

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

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

|                                                                                |                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源 .....                                                      | 李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)                          |
| 河北张家口市大气污染观测研究 .....                                                           | 邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)                        |
| 大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟 .....                                                     | 黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)                             |
| 膜生物反应器处理甲苯性能及机制 .....                                                          | 叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)                   |
| 厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析 .....                                                          | 张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)                   |
| 北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究 .....                                               | 徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)                  |
| 枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价 .....                                          | 李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)           |
| 三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险 .....                                                  | 吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)                   |
| 东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征 .....                                                  | 陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586) |
| 三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征 .....                                                       | 安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)      |
| 长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价 .....                                                 | 王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)                             |
| 江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性 .....                                         | 李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)                          |
| 扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响 .....                                                  | 李大鹏, 黄勇 (2614)                                       |
| 干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用 .....                                                    | 张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)                        |
| 常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响 .....                                                 | 李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)                      |
| 温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应 .....                                                     | 周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)                                  |
| 沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征 .....                                                     | 于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)                            |
| 城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响 .....                                                   | 杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)                        |
| 基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究 .....                                         | 边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)                    |
| 基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析 .....                                   | 白凤姣, 李天宏 (2667)                                      |
| 黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应 .....                                                  | 卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)                         |
| 强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究 .....                                                       | 周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)                            |
| 九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测 .....                                       | 王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)                              |
| 布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究 .....                                                  | 孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)                             |
| 曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究 .....                                               | 彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)                                  |
| 城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析 .....                                                      | 郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)                                  |
| IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析 .....                                               | 朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)                            |
| 原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化 .....                                         | 郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)                   |
| UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果 .....                 | 李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)               |
| 蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖 .....                   | 王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)                  |
| “Fe <sup>0</sup> /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究 .....                           | 戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)                        |
| 树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色 .....                                                | 戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)                      |
| TiO <sub>2</sub> /PS/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能 ..... | 王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)                    |
| 微波加热下苯的催化氧化性能研究 .....                                                          | 张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)                        |
| 纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究 .....                                                   | 高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)                   |
| 好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述 .....                                                      | 苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)                     |
| 超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究 .....                                               | 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)              |
| 微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响 .....                                              | 宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)                                 |
| 实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化 .....                                               | 饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)                    |
| 西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态 .....                                                       | 吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)                                  |
| 典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究 .....                                                   | 尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)                   |
| 土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响 .....                                               | 胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)                             |
| 土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应 .....                                                | 张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)                              |
| 可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复 .....                                                    | 张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)                            |
| 广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究 .....                                                     | 蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)                   |
| 北京市近郊区土壤砷累积特征 .....                                                            | 戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)                            |
| 抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究 .....                                                    | 陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)                                  |
| 臭气污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响 .....                                              | 寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)                            |
| 尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响 .....                                      | 陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)                          |
| 铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究 .....                                                 | 胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)                        |
| pH 和 Ni <sup>2+</sup> 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响 .....                                     | 罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)                                   |
| 铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究 .....                                                        | 刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)                          |
| 环丙沙星在潮土中的吸附特性 .....                                                            | 崔皓, 王淑平 (2895)                                       |
| 中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究 .....                                                 | 洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)                               |
| H <sub>2</sub> S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状 .....                                       | 郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)                             |
| 《环境科学》征稿简则 (2550)      《环境科学》征订启事 (2568)      信息 (2684, 2714, 2848, 2916)      |                                                      |

# 好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述

苏馈足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺红, 沈俊

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009)

**摘要:**以序批式反应器培养的成熟好氧颗粒污泥为对象, 研究沉淀高度对颗粒数、比重、污泥浓度、粒径分布及选择系数的影响。结果表明, 随着沉淀高度的增加, 污泥浓度在沉淀时间为 30 s 时由  $0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  明显增加至  $6.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均粒径从  $450 \mu\text{m}$  增加到  $550 \mu\text{m}$ , 颗粒圆形成度增加 12.67%, 而复杂度减小 13.47%, 说明粒径较大、形状较规则的颗粒沉降较快, 从而更易在沉降选择过程中得以保留。根据选择压原理, 结合颗粒污泥沉降实验结果引入选择系数。实验和计算结果显示, 在任意沉淀高度, 选择系数随粒径和密度的增大而增加。随着沉淀高度的增加, 直径  $> 600 \sim 800 \mu\text{m}$  的颗粒选择系数增加, 小颗粒趋势与之相反, 说明增大排水比有利于大颗粒保留而絮体被筛选出反应器, 而低的排水比会使污泥颗粒化过程放缓。该研究结果可望对加速污泥颗粒化过程和提高其稳定性提供科学的理论依据和指导。

**关键词:**好氧颗粒污泥; 沉降; 粒径分布; 圆形成度; 复杂度; 选择系数

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2773-07

## Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge

SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, WANG Chang, JIN Wang-hong, SHEN Jun

