

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究	郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)
北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征	于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)
奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析	张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)
华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素	苏彬彬 (2519)
北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究	方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)
民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究	海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)
醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究	张凡, 王建海, 王小臣, 王建昕 (2539)
微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究	曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)
生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析	李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)
炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究	周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)
春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量	曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)
千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究	董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)
新安江流域土地利用结构对水质的影响	曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)
长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析	孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)
河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性	杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)
水藻暴发的影响因素定量化研究初步	张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)
深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响	卢金锁, 胡亚潘 (2611)
结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度	周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)
Subwet 模型在人工湿地设计中的应用	李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)
白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应	何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响	许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周峰 (2642)
铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究	汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)
铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究	杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)
不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响	赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)
邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H ₂ O ₂ 降解机制研究	刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)
二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd ²⁺ 离子的吸附研究	张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)
酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附	蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)
基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni ²⁺ 的吸附性能	张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)
树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐	王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)
Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究	朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)
化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究	王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)
镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究	陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)
HRT 对 A ² O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响	刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)
发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟	张超, 陈银广 (2741)
强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究	熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)
污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响	周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)
不同粒径铁铝泥对砷(Ⅲ)的吸附效果	林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)
我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析	仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)
浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离	徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)
三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响	张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)
吉林前郭水田土壤有机碳垂直分布规律和储量研究	汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)
关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例	张晓伟, 许明祥 (2793)
三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究	黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)
土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C 连续标记法	史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)
西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析	张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)
丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价	李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)
农药企业场地苯系物污染风险及调控对策	庞博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)
水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响	张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)
硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响	刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)
零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用	周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)
2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果	全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)
反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别	刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)
1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究	张倩, 王弘宇, 桑穗姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)
1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究	陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)
微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解	张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)
扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究	周际海, 孙向武, 胡锋, 李辉信 (2894)
固定化 <i>Lysinibacillus cresolovorans</i> 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解	李婷, 任源, 韦朝海 (2899)
生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析	黄翔峰, 张树聪, 彭开彰, 陆丽君, 刘佳 (2906)
A ² O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性	高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞薇, 白志辉 (2912)
生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究	李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)
专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)	

反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别

刘立, 汤兵*, 黄绍松, 付丰连, 张启秦, 黎健彬, 罗建中

(广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006)

摘要: 以污水处理厂 A²/O 厌氧段污泥为种泥, 采用膜生物反应器 (membrane bio-reactor, MBR) 对反硝化聚磷菌 (denitrifying phosphate-removal bacteria, DPB) 进行快速富集及培养, 并提供一种鉴别方法. 试验中以乙酸钠为碳源, 并在缺氧段投加一定浓度的硝酸盐, 结果表明, 在膜组件的高效截留作用下, 经过厌氧-好氧和厌氧-缺氧 2 个阶段的富集培养, 35 d 内反硝化聚磷菌占全部聚磷菌 (phosphate-accumulating organisms) 的比例从 24% 上升到 93%. 此时系统的脱氮、除磷效率均可保持在 90% 以上. 通过荧光原位杂交技术 (fluorescence *in situ* hybridization, FISH) 并结合常规测定手段对活性污泥进行鉴别, 确定 *Pseudomonas* sp. 和 *Rhodocyclus* sp. 为主要的优势菌.

关键词: 膜生物反应器; 硝酸盐; 反硝化聚磷菌; 富集; 快速; FISH; 鉴别

中图分类号: X172; X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)07-2869-07

Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence *in situ* Hybridization Technology

LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, FU Feng-lian, ZHANG Qi-qin, LI Jian-bin, LUO Jian-zhong

(School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The present work focused on a rapid enrichment and cultivation of denitrifying phosphate-removal bacteria (DPB) in a membrane bio-reactor (MBR) by using A²/O anaerobic sludge from a wastewater treatment plant as seed, as well as providing an identification method. In the experiments, sodium acetate was used as the carbon source and a certain amount of nitrate was added to the MBR in the anoxic stage. Results showed that, with the efficient trap of the hollow-fiber membrane module, the proportion of DPB in all the phosphate-accumulating organisms (PAOs) increased from 24% to 93% within 35 days after two-stage's cultivation including anaerobic/aerobic and anaerobic/anoxic, during which the removal efficiency of nitrogen and phosphorus reached more than 90%. The activated sludge was identified by combining a regular method and the fluorescence *in situ* hybridization (FISH) technique, which demonstrated that *Pseudomonas* sp. and *Rhodocyclus* sp. were the dominant bacteria in the used bioreactor.

