

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第4期

Vol.33 No.4

**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

碳同位素比技术定量估算城市大气 CO<sub>2</sub> 的来源 ..... 刘卫, 位楠楠, 王广华, 姚剑, 曾友石, 范雪波, 耿彦红, 李燕 (1041)  
广州大气降水中稳定同位素对 2008 年初华南地区冰雪灾害期间水汽来源的反映 ..... 廖聪云, 钟巍, 马巧红, 薛积彬, 尹焕玲, 龙昆 (1050)  
北京雾霾天气期间气溶胶光学特性 ..... 于兴娜, 李新妹, 登增然登, 德庆央宗, 袁帅 (1057)  
白马泉风景区夏季大气 PM<sub>2.5</sub> 中二次有机物的初步研究 ..... 代东决, 李黎, 刘子芳, 赵敏, 冯加良, 赖玮, 曾燕梅, 周宇, 刘露云, 邓仕槐 (1063)  
机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性 ..... 乔月珍, 王红丽, 黄成, 陈长虹, 苏雷燕, 周敏, 徐骅, 张钢锋, 陈宜然, 李莉, 陈明华, 黄海英 (1071)  
法国梧桐叶片氮含量及氮同位素对城市大气湿沉降氮的响应研究 ..... 王燕丽, 肖化云, 肖红伟 (1080)  
胶州湾及邻近海域表层海水中一氧化氮浓度分布及其影响因素探讨 ..... 薛超, 刘春颖, 杨桂朋, 祝陈坚, 张洪海 (1086)  
基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评价 ..... 郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 冯承莲, 张瑞卿, 李会仙 (1091)  
流域水质时空分布特征及其影响因素初析 ..... 黄金良, 黄亚玲, 李青生, 周增荣, 冯媛, 张祯宇 (1098)  
潮白河周丛生物群落元素组成与水质变化的生态计量学关系研究 ..... 崔经国, 单保庆, 王帅 (1108)  
春季盘溪河水质日变化规律及水质评价 ..... 张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强 (1114)  
西南喀斯特流域风化作用季节性变化研究 ..... 肖琼, 沈立成, 杨雷, 伍坤宇, 陈展图 (1122)  
三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价 ..... 郭劲松, 谢丹, 李哲, 陈园, 孙志禹, 陈永柏, 龙曼 (1129)  
淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究 ..... 徐春燕, 杨洁, 马明睿, 胡雪芹, 由文辉 (1136)  
三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验 ..... 王建超, 朱波, 汪涛, 易礼军 (1144)  
沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征 ..... 李振炜, 于兴修, 刘前进, 井光花 (1152)  
合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性 ..... 李如忠, 周爱佳, 童芳, 李峰, 钱家忠 (1159)  
鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析 ..... 张华俊, 陈修康, 韩博平, 罗勇, 杨浩文, 曾艳, 陈敬安 (1167)  
三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价 ..... 敖亮, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (1176)  
黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价 ..... 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 李萍, 朱龙海 (1182)  
竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算 ..... 姜霞, 王雯雯, 王书航, 金相灿 (1189)  
雷州近海、流沙湾和深圳湾沉积物 PAHs 污染特征分析 ..... 赵利容, 孙省利, 柯盛 (1198)  
中国与印度典型城市道路街尘中多环芳烃与黑碳的对比研究 ..... 潘苏红, 张千, 孙亚莉, 解启来 (1204)  
三江平原典型灌区井灌地下水中铁的随水迁移特征 ..... 邹元春, 于晓菲, 霍莉莉, 吕宪国, 姜明 (1209)  
海水淡化水在既有管网输配的铁释放控制研究 ..... 田一梅, 刘扬, 赵鹏, 单金林, 杨所印, 刘伟 (1216)  
新生态铁的混凝作用探索 ..... 杨雪, 张景成, 关小红 (1221)  
饮用水中甲羟孕酮的臭氧氧化降解研究 ..... 岳婵媛, 缪恒锋, 任洪艳, 阮文权 (1227)  
核壳式磁性碳纳米吸附剂的制备及其对水环境中金霉素的吸附研究 ..... 王懿萱, 张娣, 牛红云, 孟昭福, 蔡亚岐 (1234)  
络合-超滤耦合工艺去除水中镍离子的研究 ..... 秦妹, 邵嘉慧, 何义亮, 李雯奎 (1241)  
赤铁矿光助类 Fenton 降解有毒有机污染物 ..... 张钰, 顾彦, 杨慧, 何燕, 李瑞萍, 黄应平, 张爱清 (1247)  
掺氮 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 诱发可见光-类 Fenton 体系降解阿特拉津研究 ..... 赵璐, 邓一荣, 杜瑛珣, 傅翔 (1252)  
O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 降解水中扑灭通效能研究 ..... 李绍峰, 孙楚 (1260)  
Pr-N 共掺杂 TiO<sub>2</sub> 光电催化降解孔雀石绿动力学 ..... 沙爽, 周少奇, 张小娜, 周晓 (1267)  
铜陵相思谷尾矿用于处理酸性矿山排水的实验研究 ..... 张楠, 陈天虎, 周跃飞, 黎少杰, 金杰, 王延明 (1272)  
聚合铝铁对 A<sup>2</sup>/O 系统 EPS 及生物絮凝性能的影响 ..... 温沁雪, 刘爱翠, 陈志强, 施汉昌, 吕炳南 (1278)  
温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响 ..... 张婷婷, 张建, 杨芳, 谢慧君, 胡振, 李一冉 (1283)  
温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响 ..... 李祥, 黄勇, 郑宇慧, 袁怡, 李大鹏, 潘杨, 张春蕾 (1288)  
好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究 ..... 王硕, 于水利, 时文歆, 暴瑞玲, 衣雪松, 李建政 (1293)  
除磷颗粒污泥系统中不同粒径颗粒的理化特性分析 ..... 李志华, 张玉蓉, 杨帆, 李胜, 姬晓琴 (1299)  
利用氧化亚氮还原酶基因 (nosZ) 评价人工湿地系统中的反硝化菌 ..... 王晓君, 陈少华, 张兆基, 肖俊超 (1306)  
紫外诱变法提高好氧反硝化菌降解性能的研究 ..... 于佳佳, 陈浚, 杨宣, 陈建孟 (1313)  
1 株异养硝化菌胞外聚合物的研究 ..... 陈哲, 张斌, 湛志强, 邱志刚, 郭迎庆, 李君文, 王景峰 (1318)  
氨氮对稀有鮎鲫胚胎及卵黄囊期仔鱼的毒性效应研究 ..... 王志坚, 鲁增辉, 石萍 (1323)  
多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响 ..... 孟德龙, 杨扬, 伍延正, 吴敏娜, 秦红灵, 朱亦君, 魏文学 (1331)  
生物炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响 ..... 王廷廷, 余向阳, 沈燕, 张超兰, 刘贤进 (1339)  
水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究:<sup>14</sup>C连续标记法 ..... 聂三安, 周萍, 葛体达, 童成立, 肖和艾, 吴金水, 张杨珠 (1346)  
油田污染土壤残留油组成与特征参数分析 ..... 王坚, 张旭, 李广贺 (1352)  
挥发性氯代烃在湿润土壤中的平衡吸附研究 ..... 孟凡勇, 刘锐, 小林刚, 万梅, 余素林, 陈吕军 (1361)  
田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究 ..... 黄锦孙, 韦东普, 郭雪雁, 马义兵 (1369)  
中国磷消费结构的变化特征及其对环境磷负荷的影响 ..... 马敦超, 胡山鹰, 陈定江, 李有润 (1376)  
基于 3MRA 模型的填埋场安全填埋废物污染物阈值评估方法与应用研究 ..... 袁英, 席北斗, 何小松, 魏自民, 李鸣晓, 姜永海, 苏婧, 安达 (1383)  
填埋垃圾初始含水率对渗滤液产量的影响及修正渗滤液产量计算公式 ..... 兰吉武, 詹良通, 李育超, 陈云敏 (1389)  
生物反应器填埋场中邻苯二甲酸二丁酯的迁移转化 ..... 方程冉, 龙於洋, 沈东升 (1397)  
岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析 ..... 杨奇勇, 蒋忠诚, 马祖陆, 曹建华, 罗为群, 李文军, 段晓芳 (1404)  
《环境科学》征订启事 (1062) 《环境科学》征稿简则 (1107) 信息 (1135, 1215, 1396)