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Settling process of mature aerobic granules cultivated in sequencing batch reactor was investigated in this study. With the increase of settling height, the concentration of suspended solids increased from  $0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  to  $6.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , mean size increased from  $450 \mu\text{m}$  to  $550 \mu\text{m}$  and roundness of granules increased by 12.67%. This indicated that big and regular granules have high settling velocity and can remain in the reactor after settling selection. A new parameter, selective coefficient is introduced based on the theory of selective pressure and settling experiments. Both experimental and simulated results showed that the selective coefficient increased with the increase of granule size and density, at any settling height. With the increase of settling height, selective coefficient of granules with radius above  $600 \sim 800 \mu\text{m}$  increased, while that of smaller granules decreased. At high exchange ratio, bigger granules have higher selective coefficient and can accumulate more than smaller ones. At lower exchange ratio, the granulation process will slow down. Results of this study can provide foundation and instruction for the cultivation and stability of aerobic granular sludge reactors.

**Key words:** aerobic granular sludge; settling; size distribution; roundness; complexity; selective coefficient

好氧颗粒污泥是微生物体自身聚集体, 因具有结构稳定、生物转化效率高、沉降性能好、耐冲击负荷能力强、占地面积小、产生剩余污泥量少等优点, 而成为废水处理领域的研究热点<sup>[1]</sup>。近年来, 国内外学者利用序批式反应器 (sequencing batch reactor, SBR) 对好氧颗粒污泥形成及其性能等进行了大量的研究<sup>[2~4]</sup>, 目前好氧颗粒污泥可用于脱氮除磷、处理有毒废水及工业废水等<sup>[5,6]</sup>。

研究表明, 活性污泥颗粒化可明显提高反应器内污泥的沉降性能, 实现混合液泥水快速分离, 确保好氧反应器在高水力负荷条件下仍能持留大量活性污泥, 有效提高了系统性能和稳定性<sup>[7]</sup>。而一个反应器是否能成功形成稳定的活性污泥颗粒在很大程度上依赖于合适的选择压, 包括沉淀时间、容积交换率和排放深度<sup>[8,9]</sup>。2005年 Liu 等<sup>[10]</sup>建立了好氧颗粒沉降速率与污泥体积指数、颗粒粒径和污泥浓度间的关系模型, 指出在工程设计与运行中可将沉

降速率作为污泥颗粒化的关键性参数。自 Morgenroth 等<sup>[11]</sup>首次报道在较短的 HRT 和污泥沉降时间条件下获得好氧颗粒污泥以来, 污泥沉降时间一直被认为是好氧颗粒化的一个主要选择压<sup>[12,13]</sup>。Tay 等<sup>[14]</sup>建立了颗粒污泥沉降时间与污泥体积指数 (sludge volume index, SVI)、颗粒粒径、污泥浓度间的关系模型, 可根据污泥特性的改变 (如粒径、SVI) 来调整污泥沉降时间, 从而控制好氧反应器颗粒化进程。

然而, 尽管诸多学者已经认识到沉降选择作用在好氧颗粒污泥培养过程中的关键作用<sup>[15]</sup>, 但是对于好氧颗粒污泥的沉降选择过程尚未有专门系统的实验研究, 更缺少相关的定量表达, 从而使这一关键

收稿日期: 2011-10-14; 修订日期: 2012-01-16

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07528-006-01); 国家自然科学基金项目 (50808061)

作者简介: 苏馈足 (1977~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水和污水处理理论与技术, E-mail: sukuizu@163.com

过程仅停留在定性的分析上,在实际操作中也只能凭经验确定.因此,本研究将针对这一问题,对好氧颗粒污泥的沉降选择作用进行实验分析和定量描述,以期对加速污泥颗粒化过程和提高其稳定性提供科学的理论依据和指导.

1 材料与方法

1.1 实验装置和方法

本实验采用有机玻璃制成的插板式分层沉淀测定装置<sup>[16]</sup>,柱高 1.2 m,有效高度 90 cm,直径 100 mm.该装置在不同高度上设置 10 个取样口,取样口间距 10 cm(为减少误差,从第 3 个取样口开始取样,即实际使用 8 个取样口).在该装置中加入混合液悬浮固体(mixed liquid suspended solids,MLSS)浓度为 3 g·L<sup>-1</sup>的好氧颗粒污泥,曝气使其均匀混合,在设定的沉淀时间时,推动直立连杆 7,使分隔插板 6 上的过流孔与分段板 5 上的镂空部位相贯通,重新曝气混合后,停止曝气,选择下一沉淀时间拉动直立连杆,摇动混合取样.

