

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

**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

中国国道和省道机动车尾气排放特征 ..... 王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)

北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响 ..... 闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)

不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征 ..... 方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)

大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价 ..... 王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)

2014年6月南京大气复合污染观测 ..... 郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)

嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征 ..... 王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)

应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法 ..... 田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)

福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析 ..... 张千湖,高兵,黄蕙,颜晓妹,崔胜辉(3610)

珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价 ..... 蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)

贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响 ..... 谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)

东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价 ..... 刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)

基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析 ..... 刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)

太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析 ..... 连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)

黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征 ..... 赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)

三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征 ..... 黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)

网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化 ..... 沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)

高地下水位地区透水停车场的水文控制效果 ..... 金建荣,李田,王圣思,陈子隼,周佳雯(3689)

北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征 ..... 于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)

垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征 ..... 肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)

潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性 ..... 李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)

滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响 ..... 臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)

高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征 ..... 刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)

活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制 ..... 苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)

石墨烯凝胶电极的制备及电吸附  $Pb^{2+}$  的性能 ..... 王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)

电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制 ..... 张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)

黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制 ..... 周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)

双氧水协同生化法强化处理印染废水 ..... 岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)

基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制 ..... 吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)

利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器 ..... 高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)

零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施 ..... 张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)

低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析 ..... 马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)

市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析 ..... 刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)

高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析 ..... 孟婷,杨宏(3816)

两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征 ..... 张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)

生物炭对土壤  $CH_4$ 、 $N_2O$  排放的影响 ..... 周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)

江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素 ..... 江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)

碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响 ..... 俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)

黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性 ..... 冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)

有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响 ..... 费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)

酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子 ..... 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)

陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力 ..... 王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)

甘肃白银东大沟铅锌镉复合污染场地水泥固化稳定化原位修复 ..... 吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)

设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价 ..... 金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)

镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响 ..... 常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)

秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响 ..... 段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)

*Pantoea* sp. IMH 介导土壤中砷的形态转化 ..... 张林,卢金锁(3937)

生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性 ..... 王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)

浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制 ..... 陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)

灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用 ..... 于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)

污泥生物炭制备吸附陶粒 ..... 李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)

石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能 ..... 黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)

《环境科学》征稿简则(3859) 《环境科学》征订启事(3952) 信息(3644, 3688, 3768)

# 高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析

孟婷, 杨宏\*

(北京工业大学建筑工程学院, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 培养高效的反硝化细菌可提高污水处理效率. 本实验为序批式实验, 以 I 号、II 号发酵液为碳源, 采用梯度提高硝氮的方式, 培养高效的反硝化细菌, 从中选择培养更加快速的发酵液. 并采用高通量测序技术分析反硝化细菌的生物群落结构和多样性的变化. 结果表明, II 号发酵液能够在第 11 d 便实现高效反硝化细菌 [ $300 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ ] 的快速培养, 比 I 号发酵液提前了 17 d, 同时, 高效反硝化细菌系统对氨氮和总磷有一定的去除效果, 最大去除速率分别为  $34.43 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$  和  $2.98 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ . 高通量测序分析结果表明, 污泥经过驯化培养, 物种丰度和多样性降低, 但发挥反硝化作用的优势菌群的类别和比例得到增大; 细菌的组成及数量发生了较大的改变, 最终发挥高效反硝化作用的核心菌属为 *Thauera* 和 *Pseudomonas*. 另外, 反硝化聚磷菌科 (Rhodocyclaceae 和 Pseudomonadaceae) 和异养硝化菌属 (*Pseudomonas*、*Alcaligenes*、*Bacillus* 和 *Comamonas*) 的存在, 验证了系统对氨氮和总磷的去除能力.

**关键词:** 快速培养; 高效反硝化细菌; 发酵液; 生物群落结构; 生物多样性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3816-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201701159

## Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria

MENG Ting, YANG Hong\*

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, College of Architectural Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** High-efficiency denitrifying bacteria can improve wastewater treatment efficiency. In order to rapidly culture high-efficiency denitrifying bacteria, batch trials were conducted at different carbon sources (No. 1 and No. 2 fermented liquid) and  $\text{NO}_3^-$ -N concentration gradients ( $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ — $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ — $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). The results showed that No. 2 fermented liquid could finish high-efficiency denitrifying bacteria [ $300 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ ] cultivation in 11 d, which is 17 d before No. 1 fermented liquid could. At the same time, high-efficiency denitrifying bacteria could effectively remove ammonia-nitrogen and total phosphorus, and maximum removal rates were  $34.43 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$  and  $2.98 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ , respectively. Furthermore, high-throughput sequencing was employed to characterize and compare the community structure and diversity. The species abundance and diversity were reduced but the category and proportion of denitrifying bacteria were increased. In addition, bacteria composition and quantity changed after cultivation and *Thauera* and *Pseudomonas* were the dominant contributors to the effective removal of nitrate in the SBR (sequencing batch reactor). Denitrifying phosphorus accumulating bacteria (Rhodocyclaceae and Pseudomonadaceae) and heterotrophic nitrifying bacteria (*Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, and *Comamonas*) proved the capacity of the system to remove ammonia-nitrogen and total phosphorus.