Key words: membrane bio-reactor (MBR); nitrate; denitrifying phosphate-removal bacteria (DPB); enrichment; rapid; FISH; identification

反硝化同步除磷脱氮技术是一种采用全新理论建立起来的较为新型的工艺, 该技术是利用 DPB 在缺氧条件下, 以硝酸盐取代氧作为电子受体, 通过代谢作用来同时完成反硝化脱氮、过量吸磷作用, 该过程相比于传统工艺可节省约 50% 的 COD 及约 30% 的耗氧量^[1, 2]. 故利用硝酸盐为电子受体的同步反硝化脱氮除磷工艺被视为一种高效、低耗、可持续的生物处理工艺. 反硝化同步除磷脱氮技术的关键就在于 DPB 的富集和培养, 目前已经有一些研究人员采用了 SBR 反应器对 DPB 进行富集研究^[3-7], 但是长世代周期的硝化菌与短世代周期的聚磷菌在 SBR 单一体系内会存在着泥龄矛盾, 而且由于丝状菌的繁殖, 会极大地影响到固液的有效分离^[8], 从而使得 DPB 在 SBR 中的富集以及实际工程中的应用增添了难度. 有研究报道了用序批式膜

生物反应器 (SBMBR) 对 DPB 进行富集^[9], 改进效果十分明显. DPB 优势菌群的构建是推进反硝化同步除磷脱氮技术实用化的关键, 其中的重要步骤是 DPB 的快速富集及培养, 并采用可靠的技术手段予以鉴别^[10]. 长久以来, 对各种污水处理工艺微生物的检测一直采用的是分离和培养的方法^[11], 但这种方法费时费力, 而且不能精准地反映工艺中混合菌群的组成, 对于部分培养条件要求苛刻的细菌, 这类方法的局限性就容易凸显. 而利用荧光原位杂交技术, 则不仅可以在指定的微生物环境中检测和鉴别不同的微生物个体, 并且可以同时微生物群落进

收稿日期: 2012-10-15; 修订日期: 2012-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178120)

作者简介: 刘立 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: liuli19880128@163.com

* 通讯联系人, E-mail: renytang@163.com

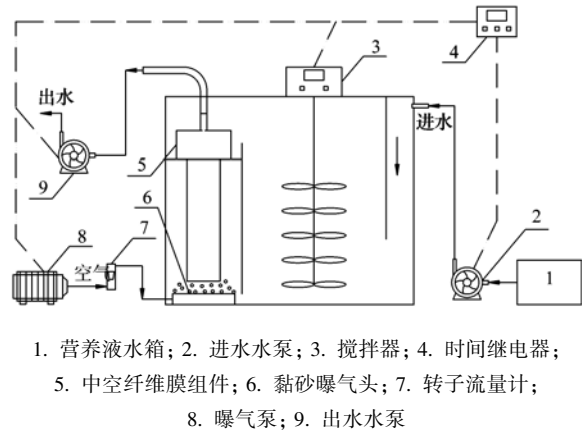
行分析评价。

故而本试验采用膜生物反应器 (MBR) 对 DPB 进行快速富集,并利用荧光原位杂交技术对富集的 DPB 进行鉴别。本项研究的目的在于利用中空纤维膜的高效截留作用^[12]及探索合适的环境条件实现反硝化聚磷菌的快速富集及培养,以及利用荧光原位杂交技术^[13,14]及结合常规测定比例方法来检验上述工作的有效性,以期反硝化同步除磷脱氮技术的工程应用提供快速富集及鉴别的参考方法。

1 材料与方法

1.1 试验装置

如图 1 所示,试验主体反应器为膜生物反应器,材质为有机玻璃,有效容积为 24 L。内设黏砂曝气头,采用鼓风曝气,反应器中同时设有搅拌器在厌氧和缺氧环境下使污泥处于悬浮状态。装置内所用膜组件为天津膜天膜公司生产的中空纤维膜,膜的参数如下:pH 范围 2~10,温度范围 5~45℃,分离孔径 0.2 μm,模材质为 PVDF。



1. 营养液水箱; 2. 进水泵; 3. 搅拌器; 4. 时间继电器; 5. 中空纤维膜组件; 6. 黏砂曝气头; 7. 转子流量计; 8. 曝气泵; 9. 出水水泵

图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experiment device

1.2 接种污泥及试验水质

活性污泥取自广州市沥窖污水处理厂 A²/O 厌氧段。试验用水为人工模拟废水(成分见表 1),其

表 1 试验人工模拟废水成分

人工合成废水成分		微量元素组成	
基质种类	浓度/mg·L ⁻¹	组分	浓度/g·L ⁻¹
COD	150~250	FeCl ₃	1.5
N	10~21	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.03
P	6~10	KI	0.18
MgSO ₄	45	ZnSO ₄	0.12
MnCl ₂	0.12	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.15
KCl	18	EDTA 二钠	10
碱度 (NaHCO ₃)	适量	微量元素	0.9 mL·L ⁻¹

