

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发 ..... 张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)  
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟 ..... 彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)  
鄂东典型工业城市大气 PM<sub>10</sub> 中元素浓度特征和来源分析 ..... 占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)  
常州夏秋季 PM<sub>2.5</sub> 中碳质气溶胶特征及来源 ..... 叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)  
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 ..... 范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)  
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源 ..... 刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)  
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布 ..... 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)  
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征 ..... 唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)  
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价 ..... 张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)  
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究 ..... 李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)  
尼洋河流域水化学特征及其控制因素 ..... 张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)  
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征 ..... 杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)  
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估 ..... 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)  
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响 ..... 何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)  
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值 ..... 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)  
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响 ..... 肖丽微, 朱波 (4580)  
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系 ..... 滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)  
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析 ..... 李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)  
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律 ..... 蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)  
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响 ..... 王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)  
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V) ..... 周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)  
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除 ..... 蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)  
流态对生物添加强化硝化效果的影响 ..... 于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 滑思思, 冯云堂 (4641)  
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响 ..... 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)  
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响 ..... 刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)  
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力 ..... 马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)  
污水处理厂 CANON 工艺小试 ..... 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)  
SBR 加载不同粒径活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制 ..... 信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)  
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复 ..... 黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)  
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化 ..... 高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)  
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析 ..... 张玉, 万方, 周集体 (4706)  
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响 ..... 耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)  
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落 ..... 杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)  
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析 ..... 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)  
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响 ..... 王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)  
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响 ..... 刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)  
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性 ..... 牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)  
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素 ..... 杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)  
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量的短期影响 ..... 李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)  
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)  
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 ..... 周燕, 卢新卫 (4800)  
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征 ..... 代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)  
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响 ..... 蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 邱磊, 胡荣桂 (4819)  
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因素 ..... 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)  
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果 ..... 段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)  
反复冻融与高温老化对砷污染土壤固化稳定化效果的影响 ..... 杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)  
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征 ..... 叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)  
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性 ..... 王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)  
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险 ..... 印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁浚刚, 唐铭 (4868)  
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响 ..... 陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)  
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响 ..... 李标, 孔晓英, 李连华, 李颖, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)  
环境模型中敏感性分析方法评述 ..... 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)  
《环境科学》征稿简则(4662) 《环境科学》征订启事(4672) 信息(4647, 4705, 4789)

# SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响

耿淑英, 付伟章\*, 王静, 郑书联

(山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018)

**摘要:** SBR 反应器的应用越来越普遍, 为进一步提高其处理效率, 提出在 SBR 反应体系再外加一个磁场来提高其运行性能. 研究了不同磁感应强度对反应系统污染物降解效率的影响, 并采用 MiSeq 高通量测序技术解析了磁场条件下活性污泥微生物群落多样性变化. 结果表明, 磁场的加入在一定程度上提高了 SBR 系统的运行性能, 且当磁感应强度为  $7 \times 10^{-2}$  T 时效果最明显. 其中, 外加磁场对 SBR 反应系统中总氮去除效果的影响显著, 在  $7 \times 10^{-2}$  T 时脱氮率从无磁场的 65.69% 提高到 85.98%. 外加磁场显著提高了污泥脱氢酶活性, 因而也会对各种污染物的去除产生积极作用. 通过对不同磁感应强度下活性污泥微生物群落多样性的比较发现,  $7 \times 10^{-2}$  T 磁场下活性污泥微生物丰度及多样性最高. 实验 SBR 反应器中的细菌域共鉴定出 14 个门, 主要以变形菌门 Proteobacteria (25.3% ~ 61.5%)、拟杆菌门 Bacteroidetes (18.6% ~ 46.2%)、放线菌门 Actinobacteria (5.3% ~ 47.2%)、酸杆菌门 Acidobacteria (0.4% ~ 4.0%) 为主. 重要的脱氮细菌: 如  $\alpha$ -Proteobacteria 的 *Rhodoblastus*、*Paracoccus*;  $\beta$ -Proteobacteria 的 *Alicyclophilus*、*Comamonas*、*Xenophilus*、*Acidovorax*、*Dechloromonas*、*Thauera*;  $\delta$ -Proteobacteria 的 *Desulfovibrio*; Planctomycetes 门等, 在中等磁感应强度尤其是  $7 \times 10^{-2}$  T 时, 丰度最高, 与脱氮效率增加有内在的联系. 典型的 PAOs 如 *Acinetobacter*、*Pseudomonas*、*Propionicimonas* 等, 在中等磁场条件下含量较高, 与除磷率变化趋势相同. 活性污泥中细菌群落结构变化与污水处理效率存在一定相关性, 外加磁场通过改变微生物群落结构影响污水处理效果.

**关键词:** SBR; 磁场增强作用; 污染物; 去除效率; 微生物群落结构

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4715-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201703088

## Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)

GENG Shu-ying, FU Wei-zhang\*, WANG Jing, ZHENG Shu-lian

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

**Abstract:** The application of SBR reactors is becoming more common and in order to further improve the efficiency of their treatment it has been proposed to add a magnetic field to SBR systems. The effects of different magnetic fields on the degradation efficiency of conventional pollutants in an SBR was studied. MiSeq high-throughput sequencing techniques were used to analyze the diversity of microbial communities in activated sludge under magnetic field conditions. These results show that the addition of a magnetic field improves the performance of a SBR system to an extent and magnetic induction effects are most obvious at  $7 \times 10^{-2}$  T. This is identified through a significant effect on the removal efficiency of total nitrogen and an increase in the denitrification rate from 65.69% to 85.98%. It also significantly improves the activity of sludge dehydrogenase and has a positive effect on the removal of various pollutants. The diversity of microbial communities in activated sludge under different magnetic field intensities shows a greater microbial abundance and diversity in the active sludge. The bacterial domain in the experimental SBR includes 14 phyla, which are mainly Proteobacteria (25.3% -61.5%), Bacteroidetes (18.6% -46.2%), Actinobacteria (5.3% -47.2%), and Acidobacteria (0.4% -4.0%). Important denitrification bacteria such as *Rhodoblastus*, *Paracoccus* of  $\alpha$ -Proteobacteria, *Alicyclophilus*, *Comamonas*, *Xenophilus*, *Acidovorax*, *Dechloromonas*, *Thauera* of  $\beta$ -Proteobacteria, *Desulfovibrio* of  $\delta$ -Proteobacteria and Planctomycetes, etc. at a moderate magnetic induction of  $7 \times 10^{-2}$  T have a high abundance and there is an internal relationship between this and an increase in denitrification efficiency. Polyphosphate-accumulating organisms (PAOs) such as *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Propionicimonas*, etc., are present at higher levels under these conditions and follow the same trends as for the phosphorus removal rates. There is a correlation between bacterial community structure changes and sewage treatment efficiency in activated sludge. Applied magnetic fields have a positive effect on sewage treatment by changing the microbial community structure.

**Key words:** sequencing batch reactor; magnetic field enhancement; pollutants; removal efficiency; microbial community structure

目前, 由于水资源缺乏导致的水环境问题日益突出, 加上人们环保意识的不断提高, 污水处理质量标准日趋严格, 传统的污水处理技术需要突破自我不断提高. 许多研究者在不断寻找强化污水处理效

收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-05-22

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2016CYJS05A02)

作者简介: 耿淑英(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: dagsyzi@163.com

\* 通信作者, E-mail: sdaufwz@sdau.edu.cn

果的新方法,其中将磁场与污水处理技术相结合的方法受到越来越多关注.磁技术与其他水处理技术相结合,可强化并提高生物处理系统的污染物去除能力和效率<sup>[1-3]</sup>.关于磁场对污水处理影响的研究主要有:磁场对水体物理化学过程的强化作用<sup>[4]</sup>,应用磁场的物化效应或电化学效应,对磁性颗粒和非磁性颗粒进行力学分离<sup>[5,6]</sup>;磁场对各种污染物去除机制<sup>[7]</sup>;磁场对微生物生长和对微生物酶活性的影响<sup>[8,9]</sup>.到目前为止,已有大量关于SBR与其它技术联合提高污水处理效果及活性污泥微生物群落多样性的研究<sup>[10-14]</sup>,然而,关于运用高通量测序技术研究磁场对活性污泥微生物群落结构和功能的影响尚鲜见报道.活性污泥中微生物群落结构的稳定性与活性污泥的污水处理效果有着密切的关系,在污水处理系统中维持细菌群落的多样性和群落结构的稳定性对于达到较好的污水生物处理效果是十分重要的<sup>[15,16]</sup>.

