

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

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

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周姗, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析

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: 为考察高效反硝化细菌及其包埋填料对低温、低底物浓度的适应性和恢复性, 实验采用2个条件(适宜、不利)、3个阶段(D_1 、 D_2 、 D_3), 探究二者的反硝化能力, 即将初始适宜条件下培养的高效反硝化细菌 [$300 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$] 置于不利条件下运行(D_1), 反硝化性能稳定后将其包埋, 仍置于不利条件下运行(D_2), 90 d后恢复到适宜条件(D_3)。结果表明分别经过17 d和16 d的运行, 反硝化细菌和包埋填料在 D_1 、 D_2 阶段的速率最终稳定在 $5.4 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $4.8 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 说明细菌及其包埋填料能够适应低温、低底物的不利条件; 在 D_3 阶段发现, 经过12 d运行填料的反硝化速率就可达到 $300 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 表明其具有快速的自我恢复能力。利用扫描电镜分析包埋填料的内外结构, 发现其内外结构均利于细菌生长代谢和传质。高通量测序分析结果表明, D_2 阶段的优势菌属仍为具有反硝化功能的 *Pseudomonas*、*Thauera*、*Gelidibacter*, 因而证明了细菌在不利条件的适应性; D_3 阶段包埋填料的优势菌属 *Thauera*、*Petrimonas*、*Pseudomonas*, 与初始适宜条件下培养的高效反硝化细菌的优势菌属完全相同, 这也充分证明了细菌包埋填料具有良好的恢复能力。

关键词: 高效反硝化细菌; 包埋填料; 性能; 群落组成; 扫描电镜

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3339-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701052

Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora

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: In order to study adaptability and recovery capability of high-efficiency denitrifying bacteria and their embedding filler to low temperature and low substrate concentration, a test was performed under two conditions (favorable and unfavorable) and three stages (D_1 , D_2 , and D_3) to explore the denitrifying capability of the bacteria. The favorable condition was a reacting temperature of 30°C , a nitrate concentration of $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and a C/N ratio of 10; and the unfavorable condition was a reacting temperature of 4°C , a nitrate concentration of $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and a C/N ratio of 5. In stage D_1 , high-efficiency denitrifying bacteria [$300 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$], which were cultured at favorable condition, were placed under the unfavorable condition. In stage D_2 , the bacteria were embedded after the denitrifying performance was stable, and then this embedded filler was placed under the unfavorable condition and recovered in the favorable condition (D_3) after 90 days. The results show that the denitrification rates of stages D_1 and D_2 finally stabilized at $5.4 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ and $4.8 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively, after operation for 17 d and 16 d, indicating that the bacteria and their embedding filler adapted to the unfavorable conditions of low temperature and low substrate concentration. In stage D_3 , the denitrifying rate of the filler reached $300 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ after operation for only 12 d, indicating that the filler had rapid self-recovery capability. Scanning electron microscopy (SEM) was utilized to analyze the internal and external structures of the embedding filler and it was determined that both the internal and external structures were favorable for bacterial growth metabolism and mass transfer. The high-throughput sequencing analysis results show that the dominant genera in stage D_2 were still *Pseudomonas*, *Thauera*, and *Gelidibacter*, which have denitrifying functions, thereby indicating adaptability of the bacteria under the unfavorable condition. The dominant genera *Thauera*, *Petrimonas*, and *Pseudomonas* of the embedding filler in stage D_3 were identical to the dominant genera of the high-efficiency denitrifying bacteria cultured under the initial favorable condition, which also showed that the bacteria embedding filler had good recovery capability.

Key words: high-efficiency denitrifying bacteria; embedding filler; performance; microflora; scanning electron microscopy (SEM)

有研究表明,在适宜的温度、pH、碳源充足等条件下,反硝化细菌可表现出较好的反硝化性能^[1~3];而当其处于不利环境中时,如:低温^[4,5]、低底物浓度(低氮^[6,7]、低碳氮比^[8,9]),则有可能导致系统的崩溃^[10~15]。

目前污水厂在实际运行过程中,尤其是我国北

方冬季,温度是首要影响因素,研究表明温度对反硝化细菌的影响大于其他细菌^[16,17],当温度低于 15°C 时,反硝化速率明显降低^[18],低于 10°C 时,反硝化

收稿日期: 2017-01-08; 修订日期: 2017-03-15

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

作用将停止,因此污水厂为保证冬季反硝化处理效果,需额外添加低温功能菌,导致加大了运行成本^[19];其次,低底物浓度也会影响污水厂的运行,一方面由于反硝化反应呈 1 级反应动力学^[5,6],氮浓度越高,反应速率越快,因此低氮条件会加大处理难度,另一方面低碳氮比已成为污水厂反硝化处理普遍面临的问题,特别是南方污水厂,额外投加碳源同样会加大运行成本^[20,21]. 因此,若能驯化培养出适应低温、低氮、低碳氮比的不利环境又能在适宜环境中快速恢复性能的高效反硝化细菌,将会避免因污水厂季节性反复更换反应池中细菌所带来的高成本,保证低底物浓度下的反硝化速率,缩短污水在反应器中的停留时间,降低运行成本.