中所投加的碳源为乙酸钠,氮源为氯化铵,磷源为磷酸二氢钾^[15],试验过程中投加适量 NaHCO₃ 控制进水 pH 值在 7.5~8.5 之间,并按需改变进水的 COD 和硝酸盐的浓度及比例。

1.3 试验方法与步骤

试验采用三段式培养方法(厌氧-好氧、厌氧-排水-进水-缺氧、厌氧-缺氧)对 DPB 进行富集培养,具体操作模式如图 2 所示。

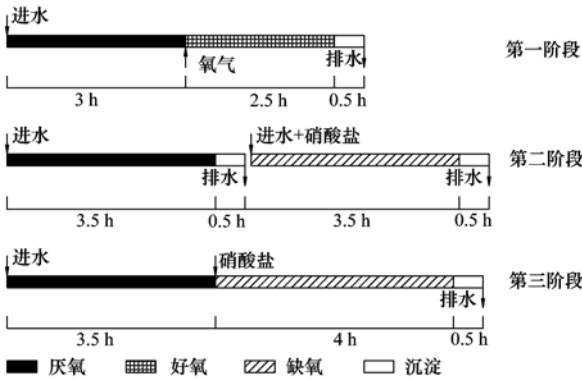


图 2 MBR 中 3 个阶段的运行方式

Fig. 2 Operation pattern of three different phases in the experiment

第一阶段在厌氧/好氧条件下进行,目的是对系统中的污泥进行活化,使系统具有高效的好氧除磷性能,为后两阶段富集 DPB 做准备。在此阶段每天运行 4 个周期,控制污泥浓度在 3 500 mg·L⁻¹ 左右,共运行 5 d;第二阶段采用厌氧/沉淀排水/缺氧/沉淀排水的运行方式。厌氧释磷结束之后,沉淀,中空纤维膜抽滤排水,之后加入不含 COD 的模拟废水,为 DPB 营造低 COD(小于 30 mg·L⁻¹) 的环境。第二阶段污泥浓度依旧控制在 3 500 mg·L⁻¹ 左右,共运行 30 d;第三阶段采用厌氧/缺氧交替运行方式,主要是考察试验系统的稳定性,以及系统同步反硝化脱氮和除磷的性能。在厌氧段进水时设定不同磷酸盐浓度(4~12 mg·L⁻¹) 的人工模拟废水,缺氧段投加硝酸盐与磷酸盐投加比控制为 N:P≈2:1。该阶段污泥浓度控制在 3 500~4 000 mg·L⁻¹,共运行 5 d。

1.4 水样指标测定与分析方法

出水水样为泥水混合液经中空纤维膜的滤液;系统水样为反应器中泥水混合液经滤纸过滤的滤过液。水样的指标分析全部采用标准方法^[16]。

DPB 在聚磷菌中所占比例的测定方法:Wachtmeister 等^[17]和 Meinhold 等^[18]设计了一个批量试验来研究全部聚磷菌中反硝化聚磷菌的数量。他们认为,缺氧吸磷和好氧吸磷速率的比值反映了

体系中的反硝化聚磷菌的比值. 故根据公式: $R_{DPB} = Q_1/Q_2$ 可以计算反应器中 DPB 在总 PAOs 中的比例^[19,20]. 式中, R_{DPB} 为 DPB 占总 PAOs 的比例; Q_1 为 DPB 缺氧吸磷速率, $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; Q_2 为 PAOs 好氧吸磷速率, $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$.

1.5 FISH 分析

1.5.1 荧光探针

探针委托英潍捷基(上海)贸易有限公司合成: 用于检测全细菌的探针 EUB338 (5'-GCTGCCTCCCGTAGGACT-3'), Texas Red 5' 标记; 用于检测 β -Proteobacteria 中 *Rhodocyclus* sp. 及相关菌种的探针 PAO651 (5'-CCCTCTGCCAACTCCAG-3'), FITC 5' 标记; 用于检测 *Pseudomonas* sp. 的探针 *Pseudomonas* sp. (5'-GCTGGCCTAGCCTTC-3'), FAM 5' 标记, 以上探针保存浓度为 $25\text{ ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$.

1.5.2 样品的处理

(1) 从 MBR 反应器中采集适量新鲜的活性污泥样品, 用 4% 的多聚甲醛固定 20 min.

(2) 用高速离心机 $12\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 于 4°C 离心 5 min, 去除上清液, 加入 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 PBS 清洗, 离心去除上清液, 重复 3 次, 加入 $0.02\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 PBS, 充分振荡, 使之重新成为悬浮液. 无法立即进行杂交的样品可以在细胞固定后加入体积比为 1:1 的乙醇与 PBS 混合液, -20°C 条件下保存待用.