**Key words:** rapid culture; high-efficiency denitrifying bacteria; fermented liquid; microbial community structure; biological diversity

目前,随着排入污水厂的污水中污染物浓度的升高,污水处理难度也越来越高<sup>[1]</sup>. 污水厂的反硝化处理能力虽然基本满足要求,但处理效率仍存在着较大的提升空间,而较低的处理效率无法从根本上达到节能降耗的目的,造成较高的污水处理设施的运行成本<sup>[2]</sup>.

现有的污水厂大多使用活性污泥法处理污水,反应池中使用的活性污泥特异性差,无法更好地发挥出单一类菌群的处理能力,制约了污水处理能力的提升. 由此,驯化培养出高效的特定功能脱氮菌群(如:AOB、DNB、NOB等),并将其定向投入到相应功能池中,可大大提高污水处理能力. 高效脱氮

菌群的使用虽有节省外加碳源、简化工艺流程、减少投资运行费用等优势<sup>[3]</sup>,但高效脱氮菌群的培养仍然是一个亟待解决的问题. 因此培养高效脱氮菌群成为研究的难点.

在反硝化过程中,微生物在缺氧环境中利用有机碳作为电子供体,将 $\text{NO}_3^-$ -N转化为 $\text{N}_2$ . 以污泥发酵液为碳源培养反硝化细菌,是近期的研究中反硝化效果相对较好的<sup>[4-6]</sup>;另外,污泥水解产酸过程

收稿日期: 2017-01-18; 修订日期: 2017-03-25

作者简介: 孟婷(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为微生物水处理技术, E-mail: mengting2@yeah.net

\* 通信作者, E-mail: yhong@bjut.edu.cn

中,既能提供可作为碳源的挥发性脂肪酸(VFAs),还能实现污泥的减量化,解决污水处理厂存在的另一大难题,有良好的发展前景<sup>[7]</sup>.

微生物群落结构和组成随环境的不同而不同,主要受到氮营养元素的影响,特别是 $\text{NO}_3^-$ -N含量是影响细菌类群的重要因素<sup>[8]</sup>.如,在北极水域中6个最大的河流中 $\text{NO}_3^-$ -N含量也是调节细菌群落组成变化的关键因素<sup>[9]</sup>.此外,微生物群落结构和组成也受到其他因素的影响,如Liao等<sup>[10]</sup>研究表明,当处理含高亚硝酸盐水时, $\gamma$ -Proteobacteria最大丰度可达84.39%;Yoshie等<sup>[11]</sup>研究表明,在含盐污水的高效脱氮中 $\gamma$ -Proteobacteria具有重要作用; $\beta$ -Proteobacteria是淡水细菌群落中一个典型的优势类群,在河流和湖泊等水生态环境中起着非常重要的作用<sup>[9,12~14]</sup>.

本实验以污泥发酵液作为反硝化碳源,采用梯度提高硝氮浓度的序批式实验,验证两种不同制备

方法制得的发酵液对快速培养高效反硝化细菌的影响;另外,采用高通量测序技术分析高效反硝化细菌的生物群落结构和多样性.培养高效的反硝化细菌,可节省外加碳源、简化工艺流程、减少投资运行费用等;观察微生物群落结构,可直接了解到主要发挥高效反硝化作用的细菌菌群种类,从而向污水厂投加该类高效菌群,实现对含 $\text{NO}_3^-$ -N废水的更好处理.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验分组

实验所用碳源是利用污水厂浓缩池污泥制成的发酵液,发酵液制作方法采用两种,区别在于是否在发酵过程中调节pH,如图1所示,得到I号和II号发酵液.依据细菌培养中加入的碳源的不同,将实验分为两组,见表1.

