

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM<sub>2.5</sub>影响 ..... 段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)

京津冀内陆平原地区PM<sub>2.5</sub>浓度时空变化定量模拟 ..... 郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)

成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 ..... 刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)

华山地区PM<sub>2.5</sub>中无机离子垂直分布特征 ..... 曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)

烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)成分图谱 ..... 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)

长三角地区中小燃煤锅炉PM<sub>2.5</sub>成分谱特征 ..... 徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)

民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子 ..... 严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)

冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素 ..... 张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)

青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度 ..... 李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)

辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配 ..... 张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)

典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露 ..... 李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)

苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平 ..... 王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)

上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响 ..... 杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)

城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性:以宁波市北仑区芦江为例 ..... 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)

艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨 ..... 曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)

三峡澎溪河水华期间水体CH<sub>4</sub>浓度及其通量变化特征初探 ..... 秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)

漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源 ..... 苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)

柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价 ..... 张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)

黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析 ..... 刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)

白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 ..... 高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)

典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟 ..... 高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)

河道水旁路处理中试工艺中PPCPs的去除效果及机制 ..... 李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (1637)

萘普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价 ..... 樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵顺利, 王聿琳, 彭明国 (1645)

真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质 ..... 孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)

热活化过硫酸盐降解三氯生 ..... 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆隽鹤 (1661)

水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律 ..... 徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)

海水优化ANAMMOX包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能 ..... 单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)

外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能 ..... 于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)

硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 ..... 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)

分段进水对改良A<sup>2</sup>/O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响 ..... 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)

不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化 ..... 梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)

智能化曝气控制A/O工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制 ..... 徐旻昉, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)

温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响 ..... 李玥, 胡奇, 高大文 (1731)

污泥臭氧原位减量工艺中抗生素的去除 ..... 汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)

零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响 ..... 杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛昱, 高品 (1748)

环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响 ..... 陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)

后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性 ..... 张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)

复合菌株YH01+YH02强化SBR好氧反硝化脱氮及菌群结构分析 ..... 陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)

氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化 ..... 贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)

1株铜绿假单胞菌对苊的降解特性及代谢途径 ..... 李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)

铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子 ..... 李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)

垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响 ..... 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)

黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响 ..... 陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)

河岸带表层土壤的铁氨氧化(Feammox)脱氮机制的探究 ..... 丁帮环, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)

藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化 ..... 展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)

深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征 ..... 沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)

香港周边海域野生鱼体内DDTs和PCBs的含量分布和食用风险评估 ..... 苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)

偏远高山湿地土壤中PAHs污染特征:以神农架大九湖为例 ..... 胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)

西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征 ..... 孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)

广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 ..... 宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)

长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响 ..... 张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)

三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响 ..... 辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)

稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系 ..... 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)

钙基膨润土辅助对堆肥及土壤Cu、Zn形态转化和白菜吸收的影响 ..... 赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)

外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响 ..... 贺玉龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)

模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响 ..... 王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)

紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素 ..... 田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)

季节非对称升温对喀斯特土壤CO<sub>2</sub>释放的影响 ..... 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)

《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)

# 复合菌株 YH01 + YH02 强化 SBR 好氧反硝化脱氮及菌群结构分析

陈海升<sup>1</sup>, 曹刚<sup>1,2\*</sup>, 张迪<sup>1</sup>, 黄郑郑<sup>1</sup>, 莫测辉<sup>1,2</sup>

(1. 暨南大学环境学院, 广州 510630; 2. 广东省污染控制与修复材料工程技术中心, 广州 510630)

**摘要:** 为探讨复合菌株强化好氧反硝化的脱氮特性以及揭示菌群结构动态演替与生物反应器运行效率之间的联系, 以硝态氮为底物, 研究了异养硝化-好氧反硝化复合菌株 *Delftia* sp. YH01 + *Acidovorax* sp. YH02 强化好氧 SBR 的脱氮特性, 并借助高通量测序技术对强化过程中的菌群结构进行了分析. 结果表明, 经复合菌株强化后, 反应器对  $\text{NO}_3^-$ -N、TN 和 COD 去除率分别提高了 12.1%、9.2% 和 9.4%; 复合菌株 YH01 + YH02 的加入对菌群结构产生了较大的影响, 菌群结构在属水平上丰度呈上升趋势, 多样性呈下降趋势; PCA 主成分分析和 UPGMA 聚类分析大致把反应器运行过程分成 4 个阶段; *Delftia* 和 *Acidovorax* 菌的丰度随着反应器呈上升趋势, 复合菌株 YH01 + YH02 在 SBR 反应器内具有良好的适应能力, 对好氧反硝化起着非常重要的作用.

**关键词:** 异养硝化-好氧反硝化; 复合菌株; SBR 反应器; 高通量测序技术; 菌群结构

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1773-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201708253

## Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02

CHEN Hai-sheng<sup>1</sup>, CAO Gang<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Di<sup>1</sup>, HUANG Zheng-zheng<sup>1</sup>, MO Ce-hui<sup>1,2</sup>

(1. School of Environment, Jinan University, Guangzhou 510630, China; 2. Guangdong Engineering Center for Environment Contamination Control and Restorative Materials, Guangzhou 510630, China)

**Abstract:** The enhanced aerobic denitrification capability of the mixed strains YH01 + YH02 in utilizing potassium nitrate, and the dynamic changes in the microbial community component during the period of operation, were evaluated. The microbial community in different stages of the SBR was analyzed by using high-throughput sequencing technology after inoculation with YH01 + YH02. The results showed that the  $\text{NO}_3^-$ -N, TN, and COD removal efficiencies increased by 12.1%, 9.2%, and 9.4%, respectively. The relative abundances of the microbes in the microbial community increased at the genus level, and the diversity in the microbial community decreased after enhancement. Principal component analysis and UPGMA analysis revealed that the period of SBR operation was roughly divided into four phases. The relative abundances of *Delftia* and *Acidovorax* increased during the period of operation, and YH01 + YH02 exhibited excellent compatibility with the SBR ecosystem and played an important part in aerobic denitrification.

**Key words:** heterotrophic nitrification-aerobic denitrification; mixed strains; SBR reactor; high-throughput sequencing technology; microbial community component

在好氧条件下能够进行硝化和反硝化的一类微生物称作异养硝化-好氧反硝化菌, 从 Robertson<sup>[1]</sup> 1988 年首次分离出异养硝化-好氧反硝化菌 *Thiosphaera pantotropha* 以来, 已发现了 *Bacillus*<sup>[2]</sup>、*Pseudomonas*<sup>[3]</sup>、*Alcaligenes*<sup>[4]</sup>、*Acinetobacter*<sup>[5]</sup> 等具有异养硝化-好氧反硝化能力的菌属. 传统的生物脱氮技术须经好氧硝化和厌氧反硝化两个单独过程, 但异养硝化-好氧反硝化细菌则可以在好氧条件下在同一生物反应器内实现同步硝化反硝化, 这一脱氮特性能够有效缩短反应路径, 提高脱氮效率, 因此在含氮废水的生物处理中成为一个研究热点.