包埋固定化是很好的细菌截留方法^[22,23],在现有的研究中,有很多针对于包埋方法的改善^[24,25],其中,基于网状载体的固定化包埋方法^[24]价格低廉,适合于工程应用,且传质效果和整体稳定性好,易于细菌生长繁殖和长期使用. 在现有的包埋固定研究中,大多针对于硝化菌、厌氧氨氧化菌等^[26~29],而针对反硝化细菌的包埋研究鲜见报道;基于网状载体的固定化包埋方法是较新型的包埋方法,应用于硝化菌、厌氧氨氧化菌的研究仍较少,目前尚无人将其应用于异养反硝化细菌.

因此,若将上述具有高适应性、高恢复性的高效反硝化细菌制作成包埋填料,将会最大限度截留高效反硝化细菌,减少基建成本和运行管理成本,同时,该包埋方法的稳定性将保证包埋填料的寿命,从而使其更简便、更持久地发挥反硝化作用,具有更好的工程应用前景及重复利用性.

本实验采用实验室在适宜条件下培养的稳定、高效的反硝化细菌作为种泥,以污泥发酵液为碳源,利用低温、低底物浓度的不利条件,考察反硝化细菌的调节适应性,并将其制作成包埋填料再次返回

到适宜条件中,考察它的自我恢复能力,同时观察包埋填料在运行过程中的稳定性,利用扫描电镜技术观察分析包埋填料的内部结构和外表面;并通过高通量测序的方法,分析细菌数量及种群结构的改变,以期为污水处理厂实现技术提升提供有力的理论基础和技术支持,对水资源的再利用有着十分重要的意义.

1 材料与方法

1.1 实验方法

1.1.1 污泥来源

实验的种泥取自实验室稳定、高效的反硝化反应器,种泥的反硝化速率为 $300\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$.

1.1.2 实验条件设计及分阶段

整个实验采用了 2 个条件 3 个阶段.

实验采用的两种不同反应条件分别为适宜条件和不利条件,详细参数信息见表 1. 在适宜条件下,中高温和充足的底物有利于反硝化细菌生长^[1~3]. 而在不利条件下,综合了低温和低底物浓度(低氮、低碳氮比)两方面影响,其中,实验所用碳源为发酵液,发酵液中并非全部都是易于吸收利用的有机物^[21],导致实际 C/N 小于 5,因此反硝化细菌生长环境极为苛刻.

实验初始阶段(D_0)为实验室在适宜条件下成功培养的稳定、高效的反硝化细菌,本实验 3 个阶段为: D_1 、 D_2 、 D_3 ,具体反应条件如表 2 所示.

表 1 实验各条件

Table 1 Experimental conditions

项目	适宜条件	不利条件
pH	7.3 ~ 7.5	7.3 ~ 7.5
温度/ $^{\circ}\text{C}$	30	4
$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	300	30
C/N	10	5

表 2 实验各阶段

Table 2 Experimental stages

项目	各阶段编号			
	D_0	D_1	D_2	D_3
形态	活性污泥	活性污泥	包埋填料	包埋填料
反应条件	适宜条件	不利条件	不利条件	适宜条件
培养装置	30 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱	4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱	4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱	30 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱

1.1.3 反硝化细菌及包埋填料性能研究实验

实验运行装置采用 1 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氮源($\text{NO}_3^- - \text{N}$)和碳源, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 由硝酸钾提供,碳源由

污水厂浓缩池污泥制取的发酵液提供(图 1).

为保证与原反应器具具有相同的悬浮污泥质量浓度($3\,426\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),向 1L 锥形瓶中添加 300 mL 富集培养的高效反硝化污泥,再加实验配水至刻线.

实验采用序批式运行,反应周期为 1 h.

实验分为 4 个部分:第一部分为 D_1 阶段,考察不利条件(低温、低氮、低碳氮比)对高效反硝化细菌的影响;第二部分为 D_2 阶段,以由 D_1 阶段的细菌制成的包埋填料为研究对象,考察在不利环境下包埋对细菌活性的影响以及包埋填料稳定性和传质

性等性能;第三部分为 D_3 阶段,考察高效反硝化细菌经过不利条件后,在适宜条件中的恢复情况以及包埋填料的稳定性和传质性等性能;第四部分采用高通量测序对初始适宜条件(D_0)到不利条件(D_2)再到适宜条件(D_3)这一过程进行微生物群落组成和变化分析.