# 除磷颗粒污泥系统中不同粒径颗粒的理化特性分析

李志华<sup>1</sup>, 张玉蓉<sup>2</sup>, 杨帆<sup>1</sup>, 李胜<sup>3</sup>, 姬晓琴<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 2. 中联西北工程设计研究院, 西安 710082; 3. 西安市污水处理有限责任公司, 西安 710025)

**摘要:** 采用SBR反应器培养具有同步脱氮除磷特性的颗粒污泥。使用目数分别为100、60、40的标准检验筛将污泥颗粒按粒径大小筛分为3个等级, 即150~280 μm、280~450 μm、>450 μm进行研究, 分析了不同粒径颗粒的理化特性。结果表明, 颗粒化初期(第7~18 d), 密实的颗粒提供良好的厌氧环境有利于加速GAOs和PAOs在颗粒内部的对底物的竞争; 密实颗粒有利于PAOs的富集和加速生长, 使得不同粒径颗粒含磷量存在差异; 280~450 μm的颗粒(以SS计)有机磷含量最高, 达113.25 mg·g<sup>-1</sup>, 无机磷含量最低, 达15.55 mg·g<sup>-1</sup>。颗粒化后期, 反应器运行第34 d, 3种粒径颗粒中有机磷含量趋于一致, 约为50 mg·g<sup>-1</sup>, 第52 d, 无机磷含量也趋于一致, 约70 mg·g<sup>-1</sup>。成熟颗粒中总磷含量占11%, 其中无机磷占4.24%。同时, 反应器中污泥的磷含量比排水中污泥高, 分析表明污泥活性和污泥龄对磷的去除效果有影响。另外, 就反硝化而言, 大、小粒径颗粒都有较好的厌氧反硝化能力, 颗粒内部与外部溶液环境中的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度梯度是影响反硝化速率的重要因素。

**关键词:** 粒径; 颗粒污泥; 聚磷菌; 脱氮除磷; 污水处理

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)04-1299-07

## Physicochemical Characteristics of Granules with Different Size in a Granular Sludge System for Phosphorus Removal

LI Zhi-hua<sup>1</sup>, ZHANG Yu-rong<sup>2</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, LI Sheng<sup>3</sup>, JI Xiao-qin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. China United Northwest Institute for Design and Research, Xi'an 710082, China; 3. Xi'an Wastewater Treatment Co. Ltd., Xi'an 710025, China)

**Abstract:** Aerobic granular sludge that could simultaneously remove nitrogen and phosphorus was cultivated in a sequencing batch reactor (SBR). Three groups were divided using 100-, 60- and 40- mesh sieves resulting the size ranges were 150-280 μm, 280-450 μm and >450 μm, respectively, and the physicochemical properties of different groups were analyzed. Results showed that during the initial period of granulation (7-18 d), the compact granules could provide the anaerobic niche for the substrate the competition between GAOs and PAOs; and the compact granules was favorable for the enrichment and growth of PAOs, resulting in different phosphorous fractions in different size of granules; granules with the size of 280-450 μm exhibited the highest content of organic phosphorous fraction, i. e., 113.25 mg·g<sup>-1</sup>. In contrast, these granules showed the lowest content of inorganic phosphorous fraction, i. e., 15.55 mg·g<sup>-1</sup>. In a later period, the content of organic phosphorous fraction in granules was similar after 34 d about 50 mg·g<sup>-1</sup>, and the inorganic phosphorous fraction became similar after 52 d was 70 mg·g<sup>-1</sup>, and the total organic phosphorous fraction of sludge in the reactor were higher than those in the solids effluent. The phosphorous fraction in different size granules was affected by the sludge retention time. The total phosphorous accounted for 11% of total weight of sludge, and the inorganic phosphorous accounted 4.24%. Additionally, the settling velocity, specific weight of bigger granules were higher than the smaller one, and these values were well correlated with total phosphorous. Concerning on denitrification, bigger and smaller granules showed high denitrification efficiency, and the gradient of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N between inside of granules and bulk solution was an important factor for denitrification rate.

**Key words:** diameter; granule sludge; phosphorus accumulating organisms (PAOs); removal of nitrogen and phosphorus; sewage treatment

基于聚磷菌(phosphorus accumulating organisms, PAOs)过量吸磷作用的强化生物除磷方法(enhanced biological phosphate removal, EBPR)是目前较经济有效的除磷方法<sup>[1,2]</sup>, 而除磷系统的稳定性和同步脱氮除磷一直是EBPR工艺研究的主要问题<sup>[3,4]</sup>。其中, 导致除磷效果不稳定的主要原因之一是聚糖菌(GAOs)与聚磷菌(PAOs)在厌氧环境下形成对碳源的竞争; 此外, 碳源、pH值、污泥龄、水

力停留时间等因素都对整个强化生物除磷系统的除磷效率有一定影响<sup>[5]</sup>。

好氧颗粒污泥作为一种新的污水处理技术, 其

收稿日期: 2011-05-26; 修订日期: 2011-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078303); 陕西高校省级重点实验室科研项目(09JS027); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0853)

作者简介: 李志华(1976~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向废水生物处理技术与理论, E-mail: lizhihua@gmail.com