本研究利用自制SBR反应器,采用Illumina的MiSeq测序平台研究活性污泥系统中细菌群落结构及多样性变化,并结合主要污染物去除率及活性污泥的变化情况进行分析,从磁场对活性污泥细菌群落结构的作用效果上深入分析磁场对活性污泥系统的影响,避免了DEEG、FISH等传统分子生物学方法弊端<sup>[17,18]</sup>,以期为进一步将磁场应用于活性污泥技术的规模化应用提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 污水及污泥来源

所用污水为人工配制的模拟城市生活污水,污水水质:COD 510 ~ 525 mg·L<sup>-1</sup>,氨氮 26 ~ 26.5 mg·L<sup>-1</sup>,总氮 29.5 ~ 30.5 mg·L<sup>-1</sup>,总磷 4.4 ~ 4.7 mg·L<sup>-1</sup>,SS 8 ~ 9 mg·L<sup>-1</sup>.接种污泥取自山东省泰安市某污水处理厂的回流污泥,接种污泥浓度MLSS为3 460 mg·L<sup>-1</sup>,MLVSS为2 780 mg·L<sup>-1</sup>,SV<sub>30</sub>为31%.

### 1.2 实验装置

所用SBR反应器为自制玻璃反应器,尺寸16 cm × 16 cm × 50 cm.各反应器上装有进水浮球开关,排水电磁阀等.小型曝气泵充氧曝气,曝气量大小由曝气管上的阀门控制.SBR污水处理各工序由时间控制器自动控制运行,反应周期8 h,每周期进水1 h,曝气4 h,沉淀2 h,排水0.5 h,闲置0.5 h,每天3个周期.共设7组SBR反应器,每组反应器外增加一对平行磁铁产生磁场,实验装置简图见图1.

磁铁选用铁磁性材料(15 cm × 10 cm × 2.5 cm).磁场位型选择相吸磁场,通过调整平行磁铁之间的距离来调整磁感应强度.磁感应强度的测定选用HT-20型高斯计.

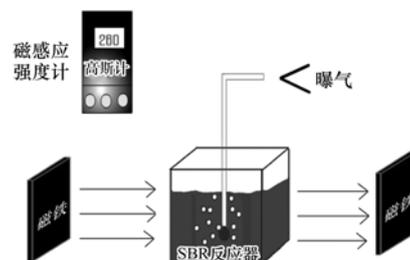


图1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

### 1.3 运行方案

整个实验的运行,主要包括3个阶段,一是污泥驯化阶段,接种污泥在实验室条件下培养驯化至稳定;二是添加磁场,A组为空白对照不加磁场,B、C、D、E、F、G组分别添加磁感应强度 $3 \times 10^{-2}$  T、 $5 \times 10^{-2}$  T、 $7 \times 10^{-2}$  T、 $9 \times 10^{-2}$  T、 $12 \times 10^{-2}$  T、 $15 \times 10^{-2}$  T;三是稳定运行阶段,此时活性污泥适应了不同强度磁场且系统出水水质稳定.接种污泥经充分混合后分至各反应器,且后期培养驯化条件相同,保证了7组样品初始生物群落结构的一致性.加磁场稳定运行一段时间后,取各反应器中污泥混合液用Illumina MiSeq高通量测序技术对污泥的微生物群落多样性进行分析.实验过程中,严格控制实验条件,使SBR反应器溶解氧的含量控制在 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,温度保持在 $20 \sim 26^\circ\text{C}$ ,pH保持在 $7.0 \sim 8.0$ ,污泥浓度控制在 $3\ 000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右.每天定时监测各反应器进出水水质及各类污泥指标.

### 1.4 指标分析方法

#### 1.4.1 水质及污泥指标分析方法

本实验所测水质指标主要有COD、氨氮、总氮、总磷等,污泥指标主要有脱氢酶活性、SV、MLSS等.水质指标采用国标法进行测定,脱氢酶活性的测定选用TTC-还原法.

#### 1.4.2 微生物多样性测序分析方法

DNA提取:取混合均匀的活性污泥,采用OMEGA Soil DNA kit试剂盒,按照说明书的要求提取DNA.

PCR扩增:选用扩增片段长度420bp的细菌16S rRNA基因高度可变的V4-V5区来测序.PCR扩增引物:515F (5'-barcode + GTGCCAGCMGCC GCGTAA-3'); 907R (5'-CCGTCAATTCMTTTR

AGTTT-3')。扩增结果进行 2% 琼脂糖凝胶电泳, 切取目的片段用 Axygen 凝胶回收试剂盒回收。利用 Quant-iT PicoGreen dsDNA Assay Kit 对 PCR 产物在 Microplate reader 上进行定量, 混样。

文库构建及 MiSeq 测序: 以扩增产物为模板进行测序文库制备, Illumina MiSeq 系统测序 V4-V5 区。对合格的文库, 在 MiSeq 机器上利用 MiSeq Reagent Kit V3 (600cycles) 进行  $2 \times 300\text{bp}$  双端测序。

序列及生物多样性分析: 使用 QIIME 软件, 调用 UCLUST 序列比对工具<sup>[19]</sup>, 对获得的高质量序列按 97% 的序列相似度进行归并和 OTU 划分。将 OTU 代表序列与对应数据库的模板序列相比对, 获取每个 OTU 所对应的分类学信息, 计算每个样本 Chao1、ACE、Simpson、Shannon 这 4 种多样性指数。根据 OTU 划分和分类地位鉴定结果, 在多个层级上全面分析活性污泥细菌群落的构成及微生物数量。Beta 多样性主要反映不同样本间的差异性, 本研究主要通过主成分分析 (principal component analysis, PCA)、聚类分析等方法, 观测样本之间的差异。

### 1.5 数据处理

采用 SPSS 20.0 数据统计软件对实验数据进行单因素方差分析, 差异显著性水平  $P < 0.05$ , 采用 Excel 作图。微生物学数据处理及热图、PCA 图的绘制采用统计学 R 软件。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磁场对 SBR 反应器运行性能的影响

稳定运行阶段, 分析不同外加磁感应强度条件下 SBR 系统中污染物去除率、脱氢酶活性等指标变化情况。由图 2 可见, 与未加磁场相比, 不同外加磁感应强度下 SBR 反应系统各污染物去除效率明显存在不同程度的升高, 差异显著 ( $P < 0.05$ )。磁感应强度由 0 增加到  $7 \times 10^{-2}\text{T}$ , COD、氨氮、总氮、总磷去除率均升高最终达到最高值, 分别为 94.23%、88.93%、85.98%、95.82%; 磁感应强度继续增大时, 处理效率不断下降, 但仍高于对照组。说明外加磁感应强度变化对 SBR 反应系统去除效率等指标会产生一定影响, 磁场的加入都会不同程度提高系统的运行性能, 各污染物去除率变化趋势大致相同。外加磁感应强度为  $7 \times 10^{-2}\text{T}$  时 SBR 系统运行性能提高效果最明显, COD、氨氮、总氮、总磷去除率相比于未加磁场分别提高 6.29%、8.89%、20.29%、

4.61%, 其中总氮去除率提高最多, 说明  $7 \times 10^{-2}\text{T}$  外加磁场对 SBR 反应系统中总氮去除效果影响最显著, 且总氮去除率在不同磁感应强度下均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

污泥脱氢酶活性 (图 3) 在外加磁感应强度  $3 \times 10^{-2}\text{T}$  时下降 5%, 磁感应强度继续增大, 脱氢酶活性不断升高, 达到  $12 \times 10^{-2}\text{T}$  时升高幅度减小, 趋于相对稳定。由此可知, 中高强度外加磁场均会促进污泥活性提高, 磁感应强度升高达到一定程度时促进作用减小。脱氢酶活性指标能够准确反映污泥活性, 外加磁场提高了脱氢酶活性, 因此对 COD、氨氮、总氮、总磷的去除效率均有一定的促进作用。