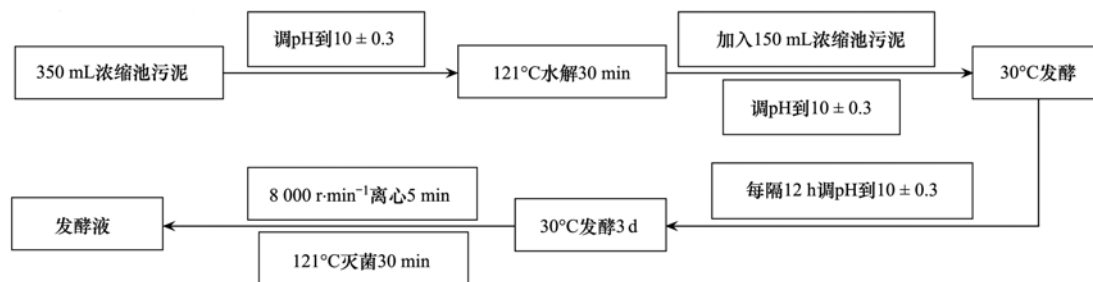


图 1 发酵液制备方法

Fig. 1 Preparation method of fermentation liquor

1.2 分析方法

根据标准分析方法测定 pH、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、COD、温度,并且每个样品均一式三份.实验中的 pH 采用上海三信 PHS-3C 型 pH 计测定; NH_4^+ -N 采用上海美谱达 UV-1600PC 紫外可见分光光度计测定; NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 采用上海欣茂 722 可见分光光度计测定;COD 采用北京连华科技 COD 快速测定仪测定;温度采用温控器探头测定.

1.3 包埋方法

称取 20 g 聚乙烯醇(PVA)溶于 160 mL 超纯水中,在 121°C 高温下完全溶化,冷却至室温;加入 60 g 经 10 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min 后所得的浓缩污泥,搅拌均匀;混匀后刷到网格载体上;随后放置到饱和硼酸溶液中进行第一次交联,交联时间为 2 h;然后取出包埋填料,调节饱和硼酸溶液的 pH 至 9,再将包埋填料放置到饱和硼酸溶液中进行第二次交联,交联时间仍为 2 h;完成第二次交联固定后,取出包埋填料,用超纯水洗净,即完成全部固定过程^[24].

1.4 DNA 提取及定性 PCR

本实验中样本 MT2、MTA、MTD 分别取自:初始阶段(D_0)、不利条件阶段(D_2)、适宜条件阶段(D_3).MTA、MTD 样本属于包埋填料样本,需经过液氮碾磨预处理,随后与 MT2 样本一起利用土壤 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.

PCR 是一种用于放大扩增特定的 DNA 片段的分子生物学技术,定性 PCR 即常规 PCR,循环周数

较多,通过产物条带亮度反映有无或强弱.实验采用 Sensoquest LabCycler PCR 仪进行 PCR 扩增.16S rRNA 基因扩增采用引物集 340F-805R 检测全部细菌,反应体系及升温程序见文献[30].

1.5 高通量测序过程

针对细菌 16S rRNA 的 V4 区扩增及测序的引物为 F 端:aatgatacggcgaccaccgagatctacactcttccctacagacgtcttccgatct;R 端:测序引物 + barcode + 测序引物:caagcagaagacggcatacgatatXXXXXXgtgactggagttcagacgtgtgctcttccgatct.采用 Illumina HiSeq 2500 PE250 进行测序,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.

2 结果与讨论

2.1 高效反硝化细菌性能

不同阶段的反硝化细菌的性能如图 2 所示.将 D_0 初始阶段下快速培养的高效反硝化细菌,放置到 D_1 阶段下,从图 2(b)中可清晰地得到,起始的反硝化速率基本为零,说明不利的生长环境给细菌带来了较大的冲击,严重影响了细菌活性;直到第 8 d,开始有增长趋势,说明高效反硝化细菌开始适应不利环境;在第 17 d,反硝化速率基本稳定,最终达到 $5.4 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右,体现出较好的反硝化能力,此时成功验证了高效反硝化细菌可适应低温等不利条件.

在 D_2 阶段,由图 2(b)可看出包埋过程对反硝

化细菌活性造成了一定的影响,经过 16 d 的培养,活性恢复并稳定到 $4.8 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,很明显,包埋后活性仅为活性污泥的 89%,究其原因,由于不利条件下细胞活性低于适宜条件,因此放大了传质对细菌的影响,导致包埋后细菌的处理能力难以达到包埋前的效果。但这与现有低温的不利条件下的研究^[4,12,13]相比仍具有较高的反硝化速率,对于保证不利条件下的正常运行具有很高的应用价值。另外,包埋填料相比较活性污泥状态,具有高效菌保留、建设投资少、运行管理方便等优势。总之,虽在不利条件下,包埋填料的反硝化效果略低了 $0.6 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,但对实际应用并无影响,同时包埋对高效菌的实际工程应用提供了更大的可能。此时也成功验证了包埋方法在不利环境中的可行性。

此外,如图 2(b)所示,“A-B”阶段的反硝化速率变化趋势与出水 COD 质量浓度的变化趋势[图 2(c)]相一致,考虑包埋后“A-B”阶段的出现是由于包埋填料 PVA 的部分溶出,增大了反应器内的 COD 质量浓度。从中可得出,要想在包埋后不影响反硝化效果,可采取提高 COD 质量浓度的方式。