目前对于异养硝化-好氧反硝化菌的研究主要集中在其脱氮特性上, 且大多为摇瓶实验<sup>[2~5]</sup>. 文

献[6~8]以氨氮为底物分别研究了单菌株 *Ochrobactrum anthropi* XH02、*Bacillus* sp. K5 和 *Acinetobacter junii* YB 的强化脱氮特性, 取得了较好的效果. 然而, 目前利用异养硝化-好氧反硝化菌强化去除硝态氮的研究则鲜有报道. 此外, 由于复合菌株较单菌株而言, 具有适应性好<sup>[9,10]</sup>, 负荷性高的特点<sup>[11]</sup>, 对于生物反应器脱氮强化有较强的潜力, 应更适合作为强化菌株, 但是目前几乎没有利

收稿日期: 2017-08-31; 修订日期: 2017-09-17

基金项目: 国家自然科学基金委员会-广东省政府联合基金重点项目(U1501233); 广东省自然科学基金研究团队项目(2016A030312009); 广东省环境污染控制与修复材料工程技术研究中心建设项目(2015B090903070)

作者简介: 陈海升(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水生物脱氮, E-mail: 913421208@qq.com

\* 通信作者, E-mail: cao\_g@163.com

用复合菌株进行生物脱氮强化的报道。而目前生物脱氮强化的研究更多关注在脱氮特性上,对强化脱氮过程中菌群结构变化演替规律的研究则关注较少,菌群结构组成会直接影响到生物反应器处理效率<sup>[12]</sup>,探究复合菌株强化过程中的菌群结构对生物反应器有重要的意义。

本文以好氧 SBR 反硝化反应器为研究对象,利用实验室筛选出来的异养硝化-好氧反硝化复合菌株 YH01 + YH02 进行好氧反硝化强化,探究其对硝态氮的强化去除潜力。同时利用高通量测序技术分析反应器中的菌群丰度和多样性的动态变化,并对菌群结构进行 PCA 主成分分析和 UPGMA 聚类分析,通过阐明菌群结构的变化与工艺运行效率之间的联系,以为生物处理硝态氮废水提供一定的理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 实验菌株和接种污泥

实验菌株来自本实验室筛选到的两株高效的异养硝化-好氧反硝化菌株 *Delftia* sp. YH01 和 *Acidovorax* sp. YH02。YH01、YH02 分别接入 500 mL LB 培养基的摇瓶中,于 30℃、120 r·min<sup>-1</sup> 摇床中培养 24 h,然后离心收集菌体。最后按照 1:1 的比例把菌株混合,再用无菌水重悬菌体至  $D_{600}$  为 2.0 左右而得复合菌株培养液。

实验活性污泥来自于广州市大坦沙污水处理厂的生化好氧池,其 MLSS 为 2 500 ~ 3 000 mg·L<sup>-1</sup>, SVI 为 90 ~ 120 mL·g<sup>-1</sup>。

#### 1.1.2 实验进水

实验进水采用人工合成水质,以柠檬酸三钠为碳源, KNO<sub>3</sub> 为氮源,具体水质如下: COD 950 ~ 1050 mg·L<sup>-1</sup>; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 190 ~ 210 mg·L<sup>-1</sup>; pH 7.4 ~ 7.6。每 1 L 进水加入 50 mL 微量元素溶液,微量元素配方如下: K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 5.0 g·L<sup>-1</sup>; MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 2.5 g·L<sup>-1</sup>; NaCl, 2.5 g·L<sup>-1</sup>; FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 0.05 g·L<sup>-1</sup>; MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O, 0.05 g·L<sup>-1</sup>。

### 1.2 好氧 SBR 反硝化工艺

好氧 SBR 反应器由有机玻璃制成,有效容积 3 L。采用向上流进水,利用鼓风机曝气,使气水同向。将新鲜的活性污泥接种于 SBR 反应器中,运行周期设为 12 h,进水 2 h,曝气 9 h 25 min,沉淀 30 min,出水 5 min,实验期间不进行排泥处理。空气经底部曝气头扩散到反应器内,用空气流量计调节进气

量为 3.5 L·min<sup>-1</sup>,温度控制在 30℃ 左右。好氧 SBR 反硝化工艺分为两个阶段:第一阶段(启动阶段):未投加复合菌株培养液,每 3 d 测定出水水质指标,直到出水稳定。第二阶段(强化阶段):出水水质稳定后,按进水量的 30% 投加复合菌株培养液,每 3 d 测定出水水质指标。出水水质指标包括 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 COD。

### 1.3 菌株的鉴定

利用细菌的特异性引物 27F (5'-AGAGTTTGTAT CMTGGCTCAG-3') 和 1492F (5'-TTGGYTACCTG TTACGACT-3') 对菌株进行 DNA 提取和 PCR 扩增。其扩增产物交由上海美吉科技公司进行测序。

### 1.4 微生物群落结构分析

为研究反应器内生物群落结构的变化趋势,取其污泥样品来测定生物群落组成。反应器在投加 YH01 + YH02 前的稳定期,取污泥样品一份。YH01 + YH02 培养液投加到反应器后取样一次,而后每隔 2 d 进行污泥样品取样,共取 9 份样品用于 DNA 提取。

使用 TruSeq™ DNA Sample Prep Kit 试剂盒对细菌 DNA 进行提取,其提取方法均按照标准步骤。提取出来的 DNA 用细菌的 16S rDNA 引物 338F5'-ACTCCTACGGGAGGCAGGAC-3' 和 806R5'-GGACTA CHVGGGTWTCTAAT-3' 进行 PCR 扩增。PCR (10 ng) 反应体系为 20 μL: 缓冲液 4 μL; dNTPs (25 mmol·mL<sup>-1</sup>) 2 μL; DNA 模板 100 ng; 上下游引物 (50 mmol·mL<sup>-1</sup>) 0.8 μL; 其余用双蒸水补充。PCR 扩增步骤: 95℃ 3 min; 30 个循环 (95℃ 30 s, 45℃ 30 s, 72℃ 42 s); 72℃ 延伸 10 min。然后再将 PCR 产物混合后用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测条带,用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒回收 PCR 产物。用 QuantiFluor™-ST 蓝色荧光定量系统 (Promega) 对标记的 PCR 产物检测定量。再利用 PCR 扩增建立测序文库,在 Illumina MiSeq 测序仪进行测序,由上海美吉生物科技有限公司完成。

微生物群落多样性分析前对原始数据进行质量控制,去除低质量序列。采用 QIIME 在 97% 相似水平上对高质量序列进行 OTU 划分,OTU 丰度小于 0.001% 会被去除<sup>[13]</sup>。并通过 Greengenes 数据库对比,对 OTU 进行分类注释。用 Ace 和 Chao 指数分析群落丰度<sup>[14]</sup>, Shannon 和 Simpson 指数分析群落多样性<sup>[15]</sup>,并用 Canoco 和 Mothur 软件分别进行主成分分析和聚类分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 16S rDNA 基因序列和系统发育分析

为确定 YH01、YH02 种属, 对菌株进行 DNA 提取和 PCR 扩增, 扩增后产物进行 DNA 测序, 获

得的基因序列在 GenBank 中登录号为 KY419588、KY419589, 通过 Blast 同源性检索, 构建系统进化发育树. 如图 1 所示, 可初步确定 YH01 为戴尔福特菌属 (*Delftia*), YH02 为食酸菌属 (*Acidovorax*), 均属于变形菌门 (Proteobacteria).

