究 焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)

针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响 杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)

城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究 王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)

铈插层黏土负载铁催化剂在 H₂S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究 孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)

脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征 祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)

固定污染源排气中 PM_{2.5} 采样方法综述 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)

产甲烷微生物研究概况 李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)

《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)

实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究

杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力

(深圳市市政设计研究院有限公司, 深圳 518029)

摘要: 采用实际城市污水在序批式反应器(SBR)中试装置中成功培养出好氧颗粒污泥. 颗粒污泥的沉降速率 $> 21 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$, 显示了良好的沉降性能. 颗粒污泥对化学需氧量(COD)、氮(N)、磷(P)具有同步去除的能力. 在 3 h 的运行周期中, 反应器出水 COD $< 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) $< 5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总氮(TN) $< 15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 对 TN 和总磷(TP)的去除率达到 50%. 采用共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)对好氧颗粒污泥的结构分析表明, 好氧颗粒污泥的胞外多聚物(EPS)在整个颗粒污泥中均匀地分布, 构成颗粒污泥的骨架. 对颗粒污泥的 X 射线衍射(XRD)分析显示, 在好氧颗粒污泥的内部存在许多无机矿物质, 在颗粒污泥形成初期, 废水中的无机成分可能具有“晶核”的作用.

关键词: 实际城市污水; 序批式反应器; 好氧颗粒污泥; COD、N、P 同步去除; 胞外多聚物; 矿物质

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1850-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.05.031

Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment

YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, DU Zhi-li

(Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518029, China)

Abstract: Microbial granules were successfully developed in a pilot-scale sequencing batch reactor (SBR) for the treatment of real municipal wastewater. The aerobic granules developed had good settleability with a settling velocity of $> 21 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$. The mature granular sludge was capable of simultaneous removal of chemical oxygen demand (COD), nitrogen (N) and phosphorus (P). With the cycle of 3 h, the effluent COD, ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) and total nitrogen (TN) concentrations were $< 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $< 5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, and $< 15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The removal efficiency for TN and total phosphorus (TP) was about 50%. Examinations by confocal laser scanning microscopy (CLSM) showed that extracellular polymeric substances (EPS) were uniformly distributed throughout the granules, forming the granule structure matrix. X-ray diffraction (XRD) analysis indicated the presence of SiO_2 and other metal oxides inside aerobic granules, implying that minerals in real wastewater might function as the seed in the initial stage of aerobic granulation.

Key words: real wastewater; sequencing batch reactor(SBR); aerobic granule; simultaneous COD, N and P removal; extracellular polymeric substances(EPS); minerals

好氧颗粒污泥是废水生物处理中的一种新技术. 与目前普遍使用的活性污泥法中的活性污泥絮体相比, 好氧颗粒污泥优势在于活性污泥絮体在一定条件下生长成为颗粒, 在水中沉降速度远大于活性污泥絮体, 因此, 采用好氧颗粒污泥处理废水, 曝气池中生物浓度可大大提高, 沉淀时间则可大大缩短^[1-10]. 普通活性污泥法曝气池中活性污泥浓度约为 $3\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 沉淀时间 30 min 到 2 h. 而采用好氧颗粒污泥技术, 曝气池中污泥浓度可达 $10\ 000 \sim 14\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 沉淀时间只需 1 ~ 3 min^[11-16]. 与普遍应用于处理高浓度废水及难降解废水的厌氧颗粒污泥相比, 好氧颗粒污泥的培养时间约为 1 个星期到 1 个月, 远小于厌氧颗粒污泥启动时间 6 个月^[17]. 因此, 好氧颗粒污泥技术有望为当今污水生物处理技术带来突破性的进展.

但是, 有关好氧污泥颗粒化的研究时间尚短, 人

们对好氧颗粒污泥的形成过程、形成机制、各种环境因素对好氧颗粒污泥的影响及颗粒污泥微生物学等, 还缺乏深入的研究. 另外, 有关好氧颗粒污泥的研究中, 大部分是在实验室规模下、采用较高有机物浓度的人工配水(如葡萄糖等)作为基质, 较少利用低有机物浓度的城镇生活废水培养好氧颗粒污泥. 另一方面, 城镇生活废水中含有各类污染物, COD 含量较低, 通常小于 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 目前这类废水的处理多采用传统活性污泥法, 废水的处理效果较好, 但传统活性污泥法处理系统普遍占地面积大, 建设成本高, 剩余污泥量大, 运行费用高, 而且容易发生污泥膨胀.