由图 2(a)可知,包埋填料在 D_2 阶段稳定运行 90 d 后,放置到 D_3 阶段,经过 12 d 的培养,细菌反硝化速率即可恢复到 $300 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,而 D_0 阶段培养高效反硝化细菌也需 11 d 时间,说明高效反硝化细菌长期处于不利条件后,仍具有很高的活性恢复能力。此时成功验证了高效反硝化细菌的自我恢复能力。这对于实际工程应用中的“一条多用”(包埋填料为条状,如图 3 所示)提供了有利条件。

2.2 包埋填料性能

由 2.1 节分析可知,在 D_2 阶段,一方面是较低的底物浓度和温度影响了包埋填料的传质性能,另一方面是由于在不利条件下细菌本身活性受限,放大了传质性能的影响,导致该条件下细菌的反硝化速率相比较 D_1 阶段降低了 $0.6 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$;在 D_3 阶段,细菌的反硝化速率达到 D_0 阶段同一水平,说明了包埋过程对细菌活性的损害已经完全恢复,同时也说明了包埋填料在适宜条件下反硝化过程不受传质性能的影响,具有较好的传质性能。

如图 3 所示,包埋填料是包埋液(PVA 与浓缩污泥的混合液)与中间的网格材料的铆固结构体,这种结构具有较高的稳定性,同时,实验证明包埋填料在反应器中运行 100 多天后,并未出现生物膜脱落的现象,表明包埋填料具有较高的稳定性,对于包

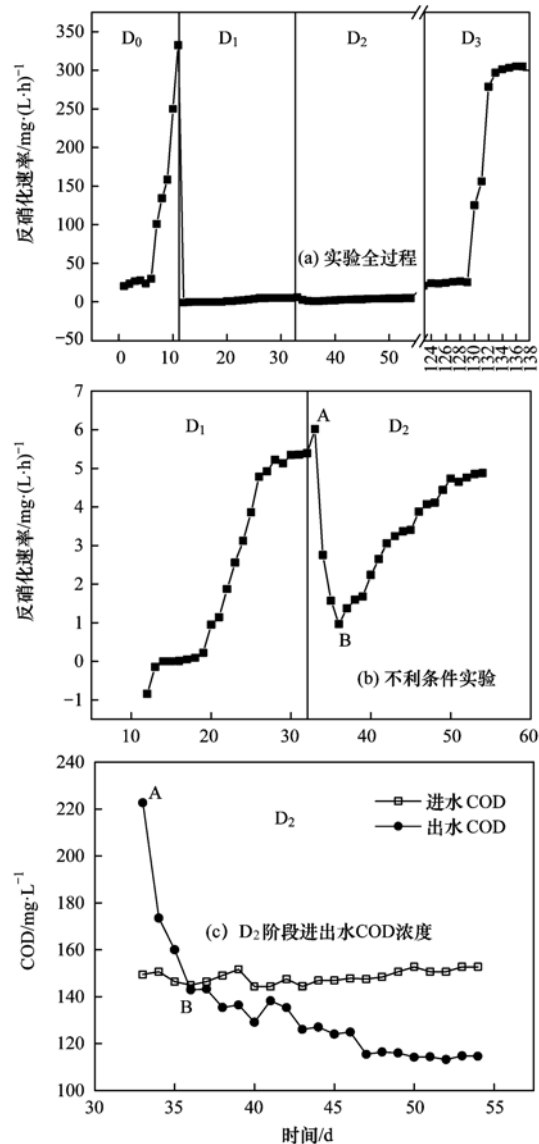


图 2 不同阶段的反硝化速率及 D_2 阶段的进出水 COD 浓度

Fig. 2 Denitrification rates under different conditions and COD concentrations of influent and effluent for stage D_2

埋填料的长期使用提供了可能,增加了实际工程应用价值。

另外,包埋填料内部与外表面的扫描电镜结果如图 4 所示。如图 4(a),包埋填料内部存在大量的供细菌附着生长的骨架结构以及可用于传质和排气的通道;如图 4(b),包埋填料多孔的外表面同样保证了底物和产物输送的畅通。综上可知,包埋填料为细菌生长代谢提供了良好的环境。这种多孔的结构在一定程度上也验证了包埋填料具有较好的传质性能。