1.5.3 杂交试验过程

(1) 取约 $5\text{ }\mu\text{L}$ 的样品悬液, 滴加到玻片上, 阴暗处常温风干. 风干后用 50%、80% 和 100% 乙醇脱水, 风干. 为了能让细菌有更好的通透性, 使探针能够进入到细菌内, 在风干后的样品上滴加约 $10\text{ }\mu\text{L}$ 的不含探针的杂交液, 预杂交 2 h. 经过预杂交的样品, 用重蒸水清洗掉杂交液, 风干后进行杂交.

(2) 先将 $10\text{ }\mu\text{L}$ 的探针与 $40\text{ }\mu\text{L}$ 的杂交缓冲液充分混合, 再取 $15\text{ }\mu\text{L}$ 混合液滴到目标区域, 加盖玻片, 暗盒内进行杂交反应(盒内放入纱布, 杂交液润湿), 再放置于恒温箱中杂交(先滴加探针 PAO651 或探针 *Pseudomonas* sp. 进行杂交, 清洗风干后再滴加探针 EUB338 进行杂交), 各探针的杂交条件^[21~24]如表 2 所示.

表 2 各探针杂交条件

Table 2 Hybridization conditions of each probe			
探针	杂交温度 / $^\circ\text{C}$	杂交时间 /h	去离子甲酰胺浓度 /%
EUB338	42	2	0
PAO651	46	3	35
<i>Pseudomonas</i> sp.	50	5	20

(3) 将杂交清洗液于 48°C 的水浴中预热 20 min, 待杂交结束后, 取出载玻片放入杂交清洗液中浸泡 20 min, 再用无菌水洗去残留杂交清洗液, 自然风干. 风干后的样品立即用荧光显微镜观察.

2 结果与讨论

2.1 活性污泥的活化、驯化

由图 3 可知, 系统在活化期间的厌氧/好氧方式下运行, 磷酸盐的去除率由开始的 31.9% 经过 5 d 的运行提升到 98.6%, COD 的去除率也由开始的 70.3% 提升到 89.8%.

结合图 4 第 5 d 周期的磷酸盐、COD 浓度关系图可以看出, 在厌氧的 0~3.5 h 内, 随着 COD 的逐渐降低, 磷酸盐的浓度呈现持续上升的现象. 在 3.5 h 时 COD 的浓度降至最低值 $23.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 而磷酸盐的浓度在此时达到了最高值 $23.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 厌氧段释磷量和 COD 消耗量的关系 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P/COD}$) 为 $0.089\text{ mg}\cdot\text{mg}^{-1}$. 此时活性污泥中聚磷菌的厌氧释磷性能已经得到充分活化. 进入好氧段之后 COD 的变化不明显, 而系统活性污泥良好的好氧聚磷性能则得到了体现, 在 2.5 h 之内, 磷酸盐的浓度由 $23.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 磷酸盐的去除率达到了 98.6%, 出水磷酸盐的浓度远远低于 GB 8978-1996 一级排放标准. 说明通过第一阶段 5 d 的运行, 系统活性污泥中聚磷菌的厌氧释磷、好氧聚磷能力得到了充分的活化.

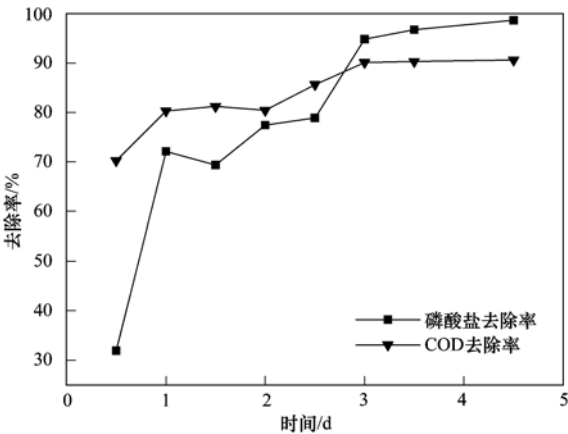


图 3 活化期间磷酸盐、COD 去除率变化过程

Fig. 3 Change processes of phosphate、COD removal efficiency during the activation stage

2.2 反硝化聚磷菌的富集

经过第一阶段的运行, 污泥具有了良好的除磷性能. 系统进入第二阶段厌氧/缺氧运行, 对以硝酸盐为电子受体的 DPB 进行富集.