收稿日期: 2013-09-03; 修订日期: 2013-12-13

基金项目: 深圳市科技研发资金基础研究杰青项目 (JC201005310700A)

作者简介: 杨淑芳(1972~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为水处理, E-mail: yangsf@szmedi.com.cn

本研究建立中试试验装置,利用实际城市污水培养好氧颗粒污泥,并采用共聚焦激光扫描显微镜、X射线衍射等现代分析手段研究所培养颗粒污泥的特性,以期为好氧颗粒污泥技术的实际应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验装置

中试试验采用圆柱型 SBR 反应器,上半部材质为有机玻璃,下半部材质为钢,内部刷漆防腐。反应器内径为 1 m,有效高度为 4.5 m,有效容积均为 3.5 m³。采用空气压缩机供气,通过流量计控制曝气量,曝气量为 12.5 m³·h⁻¹,反应器内表面气体流速为 0.44 cm·s⁻¹。反应器内表面气体流速定义如下:

$$\text{反应器内表面气体流速}(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}) = \frac{\text{反应器内的气体流量}(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})}{\text{反应器的截面积}(\text{m}^2)} \times 100$$

试验装置见图 1。SBR 单周期循环时间为 180 min,其中进水 8 min,曝气 160 min,沉淀 6 min,出水 6 min;整个运行程序利用微电脑时控开关控制。人工模拟废水由计量泵从反应器上部泵入反应器内,出水从反应器中间的排水口排出,排水比为 50%。在 3 h 的循环周期中,反应器中的 DO 浓度始终保持在 2 mg·L⁻¹以上。

1.2 接种污泥与培养

接种污泥为实际污水处理厂二沉池回流污泥。

表 2 进水水质

Table 2 Physicochemical characteristics of the real wastewater

COD/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	SS/mg·L ⁻¹	pH
100~450	20~30	20~35	1.5~5.0	100~150	6.5~7.5

1.3 分析方法

(1) 常规分析

COD、NH₄⁺-N 采用快速密闭分光光度法,NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TP、混合液悬浮固体浓度(mixed liquor suspended solid, MLSS)、混合液挥发性悬浮固体浓度(mixed liquor volatile suspended solid, MLVSS),出水悬浮物(suspended solid, SS)浓度均采用标准方法^[18]测定。采用 Olympus CX31 光学显微镜和配套的 Olympus 数码相机进行图像采集。

(2) CLSM 分析

冷冻切片:将反应器中的好氧颗粒污泥取出,用 PBS 清洗,置于冷冻介质 Tissue-Tek OCT (Miles, Elkhart, IN)中,-40℃冷冻一夜。将冷冻的颗粒污

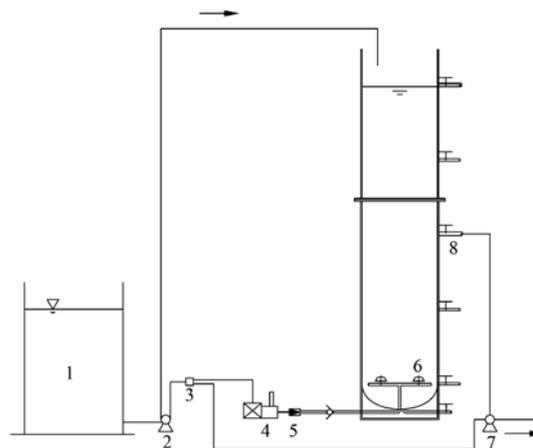


图 1 中试装置示意
1. 原水池; 2. 进水泵; 3. 微电脑时间控制器; 4. 空气压缩机;
5. 空气流量计; 6. 曝气头; 7. 出水泵; 8. 排水口

图 1 中试装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the pilot-scale SBR reactor

泥呈黄色松散絮状结构,性质见表 1。取种泥曝气 24 h 后,沉淀 30 min,排出上清液,使接种污泥量为总体积的 50%,再注入培养污水至正常水位。接种后,反应器内污泥浓度约为 3 000 mg·L⁻¹。

试验用水采用污水厂实际城市污水,进水水质如表 2。

表 1 接种污泥的性质

Table 1 Characteristics of the seed sludge

TS/mg·L ⁻¹	VSS/SS/%	平均粒径/μm
4 581	47.46	90

泥在旋转冷冻切片仪 (CM 1510-Cryostat, Leica, Germany) 上切成 50 μm 厚度的切片^[19]。

CLSM 分析:采用核酸染料 SYTO9 (25 mmol·L⁻¹, Molecular Probe, Eugene, OR) 对切片中的细菌进行染色,采用凝集素荧光染色剂 ConA-TRITC (250 mg·L⁻¹, Sigma) 对切片中的 EPS 进行染色。染色 20 min 后,用 PBS 清洗切片样品。将清洗后的染色切片样品置于共聚焦激光扫描显微镜 (CLSM, LSM 5 Pascal, Zeiss, Jena, Germany) 下观察^[19, 20]。