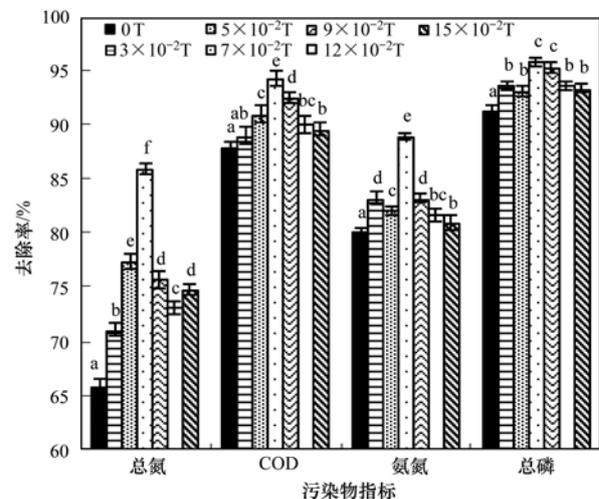


图 2 外加磁场条件下 SBR 系统中污染物去除率变化  
Fig. 2 Changes in pollutant removal rate in an SBR system under an external magnetic field

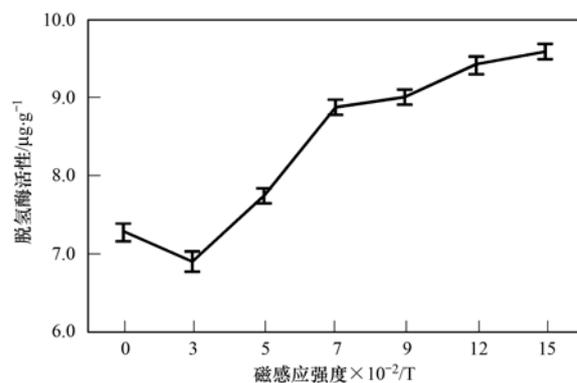


图 3 外加磁场条件下污泥脱氢酶活性变化  
Fig. 3 Change of the sludge dehydrogenase activity under an external magnetic field

外加磁场可通过强化水体物理化学过程, 提高污泥絮凝效果, 促进污泥微生物生长、微生物酶活性, 改变微生物群落结构及多样性等影响污水处理系统的运行性能。本研究主要对活性污泥细菌群落

结构及多样性的变化进行探索.

## 2.2 磁场对活性污泥中细菌群落多样性的影响

在活性污泥法污水处理中微生物是作用主体,微生物群落丰度及多样性的变化对污水处理效果有着重要的影响.不同指数对于衡量群落多样性的侧重点各不相同. Chao1 指数和 ACE 指数侧重于体现群落丰富度, Shannon 指数和 Simpson 指数体现群落多样性. Coverage 指数用来表示获得的数据相对于整体样品数据的覆盖程度,数值越高,表明样本获得的数据相对于整体样本数据的覆盖程度越高<sup>[20]</sup>.

由表 1 可知,所测样品的 Coverage 指数均在 97% 以上,说明测序结果足够反映样品中微生物的真实情况.各反应系统 OUT 数相差不大,在 20 319 ~ 22 535 之间波动.与未加磁场相比,外加磁感应强度为  $3 \times 10^{-2}$  T、 $5 \times 10^{-2}$  T、 $7 \times 10^{-2}$  T 时, Chao1

指数、ACE 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ).  $12 \times 10^{-2}$  T 与  $15 \times 10^{-2}$  T 磁感应强度下各多样性指标差异不显著 ( $P < 0.05$ ).不同磁感应强度下的污泥样品的微生物多样性各不相同,在  $3 \times 10^{-2}$  T 和  $5 \times 10^{-2}$  T 的低磁感应强度条件下,微生物多样性出现下降趋势.外加磁感应强度为  $7 \times 10^{-2}$  T 时, Chao1 指数、ACE 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数均最高,由未加磁场时的 580、766、0.899、5.127 分别增加到 643、839、0.937、5.717,说明在  $7 \times 10^{-2}$  T 磁感应强度作用下活性污泥微生物群落变化最明显.结合图 2、3 分析可知,外加磁感应强度为  $7 \times 10^{-2}$  T 时,活性污泥微生物群落多样性及污染物去除效率均最高,说明污染物去除率与活性污泥中微生物群落多样性变化情况具有一定相关性.

表 1 生物多样性指数<sup>1)</sup>

Table 1 Biodiversity indices

磁感应强度/T	Chao1 指数	ACE 指数	Simpson 指数	Shannon 指数	Coverage 指数	OUT
0	580 ± 7 a	766 ± 37 ad	0.899 ± 0.007 a	5.127 ± 0.054 a	0.976 ± 0.001 a	21 495 ± 339
$3 \times 10^{-2}$	487 ± 37 * bc	647 ± 8 * b	0.865 ± 0.021 * be	4.533 ± 0.308 *	0.981 ± 0.003 * b	21 404 ± 402
$5 \times 10^{-2}$	479 ± 11 * c	643 ± 23 * b	0.699 ± 0.027 * c	3.803 ± 0.173 * c	0.980 ± 0.001 * bc	21 824 ± 362
$7 \times 10^{-2}$	643 ± 25 * d	839 ± 23 * c	0.937 ± 0.004 * d	5.717 ± 0.109 * d	0.978 ± 0.001 ac	20 328 ± 176
$9 \times 10^{-2}$	573 ± 17 a	760 ± 32 ad	0.835 ± 0.021 * e	4.677 ± 0.121 * eb	0.978 ± 0.001 ac	22 535 ± 450
$12 \times 10^{-2}$	553 ± 40 a	739 ± 52 a	0.906 ± 0.019 ad	5.140 ± 0.291 a	0.978 ± 0.003 ac	20 319 ± 308
$15 \times 10^{-2}$	593 ± 21 a	798 ± 9 cd	0.888 ± 0.018 ab	4.970 ± 0.154 ae	0.977 ± 0.001 a	21 548 ± 271

1) 均值差的显著性水平为 0.05, \* 说明与对照组比较差异显著; a、b、c、d、e 表示同一指标在不同磁感应强度下的比较,不同字母表示差异显著,相同字母表示差异不显著

## 2.3 磁场对活性污泥中细菌群落组成的影响

### 2.3.1 活性污泥细菌门类丰度变化

实验 SBR 反应器中的细菌域共鉴定出 14 个门,如图 4 所示,主要以变形菌门 Proteobacteria (25.3% ~ 61.5%)、拟杆菌门 Bacteroidetes (18.6% ~ 46.2%)、放线菌门 Actinobacteria (5.3% ~ 47.2%)、酸杆菌门 Acidobacteria (0.4% ~ 4.0%) 为主.

活性污泥微生物门水平组成随外加磁感应强度的变化各不相同. Proteobacteria 是对照组活性污泥细菌域中丰度最高的门 (52.2%), 其广泛存在于活性污泥系统<sup>[21~23]</sup>. 与未加磁场相比, Proteobacteria 丰度在  $3 \times 10^{-2}$  T 时升高 (61.5%), 在  $5 \times 10^{-2}$  T、 $7 \times 10^{-2}$  T、 $9 \times 10^{-2}$  T、 $12 \times 10^{-2}$  T、 $15 \times 10^{-2}$  T 降低 (29.3%、44.5%、32.2%、25.3%、44.1%), 即低磁感应强度能够促进 Proteobacteria 丰度提高,磁感应强度继续增大则对其起不同程度的抑制作用.如图 5,检测到的变形菌门主要包括  $\alpha$ -Proteobacteria

(1.0% ~ 5.4%)、 $\beta$ -Proteobacteria (11.2% ~ 32.9%)、 $\delta$ -Proteobacteria (0.2% ~ 0.7%) 和  $\gamma$ -Proteobacteria (7.4% ~ 39.8%) 这 4 个纲. 相关研究表明,将氨氧化成亚硝酸的氨氧化菌 (Ammonia-oxidizing bacteria, AOB) 主要属于  $\beta$ -Proteobacteria 及极少数的  $\gamma$ -Proteobacteria<sup>[24]</sup>. 而将亚硝酸盐氧化成硝酸盐的亚硝酸盐氧化菌 (Nitrite-oxidizing bacteria, NOB) 主要属于  $\alpha$ -Proteobacteria 及部分  $\delta$ -Proteobacteria 和  $\gamma$ -Proteobacteria<sup>[25]</sup>. 与未加磁场相比,  $7 \times 10^{-2}$  T 磁场下污泥样品  $\beta$ -Proteobacteria 丰度增长最多 (32.9%).