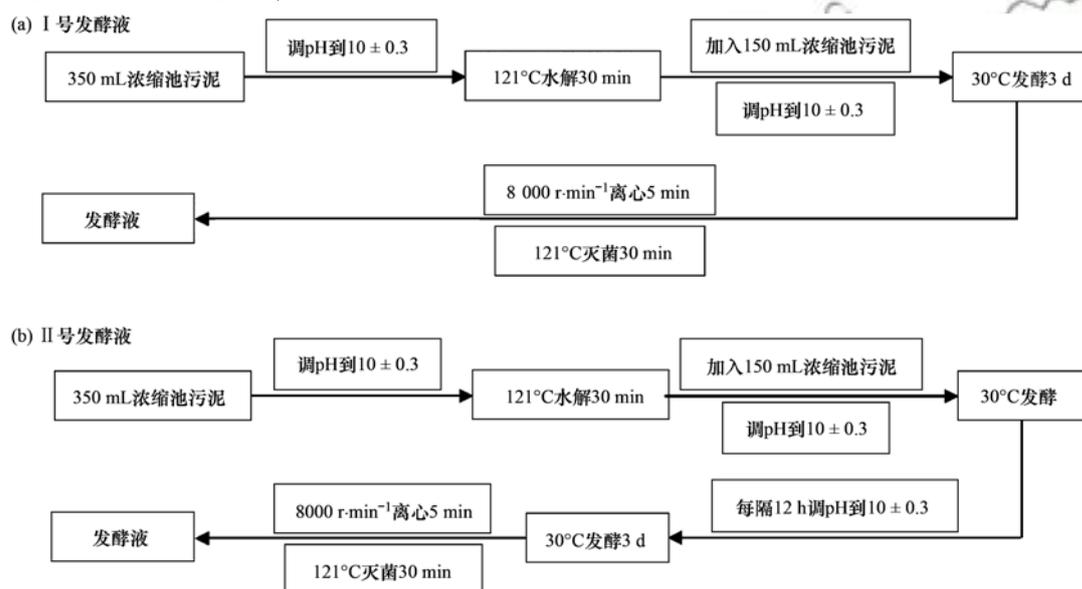


图1 污泥发酵液制备方法

Fig. 1 Methods of preparation of the fermented liquid

表1 实验分组

Table 1 Experimental group list

项目	编号	
	①	②
碳源	I号发酵液	II号发酵液

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 快速培养高效反硝化细菌

实验采用污水厂回流污泥为菌源,利用2只1 L锥形瓶作为反应器,实验用水采用人工配水,即在自来水中加入一定量的硝酸钾,以及在①、②组中分别加入I号发酵液、II号发酵液,水质特征为:

$\text{COD}/\text{NO}_3^-$ -N = 10, pH 为 7.3 ~ 7.5,  $t = 29^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ,其中,利用恒温培养箱控制反应温度,调节培养箱中摇床振荡速度为  $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,以确保物料均匀.

实验采用间歇式方法运行,反应周期为1 h,利用梯度提高 $\text{NO}_3^-$ -N浓度的方式快速培养高效反硝化细菌,即当前一个 $\text{NO}_3^-$ -N浓度条件下的出水中 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度均为零时,立刻提高到下一个 $\text{NO}_3^-$ -N浓度,当反应器中细菌的反硝化速率达到  $300 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 时,即可将其称为高效反硝化细菌. $\text{NO}_3^-$ -N质量浓度梯度为:  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \rightarrow 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \rightarrow 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 通过对比①、②组的反硝化

速率变化情况,选择出较优的发酵液制备方法,确定快速培养高效反硝化细菌的方法。

### 1.2.2 高通量测序技术分析生物群落结构和多样性的变化

本实验中样本 MT1 和 MT2 分别取自:培养前和培养后。利用土壤 DNA 快速提取试剂盒 (Bio101, Vista, CA) 从 200 ~ 500 mg 样本中提取 DNA。采用 NanoDrop 2000 分光光度计测量 DNA 浓度。采用 Sensoquest LabCycler PCR 仪进行 PCR 扩增。16S rRNA 基因扩增采用引物 340F-805R 检测全部细菌。反应体系及升温程序见文献[15]。

针对细菌 16S rRNA 的 V4 区扩增及测序的引物为 F 端: aatgatacggcgaccaccgagatctactctttcctacacgacgctctccgatct; R 端: 测序引物 + barcode + 测序引物: caagcagaagacggcatcacgagatXXXXXXgtgactggagttcagacgtgtctctccgatct。采用 Illumina HiSeq 2500 PE250 进行高通量测序。针对测序数据使用 MEGAN 软件进行环境微生物的 16S 分析,将得到的序列按照一定的阈值进行归类,得到多个序列聚类操作分类单元(OTUs),根据 OTUs 结果进行多样性的计算分析,最后对分析结果进行可视化,使信息更容易解释。

### 1.3 分析方法

根据标准分析方法测定 pH、 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、COD、总磷(TP)、VFAs、温度( $t$ ),并且每个样品均一式三份。 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、COD 和 TP 分别采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535-2009)、紫外分光光度法、N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法(GB/T 13807-1992)、连华科技 COD 快速测定法和钼酸铵分光光度法测定,VFAs 采用安捷伦 6890n 气相色谱仪测定(气相色谱测定法),pH 采用上海三信 PHS-3C 型 pH 计测定,温度使用温控器探头测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高效反硝化细菌的快速培养

#### 2.1.1 两种发酵液对高效反硝化细菌快速培养的影响

两种发酵液的成分含量,如表 2 所示。①、②组

反应器中细菌的反硝化速率变化如图 2 所示。在培养前期(进水  $\text{NO}_3^-$ -N 质量浓度为  $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),①、②组反应器中细菌的反硝化效率均存在一个缓慢提升的过程,特别是①组,如图 2(a)所示,经过 13 d 后出水中的  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 质量浓度才均为零,而在②组中,仅用 6 d 出水中的  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 质量浓度均已为零,如图 2(b)所示。说明使用 II 号发酵液可在前期培养过程中更加快速地提高反硝化速率。

当进水  $\text{NO}_3^-$ -N 质量浓度提高到  $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,①、②组反应器中反硝化效率提升所需的时间与前一过程相比均有所减少,特别是②组反应器,①、②组的反硝化性能提升所耗时间分别为 9 d 和 3 d,达到了  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度进一步提升的条件,从中可以看出 II 号发酵液快速培养高效反硝化细菌的优势更加明显。

最后,当进水  $\text{NO}_3^-$ -N 质量浓度提高到  $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  后,①、②组反应器均能实现出水  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 质量浓度为零,反硝化速率均达到  $300 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$  以上(发酵液中存在部分  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N),即均可成功培养得到高效反硝化细菌;但是,在①组反应器中培养高效反硝化细菌的全过程需要 28 d,如图 2(a)所示,而②组反应器仅需 11 d,较①组提前了 17 d。由上述分析明显可见,II 号发酵液可实现更加快速的培养高效反硝化细菌的目的。由于只有 VFAs 是易于反硝化细菌利用的碳源,由此分析其原因可能为 II 号发酵液中挥发性脂肪酸(VFAs)所占的比例(53.51%)高于 I 号发酵液(46.03%),如表 2 所示,也就是说,II 号发酵液中可供反硝化作用利用的有效碳源较多。