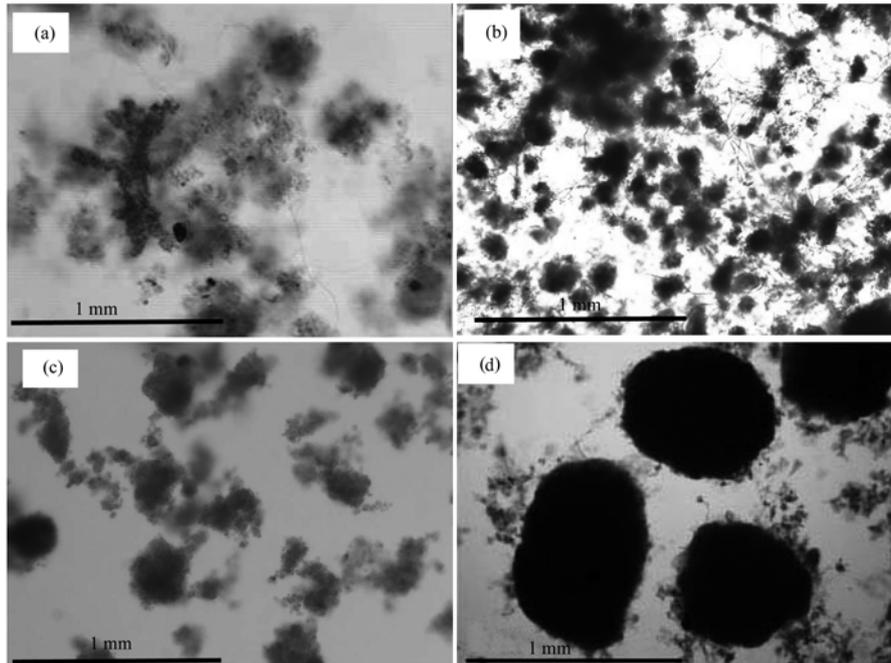
(3) 好氧颗粒污泥无机物组成分析

采用 X 射线衍射 (XRD) 分析仪分析好氧颗粒污泥中无机物的组成。具体方法为:先将样品在 550℃ 灼烧 30 min 以上,冷却,干燥,然后将样品研磨成粉末,利

用 Bruker D8 Advance X-ray powder diffractometer 采集图谱(Cu-K α 射线, LynxEye 检测器, 光管电压 40 kV, 电流 40 mA, 2θ 测角范围 $10^\circ \sim 80^\circ$, 步长 0.02° , 扫描速度为 $0.3 \text{ s}\cdot\text{步}^{-1}$), Eva XRD Pattern Processing software (Bruker Co. Ltd.) 进行数据分析.

2 结果与分析

2.1 好氧颗粒污泥的形成



(a) 接种污泥; (b) 第 20 d 时反应器中的污泥; (c) 第 30 d 时反应器中的污泥; (d) 第 45 d 时反应器中的颗粒污泥

图 2 好氧颗粒污泥的形态变化

Fig. 2 Images of sludge in the granulation process

好氧颗粒污泥培养过程中, 反应器的沉降时间从 30 min 逐渐降低到 6 min. 减少沉降时间过程中, 由于过量排泥, 反应器中的污泥浓度 (MLSS) 从 $2.13 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $0.94 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 3), 接着颗粒污泥能够得到更多营养物质用于生长, 反应器内的污泥浓度随着颗粒化进程逐渐增加, MLSS 开始缓慢增加. 运行至 40 d 时, 颗粒粒径较以前增大, 基本趋于成熟. 好氧颗粒污泥粒径可达 1.0 mm 左右. 此时反应器中 MLSS 浓度在 $1.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.

污水厂的进水为河水. 第 75 d 时, 由于大量降雨, 河水中的悬浮物急剧增加, 使反应器中的 MLSS 浓度随之增加; 降雨停止后, 反应器中的 MLSS 浓度回落至正常.

2.2 对污染物的去除

中试反应器出水 SS 的浓度变化如图 4 所示. 随着运行时间增加, 中试反应器中颗粒污泥所占比

在颗粒污泥形成过程中, 用光学显微镜对反应器中颗粒污泥的形态进行了观察, 其变化如图 2 所示. 可见, 随着培养时间的进行, 分散的絮状污泥逐渐转化成为细小不规则的小颗粒, 然后慢慢长大为个体较大、形状饱满的较大颗粒, 最终形成椭圆形、边界清晰的深褐色成熟好氧颗粒污泥. 反应器中颗粒化污泥所占的比例逐渐增加, 由 40 d 时的 20% 左右逐渐增加至 100 d 时的 85% 左右.