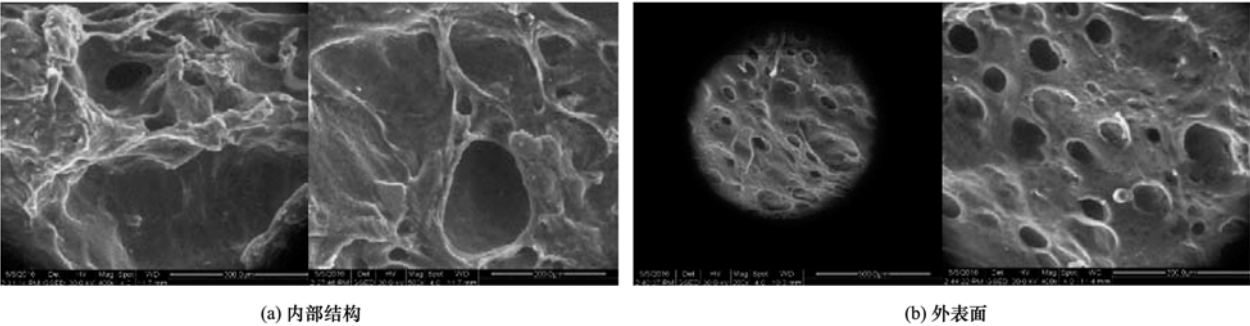
2.3 微生物群落丰富度和多样性的影响

利用高通量测序研究不同条件下反硝化菌群的变化。结果表明,有 165 480 条有效序列(MT2:



图3 实验结束后包埋填料实物

Fig. 3 Photograph of the embedding packing after the test



(a) 内部结构 (b) 外表面

图4 包埋填料的扫描电镜结果

Fig. 4 Scanning electron micrographs of the embedding packing

6.03、0.931 升高到 7.68、0.979,表明适宜条件下包埋填料具有最大的细菌多样性。

从初始阶段(D_0)到不利条件阶段(D_2)的过程, D_2 的丰度和多样性均大于初始阶段 D_0 ,可能是系统应对低温、低底物浓度等不利条件做出的反应;

从 $D_0 \sim D_2$ 再到适宜条件阶段(D_3)的过程, D_3 的丰富度(OTUs, Chao1 和 ACE)和多样性(Shannon 和 Simpson)最高,可能是因为环境适宜的条件下有利于菌群的生长繁殖,同时也是抵御一系列环境改变所做出的最终反应。

表3 各个样品的多样性统计

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

样品编号	样品来源	有效序列	OTUs	Chao1	ACE	Shannon	Simpson	覆盖值/%
MT2	适宜条件(D_0)	55209	1 750	1 890.616 5	2 033.456	6.029 889	0.931 228	99.12
MTA	不利条件(D_2)	55152	2 468	2 872.813 9	3 175.241	6.846 051	0.948 234	98.15
MTD	适宜条件(D_3)	55119	2 779	3 120.613 7	3 392.691	7.677 874	0.979 324	98.22

2.4 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5中,3个样本的有效序列被定义为两个不同的能级分布(门和属)。在门级(图5),共有6个类群,其中Proteobacteria、Bacteroidetes 和 Firmicutes 在整个条件变化过程中始终存在,并且处于优势地位。一般来说,不同条件下的微生物群落结构差异较大。如图5所示,很明显,随着生存条件的改变,系统中的微生物群落结构出现了演替。在这个过程中,

Proteobacteria 逐渐地减少(65.8% ~ 35.5%),而Bacteroidetes 逐渐地增多(19.1% ~ 34.6%);当从适宜条件变为不利条件时Firmicutes 出现了明显的下降(13.4% ~ 5.4%),而从不利条件重新变为适宜条件时又出现了明显的增长(5.4% ~ 20.0%)。这些都说明了环境条件的变化会带来细菌群落结构的差异,这是微生物对环境适应性的体现。此外,从图5还可以看出,在不利条件下系统中的优势种群仍然是以反硝化功能为主导的细菌,这充分证明了

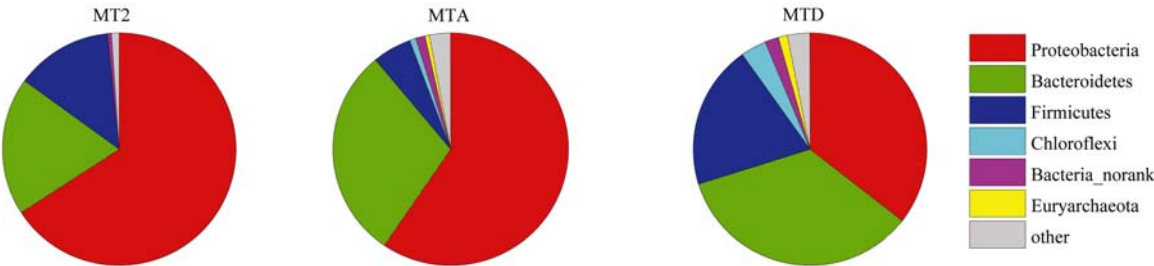


图 5 细菌群落的 phylum 能级分布分类

Fig. 5 Taxonomic classification of the bacterial communities at the phylum level

细菌对环境良好的适应能力.