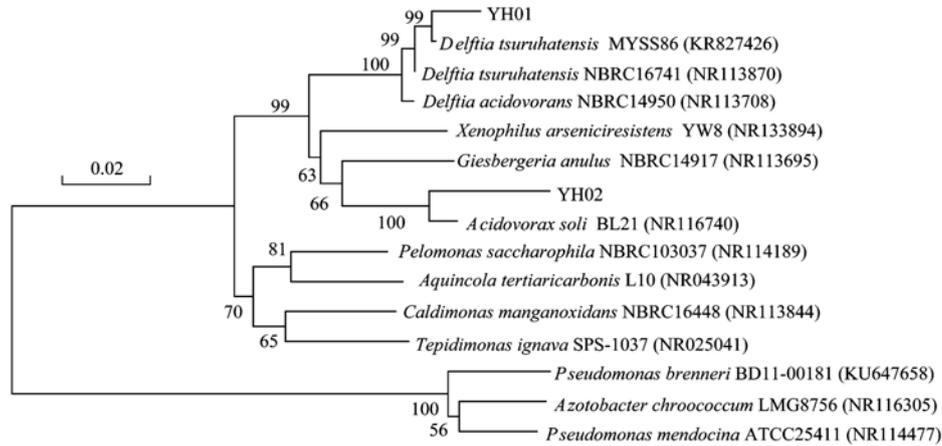


图 1 基于 16S rDNA 基因序列同源性构建 YH01、YH02 系统发育树

Fig. 1 Phylogenetic tree of the strains YH01 and YH02 based on the complete sequence of the 16S rDNA gene

### 2.2 菌株 YH01 和 YH02 异养硝化-好氧反硝化特性

为测定菌株 YH01、YH02 和 YH01 + YH02 的好氧反硝化特性, 分别以  $\text{NO}_3^- \text{-N}$   $220 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$   $220 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  为单一氮源来测定它们的反硝化效率. 如图 2(a) ~ 2(c) 所示, 在以  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  为单一氮源的摇瓶实验中, 可以发现 24 h 后单菌株和复合菌株对  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TN、COD 的去除率基本保持稳定. 从图 2(a) 和图 2(b) 可以看出, YH01、YH02、YH01 + YH02 在 24 h 对  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的去除率分别为 88.7%、85.1%、95.3%, 对 TN 去除率分别为 67.2%、70.3%、87.2%, 明显地复合菌株 YH01 + YH02 反硝化效率比单菌高, 复合菌株更有益于提高脱氮效率. 图 2(c) 所示, 24 h 后 YH01、YH02、YH01 + YH02 对 COD 的去除率较为接近, 分别为 88.2%、89.4%、90.1%.

而当  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  为单一氮源时的反硝化效率如图 2(d) ~ 2(f) 所示, 在 24 h 后, YH01、YH02 和 YH01 + YH02 对  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、TN、COD 的去除率基本保持稳定. 在 24 h 时, YH01、YH02 和 YH01 + YH02 对  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  的去除率分别为 88.2%、89.0% 和 90.1%, 对 TN 的去除率分别为 85.3%、88.9% 和 88.9%, COD 的去除率为 89.0%、90.1% 和 91.2%. 可以看出, 当以  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  为单一氮源时, YH01、YH02 和 YH01 + YH02 的反硝化的效率与以  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  为单一氮源时差异不大.

在关于复合菌株脱氮研究中, *Ochrobactrum* sp. XH02 + *Pseudomonas* sp. XH03<sup>[10]</sup> 和 *Pseudomonas* sp. B2 + *Streptomyces* sp. A9 + *Fusarium* sp. F3<sup>[9]</sup>, 这些复合菌株均有较高的脱氮效率. 此外, 复合菌株较单菌株对环境耐受性更强<sup>[16]</sup>, 原因可能是复合菌株之间的协同效应使其对环境有更强的适应性, 因此复合菌株更适合进行生物脱氮强化. 复合菌株 YH01 + YH02 具有高效的好氧反硝化能力, 比单菌株 YH01、YH02 更有益于提高脱氮效率, 这对于实际的含氮废水处理有重要的意义, 因此 YH01 + YH02 复合菌株适合进行生物脱氮强化.

### 2.3 SBR 反应器

反应器启动过程见图 3(a). 启动初期的脱氮效率较差, 这一阶段为活性污泥的适应期. 在 10 ~ 31 d, 脱氮效率稳定上升, 此阶段中能适应环境的微生物被保留下来, 不能适应的被淘汰. 在启动末期  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TN 和 COD 去除率基本稳定, 平均去除率分别为 73.4%、64.5% 和 80.7%. 反应器经过 31 d 的运行, 启动成功.

反应器运行稳定后, 在 31 d 投加复合菌株进行强化. 强化阶段中的反硝化效率如图 3(b) 所示, 在 31 ~ 34 d 内, 脱氮效率较强化前出现下降的趋势, 而后在 34 ~ 52 d,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TN 和 COD 去除率回升并趋向稳定, 其平均去除率较强化前分别增加 12.1%、9.2% 和 9.4%. 在强化阶段中, 脱氮效率出现波动的原因可能是因为复合菌株 YH01 + YH02