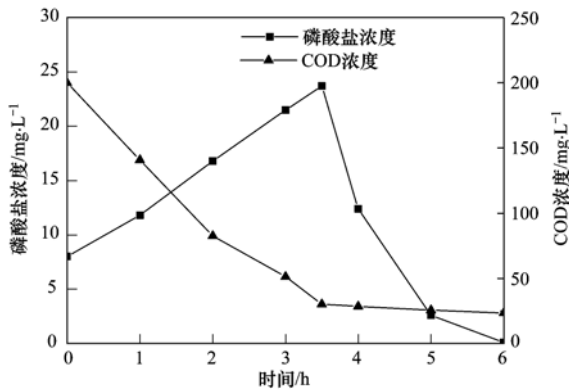


图4 第5 d的周期中磷酸盐、COD浓度变化

Fig. 4 Changes of the concentration of phosphate and COD during the fifth day's period

由于在第二阶段富集初期,能利用硝酸盐为电子受体的DPB在所有聚磷菌中的所占比例尚低,如若在富集初期投加较高浓度的硝酸盐,系统将不能把硝酸盐完全吸收利用,从而会使得硝酸盐在厌氧段累积,使得在厌氧段中有机碳源不能有效地转化为挥发性脂肪酸(VFAs),进而会抑制聚磷菌的释磷和PHB的合成,这种现象代文臣等^[9]已经报道过。故本试验基于张洁等^[25]、曹桂萍^[26]的处理手段,并进行了优化,在第二阶段的前6 d,分别往系统内投加 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硝酸盐,保证系统逐步适应,然后将硝酸盐浓度提升到较佳浓度 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

进水硝酸盐的浓度提高到 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之后,在第7 d的周期当中,磷酸盐、硝酸盐的去除率都出现不同程度的下降,分别降到了53.2%、75.4%。这是由于硝酸盐浓度的骤然改变,引起了系统内的一系列连锁反应(硝酸盐的部分累积导致厌氧段释磷的不充分,从而进一步影响缺氧段磷的吸收)。

随着系统的运行,硝酸盐的去除与磷酸盐的去除在总体上体现出正比的趋势,这与理论相符^[3]。并且二者的去除率从第20 d开始维持在80%以上,说明系统已经趋于稳定。由图5可知,从第25 d开始,膜出水的磷酸盐浓度已经维持在 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。在第30 d的时候,磷酸盐、硝酸盐的去除率分别达到了91.8%、91.9%。膜出水水质磷酸盐为 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,硝酸盐为 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

图6反映了反应器中DPB在总聚磷菌所占比例的变化趋势以及在第35 d系统活性污泥好氧聚磷速率与缺氧聚磷速率之间的关系。

结合6、图7可以看出,随着系统的运行及硝酸盐的投入,以硝酸盐为电子受体的反硝化聚磷菌DPB已经开始进行富集。由于系统处于厌氧/缺氧

阶段运行,系统中溶解氧含量极低,好氧聚磷菌由于只能利用氧作为电子受体而缺少利用硝酸盐作为电子受体所必需的酶而处于停滞期^[4],故而DPB开始随着系统逐步运行迅速呈现出其优势菌的作用,具体体现在系统膜出水水质的变化:在运行的第30 d,出水的磷酸盐、硝酸盐的去除率分别达到了91.8%、91.9%。

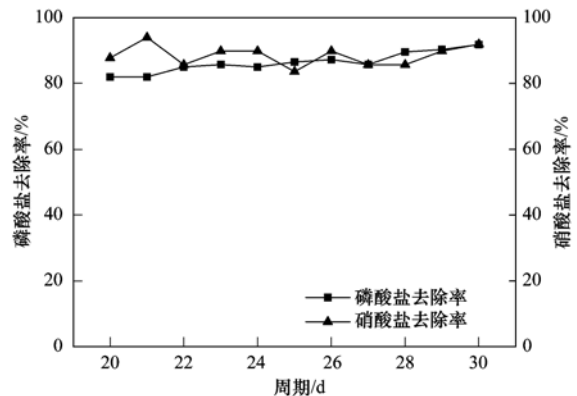


图5 第二阶段厌氧/缺氧条件运行磷酸盐、硝酸盐去除率变化

Fig. 5 Changes of phosphate and nitrate removal efficiency under anaerobic/anoxic conditions of the second stage