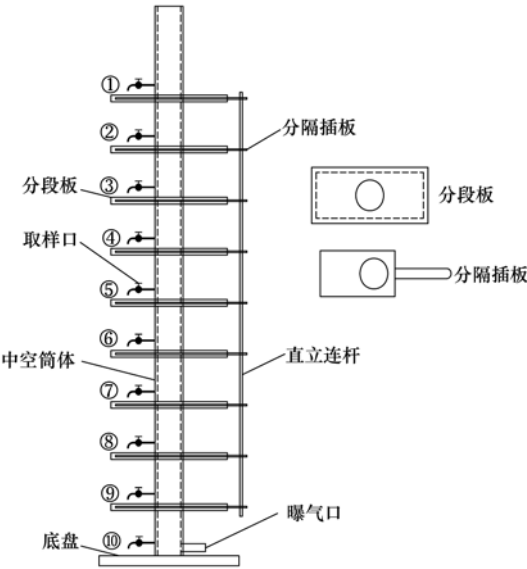


图 1 沉淀实验装置示意

Fig. 1 Schematics of the settling equipment

1.2 颗粒污泥特性

采用 SBR 反应器培养的成熟颗粒污泥,反应器内径 11.5 cm,有效高度 80 cm,总体积 8 L,排水比为 0.5.运行周期为 6 h,周期内进水时间为 5 min,曝气约 4 h,沉降 1~20 min,排水的时间 5 min,闲置 100 min.接种污泥取自合肥市某污水处理厂回流污泥.反应器在常温下运行,温度约在 15~25℃之间,进水采用人工合成有机废水,其水质如表 1 所示.

表 1 人工合成废水水质成分

| Table 1 Synthetic wastewater quality ingredients |                                      |      |                       |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------|------|-----------------------|
| 营养物                                              | 成分                                   | 对应指标 | 浓度/mg·L <sup>-1</sup> |
| 碳源                                               | 蔗糖                                   | COD  | 500~1 500             |
| 氮源                                               | NH <sub>4</sub> Cl                   | 氨氮   | 25~80                 |
| 磷源                                               | 磷酸二氢钾                                | TP   | 5~20                  |
| 常量元素                                             | CaCl <sub>2</sub>                    | —    | 20                    |
|                                                  | MgSO <sub>4</sub>                    | —    | 15                    |
|                                                  | FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O | —    | 15                    |
|                                                  | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>       | —    | 0.1                   |
| 微量元素                                             | CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O | —    | 0.1                   |
|                                                  | CuCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O | —    | 0.03                  |
|                                                  | MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O  | —    | 0.1                   |
|                                                  | NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O | —    | 0.05                  |
|                                                  | KI                                   | —    | 0.03                  |
|                                                  | AlCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O | —    | 0.05                  |
|                                                  | FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O | —    | 0.1                   |

颗粒污泥平均粒径为 540 μm,污泥形态如图 2 所示,颗粒污泥外形规则,结构密实.

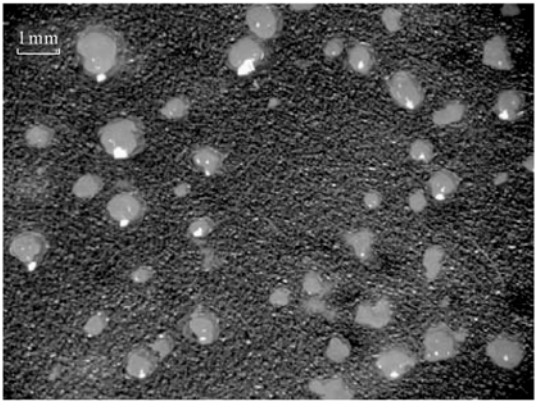


图 2 颗粒污泥形态

Fig. 2 Morphology of granular sludge

1.3 测试方法

污泥粒径分布、个数测定方法与文献<sup>[17]</sup>类似,即采用显微成像系统或体视显微镜结合数码相机 Sony DSC-HX1 拍照,样品照片采用 Motic Advanced 图像分析软件进行分析,根据分析结果即可得出颗粒的平均粒径、圆形度、复杂度等指标. MLSS 等均按标准方法测定<sup>[18]</sup>,比重测定方法见文献<sup>[2]</sup>.

2 结果与讨论

2.1 装置不同高度处颗粒数及密度变化

如图 3 所示,0 min 时由于曝气混合作用,各取样口处的颗粒密度都约为 1.055,随着实验时间的推移,不同取样口处的颗粒数和密度都随沉淀高度的降低而增大,颗粒数在 3 号取样口处为 4 000 个·L<sup>-1</sup>,10 号取样口处为 9 000 个·L<sup>-1</sup>.