脱氮除磷功能特性也是学者们的研究内容。例如,在同步硝化反硝化(SND)颗粒污泥培养系统中,为了平衡低溶氧条件下,有机物 famine 阶段丝状菌大量繁殖的问题,引入一种慢速生长的细菌——聚磷菌,既可实现脱氮除磷的功能,又有利于颗粒污泥系统的稳定,同时给出优化后颗粒污泥的细菌分布模型,外部好氧区有硝化菌和聚磷菌,内部厌氧区有反硝化菌和聚磷菌<sup>[6,7]</sup>。考虑到厌氧或缺氧区的形成与溶解氧 DO 的传递有关,颗粒的粒径、密实程度就更受关注。有报道指出,颗粒粒径大小对于系统维持稳定的生物量具有重要意义<sup>[8]</sup>,如果颗粒太小,容易从反应器中洗出,并且由于形不成厌氧区或缺氧区,所含的微生物种类减少,影响对废水的处理效果。但是如果粒径太大,基质的传递受阻,而导致颗粒内部细菌死亡,颗粒容易解体。

本研究利用 SBR 反应器培养除磷颗粒污泥,通过对系统中不同粒径颗粒的总磷(TP)含量、无机磷与有机磷组分进行比较,结合颗粒的密度、孔隙率等物理特性分析颗粒中磷聚集过程及其影响因素。并通过硝化、反硝化速率实验分析不同粒径颗粒的同步脱氮除磷特性,旨在探讨颗粒粒径对颗粒污泥系统的稳定性影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置及流程

实验反应器有效容积 8 L,净宽 12 cm,高 71 cm,接种污泥为邓家村污水厂 A<sup>2</sup>/O 二沉池回流污泥。反应器按 SBR 操作模式进行,运行周期 4 h,其中进水 4 min,搅拌 90 min,曝气 140 min,沉淀 4 min,排水 2 min。厌氧搅拌桨转速为 60 r·min<sup>-1</sup>,采用玻璃砂芯从反应器底部曝气,气体流量为 4 L·min<sup>-1</sup>,上升流速为 0.35 m·min<sup>-1</sup>。反应器从底部进水,中部排水,每周进水量、排水量均为 4 L,反应器控制温度为(25±1)℃。

### 1.2 污水组成

实验配水以 C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>O<sub>2</sub>Na 作为唯一碳源, NH<sub>4</sub>Cl 为氮源, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 为磷源。进水 COD 浓度为 600 mg·L<sup>-1</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度为 60 mg·L<sup>-1</sup>, TP 浓度为 40 mg·L<sup>-1</sup>, 微量元素组分(mg·L<sup>-1</sup>): FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.45, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 0.045 5, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 0.009 1, KI 0.054 5, MnCl<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O 0.036 4, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 0.018 2, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.036 4, CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.045 5, EDTA 二钠盐 3.03。

### 1.3 测试与分析方法

(1) 颗粒粒径、密度 根据颗粒的大小,采用尼康 N90i 全自动显微镜和 EX-Z750 数码相机拍照记录粒径。颗粒污泥的密度采用蔗糖梯度溶液法进行测定<sup>[9]</sup>。

(2) 孔隙率 颗粒经多聚甲醛在 4℃ 固定过夜后采用 OCT 进行包埋,在 -20℃ 条件下进行冷冻,然后切片(切片机型号: MICROM HM 500 O),切片厚度为 50 μm。切片的样品在显微镜下进行观察拍照,使用显微镜图像计算软件(NIS-Elements AR 3.0)计算颗粒空洞面积与颗粒断面总面积比值。

(3) 各种磷的提取及定量 取适量曝气结束时混合污泥,用标准检验筛将污泥颗粒按粒径大小筛分为 3 级,盛取同周期反应器中排水污泥。用纯水离心清洗后,采用不同提取液分 4 次逐步提取,分别是溶解性磷、与 Fe(OH)<sub>3</sub> 结合、与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 结合、与 CaCO<sub>3</sub>/MgCO<sub>3</sub> 结合的磷<sup>[10]</sup>。将提取后溶液 6 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 15 min 后,通过 0.45 μm 微孔滤膜过滤,通过测定 120℃、30 min 消解前后 2 次结果,计算 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 及 TP 含量。

(4) 硝化速率 对 250 mL 含 COD 300 mg·L<sup>-1</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 60 mg·L<sup>-1</sup> 的泥水混合液分别进行纯氧曝气和空气曝气,比较 2 种曝气方式作用下,溶液中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 被氧化成 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的量,计算单位克污泥的硝化速率。其中,纯氧曝气法利用纯氧氧分压高的特点,提高氧在混合液中的扩散能力,提高混合液中溶解氧浓度,从而迅速补充微生物消耗的氧。

(5) 反硝化速率 取适量曝气结束时的混合污泥筛分成 280~450 μm 和 450~1 000 μm 的 2 组颗粒,将用 PBS 清洗过的颗粒泥水混合液 70 mL 分装在锥形瓶中。配制 COD 浓度为 2 778 mg·L<sup>-1</sup> 溶液 90 mL, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度为 166.7 mg·L<sup>-1</sup> 溶液 90 mL,使 250 mL 混合液中未反应时的 COD 浓度为 1 000 mg·L<sup>-1</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度为 60 mg·L<sup>-1</sup>。采用 3 种不同方式加入 COD 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 溶液,分别是 2 种溶液实验开始时正常一次性加入; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 溶液开始时一次性加入、90 mL COD 溶液在 105 min 内逐步均匀加入; COD 溶液开始时一次性加入、90 mL NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 溶液均匀加入。反应时长 105 min,间隔取样测定 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的浓度变化。

(6) COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP 等水质分析 按国家标准方法进行<sup>[11]</sup>。

(7) MLSS、VMLSS 采用标准方法测定<sup>[12]</sup>。

(8) DO、pH 采用 FXL204 型溶氧仪和 pH/

ORP-6658 测控仪测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 聚磷菌颗粒形成过程及粒径分布

反应器运行至 7 d 时,通过显微镜可观察到颗粒的形成,运行 15 d 时取反应器混合污泥,肉眼可见大量具有光滑表面的颗粒污泥。采用标准检验筛将颗粒按粒径大小筛分为 3 组,分别为 150 ~ 280  $\mu\text{m}$ 、280 ~ 450  $\mu\text{m}$  和 >450  $\mu\text{m}$ 。各组颗粒在不同阶段的粒径分布如图 1 所示,可以看出,聚磷菌颗粒污泥系统运行稳定,颗粒污泥粒径逐渐增大。运行 17 d 时由于颗粒粒径太小没有筛分,平均粒径为 221  $\mu\text{m}$ ,而运行 45 d 时,3 组颗粒的平均粒径分别为 236、428 和 1 019  $\mu\text{m}$ 。不同粒径颗粒的密度及孔隙率见表 1,在颗粒形成初期,中等粒径颗粒的密度最大,随着反应器运行,大颗粒的密度逐渐均匀并呈现缓慢增大的趋势,而小颗粒的密度逐渐减小;另一方面,颗粒孔隙率随粒径的增大而逐渐增大。以上结