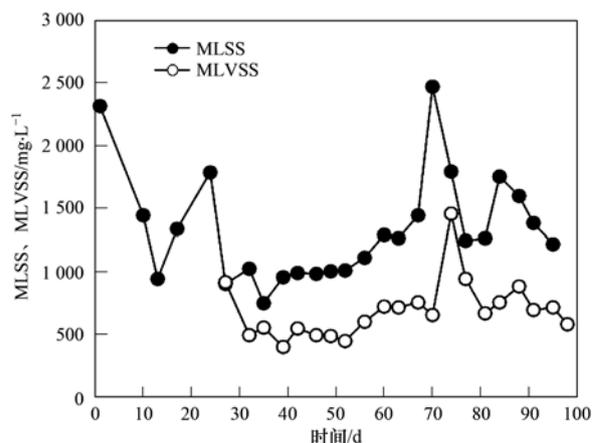


图 3 中试 SBR 反应器中 MLSS、MLVSS 随运行时间变化

Fig. 3 Variation of the MLSS and MLVSS concentrations in the pilot-scale SBR

例越来越高, 反应器出水中的 SS 浓度逐渐降低. 但是, 与污水处理厂出水一级 A 标准相比 (出水 SS <

10 mg·L⁻¹), 好氧颗粒污泥中试反应器由于沉降时间短(6 min), 导致出水 SS 仍偏高(平均为 60 mg·L⁻¹).

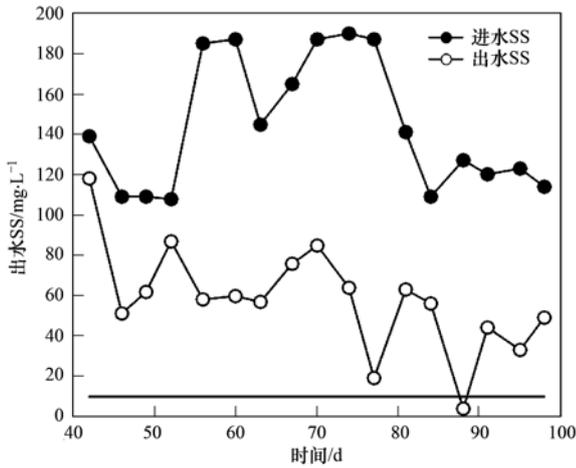


图 4 中试 SBR 反应器中出水 SS 随运行时间变化
Fig. 4 Variation of the effluent SS concentration in the pilot-scale SBR

对 COD、TN、TP 的去除结果见图 5. 反应器稳定运行后, 出水 COD 均维持在 50 mg·L⁻¹ 以下, 较好地实现了 COD 的去除; 出水 NH₄⁺-N 小于 2

mg·L⁻¹, 实现了绝大部分 NH₄⁺-N 的转化, 达到了实际污水处理厂的 NH₄⁺-N 出水指标; 随着污泥颗粒化的进行, 出水 TN 的浓度逐渐降低, 3 个月后出水 TN 小于 15 mg·L⁻¹. 出水 COD、NH₄⁺-N、TN 均达到一级 A 排放标准. 好氧颗粒污泥反应器对 TP 的去除为 50% 左右, 在系统运行的末期阶段, 出水 TP 维持在 0.57 ~ 1.09 mg·L⁻¹ 范围内.

好氧颗粒污泥反应器运行的完整周期为: 进水 8 min、曝气 160 min、沉淀 6 min、出水 6 min, 没有缺氧和厌氧阶段. 在 3 h 的循环周期中, 好氧颗粒污泥反应器稳定运行时对 TN 和 TP 的去除率均为 50% 左右. 图 5 表明, 好氧颗粒污泥反应器能够在 3 h 的周期中, 实现同步 N 的硝化和反硝化、TP 的去除. 但由于缺乏缺氧和厌氧阶段, 虽然出水 TN 和 NH₄⁺-N 达到一级 A 排放标准, 但仍可在未来的优化研究中, 在周期中增加缺氧或厌氧阶段, 进一步提高 TN、TP 去除率.