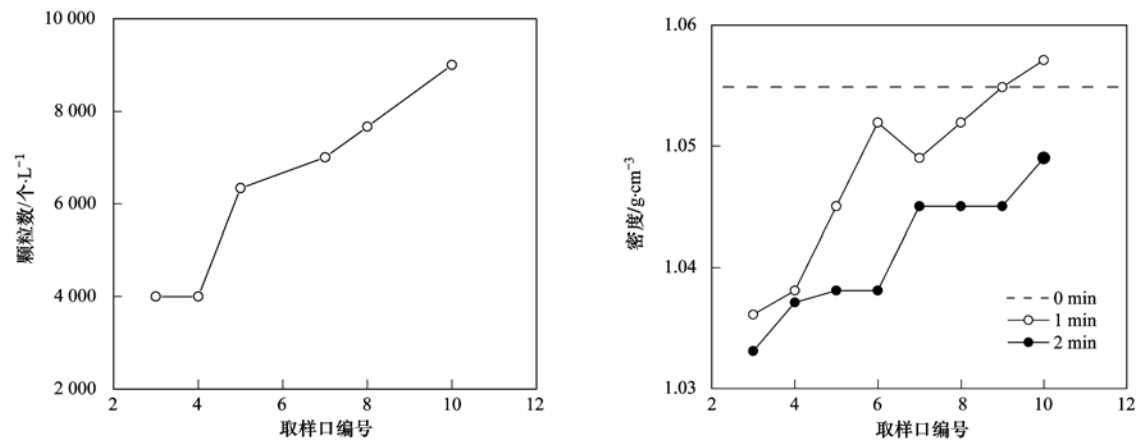


图3 不同取样口处的颗粒数及密度变化

Fig. 3 Change of granule number and specific gravity at different sampling ports

各取样口处的颗粒密度有明显增加趋势,说明下部污泥具有较大的密度和沉降速度,因而可以在沉降过程中得以保留.而3号取样口处沉降时间为2 min时颗粒的密度为 $1.033\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,低于沉降时间为1 min时的密度,说明随着时间的增长,上部悬浮颗粒密度降低,同样在10号取样口即最底端,沉降时间为2 min时的颗粒密度为 $1.049\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,也低于1 min时的 $1.057\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .分析其原因,是因为随着时间的增长,密度较小的颗粒污泥与之前沉降在底部的密度大的颗粒污泥混合后,其平均密度依然小于1 min时颗粒的密度.

2.2 不同沉淀时间下 MLSS 变化

通过对不同时刻的取样进行悬浮物浓度、粒径

等参数的测定,可以精确得到不同沉淀时间下不同高度处的悬浮物浓度的分布.为防止取样口距离太短,取样会相互影响,所以只选择2、4、6、8、10号取样口进行测定.

如图4所示,MLSS随沉淀高度的降低而增加,是因为密度较大的颗粒逐渐沉到底部,在沉降过程中,2号取样口处的MLSS由30 s时的 $0.24\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至1 min时的 $0.0425\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,说明该取样口处的大部分颗粒1 min时已经沉降到2号口以下,在4~10号取样口MLSS有明显增加,但随着时间由30 s增加至1 min时,8号口处MLSS由 $3.719\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $2.785\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,因此,在0.5~1 min的时间间隔内的大部分颗粒沉降到2~8号取样口之间.

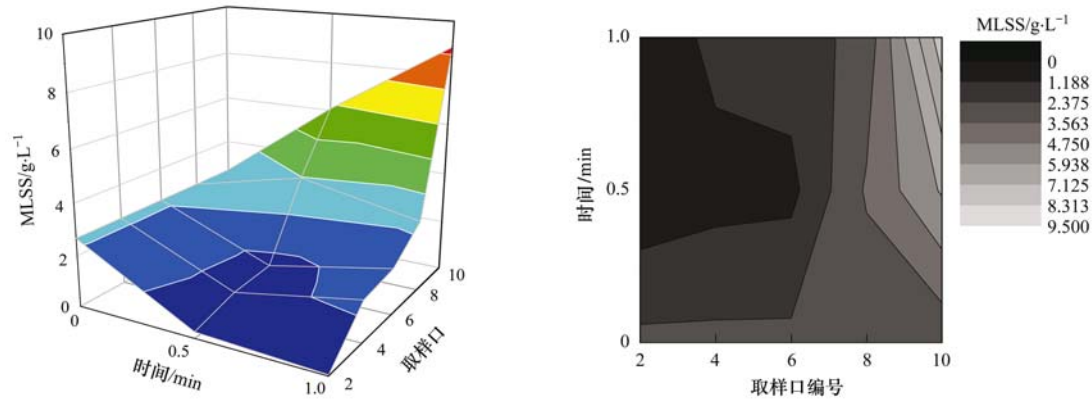


图4 不同沉降时间下取样口处 MLSS 变化

Fig. 4 Change of MLSS at different sampling ports

2.3 不同取样口处污泥粒径分布变化

图5为颗粒的粒径范围与对应的个数百分比之间的关系曲线,从中可知,在污泥浓度为 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,沉淀时间为1 min时,各取样口污泥的粒径分布有明显变化.S3~S9为从上到下的单数号取样口,其污

泥颗粒平均直径由约 $450\text{ }\mu\text{m}$ 增加至 $550\text{ }\mu\text{m}$ .对于序批式反应器,当一周周期曝气结束后,沉淀一定时间,上清液从排水口排出,由于部分污泥未沉降至排水口位置,故随出水一起排出反应器,逐渐缩短排水时间或提高排水比,可加强沉降选择作用,从而将小

而轻的污泥排出反应器,而粒径较大、密度较大的污泥则保留在反应器内继续生长,因此,小颗粒将随

排水被淘汰出反应器,大颗粒却因沉速较快而得以保留.