为了深入研究细菌种群的变化,在属级水平下对每个样本的相对丰富度进行分析,见表 4. 优势菌属是保证反硝化处理能力的根本,由表 4 可见, D_0 阶段的优势菌种为 *Thauera*、*Pseudomonas*、*Petrimonas*, D_2 阶段的优势菌种为 *Pseudomonas*、*Thauera*、*Gelidibacter*, D_3 阶段的优势菌种为 *Thauera*、*Petrimonas*、*Pseudomonas*. D_0 和 D_3 阶段的优势菌属虽存在数量上的差别,但种类相同,由此证明在 D_3 阶段系统中的微生物种群已经得到了恢复,这也解释了 D_3 阶段反硝化速率得以快速至 $300\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 的原因. 此外通过对比还发现,与 D_0 、 D_3 阶段相比, D_2 阶段中的 *Gelidibacter*、

Flavobacterium 和 *Moheibacter* 出现了明显的增长,其中, *Gelidibacter* 是一种寒性细菌,它在不利条件下的丰富度达到了 3.96%. 正是由于这些细菌的增长补充了系统的反硝化能力,也充分展现了种群间的差异性,体现了细菌应对环境改变的适应性.

此外,微生物群落的 Heatmap 图用颜色变化来反映数据信息,它可以直观地将数据值的大小以定义的颜色深浅表示出来,将高丰度和低丰度的物种分块聚集,通过颜色梯度及相似程度来反映多个样品在各分类水平上群落组成的相似性和差异性(图 6). 在 D_0 阶段,MT2 中 *Thauera* (32.94%) 是最大种属, *Pseudomonas* (32.34%) 和 *Petrimonas* (9.54%) 也是较大种属. 然而,不利条件下, *Thauera* 和

表 4 属级的细菌群落分类¹⁾/%

Table 4 Taxonomic classification of the bacterial communities at the genus level/%

项目		MT2	MTA	MTD
Proteobacteria	<i>Thauera</i>	30.865 5	5.367 2	11.476
	<i>Pseudomonas</i>	30.307	19.600 7	5.917 7
	<i>Brachymonas</i>	0	1.335 8	4.820 6
	<i>Paracoccus</i>	0.076	0.820 3	1.971
	<i>Desulfomicrobium</i>	0.464 7	0.082 3	1.754 9
	<i>Alcaligenes</i>	0.846 7	0.759 8	0.270 2
	<i>Arcobacter</i>	0.824 4	0.036 3	0.065 8
Bacteroidetes	<i>Petrimonas</i>	8.938 4	2.119 8	9.986 6
	<i>vadinBC27 wastewater-sludge group</i>	1.648 7	0.575 9	1.954 6
	<i>Proteiniphilum</i>	0.473 6	1.086 5	1.409 5
	<i>Mariniphaga</i>	0	0.500 9	1.325
	<i>Microbacter</i>	1.070 1	0.994 6	0.709 5
	<i>Gelidibacter</i>	0.015 6	3.958 9	0.296
	<i>Chryseobacterium</i>	0.022 3	0.851 8	0.133 9
	<i>Flavobacterium</i>	0.015 6	1.897 2	0.079 9
	<i>Moheibacter</i>	0.004 5	1.299 5	0.077 5
Firmicutes	<i>Christensenellaceae R-7 group</i>	0.433 4	1.030 9	2.356 3
	<i>Vulcanibacillus</i>	0.029	0.309 7	1.442 4
	<i>Fastidiosipila</i>	0.165 3	0.341 2	1.076
	<i>Anaerovorax</i>	0.909 3	0.029	0.845 7
	<i>Tissierella</i>	3.022 7	0.118 6	0.643 7
	Unclassified	13.913 55	51.147	44.406 2
	others	5.953 65	5.736 1	6.977 4