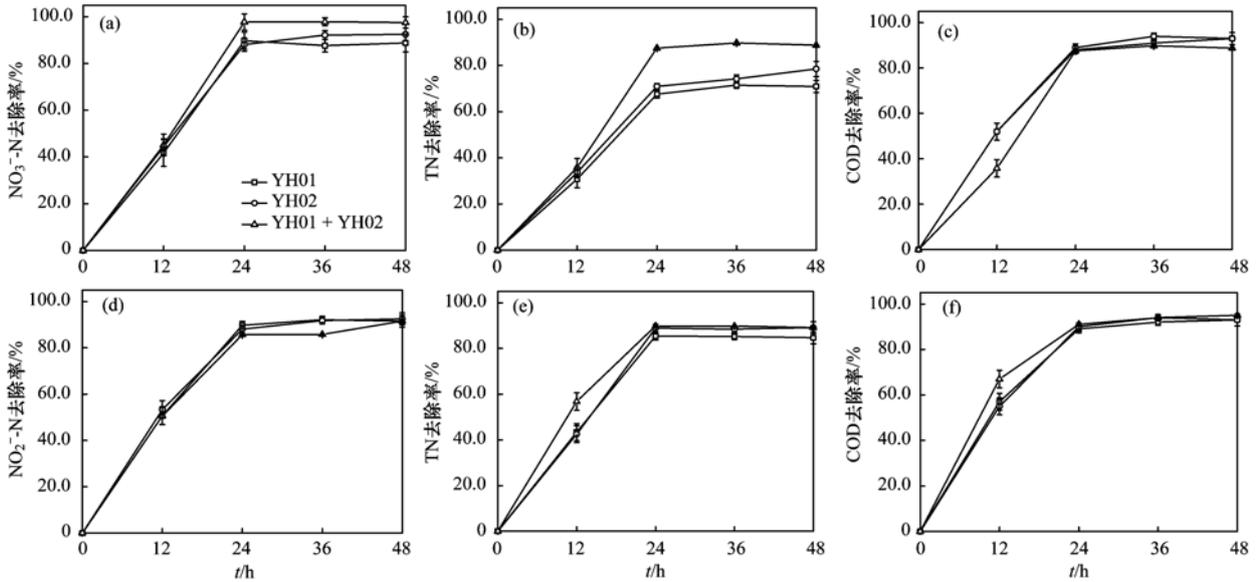


图2 YH01、YH02、YH01 + YH02反硝化特性

Fig. 2 Characteristics of denitrification by YH01, YH02, and YH01 + YH02

的加入,与原系统的微生物菌群在生存空间和营养上进行竞争,使得原系统的生物菌群结构发生变化,反应器运行效率故此受到影响.此外,根据研究发现,在废水处理上成功的生物强化需要强化菌株在强化系统中能够存活下来并保持活性,且不对体系内的原有菌群的降解能力产生消极影响<sup>[17]</sup>.所以为确保强化菌株存活下来并保持活性,有研究人员通过重复投加强化菌株<sup>[18]</sup>或者包埋菌株<sup>[19]</sup>的方式进行强化脱氮,但 these 方法会额外增加运行成本且操作繁复.而在本实验中,复合菌株 YH01 + YH02 仅通过一次投加就成功引入到原活性污泥反应体系中,并在反应器脱氮过程中产生积极的影响,说明 YH01 + YH02 在实际强化处理上具有灵活性强、适应性好的优势.

2.4 生物群落丰度和多样性分析

SBR 反应器运行中各阶段的污泥样品经过高通

量测序得到的丰度指数(Ace 和 Chao 指数)和多样性指数(Shannon 和 Simpson 指数)见图4. Chao 和 Ace 指数总体呈上升趋势,这表明反应器中生物群落丰度变化整体为上升趋势,其中第40 d的样品丰度(Ace:417, Chao:420)最高. Shannon 和 Simpson 指数从初始的3.71 和0.06,到52 d时下降到3.60 和0.05,表明反应器内生物多样性总体呈下降趋势.相似的现象,也发生在一些生物脱氮研究中,对反应器内的生物群落分析中也观察到生物多样性出现下降的现象<sup>[6,20,21]</sup>,这与有的学者认为生物强化并不会引起反应器多样性产生变化的观点不同<sup>[8]</sup>.随着复合菌株 YH01 + YH02 投加到反应器后,活性污泥体系中生物群落的相对丰度和多样性都出现了较大的波动现象,主要原因可能是 YH01 + YH02 加入到反应器后,与某些异养细菌之间存在协同效应,能够促进相互之间的生长繁殖,而且

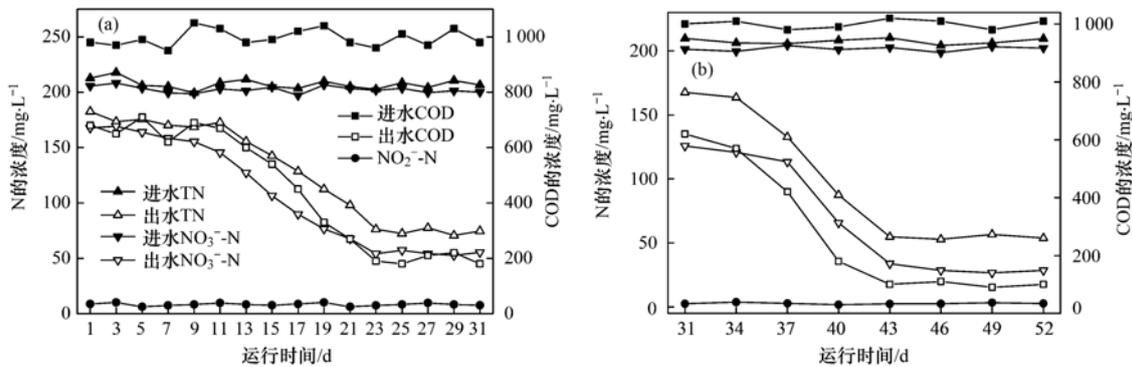


图3 反应器的启动和强化阶段各指标的浓度变化

Fig. 3 Changes in N and COD concentrations in the period of start-up and enhancement

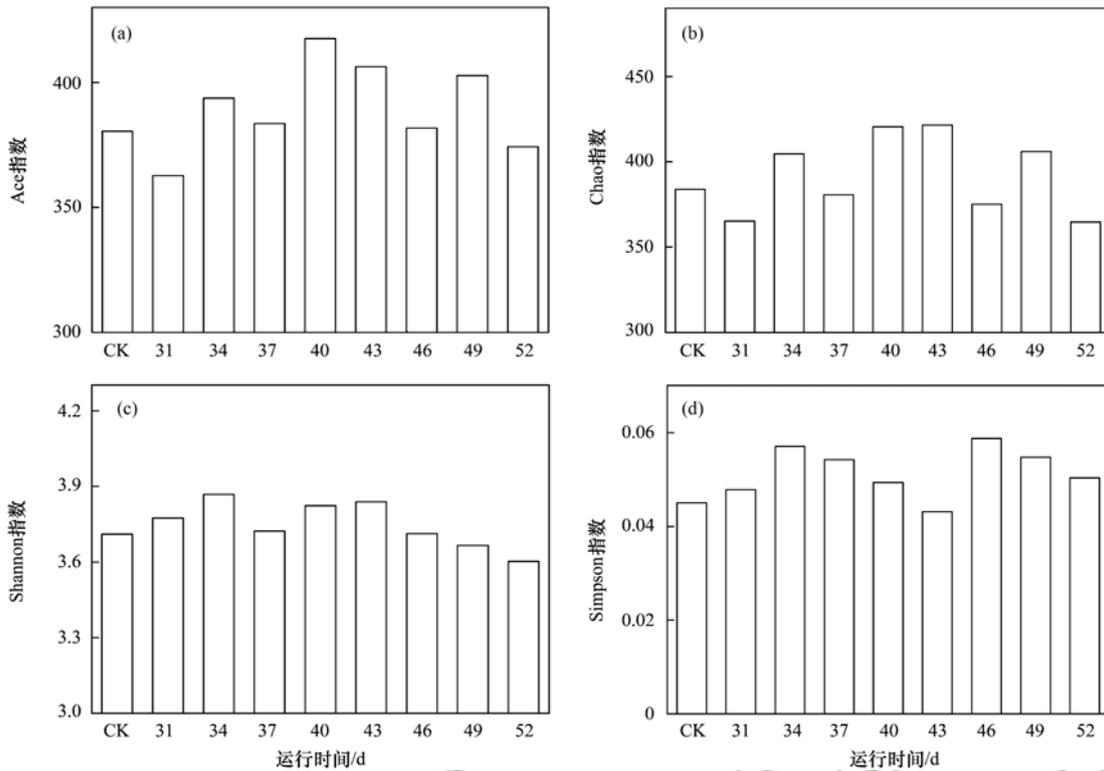


图 4 丰度指数和多样性指数

Fig. 4 Abundance and diversity indexes

有机碳更容易被异养细菌所利用<sup>[22]</sup>, 这样使得它们在竞争空间和营养中处于优势地位, 从而淘汰了一些与它们存在竞争关系的菌株. 因此生物群落相对丰度整体呈上升趋势, 而多样性则略有下降.