$3 \times 10^{-2}$  T、 $7 \times 10^{-2}$  T、 $9 \times 10^{-2}$  T 磁场下 Acidobacteria 丰度较未加磁场时下降,  $7 \times 10^{-2}$  T 磁场条件下丰度最低 (0.4%), 相应的其它磁感应强度下 Acidobacteria 丰度均有提高. Actinobacteria 在  $3 \times 10^{-2}$  T、 $5 \times 10^{-2}$  T 低磁感应强度下丰度降低,但在其它中、高磁感应强度条件下均有提高,  $5 \times 10^{-2}$  T 最低 (5.3%),  $12 \times 10^{-2}$  T 时最高 (47.2%). 装甲

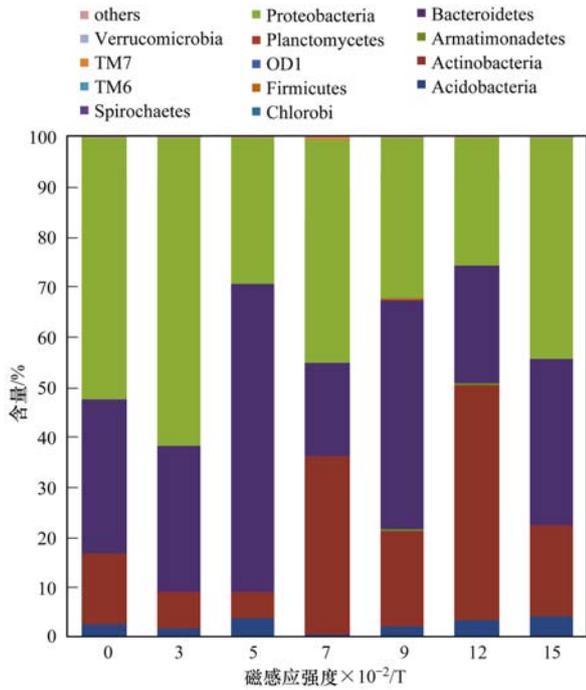


图 4 细菌域门水平分布

Fig. 4 Distribution of bacterial phyla

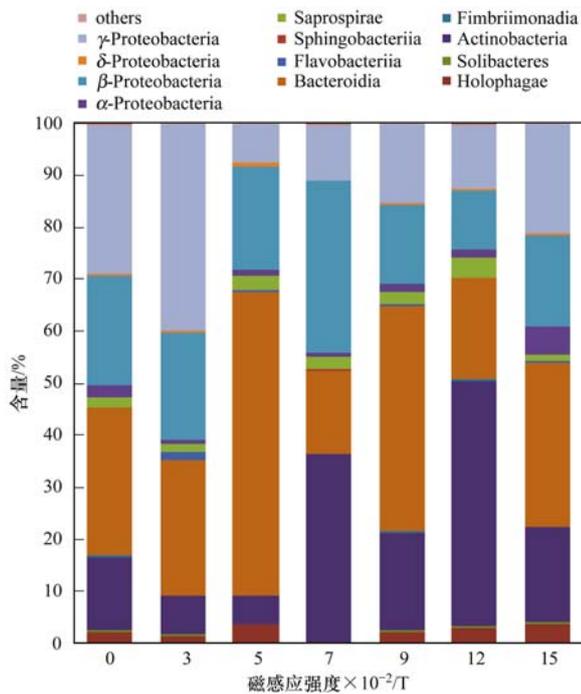


图 5 细菌域纲水平分布

Fig. 5 Distribution of bacterial class

菌门 *Armatimonadetes* 在  $3 \times 10^{-2}$  T 降低,  $12 \times 10^{-2}$  T 提高. 拟杆菌门 *Bacteroidetes* 在  $3 \times 10^{-2}$  T、 $7 \times 10^{-2}$  T、 $12 \times 10^{-2}$  T 降低, 在  $5 \times 10^{-2}$  T、 $9 \times 10^{-2}$  T、 $15 \times 10^{-2}$  T 提高. 厚壁菌门 *Firmicutes* 在  $5 \times 10^{-2}$  T、 $12 \times 10^{-2}$  T 增多. 在研究中还发现了少量浮霉菌门 *Planctomycetes*, 有研究表明执行厌氧氨氧化过

程的细菌均属于浮霉菌门, 该类细菌能够在缺氧条件下以硝酸盐或亚硝酸盐为电子受体, 将氨氧化, 直接转化成氮气. 厌氧氨氧化被证实为微生物参与的全球氮循环的重要过程<sup>[26]</sup>. 在  $7 \times 10^{-2}$  T 磁感应强度作用下, 浮霉菌门丰度相较于对照组增长了 4 倍, 这为利用厌氧氨氧化途径提高污水处理效果提供了新的思路. *TM7* 和疣微菌门 *Verrucomicrobia* 在 D 组  $7 \times 10^{-2}$  T 磁感应强度条件下丰度最高, 其它条件下差别不大, 但这两类门在活性污泥中丰度普遍都很低. *Verrucomicrobia* 的细菌绝大多数属于未培养的微生物, 其功能还鲜为人知<sup>[27]</sup>.

### 2.3.2 活性污泥细菌属类丰度变化

活性污泥细菌域共检测到 182 个属, 如图 6 及图 7. 从中可见, 在 7 种不同磁感应强度下的污泥样品中, 仅有热单胞菌属 *Thermomonas* 及 *Piscicoccus* 的丰度均超过 1%, 是 7 种活性污泥共有的优势属. *Thermomonas* 属于变形菌门  $\gamma$ -*Proteobacteria* 的黄色单胞菌目 *Xanthomonadales*, 其含量在  $3 \times 10^{-2}$  T 下最高 (30.20%), 是对照组 (16.85%) 的 1.8 倍, 而磁感应强度继续增大时该菌属丰度均低于对照组, 且在  $5 \times 10^{-2}$  T (1.90%) 和  $12 \times 10^{-2}$  T (1.06%) 时下降幅度最大. *Piscicoccus* 属于放线菌门 *Actinobacteria* 中放线菌纲的 *Actinomycetales* 目. 未加磁场时活性污泥中 *Piscicoccus* 含量为 3.56%, 在