如图 3 所示,由于 VFAs 的溶出过程缓慢,在发酵初期快速增大,随后缓慢增大,在第 7 d 达到最大,而发酵后期由于微生物消耗和生成甲烷<sup>[16]</sup>,导致发酵后期 VFAs 逐渐下降。综合经济因素分析第 3 d 和第 7 d 的 VFAs 浓度,以及考虑到实验中发酵液的及时供应问题,最终本实验的发酵期定为 3 d。

#### 2.1.2 氨氮和总磷的去除效果

由于发酵液中含有  $\text{NH}_4^+$ -N 和正磷酸盐(见表 2),若将发酵液作为碳源加入到反硝化系统中,会

表 2 两种发酵液的成分

Table 2 Constituents from two types of fermented liquid

发酵液编号	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	VFAs/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^-$ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2^-$ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+$ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
I (不调 pH)	6 071.16	2 794.732	18.669 32	1.351 35	119.754 9	35.685
II (调节 pH)	6 677.742	3 573.53	19.640 22	1.430 84	122.045 9	37.954

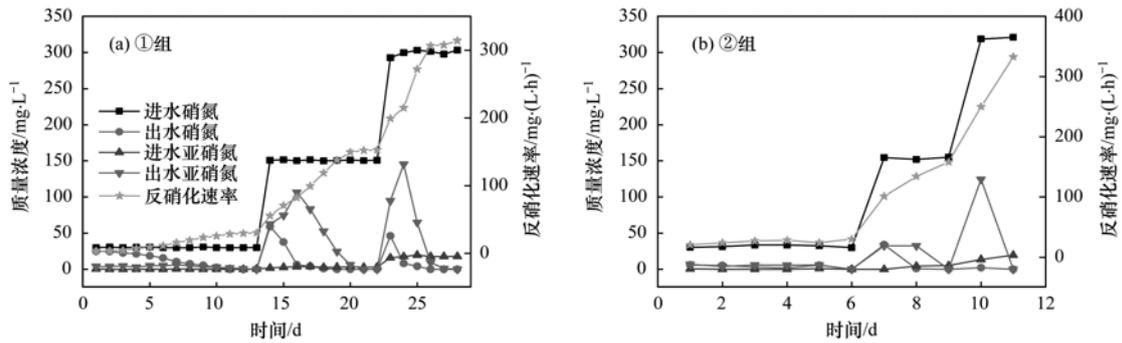


图2 进出水硝氮和亚硝氮的质量浓度以及反硝化速率曲线

Fig. 2 Denitrification rate and  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NO}_2^-$ -N concentrations of the influent and effluent

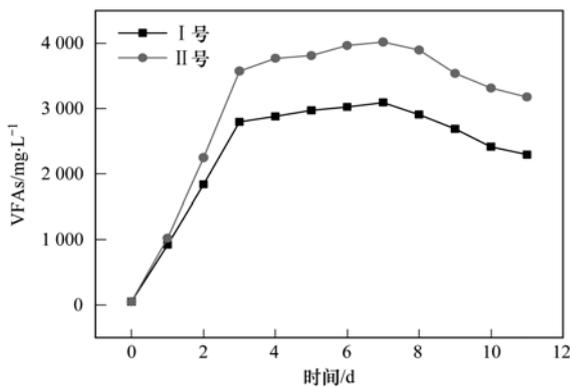


图3 两种发酵液中 VFAs 随时间的变化曲线

Fig. 3 Change in VFAs in two types of fermented liquids with time

额外带入 $\text{NH}_4^+$ -N和TP,因此,在实际工程应用发酵液作为脱氮碳源时,建议将氮磷进行预处理后使用,在现有的研究中有成熟、简单的预处理方法<sup>[17-19]</sup>.

值得注意的是,②组的实验培养的高效反硝化细菌体系对 $\text{NH}_4^+$ -N和TP均有一定的处理能力,如图4和图5所示.随着 $\text{NO}_3^-$ -N浓度梯度的提高,发酵液投加量随之增大,因而 $\text{NH}_4^+$ -N和TP浓度随之增加,其中, $\text{NH}_4^+$ -N质量浓度从 $13.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右上升到 $105 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,TP质量浓度从 $3.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右上升到 $25.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.与此同时,培养的高效反硝化细菌对 $\text{NH}_4^+$ -N和TP的去除速率也随进水 $\text{NH}_4^+$ -N和TP质量浓度的增大而愈发明显,分别从 $0.69 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 、 $1.04 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 上升到 $34.43 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 、 $2.98 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ ,推测水体中不仅存在大量的反硝化脱氮菌,还存在部分异养硝化菌和反硝化聚磷菌,研究表明一些异养硝化细菌同时也是好氧反硝化细菌<sup>[20]</sup>.此外, $\text{NH}_4^+$ -N的去除率随进水 $\text{NH}_4^+$ -N质量浓度的增大,也从5.12%增长到32.56%,一方面可能是环境适宜使得具有除 $\text{NH}_4^+$ -N功能的细菌得以生长繁殖,另一方面可能是 $\text{NH}_4^+$ -N质量浓度越高, $\text{NH}_4^+$ -N去除率越大<sup>[21]</sup>;而TP的去

除率随进水TP质量浓度的增大,从30.73%下降到11.13%,这是因为TP质量浓度的增大幅度远大于TP去除速率的增长幅度,说明TP质量浓度的升高对具有除TP功能的细菌的除磷能力影响较小,证明在实际培养除磷功能菌群实验中,利用高磷浓度提高除磷速率是不太可行的.另外,研究表明氨氮质量浓度对反硝化作用存在明显抑制作用<sup>[22,23]</sup>,但本实验中并不存在明显的抑制现象,说明培养的高效反硝化细菌对高氨氮质量浓度具有较高的耐受性.