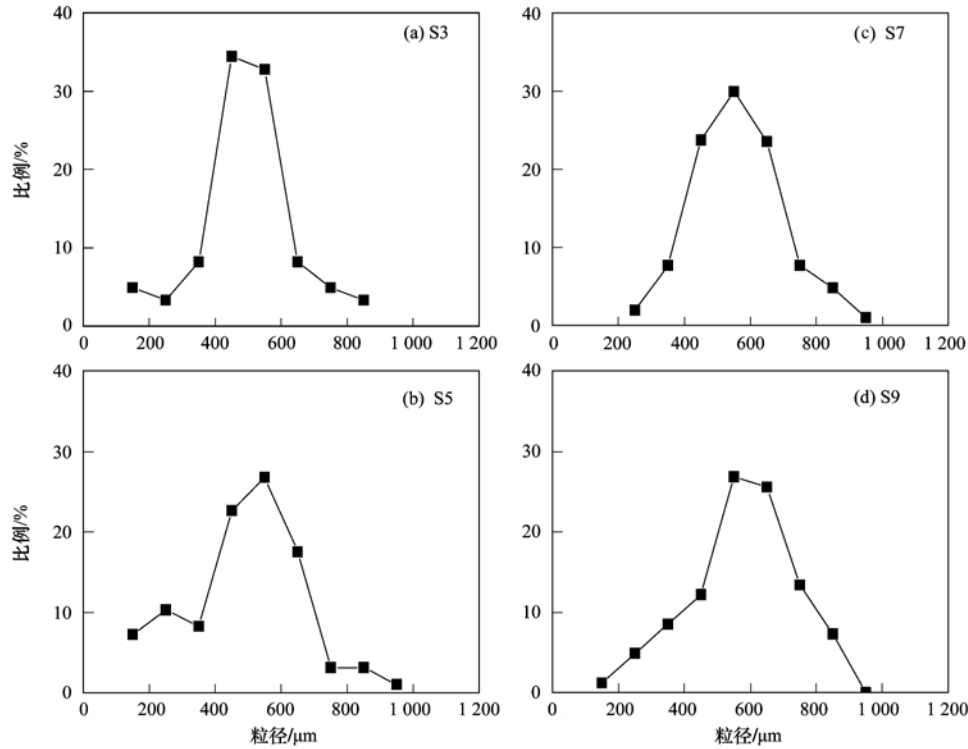


图 5 不同取样口污泥粒径分布

Fig. 5 Size distribution of granules at different sampling ports

2.4 污泥的圆形度和复杂度

好氧颗粒污泥具有近乎球形的规则形状<sup>[19]</sup>,因此颗粒的圆形度和复杂度是表征污泥尤其是颗粒污泥的重要参数,圆形度即颗粒的横截面接近理论圆的程度,其定义为颗粒各隅角及楞边平均曲率半径对于颗粒最大内接圆半径的比值<sup>[20]</sup>.复杂度是指在发现或提取一个真实目标的内在的困难程度,它取决于灰度级和图像边缘,用边缘比率来描述图像的

复杂程度<sup>[21]</sup>,复杂度小即表示颗粒比较密实.

由图 6 可知,颗粒的圆形度随着沉淀高度的增加而增大,在 3 号取样口处颗粒圆形度为 7.254,而在 9 号取样口时颗粒圆形度增至 8.173. 颗粒的复杂度随着沉淀高度的增加而减小,在 3 号取样口处颗粒复杂度为 1.900,在 9 号取样口时颗粒圆形度降至 1.644,因此接近于球形且密实的颗粒沉降速度快.

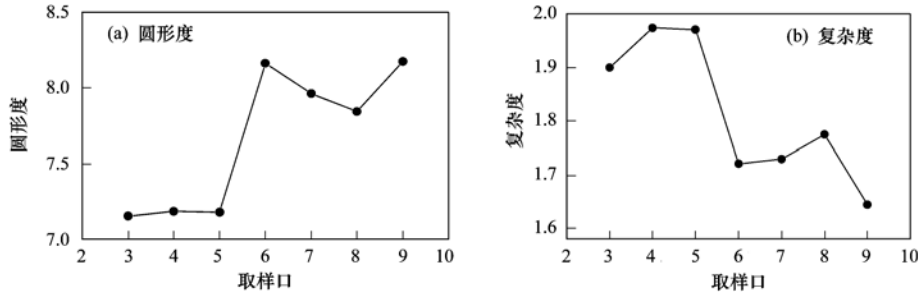


图 6 不同取样口处颗粒污泥的圆形度和复杂度

Fig. 6 Roundness and complexity of granules at different sampling ports

2.5 颗粒污泥的选择系数

选择压是控制颗粒污泥培养的一个重要因素,其最早用于种群遗传学<sup>[22]</sup>,即将种群内的选择作用

和物理学上的压力相比,来表示种群内的选择作用大小.由于选择压尚且没有对颗粒污泥的形成过程有统一具体的量化表达式,因此,根据选择压原理,

结合颗粒污泥沉降理论引入选择系数概念,用以表征选择压的大小,即粒径分级为  $i$  的颗粒在  $j$  取样口(或沉淀高度)处的选择系数为:

$$\alpha_{ij} = \frac{\eta_{ij}}{\sum_i \eta_{ij}} \quad (j = 1, 2, \dots, M; i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中,  $M$  表示取样口数,  $N$  表示粒径分级数,  $\eta_{ij}$  表示粒径分级为  $i$  的颗粒在  $j$  取样口(或排水口)处的保留率,其表达式为:

$$\eta_{ij} = \frac{\text{取样口 } j \text{ 以下粒径范围为 } i \text{ 颗粒数}}{\text{所有取样口粒径范围为 } i \text{ 的颗粒数总和}} \quad (2)$$

根据各取样口测定的污泥浓度和粒径分布(图4、图5),可计算出各粒径分级的颗粒在各取样口处的保留率和选择系数. 为避免最上和最下部的取样口由于污泥浓度过小或过大引起较大的实验误差,图7只给出不同粒径分级的颗粒沉淀1 min时在4、5和6号取样口的选择系数测定值和线性拟合值. 随着颗粒粒径的增大,4号取样口污泥选择系数由0.089 5增至0.11,增幅22.9%,5号口由0.075增至0.125,增幅66.67%,6号口由0.072增至0.128,增幅87.2%,说明对同一取样口而言,粒径越大的好氧颗粒选择系数越大,即更容易保留下来,所以对于大颗粒其选择压较大. 对于不同的取样口,粒径  $> 600 \mu\text{m}$  和  $< 600 \mu\text{m}$  的颗粒选择系数变化规律正好相反.

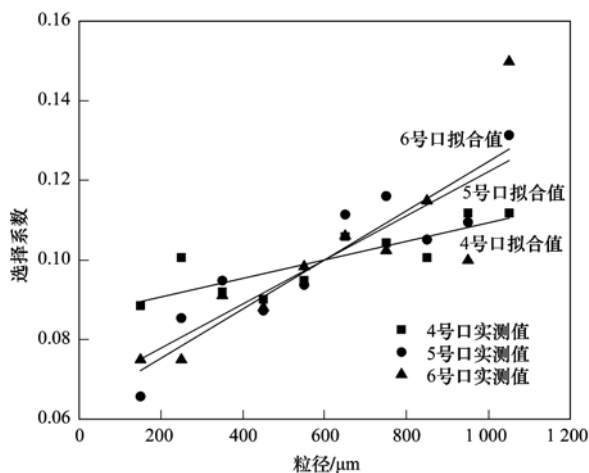


图7 不同取样口处颗粒污泥的实测选择系数随粒径变化

Fig. 7 Measured selection coefficient of granules with different size at different sampling ports

为进一步研究不同粒径颗粒在不同沉淀高度处的选择系数,建立了其理论计算模型. 为拓宽该模型在实际 SBR 反应器运行中的应用范围,在取样口的

基础上引入了沉淀高度,表示液面到排水口的高度. 另外,采用平流式沉淀池中去除率的计算公式计算保留率<sup>[23]</sup>.

假设沉淀初期颗粒全部均匀分布且为等速沉淀,对于一定的筛分粒径  $d_i$ ,在沉淀期过后,粒径大于  $d_i$  的颗粒全部保留,即保留率为  $\eta_i = 1$ ; 粒径小于  $d_i$  的颗粒(对应沉速  $\mu_x$ ) 部分保留,沉降初期所处反应器高度为  $x$ ,则  $\frac{x}{u_x} \leq \frac{H}{V_{s, \min}}$ , 由于  $\mu_x \leq V_{s, \min}$ , 则只有沉淀初期在高度  $x$  以下的部分颗粒才得以保留,保留率  $\eta_i$  则为能够保留的这部分颗粒占该粒径区间内颗粒的百分比,其表达式如下.

$$\eta_i = \frac{x}{H} = \frac{u_x}{V_{s, \min}} \quad (u_x \leq V_{s, \min})$$

$$V_s = \frac{H}{t_s} \quad (3)$$

式中,  $H$  为沉淀高度,  $t_s$  为沉淀时间.

$$u_{0,i} = \frac{g(\rho_{s,i} - \rho_L) d_i^2}{18\mu} \quad (4)$$

式中,  $d_i$  为粒径分级下的粒径;  $\rho_{s,i}$  为颗粒密度,取值 1.05,由于其变化范围小,对计算结果影响不大;  $\rho_L$  为溶液密度;  $\mu$  为溶液黏度.