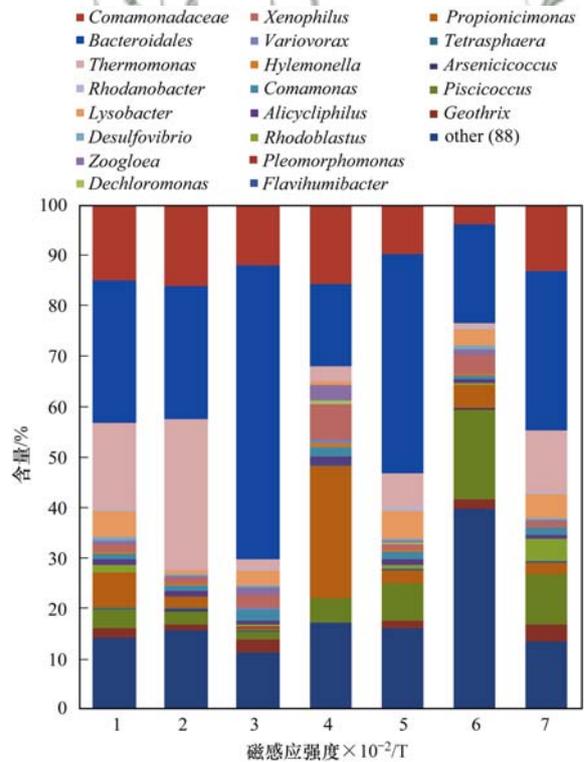


图 6 细菌域属水平分布

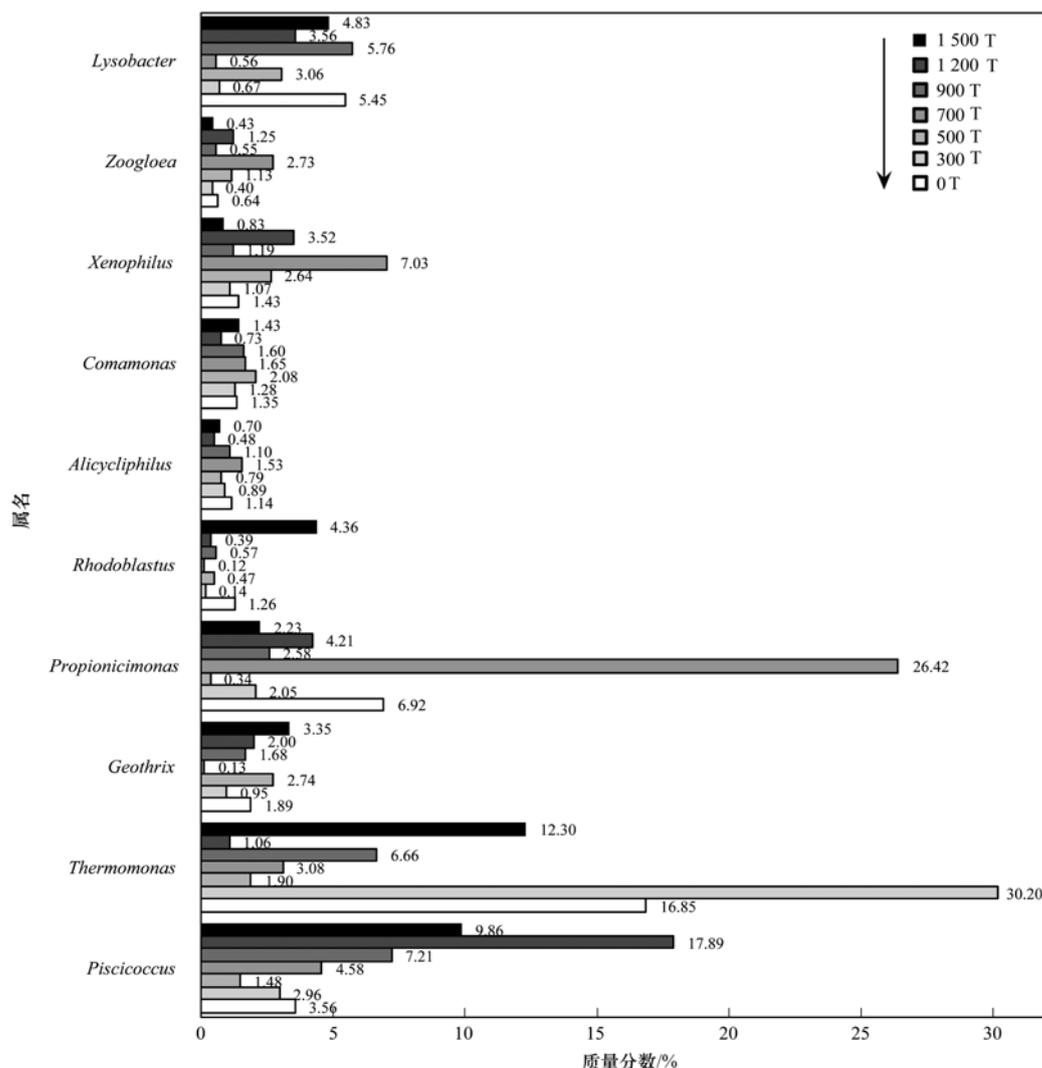
Fig. 6 Distribution of bacterial genus

低磁感应强度下逐渐降低 ( $3 \times 10^{-2} \text{T}$ : 2.96%;  $5 \times 10^{-2} \text{T}$ : 1.48%), 在中高等磁感应强度下含量高于对照组且逐渐上升至  $12 \times 10^{-2} \text{T}$  的 17.89% 时又出现下降的趋势。

检测到的活性污泥细菌域中有 8 种属在至少 1 个样品中含量超过 1%, 为部分样品的共有优势属。6 种属于变形菌门 Proteobacteria, 其中红芽生菌属 *Rhodoblastus* 属于  $\alpha$ -Proteobacteria, *Alicyclophilus*、从毛单孢菌属 *Comamonas*、嗜异性嗜血杆菌 *Xenophilus* 为  $\beta$ -Proteobacteria 的伯克氏菌目 Burkholderiales, 动胶菌属 *Zoogloea* 为  $\beta$ -Proteobacteria 的红环菌目 Rhodocyclales. 溶杆菌属 *Lysobacter* 属于  $\gamma$ -Proteobacteria 的黄色单胞菌目 Xanthomonadales.

*Rhodoblastus* 为未加磁场活性污泥中的优势属,

一定磁场的加入会抑制 *Rhodoblastus* 生长, 导致其丰度降低, 在  $7 \times 10^{-2} \text{T}$  时降到最低值 0.12%, 但是在高磁感应强度  $15 \times 10^{-2} \text{T}$  条件下迅速升高达到 4.36%, 为对照组的 3.5 倍, 由此可知, 高强度磁场可以促进活性污泥 *Rhodoblastus* 的生长. *Alicyclophilus* 属于异养反硝化菌<sup>[28]</sup>, 为  $0$ 、 $7 \times 10^{-2} \text{T}$ 、 $9 \times 10^{-2} \text{T}$  磁感应强度下活性污泥中的优势属, 且在  $7 \times 10^{-2} \text{T}$  时丰度最高, 为未加磁场的 1.34 倍, 其它磁感应强度下活性污泥中 *Alicyclophilus* 含量均低于对照组, 由此可知, 除  $7 \times 10^{-2} \text{T}$  以外的磁场都会抑制活性污泥 *Alicyclophilus* 的生长. *Comamonas* 属于反硝化细菌, 同时也有去除水中 COD 的能力, 它是除  $12 \times 10^{-2} \text{T}$  外其它 6 个污泥样品的优势属 (含量 > 1%). *Comamonas* 丰度在  $3 \times 10^{-2} \text{T}$  时较对照组出现轻微的下陷趋势, 随外加磁感应强度升高



在至少 1 个活性污泥样品中含量超过 1%

图 7 活性污泥细菌优势属含量分布

Fig. 7 Distribution of the most abundant genera in activated sludge

至  $5 \times 10^{-2} \text{T}$  后又出现下降,在中等强度 ( $5 \sim 10 \times 10^{-2} \text{T}$ ) 磁场条件下丰度最高,可知中等磁感应强度会促进 *Comamonas* 的生长. *Xenophilus* 为除  $15 \times 10^{-2} \text{T}$  外 6 种不同磁感应强度活性污泥的共有优势属,在  $7 \times 10^{-2} \text{T}$  时丰度最高 (7.03%),为未加磁场的 5 倍,  $15 \times 10^{-2} \text{T}$  磁感应强度对 *Xenophilus* 的抑制作用明显,含量降为 0.83%. *Zoogloea* 中的部分菌种含有的菌胶团能够促进活性污泥絮凝作用,7 组污泥样品中,  $7 \times 10^{-2} \text{T}$  时 *Zoogloea* 丰度最高 (2.73%) 为对照组 (0.64%) 的 4 倍,而在  $15 \times 10^{-2} \text{T}$  最高磁感应强度下动胶菌属丰度最低 (0.44%). 结合实验观察结果分析可知,适宜的磁感应强度 [ $(5 \sim 7) \times 10^{-2} \text{T}$ ] 能够有效促进活性污泥的絮凝沉降性能. *Lysobacter* 丰度在  $9 \times 10^{-2} \text{T}$  时最高 (5.76%),其它磁场条件下丰度均低于对照组 (5.45%),有研究表明其能高效防治线虫引起的病害<sup>[29]</sup>.