果表明,开始时颗粒由絮体污泥聚集形成,颗粒较为密实,且粒径逐渐增大;在颗粒形成后期,颗粒之间相互碰撞、气泡冲刷和机械搅拌而产生的剪切力是大颗粒密度越发均匀和缓慢增加的主要原因,而上述过程的散落部分所形成的小颗粒,则密度有所降低。

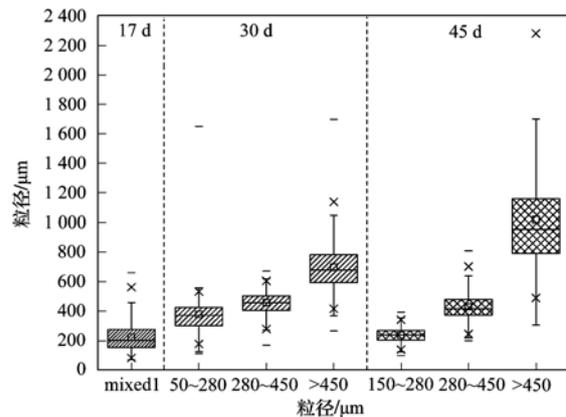


图 1 不同阶段颗粒的粒径分布

Fig. 1 Granule diameter distribution of different periods

表 1 不同粒径颗粒的密度及孔隙率 ( $n = 25$ )

Table 1 Mean density, porosity of granules with different diameters ( $n = 25$ )

周期/d	密度/ $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$			孔隙率		
	150 ~ 280 $\mu\text{m}$	280 ~ 450 $\mu\text{m}$	>450 $\mu\text{m}$	150 ~ 280 $\mu\text{m}$	280 ~ 450 $\mu\text{m}$	>450 $\mu\text{m}$
17	1.005 ~ 1.013	1.009 ~ 1.024	1.007 ~ 1.021		0.07 $\pm$ 0.03	0.15 $\pm$ 0.07
30	1.004 ~ 1.011	1.008 ~ 1.015	1.008 ~ 1.017	0.05 $\pm$ 0.03	0.13 $\pm$ 0.06	0.14 $\pm$ 0.09
52	1.002 ~ 1.006	1.006 ~ 1.021	1.021 ~ 1.023	0.04 $\pm$ 0.02	0.10 $\pm$ 0.04	0.17 $\pm$ 0.10

### 2.2 反应器的运行

对整个反应器运行周期内的水质(包括有机物、氮和磷)变化进行连续监测,如图 2 所示,第 5 d 时,厌氧段有机物被快速吸收,COD 从 570  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  降为 103.97  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,有利于好氧段聚磷菌与其它异养菌的竞争,整个周期结束后 COD 约 11.07  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。同时厌氧段磷被不断释放,厌氧末磷浓度为初始磷浓度的 2.4 倍,好氧段磷被超量吸收,整个周期磷净吸收量约 20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,去除率为 50%。直至 50 d,系统的除磷性能稳定,厌氧末磷浓度为初始磷浓度的 3.8 倍,磷去除率达到 92%。进水的稀释效果使  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度下降,厌氧段保持恒定,好氧结束

时  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度为 0.27  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 浓度分别为 0.71  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、13.86  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。整个反应过程中,因为进水氮源主要为  $\text{NH}_4^+$ -N,且过程中  $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 一直没有积累,使 TN 始终保持与  $\text{NH}_4^+$ -N 同样的下降趋势,总氮的去除率达到 76.30%。从上述实验数据可以看出,颗粒除磷脱氮效果明显,说明使用丙酸钠成功培养出了聚磷菌颗粒污泥。

### 2.3 颗粒污泥对磷的聚集过程和影响因素分析

对反应器不同阶段、不同粒径组分的聚磷菌颗粒污泥中磷含量进行分析,由此计算出不同颗粒中无机磷与有机磷含量,如表 2 所示,并对反应器中污泥和排出污泥的含磷量做了比较,如表 3 所示。

表 2 不同粒径颗粒中无机磷与有机磷的含量(SS)/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 2 Content of inorganic and organic phosphorus of granules with different diameters(SS)/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$

运行周期/d	无机磷			有机磷		
	150 ~ 280 $\mu\text{m}$	280 ~ 450 $\mu\text{m}$	>450 $\mu\text{m}$	150 ~ 280 $\mu\text{m}$	280 ~ 450 $\mu\text{m}$	>450 $\mu\text{m}$
7	13.95			31.88		
18	17.00	15.55	21.25	81.25	113.25	98.95
34	24.77	30.84	41.57	46.59	46.02	50.36
52	27.21	29.83	31.98	74.30	70.77	70.41