2.3 好氧颗粒污泥中细菌和 EPS 的分布

图 6 为一典型的好氧颗粒污泥表面的共聚焦激光扫描显微镜 (CLSM) 图像. 其中红色和绿色分别表示 EPS 和细菌的分布区域. 可见, 在颗粒污泥表

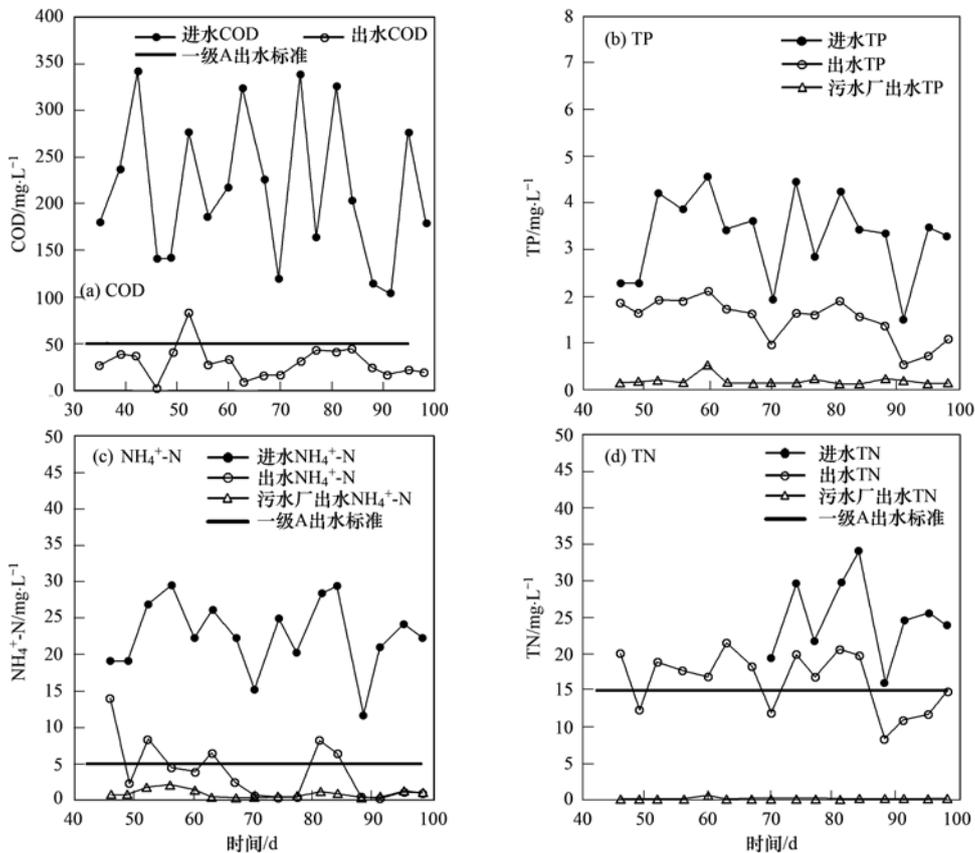
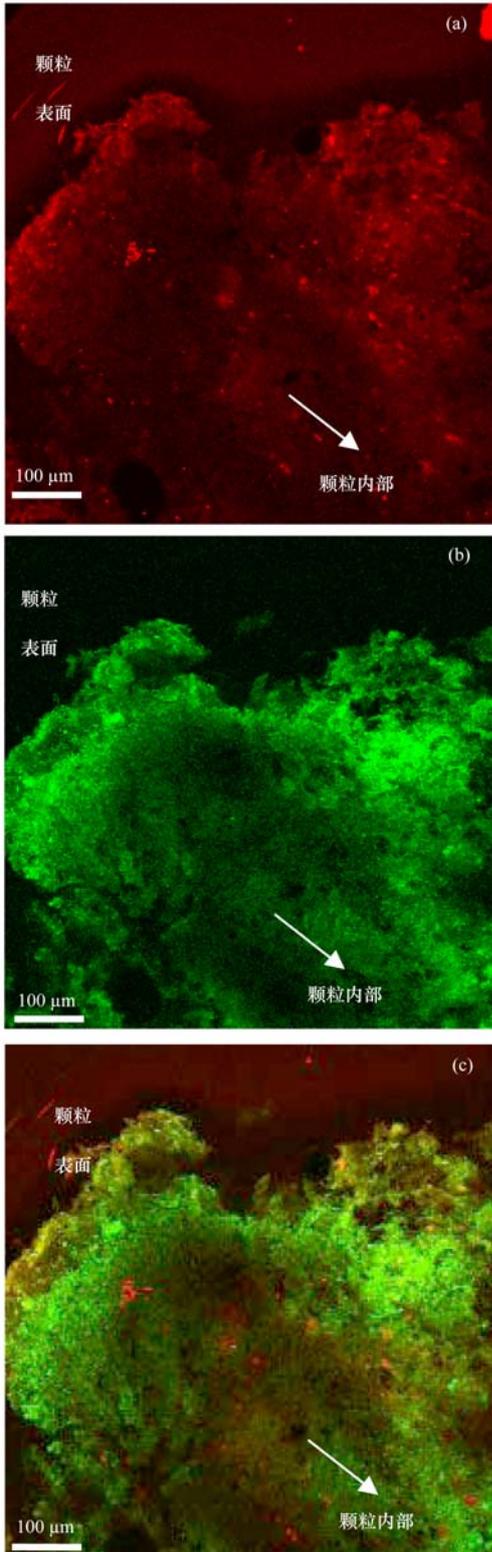