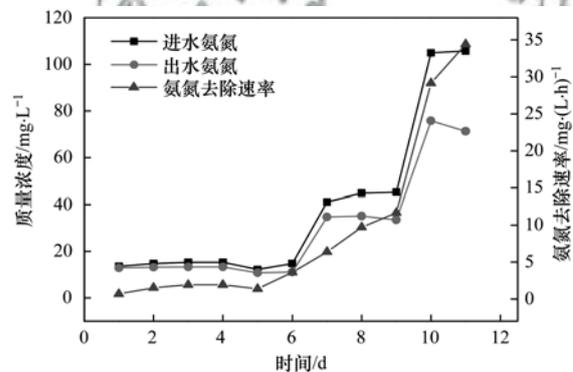


图4 氨氮去除效果曲线

Fig. 4 Effect on ammonia nitrogen removal rate

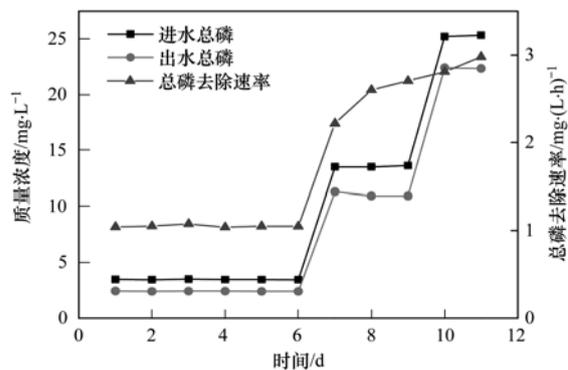


图5 总磷去除效果曲线

Fig. 5 Effect on TP removal rate

2.2 微生物群落丰富度和多样性的影响

利用高通量测序研究不同条件下反硝化种群的变化,结果表明(表3),有110 528条有效序列(MT1: 55319, MT2: 55209),以及被分为4420 OTUs(序列聚类操作分类单元)。

每个样本的 $\alpha$ 多样性估计函数见表3。所有样本覆盖值都超过99%,表明测序深度已经基本覆盖到样本中所有的物种。原始污泥经过驯化后,OTUs从2672降低到1750。样本中原始污泥的OUT数量

较大。原始污泥的Chao1(估计群落中含OTU数目的指数)和ACE指数(菌群丰富度指数,用来估计群落中含有OTU数目的指数)较大,表明原始污泥样本具有较大的丰富度。而且,Shannon多样性指数和Simpson多样性指数(反映样本中微生物多样性的指数)具有同样的变化趋势,随着污泥驯化培养的进行,Shannon多样性指数和Simpson多样性指数分别从8.56、0.984降低到6.03、0.931,表明原始污泥具有较大的细菌多样性。

表3 样本多样性统计

Table 3 Diversity statistics for each sample at the confidence cutoff level of 0.8

样品编号	有效序列	OTUs	Chao1 指数	ACE 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖值/%
MT1	55319	2672	2 675. 304 3	2 704. 481	8. 557 093	0. 983 631	99. 79
MT2	55209	1750	1 890. 616 5	2 033. 456	6. 029 889	0. 931 228	99. 12

2.3 细菌群落变化

相对丰度的改变表明了微生物种群的不同,图6中,两个样本的有效序列被定义为4个不同的能级分布(门、纲、科和属)。在门的分类水平上[图6(a)],原始污泥MT1的显著性类群是:

Proteobacteria(63.26%)、Bacteroidetes(19.84%)和Actinobacteria(4.35%); MT2的显著性类群是: Proteobacteria(65.83%)、Bacteroidetes(19.51%), Firmicutes(13.04%),由此可知,经过污泥的驯化培养,Proteobacteria仍是优势菌门,这与Liao等<sup>[10]</sup>的