*Geothrix* 属于 Acidobacteria 中的全噬菌纲,其在  $3 \times 10^{-2} \text{T}$  和  $7 \times 10^{-2} \text{T}$  磁感应强度条件下含量均小于 1%,而在  $5 \times 10^{-2} \text{T}$  和  $15 \times 10^{-2} \text{T}$  下对其生长促进效果明显,在活性污泥中的含量分别为对照组的 1.45 倍和 1.77 倍. 产丙酸单孢菌属 *Propionicimonas* 属于 Actinobacteria 中放线菌纲的放线菌目,类诺卡式菌科,具有除磷作用<sup>[30]</sup>. 除  $5 \times 10^{-2} \text{T}$  下活性污泥外, *Propionicimonas* 是其它 6 种活性污泥的共有优势属,且在  $7 \times 10^{-2} \text{T}$  时丰度最高 (26.42%),是对照组 (6.92%) 的 3.8 倍.

在除优势属外的其它属中,不动杆菌属 *Acinetobacter* 属于聚磷菌 (polyphosphate accumulating organisms, PAOs),其在中等磁感应强度  $5 \sim 9 \times 10^{-2} \text{T}$  下活性污泥中含量最高 (0.05% ~ 0.09%). 假单胞菌属 *Pseudomonas* 也属于 PAOs 且分解蛋白质和酯酶能力很强,是自然界中碳、氮循环的重要一环<sup>[31]</sup>,其在中等磁感应强度下含量最高 (0.01%). 四球虫属 *Tetrasphaera* 为除磷菌<sup>[32]</sup>,其在低磁感应强度条件下含量 (0.29% ~ 0.61%) 高于对照组 (0.21%),其它磁场条件下含量均较低 (< 0.1%). 食酸菌属 *Acidovorax*、*Dechloromonas*、陶厄氏菌属 *Thauera* 均为反硝化菌<sup>[33]</sup>,在外加磁场条件下变化趋势相同,即在  $7 \times 10^{-2} \text{T}$  磁感应强度活性污泥中含量均为最高 (0.04%、0.99%、0.06%),为对照组的 2 倍以上. 副球菌属 *Paracoccus*、红杆菌属 *Rhodobacter*、生丝微菌属 *Hyphomicrobium* 也能够参与反硝化作用<sup>[34]</sup>,检测到的含量较低 (0.01% ~ 0.03%),变化不明显.

由以上分析可知,活性污泥细菌群落各分类水平的丰度在不同磁感应强度作用下会发生一定程度的变化,最终出现与对照组存在明显差异的菌群结构. 整体上看,活性污泥中重要的脱氮细菌,如变形菌门中  $\alpha$ -Proteobacteria 的红芽生菌属 *Rhodoblastus*、副球菌属 *Paracoccus*、 $\beta$ -Proteobacteria 的 *Alicyclophilus*、丛毛单胞菌属 *Comamonas*、嗜异性嗜血杆菌 *Xenophilus*、食酸菌属 *Acidovorax*、*Dechloromonas*、陶厄氏菌属 *Thauera*、 $\delta$ -Proteobacteria 的脱硫弧菌属 *Desulfovibrio*、浮霉菌门 Planctomycetes 等,在中等磁感应强度尤其是  $7 \times 10^{-2} \text{T}$  时,丰度最高.  $7 \times 10^{-2} \text{T}$  时活性污泥中脱氮细菌含量与其它磁场条件下含量存在显著差异 ( $P < 0.05$ ) 且丰度最高 (图 8). 在各反应系统出水水质中,  $7 \times 10^{-2} \text{T}$  时脱氮效果最明显,此时脱氮率从无磁场的 65.69% 提高到 85.98%,影响显著. 不动杆菌属 *Acinetobacter*、假单胞菌属 *Pseudomonas*、产丙酸单孢菌属 *Propionicimonas* 等典型的 PAOs,丰度随外加磁场不同会有轻微的变化,且在中等磁感应强度条件下含量较高,该强度下反应系统中, COD、总磷去除率也有轻微提高 (6.29%、4.61%). 由此可知,活性污泥中细菌群落的结构变化与污水处理效率存在一定相关性,外加磁场通过改变微生物群落结构影响污水处理效果.

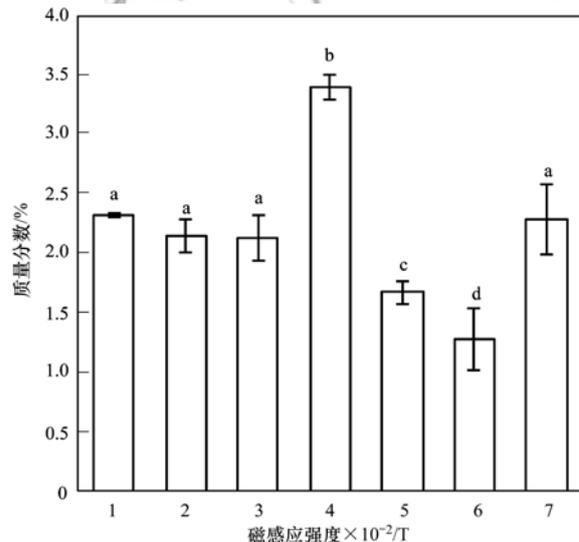


图 8 不同外加磁感应强度下脱氮菌含量变化

Fig. 8 Changes in the denitrifying bacteria content under different external magnetic induction