图 5 中试 SBR 反应器对 COD、N、P 的去除
Fig. 5 Performance of the pilot-scale SBR

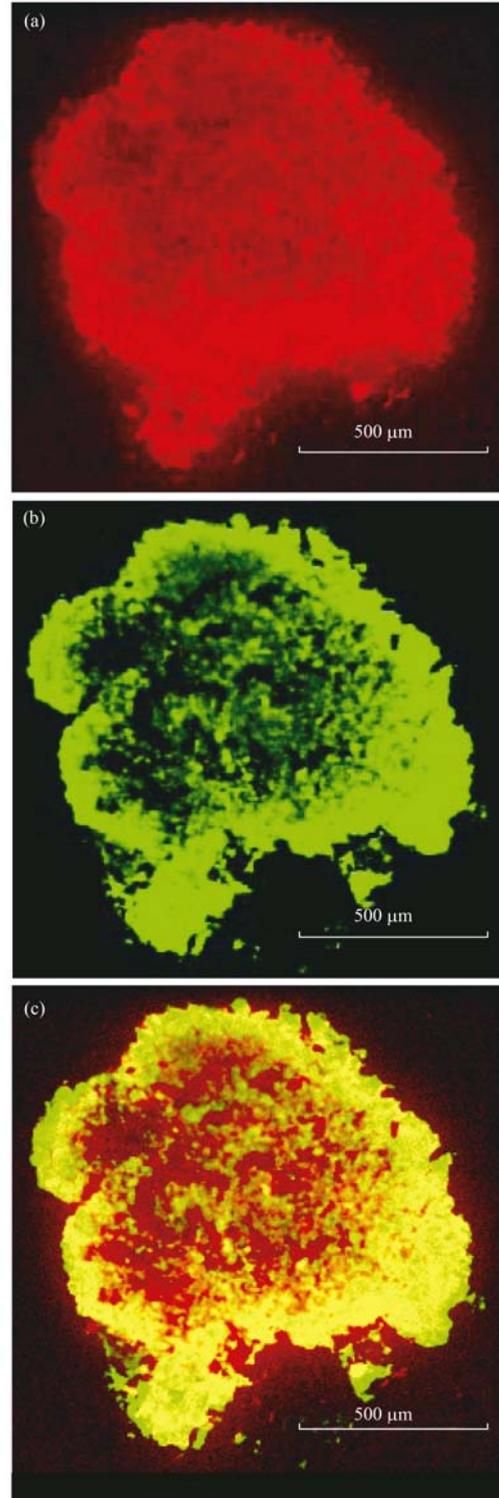


(a) EPS(红色); (b)细菌(绿色); (c)合成图像
图 6 好氧颗粒污泥表面的 CLSM 图像

Fig. 6 CLSM images of the surface of the granules

面处,细菌均匀地分布在 EPS 构成的网络结构中.

图 7 显示了好氧颗粒污泥的中心横断面上的 CLSM 图像,红色和绿色分别代表 EPS 和细菌的分



(a) EPS(红色); (b)细菌(绿色); (c)合成图像
图 7 好氧颗粒污泥中心横断面的 CLSM 图像

Fig. 7 CLSM images of the 50 μm cryosections through the centre of the granules

布区域. 可以看出,从整个好氧颗粒污泥的横断面上来看,细菌主要分布在好氧颗粒污泥表面约 50 ~ 80 μm 的区域,此后随着颗粒内部深度的增加,菌体分布逐渐越少,而 EPS 则分布在整个颗粒污泥中.

2.4 好氧颗粒污泥的无机物组成分析

图 8 为好氧颗粒污泥中物质的 XRD 图谱,通过 XRD 图谱分析可以看出,其成分比较复杂,主要成分有:SiO₂、CaSO₄、Ca(Al₂Si₂O₈)、Fe₂O₃. 其中最高波峰为 SiO₂.