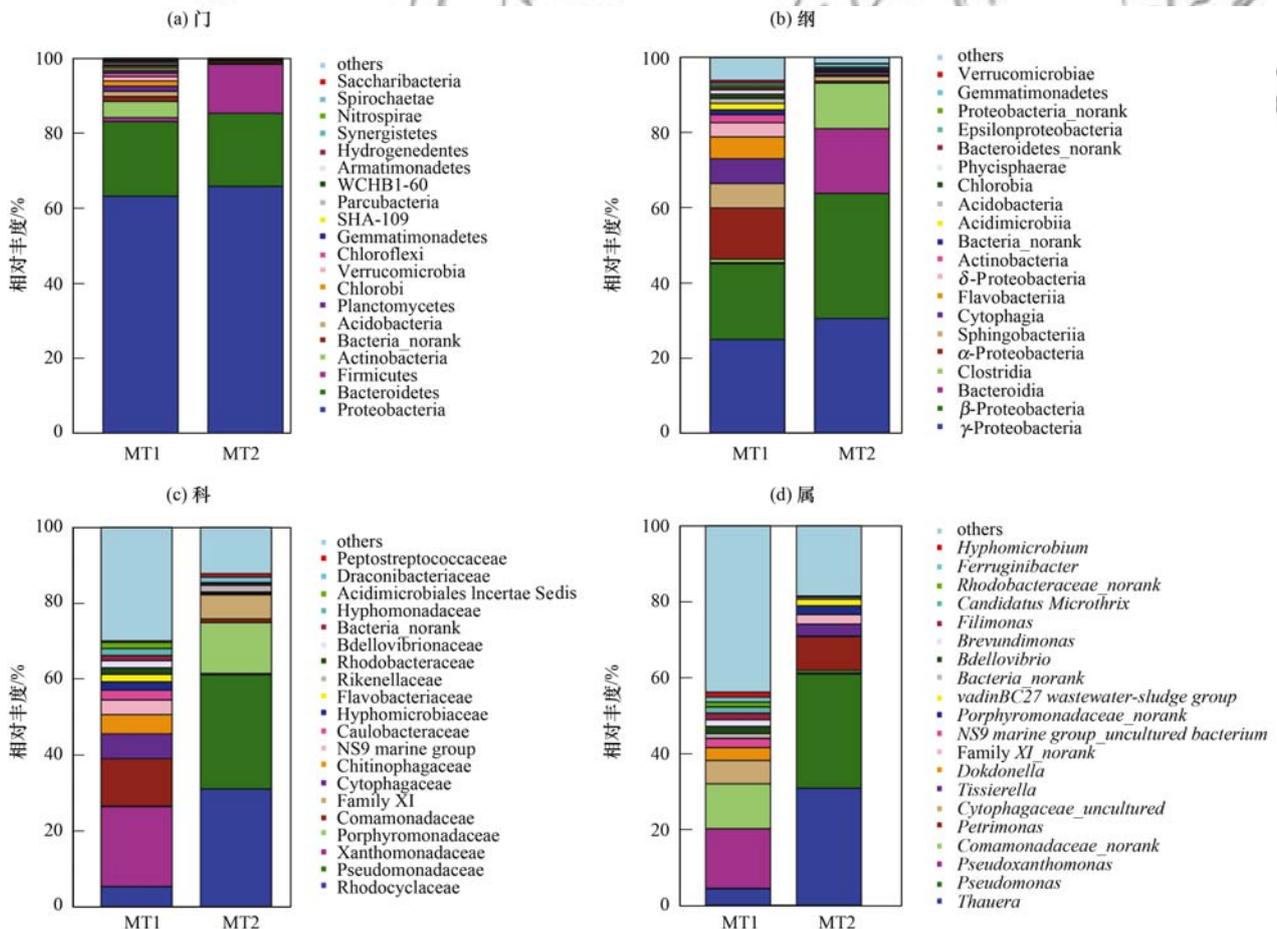


图6 MT1和MT2的微生物群落结构

Fig. 6 Microbial community structure of MT1 and MT2

研究结果一致; Bacteroidetes 仍是第二优势菌门, 这与 Newton 等<sup>[24]</sup>的研究结果一致; 但在利用发酵液培养高效反硝化细菌的过程中, 细菌的组成及数量都发生了改变。

如图 6(b) 所示, 在纲的分类水平上, MT1 的显著性类群是:  $\gamma$ -Proteobacteria (24.86%)、 $\beta$ -Proteobacteria (20.21%) 和  $\alpha$ -Proteobacteria (13.67%), 均从属于 Proteobacteria; MT2 的显著性类群是:  $\beta$ -Proteobacteria (33.28%)、 $\gamma$ -Proteobacteria (30.53%)、Bacteroidia (17.27%) 和 Clostridia (12.20%), 分别从属于 Proteobacteria、Bacteroidetes 和 Firmicutes, 由此可知, 经过污泥的驯化培养, 优势菌群的类别得到了拓宽、所占比例得到提高 (从 58.74% ~ 93.28%), 这在一定程度上保证了反硝化作用的高效性; 另外,  $\beta$ -Proteobacteria 和  $\gamma$ -Proteobacteria 仍是最主要的显著性类群, 但  $\beta$ -Proteobacteria (33.28%) 代替  $\gamma$ -Proteobacteria (30.53%) 成为第一优势菌门, 这与孙<sup>[25]</sup>的研究结果一致;  $\alpha$ -Proteobacteria 丰度从 13.67% 减小到 0.47%, 虽然  $\alpha$ -Proteobacteria 广泛分布于全球范围内的河流和湖泊中<sup>[8,12,24]</sup>, 但是它们更偏好于盐水环境<sup>[26]</sup>, 由此可知, 随着污泥的驯化培养, 反应体系中的生长环境逐渐趋于淡水环境。

如图 6(c) 所示, 在科的分类水平上, MT2 的显著性类群是: Rhodocyclaceae (31.04%)、Pseudomonadaceae (30.08%)、Porphyromonadaceae (13.48%)、Rikenellaceae (1.78%) 和 Draconibacteriaceae (1.43%)。Rhodocyclaceae 部分为反硝化聚磷功能菌群<sup>[27~29]</sup>, Pseudomonadaceae 亦有部分为已证明的反硝化聚磷菌群<sup>[30]</sup>, 验证了系统中具有一定的除磷效果。