### 2.5 生物群落结构变化

如图 5 所示, 9 个污泥样品共检测到 27 个菌门, 共有的菌门为 19 个, 其中 Proteobacteria (变形菌门)、Bacteroidetes (拟杆菌门)、Planctomycetes

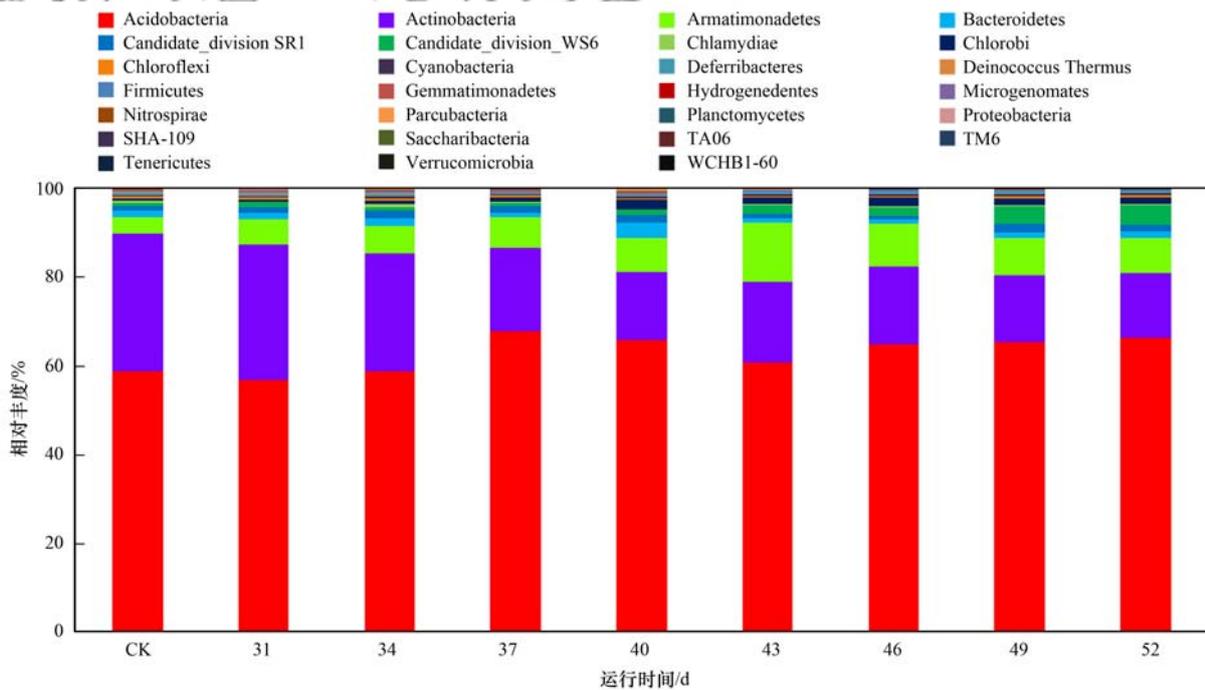


图 5 门水平上微生物相对丰度的变化

Fig. 5 Changes in the relative abundance of microorganisms at the phylum level

(浮霉菌门)和 Chloroflexi(绿弯菌门)在反应器内丰度靠前,分别为  $62.1\% \pm 4.1\%$ 、 $22.2\% \pm 8.0\%$ 、 $7\% \pm 3\%$ 和  $3.3\% \pm 2.0\%$ 。Proteobacteria 是反应器内最优势种群,同样地在 *Ochrobactrum anthropi* XH02<sup>[6]</sup> 强化反应器脱氮过程中,也发现 Proteobacteria 是反应器内最优势菌门。Proteobacteria、Chloroflexi 和 Planctomycetes 在投加 YH01 + YH02 后,其相对丰度增加了  $7.0\%$ 、 $3.4\%$ 和  $3.1\%$ 。Proteobacteria、Chloroflexi 和 Planctomycetes 都包含许多脱氮菌,且这些细菌广泛存在于好氧脱氮系统中<sup>[23~25]</sup>。Bacteroidetes 的相对丰度从强化前的  $31.0\%$  下降到  $14.6\%$ ,表明了 YH01 + YH02 与其存在竞争关系,并且 Bacteroidetes 处于劣势地位,其生长受阻,相对丰度一直降低到  $15.0\%$  左右。

为清楚阐明 SBR 反应器在运行过程中生物群落的演替过程,在菌属水平上选取相对丰度排名前 30 的来制作群落结构 Heatmap 图,如图 6 所示,列

表示样品,行表示菌属,色块深浅表示相对丰度的大小,颜色越红其相对丰度越高,越绿其相对丰度越低。通过色块深浅变化可以观察生物群落结构变化过程。Uncultured *Saprospiraceae*、*Thauera*(陶厄氏菌属)、*Luteimonas*(藤黄单胞菌属)在运行期占主导地位,相对丰度均在  $3\%$  以上,并且均属于 Proteobacteria 菌门。Uncultured *Saprospiraceae*、*Thauera* 和 *Luteimonas* 在 YH01 + YH02 投加后相对丰度都出现了先升后降的现象,到了 52 d 时跟强化前比较分别下降了  $7.1\%$ 、 $0.5\%$ 和  $7.5\%$ ,这可能是因为 YH01 + YH02 虽然能够促进它们的生长,但是反应器运行后期形成了新的菌群,与它们形成了竞争关系,其生长繁殖受到抑制。其中 Uncultured *Saprospiraceae* 在反应器运行期间一直是最优势菌属,但几乎没有关于其在脱氮方面相关的文献报道,而其在反应器内相对丰度较高,这意味着 Uncultured *Saprospiraceae* 属下的菌种具有较强的环境适应能力,值得进一步研究。