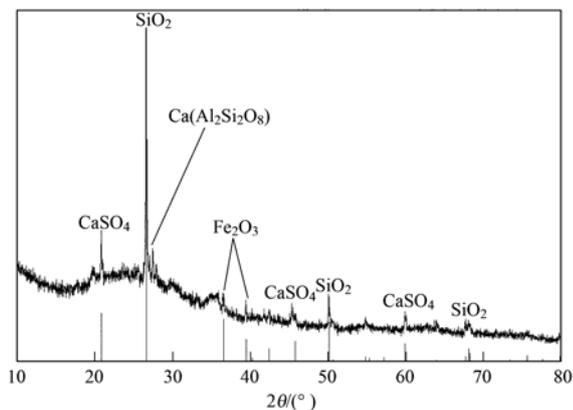


图 8 好氧颗粒污泥 XRD 图谱

Fig. 8 XRD diffractogram of the aerobic granule

3 讨论

好氧颗粒污泥培养初期,为了促进好氧颗粒污泥的产生,改变运行方式,增加曝气时间,减少沉淀时间,加大选择压,这有利于排除一些沉降速率慢的污泥. 此时,反应器内污泥的沉降性能得到了明显的改善,但是由于沉淀时间缩短,反应器的出水 SS 变大,反应器内的 MLSS 有所降低(图 3). 经过将近 20 d 的培养,反应器内都出现了好氧颗粒污泥,污泥浓度也开始逐渐增加,MLSS 维持在 1 200 mg·L⁻¹ 左右. 由于实际污水浓度较低,且其中含有 30%~40% 左右的工业废水,污泥颗粒化后,污泥浓度并没有大幅度的提高.

中试系统的接种污泥也为实际污水厂中的二沉池剩余污泥,MLVSS/MLSS 比例约为 50%,污泥活性较低,初期培养出的好氧颗粒污泥的 MLVSS/MLSS 比例也为 50% 左右,与实际污水厂活性比相当;随着运行时间的增加,MLVSS/MLSS 比例有所增加,达到 60% 以上,反映出培养的好氧颗粒污泥活性增加.

好氧颗粒污泥中试反应器由于沉降时间短(6 min),导致出水 SS 偏高(图 4). 因此在未来实际应用时,需要增加过滤工艺.

图 5 显示 50% 的 TN 得到去除,表明培养的好氧颗粒污泥具有同步硝化和反硝化的能力. 这是由于好氧颗粒污泥的多菌种结构,且基质和 O₂ 的传质

阻力随着粒径的增加而增大、大颗粒的孔隙率也随着颗粒的深度而减小,好氧颗粒污泥内部形成多种微环境,可同时满足脱氮所需的不同条件:O₂ 作为电子受体时,可进行氨氧化;NO₃⁻-N 作为电子受体时,可在缺氧区脱氮^[21, 22]. 传统活性污泥法中,通常在不同区域需要使用回流泵,因此具有同步硝化和反硝化功能的好氧颗粒污泥有望大大提高废水生物处理的效率,节省能耗.

图 5 同时显示好氧颗粒污泥反应器对 TP 的去除效率约为 50%. 好氧颗粒污泥对磷的去除主要通过聚磷菌(PAOs)厌氧释磷和好氧吸磷将磷以胞内多聚磷酸盐的方式通过排泥去除. 中试试验过程中没有进行排泥,但由于反应器沉降时间短(6 min),导致出水 SS 较高(平均为 65 mg·L⁻¹,图 4),TP 主要由出水中的 SS 带走. 另外有研究表明,好氧颗粒污泥对磷的去除除了传统的生物除磷途径外,还有一部分是由于磷在颗粒污泥内部的化学沉淀作用而被去除^[23, 24].

图 6 反映了好氧颗粒污泥表面 EPS 和细菌的分布,图 7 则显示了 EPS 和细菌在整个好氧颗粒污泥中心横断面上的分布. 可以看出,好氧颗粒污泥中 EPS 均匀分布在颗粒污泥中,而细菌则主要分布在表面 50~80 μm 处,越靠近颗粒内部,由外到内逐渐减少. 文献[25, 26]发现 EPS 中的藻多糖具有很强的凝聚能力,好氧颗粒污泥中的藻多糖通过形成具有三维空间结构的细菌藻酸盐-金属凝胶而对颗粒污泥的形成起骨架作用. 从颗粒污泥的整体结构(图 6、7)可以推断好氧颗粒污泥主要骨架结构为 EPS,各种菌群镶嵌在 EPS 组成的凝胶网状结构内.

颗粒污泥的 VSS/SS 比例为 50%~60% 左右,颗粒污泥中含有较多的无机物. XRD 图谱显示,这些无机物以 SiO₂ 为主,以及一些金属离子铁、铝、钙等. 中试试验中的实际城市污水的成分十分复杂,含有很多泥沙,还包含 30%~40% 的工业废水,这些基本在 XRD 谱图中得以体现. 一些学者^[27]曾提出颗粒污泥形成的“晶核假说”原理. 该假说认为好氧颗粒污泥的形成过程类似于结晶过程. 在晶核的基础上,好氧颗粒污泥不断发育,最终形成成熟的好氧颗粒污泥. 该原理所指的晶核一般为接种污泥中的惰性载体或无机杂质等微粒物质. 图 8 中无机晶体的存在与“晶核假说”一致,在好氧颗粒污泥形成初期,这些无机微粒提供晶核,促进了好氧颗粒污泥的形成;在颗粒污泥形成的后期,这些晶核与

EPS 一起共同维持好氧颗粒污泥结构的稳定性.