由图8可以看出,沉淀时间1 min时不同沉淀高度(取样口编号10 cm)选择系数的计算值与实测值变化规律一致. 计算的选择系数值比实测值偏小是由于计算中所选取的粒径范围较大,粒径分级数较多,故各分数所占比例均减小[式(1)]. 在任一沉淀高度,选择系数都随粒径的增大而增加,说明无论排水口设置于任何高度,大颗粒都比小颗粒保留下来的几率大. 但对于任一粒径颗粒在不同沉淀高度处的选择系数,则呈现不同变化规律. 对于粒径  $> 600 \sim 800 \mu\text{m}$  的颗粒,选择系数随沉淀高度的增加而增大,说明排水口设置在越低位置,大颗粒选择压越大. 而对于粒径  $< 600 \sim 800 \mu\text{m}$  的颗粒,尽管在任意沉淀高度处,其选择系数都小于大颗粒,即其不能在反应器中占有优势,最终将被淘汰,但由于其选择系数随沉淀高度的增加而减小,说明随着排水口位置越高,小颗粒被淘汰出反应器所需的时间将会增长,即颗粒培养过程缓慢.

根据实验和模拟结果,对于培养好氧颗粒污泥的 SBR 反应器,若使粒径  $> 700 \mu\text{m}$  颗粒污泥稳定地保留在反应器中,其选择系数必须达到各粒径分级选择系数的平均值0.055 3,如果沉淀其排水口距离顶部约40 cm(相当于图1中5号口位置),则其

沉淀时间应设置为 82 s,如其沉淀时间已确定为 1.5 min,则排水口应设置在液面以下 60 cm 处. 综上所述,引入的选择系数概念可较好地描述不同运行条件对不同粒径颗粒的选择压,从而预测何种颗粒可以在反应器中得以保留,何种被淘汰出反应器,研究结果可为加速污泥颗粒化过程和提高其稳定性提供理论依据和指导.

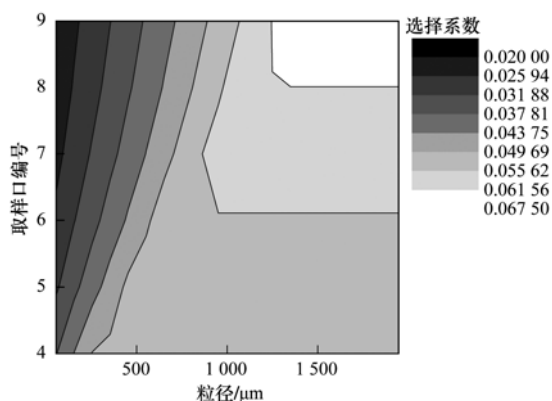


图 8 不同取样口处颗粒污泥的计算选择系数随粒径变化

Fig. 8 Simulated selection coefficient of granules with different size at different sampling ports

### 3 结论

(1) 采用插板式分层沉淀装置测定成熟好氧颗粒污泥沉降过程,其不同取样口处的颗粒数、密度和 MLSS 都随取样口高度的降低而增加,同一取样口处的 MLSS 总体上随沉降时间的增加而逐渐增大,沉降时间在 1~2 min 的时间间隔内的大部分颗粒沉降到 2~8 号取样口之间.

(2) 好氧颗粒在不同取样口处污泥样品的粒径分布均有明显变化. S3~S9 为从上到下的单数号取样口,其污泥平均粒径逐渐变大. 颗粒的圆形成度随着沉淀高度的增加而增加,颗粒的复杂度随着沉淀高度的增加而减小.

(3) 根据选择压原理,结合颗粒污泥沉降理论引入选择系数概念,用以表征选择压的大小,建立了其理论计算模型,根据实验和模型的结果显示,沉淀时间 1 min 时不同沉淀高度选择系数的计算值与实测值变化规律一致. 对于粒径  $< 600 \sim 800 \mu\text{m}$  的颗粒,尽管在任意沉淀高度处,其选择系数都小于大颗粒,即其不能在反应器中占有优势,最终将被淘汰,但由于其选择系数随沉淀高度的增加而减小,说明随着排水口位置越高,小颗粒被淘汰出反应器所需的时间将会增长,即颗粒培养过程缓慢.