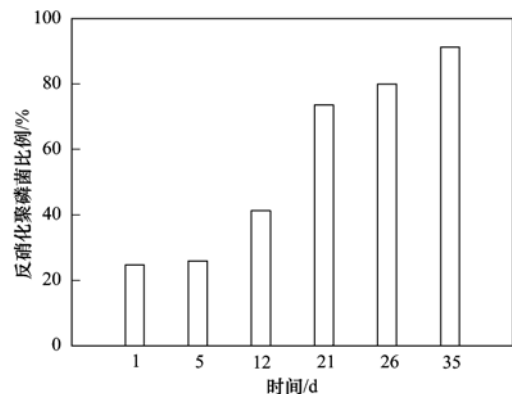


图6 反硝化聚磷菌(DPB)比例随着周期运行的变化

Fig. 6 Changes of the proportion of DPB with the run of cycle

从图7中可以得知,在第35 d系统活性污泥厌氧与缺氧或好氧过程中,厌氧阶段120 min内,磷酸盐的浓度从 $6.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $13.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,依然体现出良好的释磷性能。而在接下来的好氧、缺氧过程中,好氧120 min后磷酸盐的浓度由 $13.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,好氧聚磷量为 $13.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,速率($\text{PO}_4^{3-}\text{-P/MLSS}$)达到了 $1.9 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$;缺氧120 min磷酸盐的浓度由 $13.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,反硝化聚磷速率则为 $1.8 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 。根据DPB比例计算公式得出,此时体系中DPB在总聚磷菌中所占比例高达93%,远远高于Lee等^[5]、李勇智等^[3]报道的64%和73%,与周康群等^[27]报道的

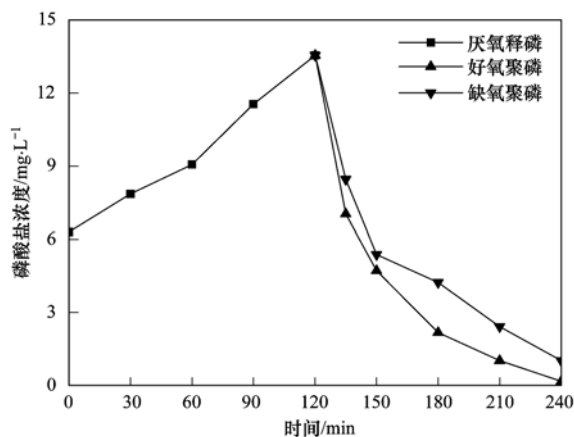


图7 第35 d系统活性污泥厌氧与缺氧或好氧过程中磷酸盐浓度变化

Fig. 7 Changes of phosphate concentration of the thirty-fifth day activated sludge under anaerobic/anoxic and anaerobic/aerobic conditions

94%较为接近,而所用的富集时间为35 d.说明在有中空纤维膜辅助的情况下,所设定的富集方法,有利于快速驯化、富集以硝酸盐为电子受体的反硝化聚磷菌.

2.3 反硝化聚磷菌的FISH鉴别

取MBR反应器中测定反硝化聚磷菌在总聚磷菌中所占比例达到93%时的活性污泥进行FISH鉴别,此时反硝化聚磷菌已初步认定成为优势菌,可避免由于反硝化聚磷菌数量较少而出现杂交现象不明显的情况.图8为MBR反应器中反硝化聚磷菌活性污泥的重复双色法杂交FISH图片.其中图8

(a)、图8(d)红色荧光信号为Texas Red标记的EUB338探针杂交的效果图;图8(b)绿色荧光信号为FITC标记的PAO651探针杂交的效果图;图8(e)绿色荧光信号为FAM标记的*Pseudomonas* sp.探针杂交的效果图;图8(c)、图8(f)是用Image-Pro Plus 6.0分别将图8(a)和图8(b)、图8(d)和图8(e)结合之后的图,其中图8(c)的黄色信号是*Rhodocyclus* sp.,图8(f)的黄色信号是*Pseudomonas* sp..用软件Image-Pro Plus 6.0分析荧光信号可得出,在图8(c)中,活性污泥*Rhodocyclus* sp.在全细菌中占的比例为 $(45 \pm 5)\%$,而在图8(f)中可以看出活性污泥中*Pseudomonas* sp.也占有了一定比例,为全细菌的 $(19 \pm 5)\%$.结合此时系统出水良好,运行稳定,说明在以硝酸盐为电子受体培养驯化的MBR系统中,*Pseudomonas* sp.和*Rhodocyclus* sp.已经成为优势菌种,进一步证实了所设定的快速富集方式能迅速、有效地富集反硝化聚磷菌.

2.4 系统的稳定性能

经过第二阶段的富集,阶段末期磷酸盐和硝酸盐的去除率分别达到了91.8%和91.9%,表明了系统中已富集了较多的反硝化聚磷菌.为考察系统的稳定性能,本研究进行了系统的稳定性测试试验,结果如图9所示.