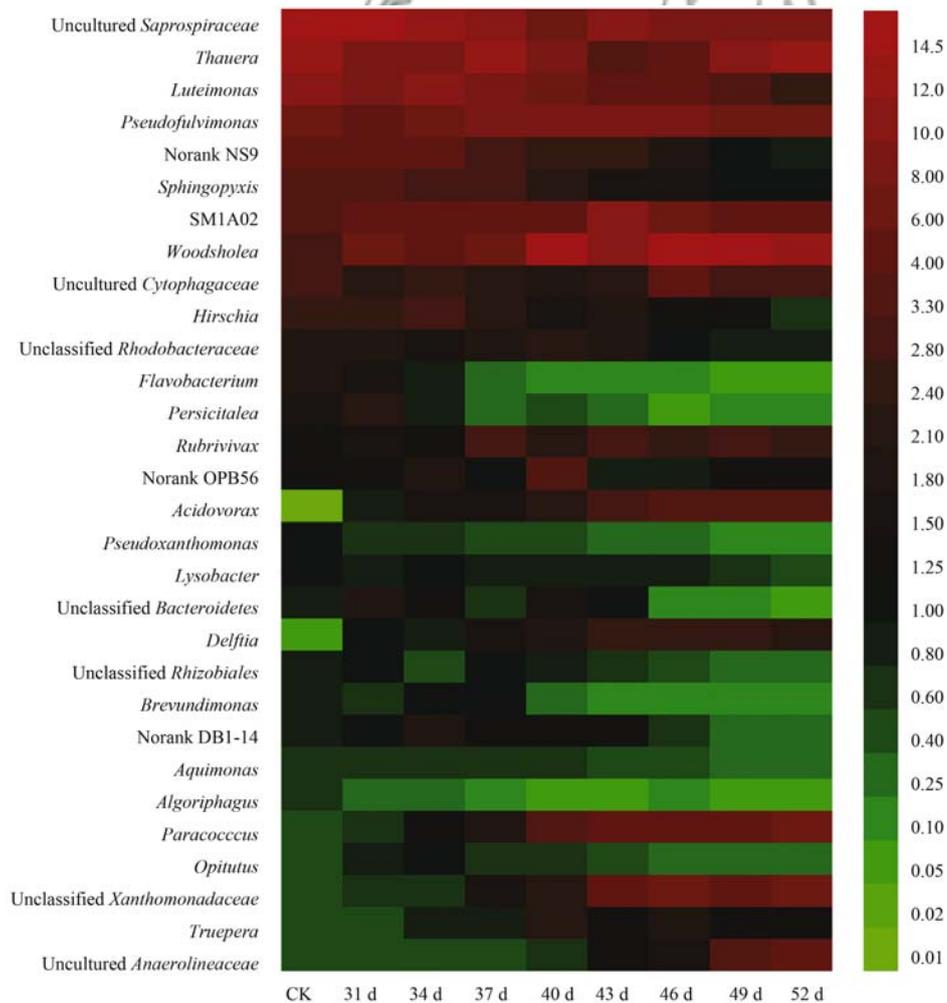


图 6 菌属的丰度热图

Fig. 6 Heatmap of the bacterial community at the genus level

*Delftia* 和 *Acidovorax* 在反应器运行各阶段的相对丰度的变化见图 7. *Delftia* 和 *Acidovorax* 在投加到反应器时丰度分别为 0.09% 和 0.1%, 随着反应器的运行, 它们的丰度呈上升趋势, 52 d 时相对丰度增加到 2.2% 和 3.5%. 虽然 *Delftia* 和 *Acidovorax* 在运行结束时没有成为最优菌属, 但是它们相对丰度排名在前 10 名以内, 而且可以观察到随着 *Delftia* sp. YH01 + *Acidovorax* sp. YH02 的加入, SBR 反硝

化效率提高了 10% 左右, 这可能是 YH01 + YH02 与其它菌属具有协同效应, 对反应器的脱氮起到重要作用. 此外, 因 *Delftia* 具有氨化、硝化和反硝化的能力, 这保证了它能较好适应新的环境<sup>[26]</sup>, 而 *Acidovorax* 在酸性环境下仍能进行好氧反硝化<sup>[27]</sup>, 表明了 *Delftia* + *Acidovorax* 在与其它菌属竞争中仍有较强竞争力, 并且对恶劣的环境有良好的适应能力.

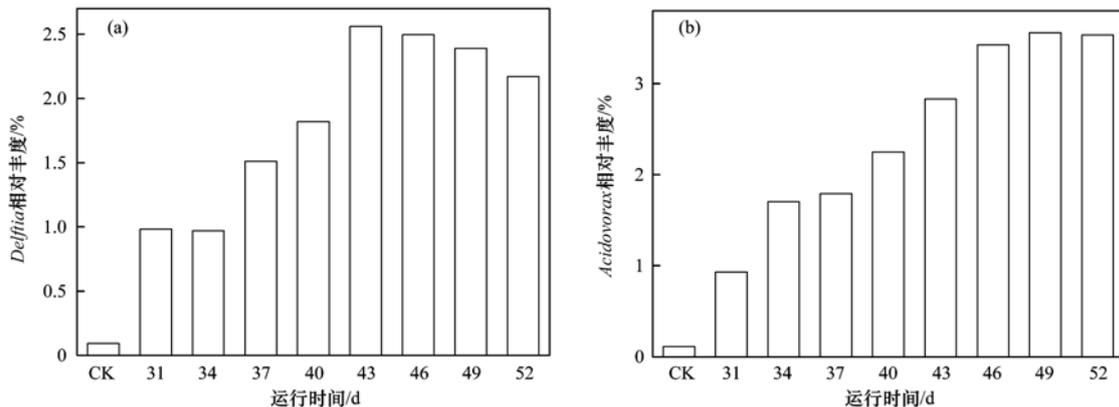


图 7 *Delftia* 和 *Acidovorax* 的相对丰度变化  
Fig. 7 Relative abundances of *Delftia* and *Acidovorax*

## 2.6 生物菌群结构分析

### 2.6.1 生物菌群的 PCA 分析

PCA 分析指通过分析样品的不同组成可以反映样本间菌群结构的差异程度, 样本的菌群结构差异程度越大, 表现出在 PCA 图中距离越分散, 反之则越接近, 通过 PCA 分析可以揭示出反应器在运行过程中的不同阶段的生物菌群结构的变化规律<sup>[28,29]</sup>. 本实验对 9 个污泥样品的 OTU 组成进行 PCA 分析, 如图 8 所示, 可以明显看出 31 ~ 34 d 内的样品和第 37 d 的样品距离较远, 说明 31 ~ 34 d 与第 37 d 的微生物种类相似程度较低, 这可能是由于 YH01 + YH02 的加入后, 与其它菌种存在协同或竞争关系, 打破了原有的菌群平衡, 使得菌群结构发生了巨大的变化. 在 40 ~ 46 d 内的 3 个样品距离较近, 表明各样品中微生物种类相似程度较高, 反应器菌群结构在此阶段处于相对平衡状态. 而 40 ~ 46 d 与 49 ~ 52 d 的样品间有一定的距离, 这表明了 SBR 在运行末期菌群结构有一定的变化, 可能是出现了新的菌群. 因此, 可以将 SBR 运行过程分成 4 个不同的阶段, 表明复合菌株 YH01 + YH02 加入到反应器后, 菌群结构随着强化过程的不同阶段而变化, 更直观地反映了 SBR 反应器中生物菌群的演替过程.