1) 颜色越深表示丰度越大

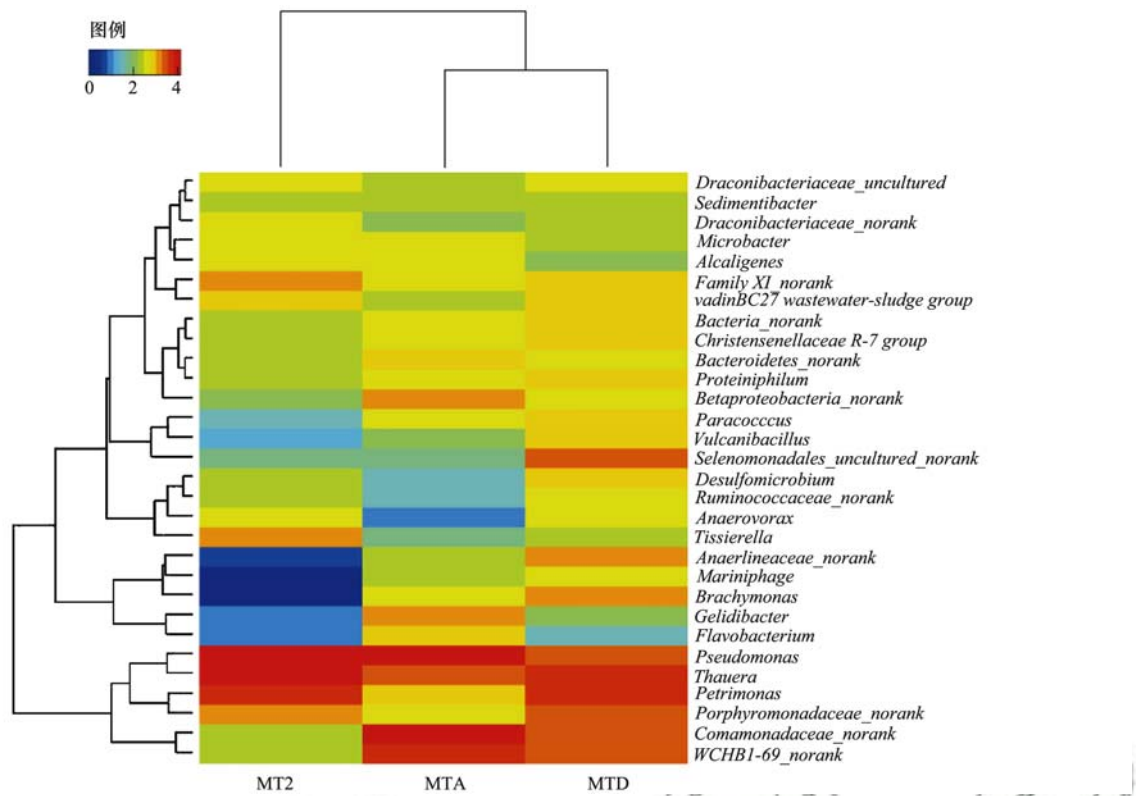


图 6 样本在属水平的菌落丰度 Heatmap 图
Fig. 6 Heatmap of the relative abundance of taxa

Petrimonas 相对丰度分别明显减少至 5.85% 和 2.31%, *Pseudomonas* 相对丰度 (21.36%) 有一个相对较小的下降. 这可能由于反应器中 *Thauera*、*Pseudomonas* 和 *Petrimonas* 存在相互竞争, *Thauera* 和 *Petrimonas* 与 *Pseudomonas* 相比没有任何优势. 相反, 恢复到适宜条件中, *Thauera* 和 *Petrimonas* 相对丰度分别增加至 12.47% 和 10.85%, 并且 *Thauera* 重新成为优势菌种, 表明在适宜条件下, *Thauera* 发挥了主要的反硝化作用. 有意思的是, 恢复到适宜条件中, *Pseudomonas* 相对丰度明显减少至 5.92%, 考虑 D_0 和 D_3 阶段的 *Pseudomonas* 是同属不同种, 待进一步深入研究.

3 结论

(1) 适宜条件下培养的高效反硝化细菌 [300 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$] 具有较高的适应性及活性恢复性, 置于不利条件下, 经过 17 d 反硝化速率为 5.4 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 包埋后经过 16 d, 反硝化速率稳定到 4.8 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 高效反硝化细菌包埋填料经过长达 90 d 的不利条件驯化后, 在适宜条件下利用 12 d 快速恢复高效性能 [300 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$].

(2) 高通量测序结果表明, 条件的改变会导致系统内的微生物种群结构随之改变. 在适宜条件

下, 发挥处理能力的优势菌群均为 *Thauera*、*Petrimonas*、*Pseudomonas*, 在不利条件下, 发挥处理能力的优势菌群为 *Pseudomonas*、*Thauera*、*Gelidibacter*; 同时在不利条件下一些反硝化细菌的增长如 *Flavobacterium* 等在一定程度上补充了系统的反硝化能力, 从而也证明了高效反硝化细菌的适应性.

(3) 包埋填料经历 100 多天的运行未出现生物膜脱落现象, 表现出较长的寿命; 扫描电镜对包埋填料结构的分析表明其内外结构有利于细菌正常生长代谢.

参考文献:

[1] 陈朋. 反硝化细菌的筛选、鉴定及其强化处理硝酸盐废水的研究[D]. 济南: 山东大学, 2009. 13-14.

[2] 白玉涛. 基于 T-RFLP 技术的内蒙古高原河湖湿地反硝化细菌群落分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2012. 3-4.

[3] Yang L, Ren Y X, Zhao S Q, et al. Isolation and characterization of three heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacteria from a sequencing batch reactor[J]. Annals of Microbiology, 2016, 66(2): 737-747.

[4] Hanke A, Berg J, Hargesheimer T, et al. Selective pressure of temperature on competition and cross-feeding within denitrifying and fermentative microbial communities [J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 6: 1461.

[5] 殷芳芳, 王淑莹, 昂雪野, 等. 碳源类型对低温条件下生物反硝化的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 108-113.