根据设定的进水磷酸盐浓度,对系统进行稳定性试验.由图9可以看出,当系统的进水磷酸盐浓度发生变化时,出水磷酸盐浓度变化较小,磷酸盐的

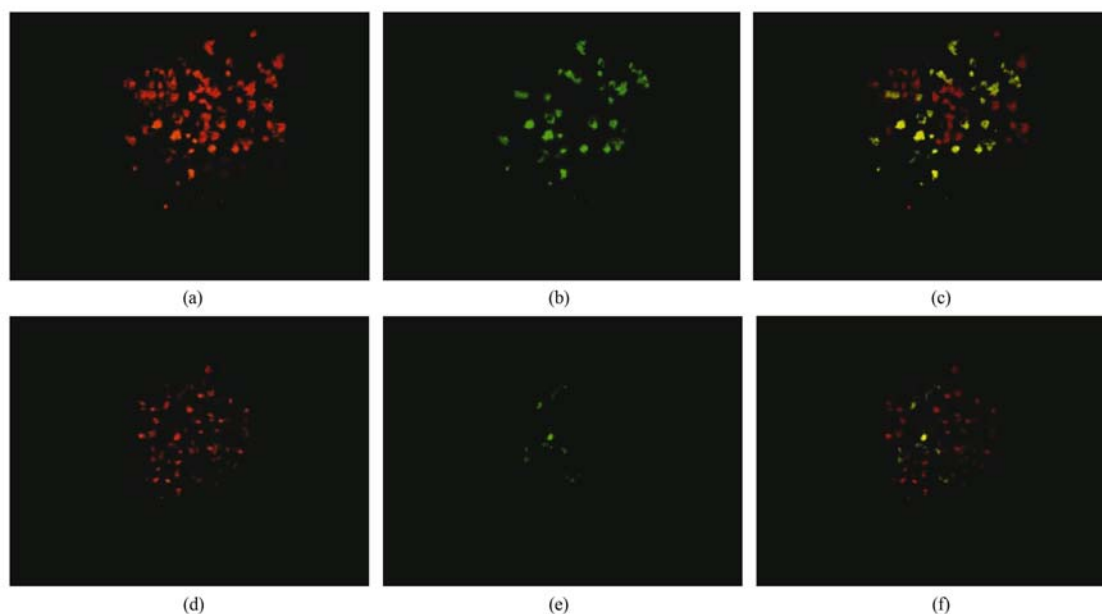


图8 反硝化聚磷菌活性污泥FISH图片(标尺均为10 μm)

Fig. 8 FISH pictures of denitrifying phosphate-removal bacteria active sludge(all scales were 10 μm)

去除率基本都保持在 90% 以上(第 0.5 d、第 2 d、第 5 d 为 90%,第 3.5 d 为 87.8%),出水磷酸盐浓度皆能达到 GB 8978-1996 一级排放标准.由此可以说明本试验所富集的以 DPB 为优势菌群的体系对进水磷酸盐浓度变化有较好的适应能力,进一步证实所设定的富集方法有效,得到的体系稳定性好.

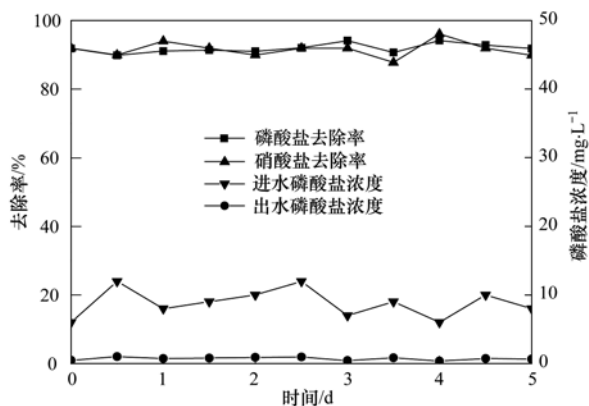


图9 进水磷酸盐浓度变化对系统稳定性的影响

Fig. 9 Effect of changing phosphate concentration on the system stability

3 结论

(1)利用膜生物反应器实现了反硝化聚磷菌的快速富集及培养,在 35 d 内,反硝化聚磷菌占全部聚磷菌的比例从 24% 上升到 93%.

(2)试验条件下富集的优势菌及结合中空纤维膜的高效截留作用,使得体系稳定性良好,系统的脱氮、除磷效率均可保持在 90% 以上.

(3)采用 FISH 技术并结合常规测定 DPB 在聚磷菌中占有比例的方法,证实 *Pseudomonas* sp. 和 *Rhodocyclus* sp. 在活性污泥中占有较大比例,分别为 $(45 \pm 5)\%$ 和 $(19 \pm 5)\%$,证明试验所设定的快速富集方法有效.