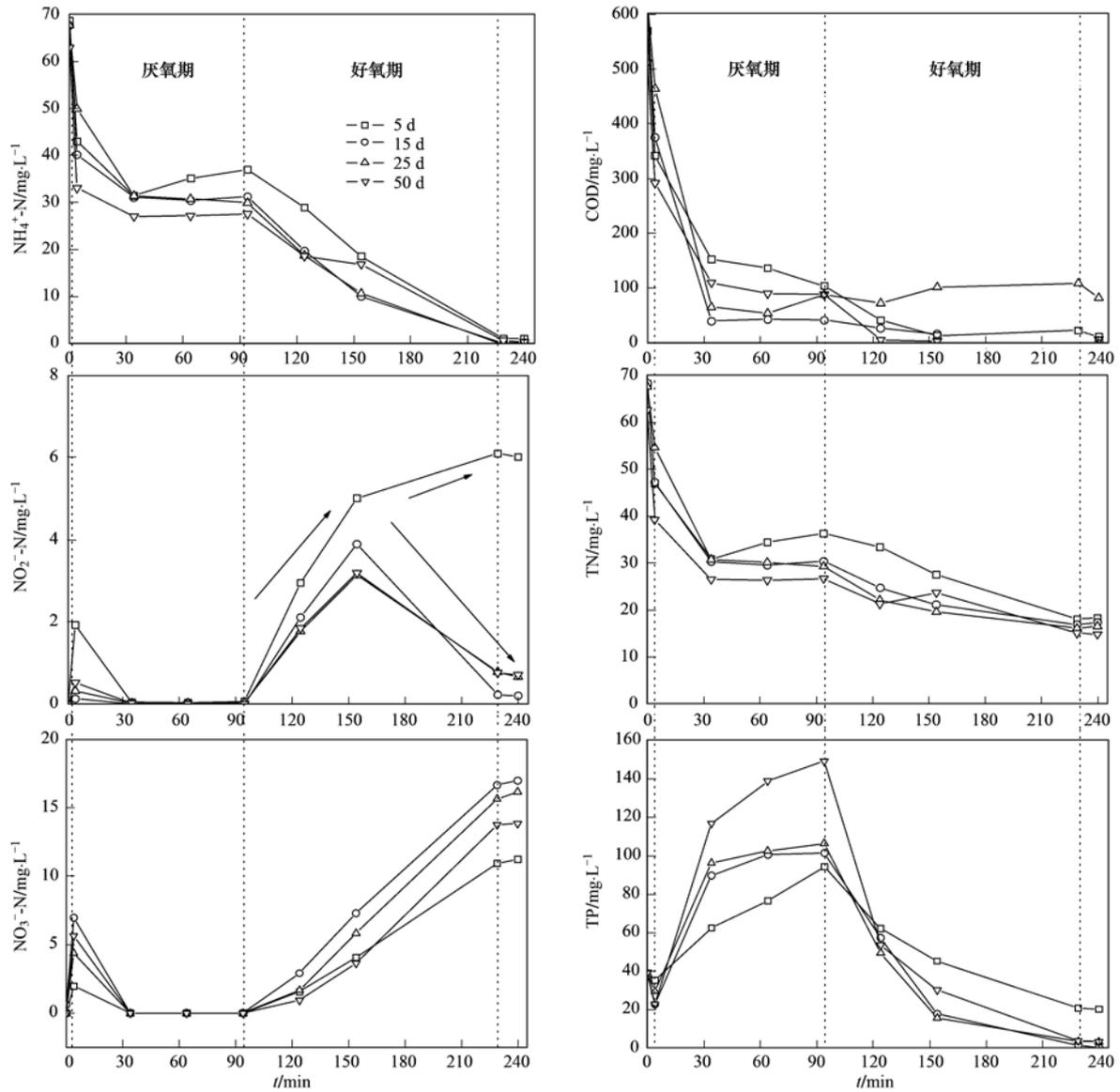


图2 颗粒污泥对有机物、氮、磷的反应

Fig. 2 Carbon, nitrogen, and phosphorus transformation during experimental period

表3 反应器中污泥与排水中污泥的含磷量比较(SS)/mg·g<sup>-1</sup>Table 3 Comparison of phosphorus content within sludge in reactor and in effluent(SS)/mg·g<sup>-1</sup>

运行周期/d	反应器中污泥			排水中污泥		
	无机磷	有机磷	总磷	无机磷	有机磷	总磷
18	17.92	97.82	115.74	25.66	60.35	86.01
34	27.61	42.84	70.45	22.84	44.17	67.00
52	42.44	68.33	110.78	29.32	58.49	87.81

从以上数据可以看出,颗粒中磷的聚集包括有机磷聚集和无机磷聚集两部分,它们是独立的两个过程.在颗粒形成初期,磷的积累主要依靠聚磷菌的大量繁殖和迅速聚集,并在厌氧、好氧的循环过程中超过其生理需求量而从外部环境摄取磷,且可以将磷以聚合的形态储存在菌体内.系统稳定后,受外部环境 pH 的影响,颗粒中也会有部分生物化学除磷

作用,聚磷菌在厌氧条件下释放  $\text{PO}_4^{3-}$ ,并与铁、铝和钙 3 种金属盐结合,形成胞外无机磷,而好氧阶段也只过量吸收可通过生物作用的  $\text{PO}_4^{3-}$ .所以在颗粒形成初期,颗粒中有机磷的含量远远大于无机磷的含量,并且随着系统的运行,结合在线 pH 数据,如图 3 所示,一个周期内 pH 在 7.7~9.1 之间,在这种 pH 下,有利于无机磷的形成.而有机磷的含量随着生物

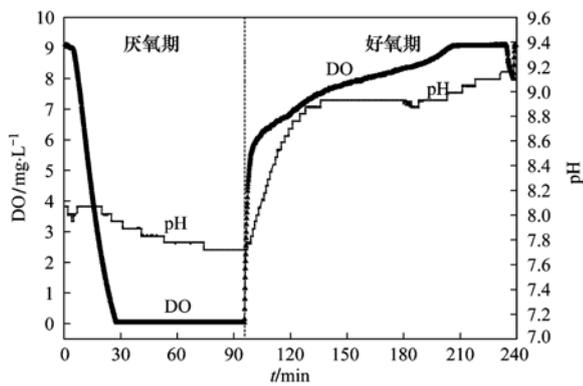


图3 典型周期溶解氧 DO 与 pH 值

Fig. 3 Changes of dissolved oxygen concentration and pH during a typical cycle of the SBR

化学的降解作用以及污泥中聚磷菌含量的变化而有所降低和浮动。

对比不同粒径颗粒的含磷量发现,在颗粒污泥形成初期,280 ~ 450  $\mu\text{m}$  的颗粒无机磷含量最低,有机磷含量最高,与另外 2 种粒径的颗粒存在差异.分析原因认为,在颗粒形成初期,污泥中 PAOs 和 GAOs 并存,GAOs 与 PAOs 在厌氧阶段会形成对有机底物的竞争矛盾,并且有学者研究发现<sup>[13,14]</sup>,以丙酸作为碳源时不利于 GAOs 的生长;在颗粒形成初期,280 ~ 450  $\mu\text{m}$  的颗粒密度最高最为密实,空隙率最小,内部厌氧形成对有机底物的竞争最为激烈,同时丙酸不利于 GAOs 的生长,因此导致 PAOs 在 280 ~ 450  $\mu\text{m}$  的颗粒中生长最为迅速,相对其他 2 种粒径的颗粒 PAOs 含量更高,进而导致了其有机磷含量较高.再者,由于其颗粒密实空隙率小,外部 pH 对其影响面积小,与无机金属离子接触少,导致其无机磷生成相对较少.随着运行时间的不断延长,PAOs 成为优势菌种,GAOs 被不断洗出反应器,3 种粒径情况下厌氧形成的对底物的竞争程度趋于—

致,PAOs 的生长速率也趋于一致,进而导致了 3 种粒径情况下有机磷含量趋于一致;就无机磷含量而言,随着运行时间的延长,与金属离子反应生成的无机磷积累越来越多,280 ~ 450  $\mu\text{m}$  与 > 450  $\mu\text{m}$  的颗粒空隙率趋于一致,其无机磷生成速率也趋于一致,而 150 ~ 280  $\mu\text{m}$  的颗粒主要由大颗粒剥离的絮体生成(如 2.1 节所述),同时,稳定的 pH 使得反应器内无机磷沉淀物含量达到平衡,进而导致 3 种颗粒无机磷也趋于一致.因此认为,在颗粒形成初期,密实的颗粒有利于加速 GAOs 和 PAOs 在颗粒内部的对底物的竞争;在有利于 PAOs 生长的丙酸钠培养环境下,有利于 PAOs 的富集和加速生长.