- Yin F F, Wang S Y, Ang X Y, *et al.* Effects of carbon source types on denitrification performance at low temperature [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 108-113.
- [6] Leverenz H L, Haunschild K, Hopes G, *et al.* Anoxic treatment wetlands for denitrification[J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(11): 1544-1551.
- [7] Chun J A, Cooke R A, Eheart J W, *et al.* Estimation of flow and transport parameters for woodchip-based bioreactors: I. Laboratory-scale bioreactor[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, **104**(3): 384-395.
- [8] Tan C, Ma F, Qiu S. Impact of carbon to nitrogen ratio on nitrogen removal at a low oxygen concentration in a sequencing batch biofilm reactor[J]. *Water Science and Technology*, 2013, **67**(3): 612-618.
- [9] 谭冲, 刘颖杰, 王薇, 等. 碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3807-3813.
- Tan C, Liu Y J, Wang W, *et al.* Effect of carbon/nitrogen ratio on short-cut nitrification and denitrification of polyurethane biofilm reactor[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3807-3813.
- [10] He Y, Wang Y H, Song X S. High-effective denitrification of low C/N wastewater by combined constructed wetland and biofilm-electrode reactor (CW-BER) [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **203**: 245-251.
- [11] Li K, Fang F, Guo J S, *et al.* Performance of one-stage autotrophic nitrogen removal in a biofilm reactor with low C/N ratio[J]. *Environmental Technology*, 2015, **36**(14): 1819-1827.
- [12] Zhou H X, Li X K, Chu Z R, *et al.* Effect of temperature downshifts on a bench-scale hybrid A/O system: process performance and microbial community dynamics [J]. *Chemosphere*, 2016, **153**: 500-507.
- [13] Güven D. Effects of different carbon sources on denitrification efficiency associated with culture adaptation and C/N ratio[J]. *CLEAN-Soil Air Water*, 2009, **37**(7): 565-573.
- [14] 高建文. 生物滤池-生态砾石床联用处理硝酸盐微污染地表水研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012. 11-39.
- [15] 袁林江. 聚乙烯醇固定化反硝化菌的脱氮试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报*, 1997, **29**(3): 257-261.
- Yuan L J. Study on denitrification of immobilized denitrificater by PVA [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 1997, **29**(3): 257-261.
- [16] Knowles R. Denitrification[J]. *Microbiological Reviews*, 1982, **46**(1): 43-70.
- [17] Chu L B, Wang J L. Denitrification of groundwater using PHBV blends in packed bed reactors and the microbial diversity[J]. *Chemosphere*, 2016, **155**: 463-470.
- [18] Misiti T M, Hajaya M G, Pavlostathis S G. Nitrate reduction in a simulated free-water surface wetland system [J]. *Water Research*, 2011, **45**(17): 5587-5598.
- [19] 王衫允, 马斌, 贾方旭, 等. AAO 污水处理工艺中厌氧氨氧化效能及微生物交互作用[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(7): 1988-1996.
- Wang S Y, Ma B, Jia F X, *et al.* The role and microbial interaction of anammox in WWTPs with AAO process[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 1988-1996.
- [20] 刘钢. 新型后置反硝化工艺处理低 C/N(C/P) 比城镇污水性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. 17.
- [21] 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.
- [22] Lin Y F, Chen K C. Denitrification by immobilized sludge with polyvinyl alcohol gels[J]. *Water Science & Technology*, 1993, **28**(7): 159-164.
- [23] Kessertü P, Kiss I, Bihari Z, *et al.* Biological denitrification in a continuous-flow pilot bioreactor containing immobilized pseudomonas butanovora cells [J]. *Bioresource Technology*, 2003, **87**(1): 75-80.
- [24] 北京工业大学. 一种基于网状载体的反硝化细菌固定化直筒状生物活性填料制备及应用[P]. 中国专利: CN 103951050A, 2014-04-04.
- [25] 吴晓磊, 刘建广, 黄霞, 等. 海藻酸钠和聚乙烯醇作为固定化微生物包埋剂的研究[J]. *环境科学*, 1993, **14**(2): 28-31, 77.
- Wu X L, Liu J G, Huang X, *et al.* Study on sodium alginate and polyvinyl alcohol as entrapping agents [J]. *Environmental Science*, 1993, **14**(2): 28-31, 77.
- [26] 刘金苓, 钟玉鸣, 王丽娇, 等. 厌氧氨氧化微生物的吸附、包埋固定化效果初探[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(3): 470-476.
- Liu J L, Zhong Y M, Wang L J, *et al.* Preliminary study on nitrogen removal with anaerobic ammonium oxidizing (ANAMMOX) bacteria immobilized in absorbent and entrapping materials[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(3): 470-476.
- [27] 邓岩岩. 固定化包埋硝化菌去除废水中氨氮的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [28] 欧阳丽华, 周伟丽, 张振家, 等. 包埋固定化微生物的疏自养反硝化实验研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1644-1652.
- Ouyang L H, Zhou W L, Zhang Z J, *et al.* Study on sulfur-based autotrophic denitrification by immobilized pellets [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(6): 1644-1652.
- [29] 李正魁, 赖鼎东, 杨竹攸. 固定化氨氧化细菌短程硝化稳定性研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2835-2840.
- Li Z K, Lai D D, Yang Z X. Stability of short-cut nitrification using immobilized ammonia-oxidizing bacteria [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(10): 2835-2840.
- [30] 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.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-pei, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)