如图 6(d) 所示, 在属的分类水平上, MT2 的最显著性类群是: *Thauera* (30.89%) 和 *Pseudomonas* (30.08%), 同属于 Proteobacteria, 只是处在不同的进化分支上。已知的 *Thauera* 细菌都是反硝化菌<sup>[31]</sup>, *Pseudomonas* 属是已被正式描述硝化细菌 (包括异养、自养) 的菌属的其中之一<sup>[21]</sup>。值得一提的是, 数量较少的菌属 [在图 6(d) 的 others 中], 包括 *Alcaligenes* (0.92%) 和 *Bacillus* (0.03%) 也是已被正式描述为硝化细菌的菌属, 而 *Comamonas* (0.30%) 可能是新型的异养硝化菌<sup>[21]</sup>, 验证了系统中具有一定的除氨氮效果。

### 3 结论

(1) 在 II 号发酵液制备过程中, 每隔 12 h 将发

酵液 pH 调节为 10, 这区别于 I 号发酵液的制备方法, 使得 II 号发酵液中挥发性脂肪酸 (VFAs) 所占的比例 (53.51%) 高于 I 号发酵液 (46.03%), 因此利用 II 号发酵液, 可实现更加快速培养高效反硝化细菌的目的, 培养时间仅需 11 d, 反硝化速率即可达  $300 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$  以上。

(2) 经过污泥的驯化培养, Proteobacteria 和 Bacteroidetes 仍是优势菌门, 但细菌的组成及数量都发生了改变, 其中,  $\beta$ -Proteobacteria 代替  $\gamma$ -Proteobacteria 成为第一优势变形菌门, 而  $\gamma$ -Proteobacteria 的数量在 MT2 条件下仍占有较大比例;  $\alpha$ -Proteobacteria 不再是优势菌群, 取而代之的是 Bacteroidia 和 Clostridia。

(3) 培养前, 优势菌群均从属于 Proteobacteria; 培养后优势菌群分别从属于 Proteobacteria、Bacteroidetes 和 Firmicutes, 优势菌群类别的拓宽、所占比例的提高, 在一定程度上保证了反硝化作用的高效性。

(4) 高效反硝化细菌对总磷存在一定的处理能力, 最高可达  $2.98 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ , 而反硝化聚磷菌 Rhodocyclaceae 和 Pseudomonadaceae 的存在, 验证了系统中的除磷效果。已被正式描述硝化细菌 (包括异养、自养) 的菌属: *Pseudomonas*、*Alcaligenes* 和 *Bacillus* 的存在, 以及 *Comamonas* (可能为新型的异养硝化菌属) 的存在, 验证了系统中的除氨氮效果。

#### 参考文献:

- [1] 林齐. 工业综合废水深度处理与污水厂工艺升级改造研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- [2] 朱雁伯, 袁楠楠, 姜威, 等. 我国城镇污水厂运行管理中存在的问题及对策 [J]. 中国给水排水, 2012, 28(18): 30-34. Zhu Y B, Yuan N N, Jiang W, et al. Problems and solutions in operation management of municipal sewage treatment plants in China [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(18): 30-34.
- [3] 杜理智. 水解反硝化工艺对低碳氮比和低温城市污水的脱氮性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [4] Li C, Cao J S, Ren H Q, et al. Comparison on kinetics and microbial community among denitrification process fed by different kinds of volatile fatty acids [J]. Process Biochemistry, 2015, 50(3): 447-455.
- [5] 何岳兰, 王淑莹, 李夕耀, 等. 不同剩余污泥发酵液对  $\text{NO}_x^-$  还原的影响 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 2964-2971. He Y L, Wang S Y, Li X Y, et al. Effect of different waste activated sludge fermentation supernatants on  $\text{NO}_x^-$  reduction process [J]. China Environmental Science, 2016, 36(10): 2964-2971.
- [6] Liu Y L, Yuan Y X, Li X, et al. Succession of bacterial community in anaerobic-anoxic-aerobic ( $\text{A}^2\text{O}$ ) bioreactor using sludge fermentation liquid as carbon source [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 54(4-5): 1061-1069.