同时,从上述分析中看出,在有机磷的去除方面,有机磷的去除与聚磷菌的排出量有直接关系.进而,有机磷部分的去除与反应器中颗粒 VSS/SS 及泥龄 SRT 存在一定关系. VSS/SS 下降使得污泥活性降低,颗粒中聚磷菌数量减少;污泥龄延长,由于聚磷菌的衰亡速度较慢,排放的污泥较少,排出的聚磷菌减少,进而影响磷的去除<sup>[5]</sup>.在本实验中,反应器污泥有机磷占污泥质量的比例从 18 d 的 9.78% 下降至 4.28%,52 d 又逐渐上升为 6.83%,其原因是运行过程中反应器内污泥 VSS/SS 发生相应变化,如图 4 所示,从第 18 d 的 0.80 下降至 0.56 后又上升至 0.62,且污泥龄 SRT 也因为反应器内 MLSS 浓度增大(20 d 之前维持在 3 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,之后维持在 4 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )和出水中 MLSS 浓度的减小而增大.在无机磷方面,无机磷含量的不断增加有利于系统中污泥的稳定,一方面无机磷的积累有利于增加颗粒密度<sup>[15]</sup>,另一方面无机晶体与胞外有机物质的结合更有利于维持颗粒结构的稳定<sup>[16]</sup>.

据有关文献报道,生物除磷系统中污泥含磷率为 5%<sup>[17,18]</sup>.本实验结果,磷含量占污泥质量的

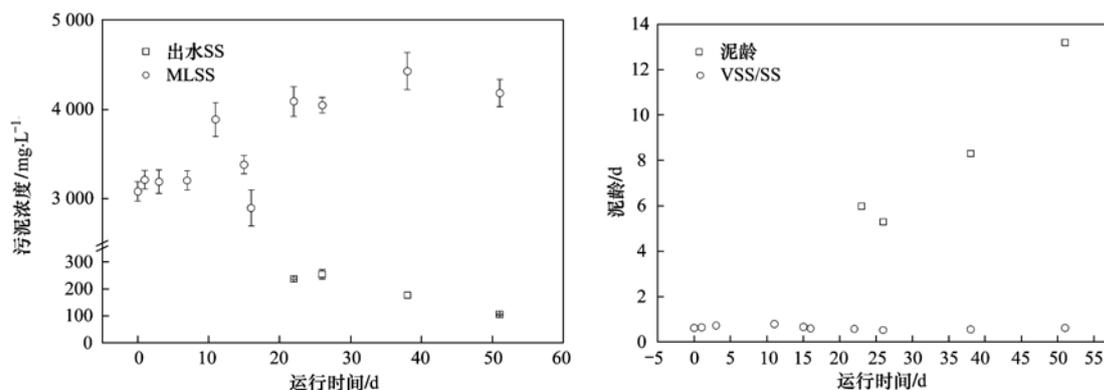


图4 不同阶段反应器出水中污泥浓度以及泥龄、VSS/SS

Fig. 4 MLSS of reactor and effluent SRT and VSS/SS during experimental period

11.57%。另一方面,比较表3中反应器中污泥与排水中污泥的含磷量时,可以看出,排水中污泥的含磷量比反应器中磷含量低,这说明系统排出高磷污泥的效率不高,不利于对磷的去除,需要缩短污泥SRT。

## 2.4 颗粒污泥硝化速率分析

对纯氧曝气和空气曝气条件下单位质量污泥中氨氧化菌(AOB)和硝化细菌(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)氧化生成

NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的速率大小进行比较,结果如图5。可以看出,纯氧曝气条件下氨氧化速率是空气曝气条件的1~1.5倍,说明颗粒内部也存在大量氨氧化菌,因为纯氧曝气氧的扩散能力可以迅速补充颗粒内部微生物消耗的氧,反应速率快。而硝化菌(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)的硝化速率除受到溶解氧浓度影响外,还与反应过程中亚硝态氮浓度有关,因此,可以认为在颗粒内、外部均有分布。

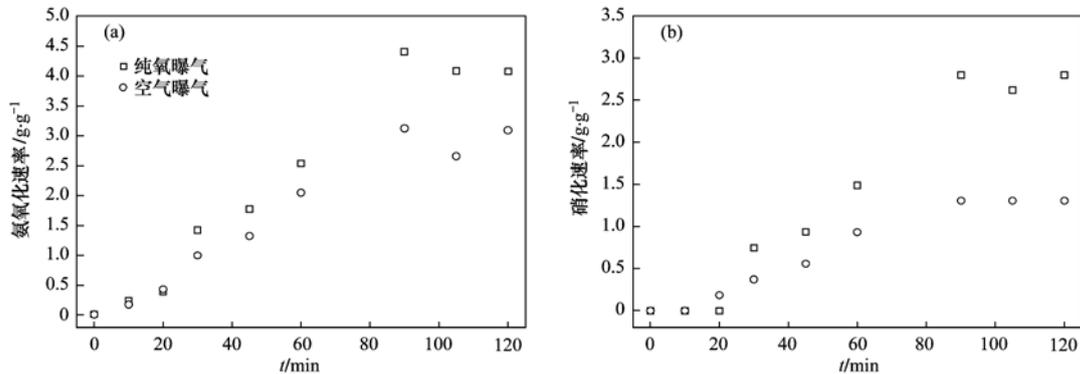


图5 空气和纯氧曝气条件下硝化速率

Fig. 5 Rate of nitrification under oxygen aeration and air aeration

## 2.5 不同粒径颗粒的反硝化速率比较

比较280~450 μm、450~1000 μm这2组粒径等级颗粒的反硝化速率,结果如图6所示。大、小颗粒都有较好的反硝化能力,但不同底物(COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)供给方式对大、小颗粒反硝化速率的影响略有不同。首先,COD溶液一次性加入,90 mL NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N溶液均匀加入,反硝化速率都是最小的,说明颗粒内部是反硝化的主要场所,因为在COD充足条件下,均匀加入的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N溶液,只能提供较小的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度梯度,不利于NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N快速传递到颗粒内

部进行反硝化。其次,小颗粒因为粒径小,传质快,在采用NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N溶液开始一次性加入时,反硝化速率最大;而大颗粒受传质影响,COD均匀加入浓度不足,反硝化速率比正常情况下小。但也因为大颗粒内反硝化菌数量较多、孔隙率较大,采用NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N溶液均匀加入的方式时,反硝化速率比小颗粒大。因此可以看出在碳源供给充足的情况下,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的浓度梯度对颗粒内部反硝化存在明显影响,同时颗粒的粒径、孔隙率也存在影响。

## 3 结论

(1) 密实的颗粒提供良好的厌氧环境有利于加速GAOs和PAOs在颗粒内部的对底物的竞争;在采用有利于PAOs生长的丙酸钠培养环境下,密实颗粒有利于PAOs的富集和加速生长。