### 参考文献:

- [1] Adav S S, Lee D J, Show K Y, *et al.* Aerobic granular sludge: Recent advances[J]. *Biotechnology Advances*, 2008, **26**(5): 411-423.
- [2] Su K Z, Yu H Q. Formation and characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor treating soybean-processing wastewater[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(8): 2818-2827.
- [3] Liu Y Q, Moy B, Kong Y H, *et al.* Formation, physical characteristics and microbial community structure of aerobic granules in a pilot-scale sequencing batch reactor for real wastewater treatment[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2010, **46**(6): 520-525.
- [4] 高景峰, 郭建秋, 陈冉妮, 等. SBR 反应器排水高度与直径比对污泥好氧颗粒化的影响[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(6): 512-516.
- [5] Muda K, Aris A, Salim M R, *et al.* Development of granular sludge for textile wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2010, **44**(15): 4341-4350.
- [6] Zhu L, Yu Y W, Xu X Y, *et al.* High-rate biodegradation and metabolic pathways of 4-chloroaniline by aerobic granules[J]. *Process Biochemistry*, 2011, **46**(4): 894-899.
- [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] Arrojo B, Mosquera-Corral A, Garrido J M, *et al.* Aerobic granulation with industrial wastewater in sequencing batch reactors[J]. *Water Research*, 2004, **38**(14-15): 3389-3399.
- [9] Kim S M, Kim S H, Choi H C, *et al.* Enhanced aerobic floc-like granulation and nitrogen removal in a sequencing batch reactor by selection of settling velocity[J]. *Water Science and Technology*, 2004, **50**(6): 157-162.
- [10] Liu Y, Wang Z W, Liu Y Q, *et al.* A generalized model for settling velocity of aerobic granular sludge[J]. *Biotechnology Progress*, 2005, **21**(2): 621-626.
- [11] 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.
- [12] Liu Y, Wang Z W, Qin L, *et al.* Selection pressure-driven aerobic granulation in a sequencing batch reactor[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005, **67**(1): 26-32.
- [13] 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.
- [14] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. The role of cellular polysaccharides in the formation and stability of aerobic granules[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2001, **33**(3): 222-226.
- [15] 王强, 陈坚, 堵国成. 选择压法培育好氧颗粒污泥的试验[J]. *环境科学*, 2003, **24**(4): 99-104.
- [16] 苏馈足, 王畅, 袁守军, 等. 一种插板式分层沉淀测定装置[P]. 中国专利: ZL 201020593630, 2010-11-05.
- [17] 张子健, 吴伟伟, 王建龙. 全自养硝化污泥的颗粒化过程研

究[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 140-146.

[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] Ni B J, Yu H Q. Mathematical modeling of aerobic granular sludge: A review[J]. Biotechnology Advances, 2010, **28**(6): 895-909.

[20] Wadell H. Volume, shape, and roundness of rock particles[J]. Journal of Geology, 1932, **40**(5): 443-451.

[21] Mario I, Chacon M, Alma D, *et al.* Image complexity measure. A human criterion free approach [C]. Proceedings of IEEE Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, 2005. 241-246.

[22] 山田常雄编, 鄂永昌译. 生物学词典[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 1028.

[23] 许保久, 龙腾锐. 当代给水与废水处理原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 51-52.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                          |                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea .....                                                              | LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)                  |
| Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei .....                                                                                                    | SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)            |
| Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane .....                                                                              | HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)     |
| Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors .....                                                                                 | YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)           |
| Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting .....                                                                                                            | ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)     |
| Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water .....                                                                                    | XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)         |
| Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods .....                              | LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)        |
| Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir .....                                          | WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580) |
| Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake .....                                                        | CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)          |
| Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas .....                                                       | AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)   |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River .....                                             | WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)          |
| Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province ..... | LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)             |
| Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake .....                                                       | LI Da-peng, HUANG Yong (2614)                                      |
| Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay .....                                                                                | ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)              |
| Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir .....           | LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)            |
| Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City .....                                                                            | ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)                      |
| Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area .....                                           | YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)       |
| Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions .....                                                                | YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)      |
| Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS .....                                                                             | BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)          |
| GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen .....                                                        | BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)                                 |
| Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area .....                                                                      | WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)            |
| Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal .....                                                                                     | ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)     |
| Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River .....  | WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)      |
| Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season .....                                                 | SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)     |
| Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter .....                    | PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)                        |
| Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch .....                                                             | GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)                         |
| Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater .....                                         | ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)   |
| Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization .....                                                           | ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)         |
| Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Process .....                     | LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)             |
| Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment .....                                                    | WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)   |
| Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe <sup>0</sup> /Enriched-Bacteria" System .....                                                          | DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)              |
| Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green .....                                                   | QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)               |
| Low-Temperature Preparation of TiO <sub>2</sub> /PS/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery .....                           | WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)   |
| Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating .....                                                                                                       | ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)      |
| Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge .....                                                      | GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)       |
| Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge .....                                                                                    | SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)            |
| Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment .....                                                          | YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)             |
| Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching .....                                            | SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)                    |
| Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions .....                   | RAO Ben-jiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)            |
| Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China .....                                                                             | WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)                      |
| Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils .....                                                                     | YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)       |
| Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil .....                                             | HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)         |
| Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs .....                                                                          | ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)       |
| Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i> .....                                                              | ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)   |
| Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China .....                                                       | CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)         |
| Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing .....                                                                                               | QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)            |
| Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks .....                                                                         | CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)                       |
| Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat .....                                   | KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)         |
| Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption .....               | LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)                |
| Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb <sup>2+</sup> and Cu <sup>2+</sup> on Nano-HAP Surfaces .....                                                              | HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)         |
| Effects of pH and Ni <sup>2+</sup> on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica .....                                                                  | LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)                           |
| Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite .....                                                                                                 | LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)            |
| Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols .....                                                                                                     | CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)                                      |
| Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO <sub>x</sub> Removal at Moderate to High Temperatures .....                                      | HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)              |
| Current Research Situation of H <sub>2</sub> S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts .....                                                            | HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)      |

# 《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8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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