参考文献:

- [1] Kuba T, Smolders G, van Loosdrecht M C M, et al. Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor [J]. Water Science & Technology, 1993, **27**(5-6): 241-252.
- [2] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two sludge system [J]. Water Research, 1996, **30**(7): 1702-1710.
- [3] 李勇智,王淑滢,吴凡松,等.强化生物除磷体系中反硝化聚磷菌的选择与富集[J].环境科学学报,2004, **24**(1): 45-49.
- [4] Zeng R J, Saunders A M, Yuan Z G, et al. Identification and comparison of aerobic and denitrifying polyphosphate-accumulating organisms [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, **83**(2): 140-148.
- [5] Lee D S, Jeon C O, Park J M. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system [J]. Water Research, 2001, **35**(16): 3968-3976.
- [6] 杨文婷,沈耀良. SBR 中反硝化聚磷菌的培养驯化研究[J].环境科学与技术,2009, **32**(8): 6-8, 12.
- [7] 刘娇娇,刘涛.反硝化除磷菌富集试验研究[J].化工文摘,2009, (2): 33-35.
- [8] Ekama G A, Wentzel M C. Difficulties and developments in biological nutrient removal technology and modelling [J]. Water Science & Technology, 1999, **39**(6): 1-11.
- [9] 代文臣,张捍民,肖景霓,等.序批式膜生物反应器中反硝化聚磷菌的富集[J].环境科学,2007, **28**(3): 517-521.
- [10] 颜强,谢有奎. FISH 技术在污水生物除磷脱氮研究中的应用 [J]. 重庆建筑大学学报,2004, **26**(6): 71-73.
- [11] 李冰冰,肖波,李蓓. FISH 技术及其在环境微生物监测中的应用 [J]. 生物技术,2007, **17**(5): 94-97.
- [12] Adham S, Gagliardo P, Boulos L, et al. Feasibility of the membrane bioreactor process for water reclamation [J]. Water Science & Technology, 2001, **43**(10): 203-209.
- [13] Soejima K, Oki K, Terada A, et al. Effects of acetate and nitrite addition on fraction of denitrifying phosphate-accumulating organisms and nutrient removal efficiency in anaerobic/aerobic/anoxic process [J]. Bioprocess and Biosystems engineering, 2006, **29**(5-6): 305-313.
- [14] Zillers J L, Peccia J, Kim M W, et al. Involvement of *Rhodocyclus* - related organisms in phosphorus removal in full-scale wastewater treatment plants [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, **68**(6): 2763-2769.
- [15] 徐微,吕锡武,蒋彬.反硝化聚磷污泥的培养驯化及关键参数研究[J].中国给水排水,2009, **25**(5): 5-8.
- [16] 国家环保局编委会.水和废水检测分析方法[M].北京:环境科学出版社,1994.
- [17] Wachtmeister A, Kuba T, van Loosdrecht M C M, et al. A sludge Characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. Water Research, 1997, **31**(3): 471-478.
- [18] Meinhold J, Filipe C D M, Daggar G T, et al. Characterization of the denitrifying fraction of phosphate accumulating organisms in biological phosphate removal [J]. Water Science & Technology, 1999, **39**(1): 31-42.
- [19] Kernr Jespersen J P, Henze M. Biological phosphorus uptake under anoxic and aerobic condition [J]. Water Research, 1993, **27**(4): 617-624.
- [20] Hu J Y, Ong S L, Ng W J, et al. A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacteria by using three different types of electron acceptors [J]. Water Research, 2003, **37**(14): 3463-3471.
- [21] 朱琳,尹立红,浦跃朴,等.荧光原位杂交法检测环境硝化细菌实验条件优化及应用 [J]. 东南大学学报(自然科学版),2005, **35**(2): 266-270.

- [22] 张勇, 宋吟玲. 荧光原位杂交法检测反应器中聚磷菌实验条件优化及应用[J]. 环境科学与管理, 2008, **33**(2): 126-129.
- [23] Schleifer K H, Amann R I, Ludwig W, *et al.* Nucleic acid probes for the identification and in situ detection of *Pseudomonas* spp [A]. In: Galii E, Silver S, Witholt B (Eds.). *Pseudomonas: Molecular Biology and Biotechnology* [C]. Washington D. C.: American Society for Microbiology, 1992. 127-134.
- [24] Amann R I. In situ identification of micro-organisms by whole cell hybridization with rRNA-targeted nucleic acid probes [A]. In: Akkermans A D L, Elsas J D, de Bruij F J (Eds.). *Molecular Microbial Ecology Manual* [C]. London: Kluwer, 1995. 1-5.
- [25] 张洁, 田立江, 张雁秋. 反硝化聚磷菌快速驯化的对比研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2007, **41**(3): 411-414.
- [26] 曹桂萍. 反硝化聚磷菌富集条件的研究[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(13): 60-63.
- [27] 周康群, 刘晖, 孙彦富, 等. 反硝化聚磷菌的富集及富集污泥活性研究[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(4): 110-115.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2012年12月7日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续11次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophtic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qianguo, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行