### 2.3.3 不同外加磁场条件下活性污泥中细菌的聚类分析

图 9 为结合聚类分析的属水平 (丰度前 50) 群

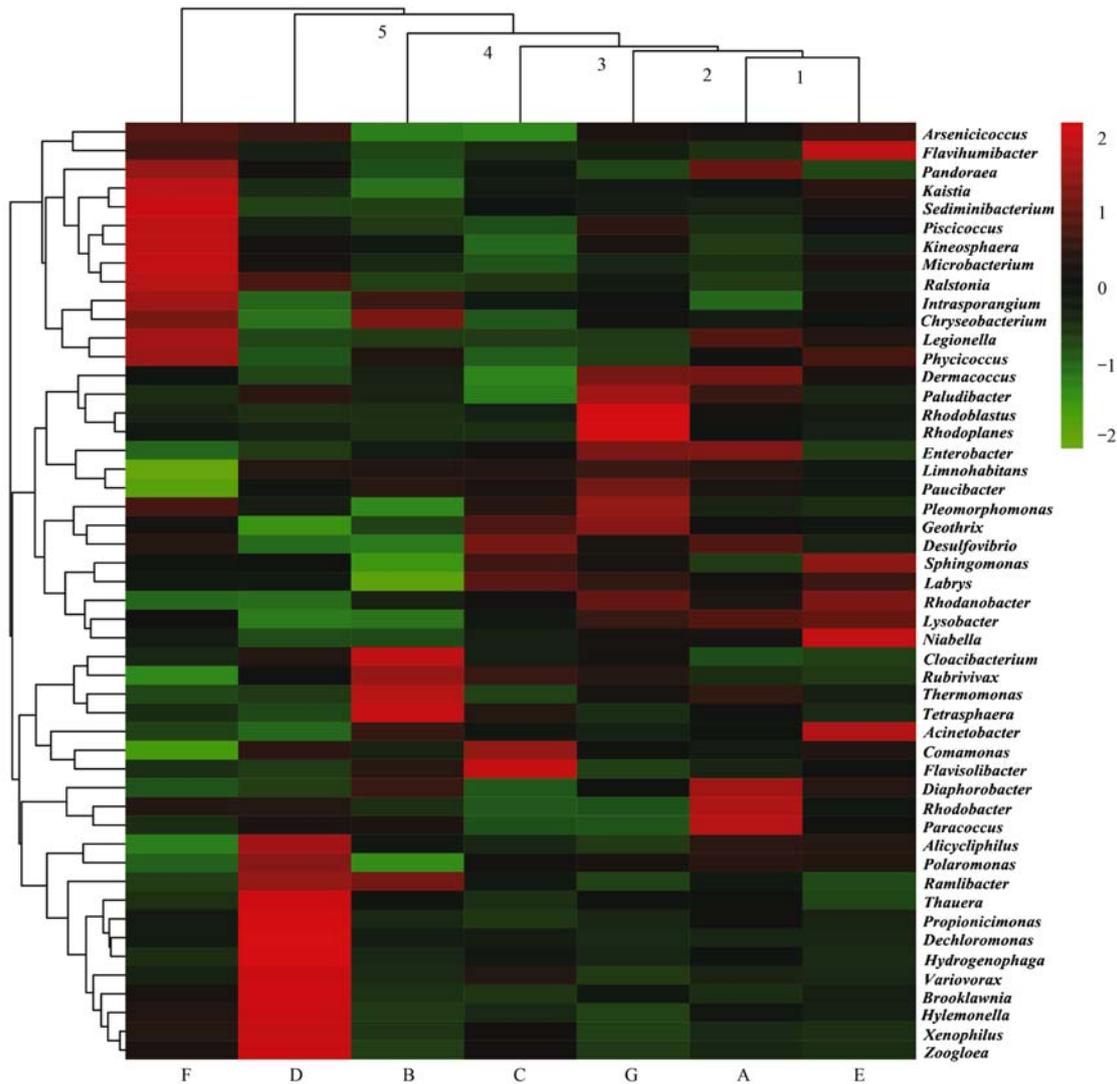


图9 结合聚类分析的属水平群落组成热图

Fig. 9 Heat-map of the classified genus

落组成热图,红色代表在对应样本中丰度较高的属,绿色代表丰度较低的属.样本先按照彼此之间属水平物种丰度分布的相似度进行聚类,根据聚类结果横向依次排列,结果说明在丰度前50的属水平物种聚类中A和E组即 $9 \times 10^{-2}T$ 与未加磁场下微生物最相似.图10为活性污泥微生物群落主成分分析,不同的点代表不同样本,两点之间距离越近表明两个样本之间的微生物群落结构相似度高,差异越小.主成分1(PC1)与主成分2(PC2)是造成7组样品的两个最大差异特征,其贡献率分别为49.25%和30.44%.由图10分析可知, $7 \times 10^{-2}T$ 和 $12 \times 10^{-2}T$ 与其它各组差异最显著, $15 \times 10^{-2}T$ 与对照组差别最小,即 $7 \times 10^{-2}T$ 和 $12 \times 10^{-2}T$ 磁感应强度下,活性污泥微生物群落结构变化最显著.

### 3 结论

(1)磁场的加入都会在一定程度上提高SBR系统的运行性能,且当磁感应强度为 $7 \times 10^{-2}T$ 时系统运行性能提高效果最明显,COD、氨氮、总氮、总磷去除率相比于未加磁场提高量分别为6.29%、8.89%、20.29%、4.61%,其对总氮去除效果影响最显著.通过对污泥脱氢酶活性的研究发现,中高强度磁场会促进污泥脱氢酶活性提高,因而会对各种污染物的去除产生积极作用.

(2)在 $7 \times 10^{-2}T$ 磁感应强度作用下活性污泥微生物群落丰度及多样性最高,相较于未加磁场变化最明显.微生物多样性与污染物去除率变化趋势一致,即微生物群落多样性最高时去除效果最好,说明污染物去除率与活性污泥中微生物群落多样性具

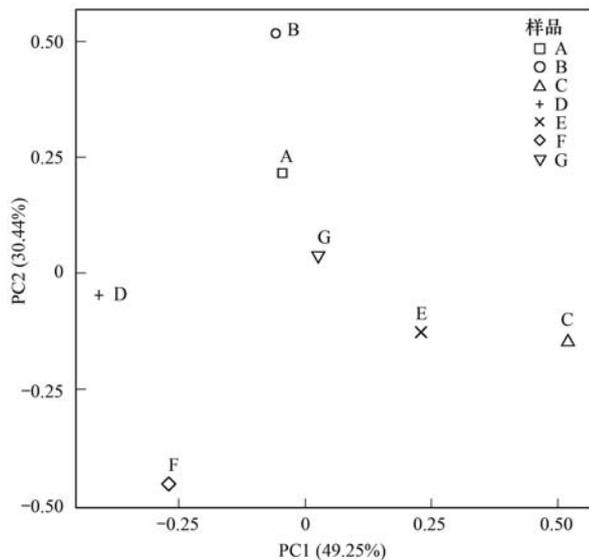


图 10 活性污泥微生物群落主成分分析

Fig. 10 Principal components analysis on activated sludge microbial communities in a SBR system

有一定的相关性。

(3) 运用高通量测序技术, 鉴定出的不同磁感应强度下活性污泥中细菌主要以 Proteobacteria、Bacteroidetes、Actinobacteria、Acidobacteria 为主。重要的脱氮细菌、典型的 PAOs 等, 丰度随外加磁场变化而不同, 且在中等磁场条件下含量最高, 其中  $7 \times 10^{-2} \text{T}$  时脱氮细菌含量变化最明显。活性污泥中细菌群落结构变化与污水处理效率存在一定相关性, 外加磁场通过改变微生物群落结构影响污水处理效果。实际应用中可根据所要处理的水质状况选择合适的磁感应强度, 找到利于污水处理的最佳菌群结构, 提高污水处理效果。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Zaid N S, Sohaili J, Muda K, *et al.* Magnetic field application and its potential in water and wastewater treatment systems [J]. Separation and Purification Reviews, 2014, **43**(3): 206-240.
- [ 2 ] 马放, 王强, 朱雪松, 等. 磁技术在污水处理中的应用现状及发展趋势 [J]. 中国给水排水, 2010, **26**(14): 34-37.  
Ma F, Wang Q, Zhu X S, *et al.* Application status and development trend of magnetic technology in wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2010, **26**(14): 34-37.
- [ 3 ] Tomska A, Wolny L. Enhancement of biological wastewater treatment by magnetic field exposure [J]. Desalination, 2008, **222**(1-3): 368-373.
- [ 4 ] 郑利兵, 佟娟, 魏源送, 等. 磁分离技术在水处理中的研究与应用进展 [J]. 环境科学学报, 2016, **36**(9): 3103-3117.  
Zheng L B, Tong J, Wei Y S, *et al.* The progress of magnetic separation technology in water treatment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(9): 3103-3117.
- [ 5 ] 王东升, 张明, 肖峰. 磁混凝在水与废水处理领域的应用 [J]. 环境工程学报, 2012, **6**(3): 705-713.  
Wang D S, Zhang M, Xiao F. Application of magnetic coagulation in water and wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, **6**(3): 705-713.
- [ 6 ] 李建军, 朱金波, 张丽亭, 等. 磁选技术在水污染治理中的应用 [J]. 水处理技术, 2012, **38**(7): 9-13.  
Li J J, Zhu J B, Zhang L T, *et al.* Applications of magnetic separation in waste water treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2012, **38**(7): 9-13.
- [ 7 ] 陈秋芳, 农文贵, 崔巍. 磁技术在污废水处理中的作用机理及应用 [J]. 环境科学与管理, 2012, **37**(8): 110-114.  
Chen Q F, Nong W G, Cui W. Mechanism and application of magnetic technology in wastewater treatment [J]. Environmental Science and Management, 2012, **37**(8): 110-114.
- [ 8 ] 单郡. 磁-SBR 复合系统脱氮效果及微生物群落动态分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [ 9 ] 栗杰, 依艳丽, 焦颖, 等. 棕壤微生物和几种酶活性的磁致效应研究 [J]. 土壤通报, 2007, **38**(5): 957-961.  
Li J, Yi Y L, Jiao Y, *et al.* Effect of magnetic field on soil microbes and soil enzyme activities in brown earth [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, **38**(5): 957-961.
- [ 10 ] 殷成强, 潘杨, 郑莹, 等. 新型 SBR 工艺释磷影响因素分析 [J]. 现代化工, 2017, **37**(3): 80-83.  
Yin C Q, Pan Y, Zheng Y, *et al.* Analysis on the influencing factors of phosphorus release in new SBR process [J]. Modern Chemical Industry, 2017, **37**(3): 80-83.
- [ 11 ] 熊光城, 濮文虹, 杨昌柱. 预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 [J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1472-1478.  
Xiong G C, Pu W H, Yang C Z. Acceleration of the formation of aerobic granules in SBR by inoculating different proportions and different diameters of mature aerobic granules [J]. Environmental Science, 2013, **34**(4): 1472-1478.
- [ 12 ] 孟祥至, 孟昭福, 赵君楠, 等. 进水氨氮浓度对 SBR 法处理猪场废水的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(8): 1656-1663.  
Meng X Z, Meng Z F, Zhao J N, *et al.* Effect of influent concentrations of ammoniacal nitrogen on SBR treatment for swine wastewater [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(8): 1656-1663.
- [ 13 ] 许德超, 陈洪波, 李小明, 等. 静置/好氧/缺氧序批式反应器 (SBR) 脱氮除磷效果研究 [J]. 环境科学学报, 2014, **34**(1): 152-159.  
Xu D C, Chen H B, Li X M, *et al.* Biological phosphorus and nitrogen removal in a sequencing batch reactor (SBR) operated in static/aerobic/anoxic regime [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(1): 152-159.
- [ 14 ] 曹天昊, 王淑莹, 苗蕾, 等. 不同基质浓度下 SBR 进水方式对厌氧氨氧化的影响 [J]. 中国环境科学, 2015, **35**(8): 2334-2341.  
Cao T H, Wang S Y, Miao L, *et al.* Influence of feeding modes on anammox under different influent substrate concentration in SBR [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(8): 2334-2341.
- [ 15 ] Ye L, Zhang T. Bacterial communities in different sections of a municipal wastewater treatment plant revealed by 16S rDNA 454 pyrosequencing [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, **97**(6): 2681-2690.