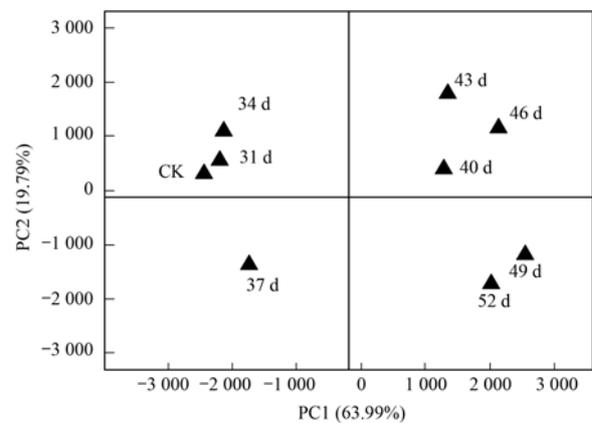


图 8 菌群的 PCA 主成分分析

Fig. 8 Principal component analysis of the bacterial community

### 2.6.2 生物菌群的聚类分析

微生物菌群变化分析通常会由于统计模型的不同而导致不同的分析结果<sup>[30,31]</sup>. 而 UPGMA 聚类分析能较好反映出微生物菌落结构变化与反应器运行之间联系<sup>[20]</sup>. 对 9 个样品的功能基因进行聚类分析, 结果如图 9 所示, 31 ~ 34 d 样品作为运行初期, 样品的菌群结构较为相似, 而到了 37 d 时样品菌群结构与运行初期相比发生较大变化, 这可能由于菌群竞争激烈所致. 而到了 40 ~ 46 d 的样品的菌群结构较为相似, 说明了反应器内菌群结构趋向稳定.

而到运行末期, 49~51 d 样品的相似度较高, 与 40~46 d 菌群结构有差异, 说明末期菌群又发生了改变. 这样可大致将强化过程分为 31~34、37、40~46 和 49~52 d 这 4 个阶段, 说明体系内菌群结构呈现规律演替, 这与张斌等<sup>[32]</sup>的研究结论类似. 这表明了强化的不同阶段微生物群落存在一定的演变关系, 经过规律演替过程最终会形成稳定的菌群结构.

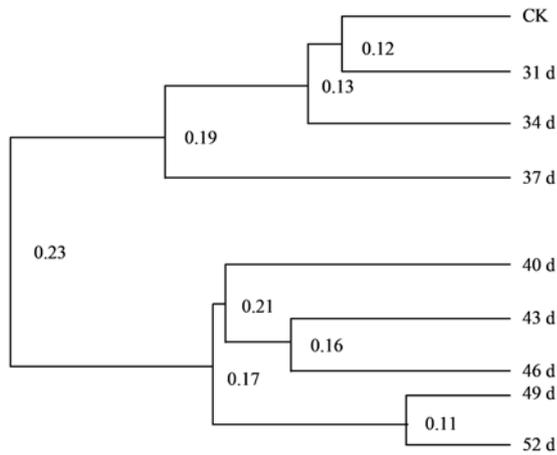


图 9 菌群的 UPGMA 聚类分析

Fig. 9 Cluster analysis of the bacterial community by UPGMA

### 3 结论

(1) 复合菌株 YH01 + YH02 可明显提高 SBR 好氧反硝化效率,  $\text{NO}_3^-$ -N、TN 和 COD 去除率较强化前分别提高了 12.1%、9.2% 和 9.4%.

(2) 在强化 SBR 好氧反硝化过程中, 菌群在门水平以 Proteobacteria、Bacteroidetes 和 Planctomycetes 为主, 丰度均在 5% 以上. 在属水平上以 Uncultured Saprospiraceae、Thauera 和 Luteimonas 为主, 丰度均在 3% 以上.

(3) Delftia 和 Acidovorax 菌相对丰度在强化过程中呈现上升趋势, 复合菌株 YH01 + YH02 在反应器内具有良好的适应能力, 对好氧反硝化起着非常重要的作用.

(4) PCA 分析和 UPGMA 聚类分析大致把 SBR 强化脱氮运行过程分为 4 个阶段, 分别对应 31~34、37、40~46 和 49~52 d.

#### 参考文献:

[1] Robertson L A, Kuenen J G. Aerobic denitrification: a controversy revived[J]. Archives of Microbiology, 1984, **139**(4): 351-354.  
 [2] 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 等. 海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌 SLWX<sub>2</sub> 的筛选及脱氮特性[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2681-2688.  
 Cheng Y, Li Q F, Fei L T, et al. Screening and nitrogen

removing characteristics of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria SLWX<sub>2</sub> from sea water[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2681-2688.

- [3] Wan C L, Yang X, Lee D J, et al. Aerobic denitrification by novel isolated strain using  $^-$ -N as nitrogen source [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(15): 7244-7248.  
 [4] Joo H S, Hirai M, Shoda M. Characteristics of ammonium removal by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification by *Alcaligenes faecalis* NO.4 [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2005, **100**(2): 184-191.  
 [5] Wang H N, Ma X L, Li Y. Influence of different C/N ratios on aerobic denitrification characteristics of the strain [J]. Meteorological and Environmental Research, 2013, **4**(10): 22-24.  
 [6] 黄郑郑, 曹刚, 李紫惠, 等. XH02 菌强化反应器脱氮过程中菌群结构的高通量分析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(5): 1922-1929.  
 Huang Z Z, Cao G, Li Z H, et al. High-throughput sequencing analysis of community structure in reactor enhanced by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria XH02 [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(5): 1922-1929.  
 [7] Yang Y, Xie L, Tao X, et al. Municipal wastewater treatment by the bioaugmentation of *Bacillus sp.* K5 within a sequencing batch reactor[J]. PLoS One, 2017, **12**(6): e0178837.  
 [8] Yang L, Ren Y X, Liang X, et al. Nitrogen removal characteristics of a heterotrophic nitrifier *Acinetobacter junii* YB and its potential application for the treatment of high-strength nitrogenous wastewater[J]. Bioresource Technology, 2015, **193**: 227-233.  
 [9] Wang W F, Cao L X, Tan H M, et al. Nitrogen removal from synthetic wastewater using single and mixed culture systems of denitrifying fungi, bacteria, and actinobacteria [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, **100**(22): 9699-9707.  
 [10] 黄郑郑, 曹刚, 陈海升, 等. 异养硝化-好氧反硝化菌协同竞争对脱氮特性的影响[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(5): 765-774.  
 Huang Z Z, Cao G, Chen H S, et al. Synergy and competition for nitrogen removal by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria[J]. Research of Environmental Science, 2017, **30**(5): 765-774.  
 [11] 全向春, 岑艳, 钱殷. 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[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2862-2868.  
 Quan X C, Cen Y, Qian Y, et al. Isolation, identification of two aerobic denitrifiers and bioaugmentation for enhancing denitrification of biofilm under oligotrophic conditions [J]. Environmental Science, 2013, **34**(7): 2862-2868.  
 [12] 郭昱廷, 彭剑峰, 宋永会, 等. 温度对 ABR 反应器处理效果和微生物群落结构的影响[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(7): 1542-1548.  
 Guo Y T, Peng J F, Song Y H, et al. Influence of temperature on the pollutant removal efficiency and the microbial community of the anaerobic baffled reactor [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(7): 1542-1548.  
 [13] Bokulich N A, Subramanian S, Faith J J, et al. Quality-filtering vastly improves diversity estimates from Illumina amplicon sequencing[J]. Nature Methods, 2013, **10**(1): 57-59.