(2) 成熟颗粒中总磷含量占11%,其中有机磷含量为6.83%,无机磷含量为4.24%。

(3) 通过调节颗粒VSS/SS及污泥龄SRT,可以调节系统中对有机磷的去除,VSS/SS越高,SRT越短,有机磷去除效率越高,具有一定的实际意义。

(4) 在碳源供给充足的情况下,颗粒内外部NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的浓度梯度越大,颗粒内部反硝化速率越大,而且NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的浓度梯度为颗粒内部反硝化的主要影

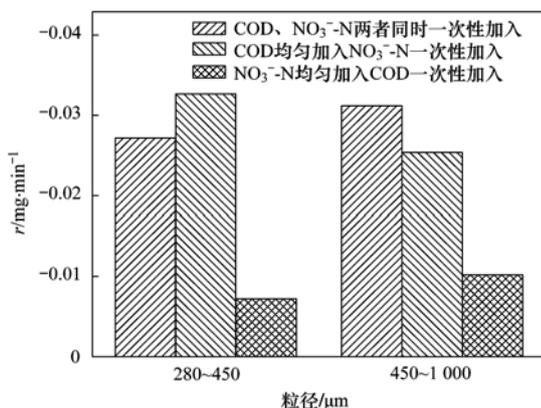


图6 不同粒径颗粒的反硝化速率比较

Fig. 6 Denitrification rate comparison of granules with different diameters

响因素,同时颗粒的粒径、空隙率对其也存在影响。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Fuhs G W, Chen M. Microbiological basis of phosphate removal in the activated sludge process for the treatment of wastewater [J]. *Microbiology Ecology*, 1975, **2**(2): 119-138.
- [ 2 ] Seviour R J, Mino T, Onuki M. The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2003, **27**(1): 99-127.
- [ 3 ] Saunders A M, Oehmen A, Blackall L L, *et al.* The effect of GAOs on anaerobic carbon requirements in full-scale Australian EBPR plants [J]. *Water Science and Technology*, 2003, **47**(11): 37-43.
- [ 4 ] Satoh H. Deterioration of enhanced biological phosphate removal by the domination of microorganisms without poly-p accumulating [J]. *Water Science and Technology*, 1994, **30**(6): 203-211.
- [ 5 ] 刘小英, 姜应和, 郭超, 等. SBR 中除磷颗粒污泥的培养和 A/O 及 A/A/O 颗粒污泥工艺除磷特性研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(9): 2655-2660.
- [ 6 ] 张可方, 张朝升, 罗思音, 等. SBR 短程同步硝化反硝化耦合除磷的研究[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(7): 65-70.
- [ 7 ] De Kreuk M K, Heijnen J J, Van Loosdrecht M C M. Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, **90**(6): 761-769.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] Eitterer T, Wilderer P A. Generation and properties of aerobic granular sludge [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **43**(3): 19-26.
- [ 10 ] Uhlmann D, Roske I, Hupfer M, *et al.* A simple method to distinguish between polyphosphate and other phosphate fractions of activated sludge [J]. *Water Research*, 1990, **24**(11): 1355-1360.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. (20th ed.). Washington DC: American Health Association, 1998.
- [ 13 ] 王亚宜, 鲁文敏, 杨健, 等. 基于聚糖菌和聚磷菌竞争的代谢模型及影响因素[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(6): 1131-1138.
- [ 14 ] 李夕耀, 王淑莹, 郭春艳, 等. 聚磷菌在不同碳源下的反硝化研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 2958-2962.
- [ 15 ] 王超, 冯士龙, 王沛芳, 等. 污泥中磷的形态与生物可利用磷的分布及相互关系[J]. *环境科学*, 2008, **29**(6): 1593-1597.
- [ 16 ] 康健. 胞外聚合物在生物除磷中作用的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [ 17 ] 卢然超, 张晓健, 张悦, 等. SBR 工艺污泥颗粒化对生物脱氮除磷特性的研究[J]. *环境科学学报*, 2001, **21**(5): 577-581.
- [ 18 ] 李圭白, 张杰. 水质工程学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