4 结论

(1)采用实际城市污水在序批式反应器(SBR)中成功培养出性能良好的好氧颗粒污泥. 培养出的好氧颗粒污泥在 3 h 的一个好氧循环周期中,反应器出水 COD < 50 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N < 5 mg·L⁻¹, TN < 15 mg·L⁻¹,对 TN 和 TP 的去除率达 50%,显现出较好的污染物去除效果.

(2)成熟的颗粒污泥对 COD 具有较强的吸附与降解性能,实现了 N 的同步硝化反硝化和 P 的去除.

(3)在好氧颗粒污泥表面处,细菌均匀分布在 EPS 构成的网络结构中;而从整个好氧颗粒污泥的三维结构看,细菌主要分布在好氧颗粒污泥表面约 50~80 μm 的区域,越往内部细菌的分布越少, EPS 则分布在整个颗粒污泥中,构成了好氧颗粒污泥的骨架.

(4)XRD 分析显示,好氧颗粒污泥中的无机物以 SiO₂ 为主,以及一些金属离子钙、铁、铝等. 这些无机微粒可能在好氧颗粒污泥形成初期为好氧颗粒污泥的形成提供晶核,促进了好氧颗粒污泥的形成,在颗粒污泥形成后期,这些晶核与 EPS 一起维持好氧颗粒污泥结构的稳定性.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Peng D, Bernet N, Delgenes J P, *et al.* Aerobic granular sludge—a case study[J]. *Water Research*, 1999, **33**(3): 890-893.
- [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] 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.
- [5] Tay J H, Yang S F, Liu Y. Hydraulic selection pressure-induced nitrifying granulation in sequencing batch reactors [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2002, **59**(2-3): 332-337.
- [6] Yang S F, Tay J H, Liu Y. Effect of substrate nitrogen/chemical oxygen demand ratio on the formation of aerobic granules [J]. *Journal of Environmental Engineering—ASCE*, 2005, **131**(1): 86-92.
- [7] 彭永臻, 吴蕾, 马勇, 等. 好氧颗粒污泥的形成机制、特性及应用研究进展[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 273-281.
- [8] 涂响, 苏本生, 孔云华, 等. 城市污水培养好氧颗粒污泥的中试研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(9): 2118-2123.
- [9] Moy B Y P, Tay J H, Toh S K, *et al.* High organic loading influences the physical characteristics of aerobic granules [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2002, **34**(6): 407-412.
- [10] Yang S F, Tay J H, Liu Y. A novel granular sludge sequencing-batch reactor for removal of organic and nitrogen from wastewater [J]. *Journal of Biotechnology*, 2003, **106**(1): 77-86.
- [11] 周曼, 杨昌柱, 濮文虹, 等. 不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 896-903.
- [12] 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): 986-991.
- [13] 汪善全, 原媛, 孔云华, 等. 好氧颗粒污泥处理高含盐废水研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 145-151.
- [14] 由阳, 彭轶, 袁志国, 等. 富含聚磷菌的好氧颗粒污泥的培养与特性[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2242-2248.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Flemming H C, Wingender J. The biofilm matrix [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, **8**(9): 623-633.
- [18] 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.
- [19] Yang S F, Li X Y, Yu H Q. Formation and characterisation of fungal and bacterial granules under different feeding alkalinity and pH conditions [J]. *Process Biochemistry*, 2008, **43**(1): 8-14.
- [20] 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.
- [21] 高景峰, 陈冉妮, 苏凯, 等. 同步脱氮除磷好氧颗粒污泥形成与反应机制的研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 1021-1029.
- [22] 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.
- [23] 郝晓地, 陈新华, 戴吉, 等. 极具工程化潜力的好氧颗粒污泥技术 [J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(8): 1-7.
- [24] Manãs A, Biscans B, Spérandio M. Biologically induced phosphorus precipitation in aerobic granular sludge process [J]. *Water Research*, 2011, **45**(12): 3776-3786.
- [25] 林跃梅, 王琳. 好氧颗粒污泥藻酸盐提取物的聚集形态研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1181-1186.
- [26] Lin Y M, Wang L, Chi Z M, *et al.* Bacterial alginate role in aerobic granular bio-particles formation and settleability improvement [J]. *Separation Science and Technology*, 2008, **43**(7): 1642-1652.
- [27] 崔成武, 纪树兰, 高景峰. 好氧颗粒污泥的形成机理 [J]. *水处理技术*, 2006, **32**(2): 13-15.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjinghu Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, Ma Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FePMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LI Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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