- [14] Wang M, Chen J K, Li B. Characterization of bacterial community structure and diversity in rhizosphere soils of three plants in rapidly changing salt marshes using 16S rDNA [J]. *Pedosphere*, 2007, **17**(5): 545-556.
- [15] Xu C L, Sun R, Qiao X J, *et al.* Protective effect of glutamine on intestinal injury and bacterial community in rats exposed to hypobaric hypoxia environment [J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2014, **20**(16): 4662-4674.
- [16] Vacková L, Srb M, Sloukal R, *et al.* Comparison of denitrification at low temperature using encapsulated *Paracoccus denitrificans*, *Pseudomonas fluorescens* and mixed culture [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(7): 4661-4666.
- [17] Chen Q, Ni J R, Ma T, *et al.* Bioaugmentation treatment of municipal wastewater with heterotrophic-aerobic nitrogen removal bacteria in a pilot-scale SBR [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **183**: 25-32.
- [18] Boon N, De Gelder L, Lievens H, *et al.* Bioaugmenting bioreactors for the continuous removal of 3-chloroaniline by a slow release approach [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(21): 4698-4704.
- [19] Bouchez T, Patureau D, Delgenès J P, *et al.* Successful bacterial incorporation into activated sludge flocs using alginate [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(2): 1031-1032.
- [20] 邵基伦, 曹刚, 李紫惠, 等. 异养硝化-好氧反硝化菌 *Burkholderia* sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 630-637.
- Shao J L, Cao G, Li Z H, *et al.* Analysis of the microbial community structure in continuous flow reactor enhanced by heterotrophic nitrification and aerobic denitrification bacterium *Burkholderia* sp. YX02 [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 630-637.
- [21] Gao L, Zhou W L, Huang J C, *et al.* Nitrogen removal by the enhanced floating treatment wetlands from the secondary effluent [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **234**: 243-252.
- [22] 侯爱月, 李军, 卞伟, 等. 不同短程硝化系统中微生物群落结构的对比分析 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(2): 428-436.
- Hou A Y, Li J, Bian W, *et al.* Analysis of microbial community structure in different partial nitrification system [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 428-436.
- [23] Islam M S, Zhang Y Y, Dong S M, *et al.* Dynamics of microbial community structure and nutrient removal from an innovative side-stream enhanced biological phosphorus removal process [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **198**: 300-307.
- [24] Du C, Cui C W, Qiu S, *et al.* Nitrogen removal and microbial community shift in an aerobic denitrification reactor bioaugmented with a *Pseudomonas* strain for coal-based ethylene glycol industry wastewater treatment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(12): 11435-11445.
- [25] Janssen P H, Evers S, Rainey F A, *et al.* *Lactosphaera* gen. nov., a new genus of lactic acid bacteria, and transfer of *Ruminococcus pasteurii* Schink 1984 to *Lactosphaera pasteurii* comb. nov. [J]. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1995, **45**(3): 565-571.
- [26] Patil N K, Kundapur R, Shouche Y S, *et al.* Degradation of plasticizer Di-*n*-butylphthalate by *Delftia* sp. TBKNP-05 [J]. *Current Microbiology*, 2006, **52**(5): 369-374.
- [27] Li P, Liu D L, Nahimana L, *et al.* High nitrogen removal from wastewater with several new aerobic bacteria isolated from diverse ecosystems [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, **18**(3): 525-529.
- [28] Zhang Z H, Liu Y, Yu C G, *et al.* Genetically modified WYMV-resistant wheat exerts little influence on rhizosphere microbial communities [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, **105**: 169-176.
- [29] Chae J P, Pajarillo E A B, Oh J K, *et al.* Revealing the combined effects of lactulose and probiotic enterococci on the swine faecal microbiota using 454 pyrosequencing [J]. *Microbial Biotechnology*, 2016, **9**(4): 486-495.
- [30] 郭星亮, 谷洁, 陈智学, 等. 铜川煤矿区重金属污染对土壤微生物群落代谢和酶活性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(3): 798-806.
- Guo X L, Gu J, Chen Z X, *et al.* Effects of heavy metals pollution on soil microbial communities metabolism and soil enzyme activities in coal mining area of Tongchuan, Shaanxi Province of northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(3): 798-806.
- [31] 周石磊, 黄廷林, 张春华, 等. 基于 Miseq 的好氧反硝化菌源水脱氮的种群演变 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(4): 1125-1135.
- Zhou S L, Huang T L, Zhang C H, *et al.* Bacterial community structures of aerobic denitrification bacteria nitrogen removal process in source water experiment by using Miseq high-throughput sequencing technique [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(4): 1125-1135.
- [32] 张斌, 孙宝盛, 季民, 等. MBR 中微生物群落结构的演变与分析 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(11): 2192-2199.
- Zhang B, Sun B S, Ji M, *et al.* Analysis and succession of microbial community structure in a membrane bioreactor [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(11): 2192-2199.

## CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM <sub>2.5</sub> .....	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM <sub>2.5</sub> Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu .....	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM <sub>2.5</sub> at Mt. Huashan, Inland China .....	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM <sub>2.5</sub> ) Produced by Burning Fireworks .....	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region .....	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion .....	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring .....	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao .....	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay .....	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas .....	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City .....	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai .....	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River; A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo .....	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region .....	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH <sub>4</sub> Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River .....	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River .....	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments .....	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River .....	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake .....	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta .....	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process .....	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen; Removal, Transformation and Risk Assessment .....	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine .....	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation .....	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water .....	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater .....	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition .....	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads .....	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A <sup>2</sup> /O-BAF System .....	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control .....	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process .....	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater .....	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process .....	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process .....	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge .....	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process .....	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02 .....	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances .....	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain .....	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings .....	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin .....	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region .....	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feamnox in the Surface Soils of a Riparian Zone .....	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding .....	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China .....	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment .....	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajuhu Lake, Shengongjia .....	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China .....	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi .....	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It .....	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment .....	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains .....	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage .....	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern .....	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland .....	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission .....	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO <sub>2</sub> Release in Karst Region .....	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)