## CONTENTS

Quantitative Estimation Source of Urban Atmospheric CO <sub>2</sub> by Carbon Isotope Composition .....	LIU Wei, WEI Nan-nan, WANG Guang-hua, <i>et al.</i> (1041)
Moisture Sources of Guangzhou During the Freezing Disaster Period in 2008 Indicated by the Stable Isotopes of Precipitation .....	LIAO Cong-yun, ZHONG Wei, MA Qiao-hong, <i>et al.</i> (1050)
Optical Properties of Aerosol During Haze-Fog Episodes in Beijing .....	YU Xing-na, LI Xin-mei, DENG Zen-grandeng, <i>et al.</i> (1057)
Secondary Organic Tracers in Summer PM <sub>2.5</sub> Aerosols from Baima Spring Scenic Area, Yaan, Sichuan Province .....	DAI Dong-jue, LI Li, LIU Zi-fang, <i>et al.</i> (1063)
Source Profile and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Vehicle Exhaust .....	QIAO Yue-zhen, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1071)
<i>Platanus orientalis</i> Foliar N% and δ <sup>15</sup> N Responses to Nitrogen of Atmospheric Wet Deposition in Urban Area .....	WANG Yan-li, XIAO Hua-yun, XIAO Hong-wei (1080)
Distribution and Controlling Factors of Nitric Oxide Concentrations in Surface Seawater of Jiaozhou Bay and Adjacent Waters .....	XUE Chao, LIU Chun-ying, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (1086)
Uncertainty Characterization Approaches for Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Taihu Lake .....	GUO Guang-hui, WU Feng-chang, HE Hong-ping, <i>et al.</i> (1091)
Preliminary Analysis of Spatiotemporal Variation of Water Quality and Its Influencing Factors in the Jiulong River Watershed .....	HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, <i>et al.</i> (1098)
Ecological Stoichiometric Relationships of Periphyton Community Elemental Composition and Variations of Water Quality in the Chaobai River .....	..... CUI Jing-guo, SHAN Bao-qing, WANG Shuai (1108)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality of Panxi River in Spring .....	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (1114)
Weathering Seasonal Variations in Karst Valley in Southwest China .....	XIAO Qiong, SHEN Li-cheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (1122)
Algal Community Structure and Water Quality Assessment on Drawdown Area of Kaixian Waters in Three Gorges Reservoir During Winter Storage Period .....	..... GUO Jing-song, XIE Dan, LI Zhe, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics of Phytoplankton Community Changes in Dianshan Lake During Peak Period of Algal Blooms .....	XU Chun-yan, YANG Jie, MA Ming-rui, <i>et al.</i> (1136)
Nitrogen and Phosphorus Release from Herbaceous Vegetation Under Simulated Inundation Experiment of Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir Area .....	..... WANG Jian-chao, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (1144)
Output Characteristics of Non-point Phosphorus from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area Under the Special Rainfall .....	LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (1152)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Urban Dusts from Hefei City .....	LI Ru-zhong, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, <i>et al.</i> (1159)
Distribution and Pollution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Hedi Reservoir .....	ZHANG Hua-jun, CHEN Xiu-kang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (1167)
Heavy Metals Distribution and Risk Assessment of Sediments in the Riverine Wetland of Sanmenxia Reservoir .....	AO Liang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1176)
Regional Distribution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments from Coastal Wetlands of the Yellow River Delta .....	..... LIU Zhi-jie, LI Pei-ying, ZHANG Xiao-long, <i>et al.</i> (1182)
Calculation of Environmental Dredging Depth of Heavy Metal Polluted Sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake .....	JIANG Xia, WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, <i>et al.</i> (1189)
Characteristics of PAHs Pollution in Sediments from Leizhou Coastal Marine Area, Liusha Bay and Shenzhen Bay .....	ZHAO Li-rong, SUN Sheng-li, KE Sheng (1198)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Black Carbon in Road Dusts from Typical Cities of China and India .....	PAN Su-hong, ZHANG Gan, SUN Ya-li, <i>et al.</i> (1204)
Waterborne Iron Migration by Groundwater Irrigation Pumping in a Typical Irrigation District of Sanjiang Plain .....	ZOU Yuan-chun, YU Xiao-fei, HUO Li-li, <i>et al.</i> (1209)
Research on Controlling Iron Release of Desalted Water Transmitted in Existing Water Distribution System .....	TIAN Yi-mei, LIU Yang, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (1216)
Exploration of Newly-Formed Ferric as the Coagulant .....	YANG Xue, ZHANG Jing-cheng, GUAN Xiao-hong (1221)
Degradation of Medroxyprogesterone in Drinking Water by Ozone Oxidation .....	YUE Chan-yuan, MIAO Heng-feng, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (1227)
Synthesis of Core/Shell Structured Magnetic Carbon Nanoparticles and Its Adsorption Ability to Chlortetracycline in Aquatic Environment .....	..... WANG Yi-xuan, ZHANG Di, NIU Hong-yun, <i>et al.</i> (1234)
Removal of Nickel from Aqueous Solutions Using Complexation-Ultrafiltration Process .....	QIN Shu, SHAO Jia-hui, HE Yi-liang, <i>et al.</i> (1241)
Degradation of Organic Pollutants by Photo-Fenton-Like System with Hematite .....	ZHANG Yu, GU Yan, YANG Hui, <i>et al.</i> (1247)
Study on the Degradation of Atrazine in Photo-Fenton-Like System Under Visible Light Irradiation Promoted by N-doped Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	ZHAO Lu, DENG Yi-rong, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1252)
Degradation of Prometon by O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	LI Shao-feng, SUN Chu (1260)
Photoelectrocatalytic Degradation Kinetics of Malachite Green by Pr-N Co-doped TiO <sub>2</sub> Photocatalyst .....	SHA Shuang, ZHOU Shao-qi, ZHANG Xiao-na, <i>et al.</i> (1267)
Experimental Study on Acid Mine Drainage Treatment Using Mine Tailings of Xiangsi Valley, Tongling, China .....	ZHANG Nan, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (1272)
Effect of Polymeric Aluminum-iron on EPS and Bio-flocculation in A <sup>2</sup> /O System .....	WEN Qin-xue, LIU Ai-cui, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Temperature on Pollutant Removal and Nitrous Oxide Emission of Wastewater Nitrogen Removal System .....	ZHANG Ting-ting, ZHANG Jian, YANG Fang, <i>et al.</i> (1283)
Effect of Temperature on Stability of Nitrogen Removal in the ANAMMOX Reactor .....	LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yu-hui, <i>et al.</i> (1288)
Phosphorus Removal Characteristics by Aerobic Granules in Normal Molasses Wastewater After Anaerobic Treatment .....	WANG Shuo, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1293)
Physicochemical Characteristics of Granules with Different Size in a Granular Sludge System for Phosphorus Removal .....	LI Zhi-hua, ZHANG Yu-rong, YANG Fan, <i>et al.</i> (1299)
Denitrifying Bacteria of Constructed Wetland System Based on Nitrous Oxide Reductase Gene ( <i>nosZ</i> ) .....	WANG Xiao-jun, CHEN Shao-hua, ZHANG Zhao-ji, <i>et al.</i> (1306)
Improving Degradation Ability of an Aerobic Denitrifier by Ultraviolet Mutagenesis .....	YU Jia-jia, CHEN Jun, YANG Xuan, <i>et al.</i> (1313)
Characteristics of the Extracellular Polymeric Substances of a Heterotrophic Nitrifying Bacterium Strain .....	CHEN Zhe, ZHANG Bin, SEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1318)
Study on Toxic Effects of Ammonia on Embryonic and Yolk-sac Stage Larvae of Rare minnow .....	..... WANG Zhi-jian, LU Zeng-hui, SHI Ping (1323)
Effects of Continuous Cropping of Vegetables on Ammonia Oxidizers Community Structure .....	MENG De-long, YANG Yang, WU Yan-zheng, <i>et al.</i> (1331)
Impact of Biochar Amendment on the Sorption and Dissipation of Chlorantraniliprole in Soils .....	WANG Ting-ting, YU Xiang-yang, SHEN Yan, <i>et al.</i> (1339)
Quantifying Rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) Photo-assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous <sup>14</sup> C Labeling .....	NIE San-an, ZHOU Ping, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1346)
Compositions and Diagnostic Ratios of Heavily Degraded Crude Oil Residues in Contaminated Soil in Oilfields .....	WANG Jian, ZHANG Xu, LI Guang-he (1352)
Study on Equilibrium Adsorption of Volatile Chlorinated Hydrocarbons on Humid Soils .....	MENG Fan-yong, LIU Rui, Kobayashi Takeshi, <i>et al.</i> (1361)
Toxicity and Accumulation of Copper and Nickel in Wheat Plants Cropped on Alkaline and Acidic Field Soils .....	HUANG Jin-sun, WEI Dong-pu, GUO Xue-yan, <i>et al.</i> (1369)
Change Traits of Phosphorous Consumption Structure in China and Their Effects on Environmental Phosphorous Loads .....	MA Dun-chao, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, <i>et al.</i> (1376)
Research Based on 3MRA Model About the Risk Assessment Methods and Applications of the Landfill Waste .....	YUAN Ying, XI Bei-dou, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (1383)
Impacts of Initial Moisture Content of MSW Waste on Leachate Generation and Modified Formula for Predicting Leachate Generation .....	LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, LI Yu-chao, <i>et al.</i> (1389)
Transformation of Dibutyl Phthalate in Bioreactor Landfill .....	FANG Cheng-ran, LONG Yu-yang, SHEN Dong-sheng (1397)
Kriging Analysis of Vegetation Index Depression in Peak Cluster Karst Area .....	YANG Qi-yong, JIANG Zhong-cheng, MA Zu-lu, <i>et al.</i> (1404)

# 《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4月15日 33卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 4 Apr. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@cees.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@cees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人