- [16] Ye L, Zhang T, Wang T T, *et al.* Microbial structures, functions, and metabolic pathways in wastewater treatment bioreactors revealed using high-throughput sequencing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(24): 13244-13252.
- [17] 滕绍雷, 孙宝盛, 赵双红, 等. pH 对间歇进水序批式生物反应(SBR)工艺活性污泥沉降性能和微生物结构的影响[J]. *环境化学*, 2016, **35**(3): 508-515.  
Qu S L, Sun B S, Zhao S H, *et al.* pH activated sludge sedimentation performance and the structure of the microbe of SBR technology[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(3): 508-515.
- [18] 张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 等. 四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3339-3344.  
Zhang Y, Sun F X, Xie H J, *et al.* Start-up characteristics of four-zone integrated reactor for nitrogen removal in winter and analysis of nitrobacteria community[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3339-3344.
- [19] Edgar R C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST[J]. *Bioinformatics*, 2010, **26**(19): 2460-2461.
- [20] 许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 等. 包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 2052-2058.  
Xu X Y, You X L, Lv C P, *et al.* Nitrogen removal performance and microbial community analysis of activated sludge immobilization[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 2052-2058.
- [21] McLellan S L, Huse S M, Mueller-Spitz S R, *et al.* Diversity and population structure of sewage-derived microorganisms in wastewater treatment plant influent [J]. *Environmental Microbiology*, 2010, **12**(2): 378-392.
- [22] 赵志瑞, 马斌, 张树军, 等. 高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1448-1456.  
Zhao Z R, Ma B, Zhang S J, *et al.* Comparing microbial community of high ammonia wastewater and municipal sewage in a partial nitrification system[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1448-1456.
- [23] Zhang X X, Zhang T. Occurrence, abundance, and diversity of tetracycline resistance genes in 15 sewage treatment plants across China and other global locations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(7): 2598-2604.
- [24] 董莲华, 杨金水, 袁红莉. 氨氧化细菌的分子生态学研究进展[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(6): 1381-1388.  
Dong L H, Yang J S, Yuan H L. Research Advances in molecular ecology of ammonia oxidizing bacteria[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(6): 1381-1388.
- [25] 赵晶, 唐阳, 李勇, 等. 活性污泥污水处理厂硝化细菌的组成和丰度[J]. *昆明学院学报*, 2014, **36**(3): 64-67.  
Zhao J, Tang Y, Li Y, *et al.* Composition and abundance of nitrifying bacterial populations in activated sludge wastewater treatment plants[J]. *Journal of Kunming University*, 2014, **36**(3): 64-67.
- [26] 田美, 刘汉湖, 申欣, 等. 百乐克(BIOLAK)活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1739-1748.  
Tian M, Liu H H, Shen X, *et al.* Biodiversity and function analyses of BIOLAK activated sludge metagenome [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1739-1748.
- [27] 侯婷婷, 钟志平, 刘纛, 等. 青石斑鱼海水循环水养殖水体的细菌群落特征[J]. *微生物学报*, 2016, **56**(2): 253-263.  
Hou T T, Zhong Z P, Liu Y, *et al.* Bacterial community characterization of rearing water of marine recirculating aquaculture systems for yellow grouper (*Epinephelus awoara*) [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2016, **56**(2): 253-263.
- [28] 郝瑞霞, 任晓克, 孟成成, 等.  $\rho(C)/\rho(N)$ 对3BER-S工艺特性及反硝化细菌群落特征的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2015, **41**(5): 755-762.  
Hao R X, Ren X K, Meng C C, *et al.* Influence of  $\rho(C)/\rho(N)$  ratio on technology characteristics and denitrifying bacteria community for 3BER-S [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, **41**(5): 755-762.
- [29] 王娜, 武坤毅, 崔浪军, 等. 溶杆菌属细菌鉴定及生防机制概况[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, **43**(5): 174-182, 191.  
Wang N, Wu K Y, Cui L J, *et al.* Advance in bacteria identification and biocontrol mechanism of *Lysobacter* spp. [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2015, **43**(5): 174-182, 191.
- [30] 张长风, 余利岩, 张玉琴. 小月菌属放线菌的研究进展[J]. *微生物学报*, 2017, **57**(2): 179-187.  
Zhang C F, Yu L Y, Zhang Y Q. Research progress on the genus *Microtholunatus* [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2017, **57**(2): 179-187.
- [31] 金浩, 李柏林, 欧杰, 等. 污水处理活性污泥微生物群落多样性研究[J]. *微生物学杂志*, 2012, **32**(4): 1-5.  
Jin H, Li B L, Ou J, *et al.* Microbial population diversity of activated sludge for wastewater treatment [J]. *Journal of Microbiology*, 2012, **32**(4): 1-5.
- [32] Kristiansen R, Nguyen H T T, Saunders A M, *et al.* A metabolic model for members of the genus *Tetrasphaera* involved in enhanced biological phosphorus removal[J]. *The ISME Journal*, 2013, **7**(3): 543-554.
- [33] Hao R X, Li S M, Li J B, *et al.* Denitrification of simulated municipal wastewater treatment plant effluent using a three-dimensional biofilm-electrode reactor; operating performance and bacterial community[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **143**: 178-186.
- [34] Sun G Z, Zhu Y F, Saeed T, *et al.* Nitrogen removal and microbial community profiles in six wetland columns receiving high ammonia load[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **203**: 326-332.

## CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin .....	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China .....	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM <sub>10</sub> Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province .....	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> Measurements During Summer and Fall in Changzhou .....	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou .....	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China .....	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China .....	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn .....	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China .....	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics .....	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin .....	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer .....	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China .....	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu .....	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China .....	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region .....	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China .....	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios .....	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances .....	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water .....	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions .....	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites .....	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation .....	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR) .....	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor .....	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns .....	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants .....	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System .....	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature .....	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System .....	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II)/EDTA-NO <sub>3</sub> /Fe(III) EDTA .....	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR) .....	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province .....	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area .....	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment .....	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil .....	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1 .....	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing .....	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary .....	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation .....	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China .....	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert .....	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields .....	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems .....	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock .....	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil .....	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features .....	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex .....	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products .....	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste .....	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste .....	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models .....	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)