- [7] 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 等. 污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 1000-1005.  
Luo Z, Zhou G J, Liu H B, *et al.* Enhanced nitrogen and phosphorus removal of wastewater by using sludge anaerobic fermentation liquid as carbon source in a pilot-scale system[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 1000-1005.
- [8] Liu Z H, Huang S B, Sun G P, *et al.* Phylogenetic diversity, composition and distribution of bacterioplankton community in the Dongjiang River, China [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2012, **80**(1): 30-44.
- [9] Crump B C, Peterson B J, Raymond P A, *et al.* Circumpolar synchrony in big river bacterioplankton [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, **106**(50): 21208-21212.
- [10] Liao R H, Shen K, Li A M, *et al.* High-nitrate wastewater treatment in an expanded granular sludge bed reactor and microbial diversity using 454 pyrosequencing analysis [J]. Bioresource Technology, 2013, **134**: 190-197.
- [11] Yoshie S, Noda N, Miyano T, *et al.* Microbial community analysis in the denitrification process of saline-wastewater by denaturing gradient gel electrophoresis of PCR-amplified 16S rDNA and the cultivation method[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2001, **92**(4): 346-353.
- [12] Crump B C, Hobbie J E. Synchrony and seasonality in bacterioplankton communities of two temperate rivers [J]. Limnology and Oceanography, 2005, **50**(6): 1718-1729.
- [13] Newton R J, Kent A D, Triplett E W, *et al.* Microbial community dynamics in a humic lake: differential persistence of common freshwater phylotypes[J]. Environmental Microbiology, 2006, **8**(6): 956-970.
- [14] Salcher M M, Posch T, Pernthaler J. *In situ* substrate preferences of abundant bacterioplankton populations in a prealpine freshwater lake[J]. The ISME Journal, 2013, **7**(5): 896-907.
- [15] 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 等. 冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1002-1008.  
Huang F, Mei X J, Wang Z W, *et al.* Diversity of operation performance and microbial community structures in MBRs and CAS processes at low temperature[J]. Environmental Science, 2014, **35**(3): 1002-1008.
- [16] 李晓玲, 彭永臻, 柴同志, 等. 投碱种类和氨吹脱对污泥碱性发酵产酸的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(5): 1194-1199.  
Li X L, Peng Y Z, Chai T Z, *et al.* The effect of alkali types and ammonia stripping on volatile fatty acids accumulation in sludge alkaline fermentation[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(5): 1194-1199.
- [17] Barat R, Montoya T, Seco A, *et al.* Modelling biological and chemically induced precipitation of calcium phosphate in enhanced biological phosphorus removal systems [J]. Water Research, 2011, **45**(12): 3744-3752.
- [18] Liao P H, Chen A, Lo K V. Removal of nitrogen from swine manure wastewaters by ammonia stripping [J]. Bioresource Technology, 1995, **54**(1): 17-20.
- [19] Zhang C, Chen Y G. Simultaneous nitrogen and phosphorus recovery from sludge-fermentation liquid mixture and application of the fermentation liquid to enhance municipal wastewater biological nutrient removal [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(16): 6164-6170.
- [20] Robertson L A, Van Niel E W J, Torremans R A M, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrification in aerobic chemostat cultures of *Thiosphaera pantotropha* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1988, **54**(11): 2812-2818.
- [21] 司文攻, 吕志刚, 许超. 耐受高浓度氨氮异养硝化菌的筛选及其脱氮条件优化[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3448-3454.  
Si W G, Lü Z G, Xu C. Isolation of heterotrophic nitrifiers which can tolerate high concentration of ammonia-nitrogen and the optimization of their nitrogen removal efficiency in wastewater [J]. Environmental Science, 2011, **32**(11): 3448-3454.
- [22] 张瑞. 耐低温反硝化菌的选育及其脱氮特性研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2013.
- [23] 胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 等. 农业废物好氧堆肥中环境因子对 *nirK*、*nirS* 和 *nosZ* 数量的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1196-1203.  
Hu C X, Chen Y N, Zhang J C, *et al.* Effects of physico-chemical parameters on the abundance of the denitrification-associated genes *nirK*, *nirS* and *nosZ* during agricultural waste composting[J]. Environmental Science, 2013, **34**(3): 1196-1203.
- [24] Newton R J, Jones S E, Eiler A, *et al.* A guide to the natural history of freshwater lake bacteria [J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2011, **75**(1): 14-49.
- [25] 孙巍. 东江微生物的群落结构及其在氨氮转化中的作用特点[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [26] Biers E J, Sun S L, Howard E C. Prokaryotic genomes and diversity in surface ocean waters: interrogating the global ocean sampling metagenome [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2009, **75**(7): 2221-2229.
- [27] Zilles 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.
- [28] Kim J M, Lee H J, Lee D S, *et al.* Characterization of the denitrification-associated phosphorus uptake properties of "*Candidatus* Accumulibacter phosphatis" clades in sludge subjected to enhanced biological phosphorus removal [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, **79**(6): 1969-1979.
- [29] Tsuneda S, Miyauchi R, Ohno T, *et al.* Characterization of denitrifying polyphosphate-accumulating organisms in activated sludge based on nitrite reductase gene[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2005, **99**(4): 403-407.
- [30] Barak Y, van Rijn J. Relationship between nitrite reduction and active phosphate uptake in the phosphate-accumulating denitrifier *Pseudomonas* sp. strain JR 12 [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, **66**(12): 5236-5240.
- [31] Luo J, Tillman R W, Ball P R. Factors regulating denitrification in a soil under pasture [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, **31**(6): 913-927.

## CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China .....	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing .....	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels .....	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust .....	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014 .....	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing .....	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System .....	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province .....	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta .....	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus .....	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City .....	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations .....	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin .....	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River .....	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir .....	..... HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes .....	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas .....	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China .....	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills .....	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment .....	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions .....	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon .....	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb <sup>2+</sup> Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode .....	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode .....	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite .....	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Biochemical Method .....	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process .....	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge .....	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification .....	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen .....	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge .....	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria .....	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems .....	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions from Lou Soil .....	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province .....	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil .....	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3845)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region .....	..... FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles .....	..... FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region .....	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi .....	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China .....	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation .....	..... JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil .....	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice .....	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH .....	..... ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil .....	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI) .....	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge .....	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar .....	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance .....	..... HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)