

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

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

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM_{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM_{2.5} 水溶性离子特征及来源分析 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水地球化学时空变化特征及其环境意义 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲柱, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

¹³C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试

杨宏, 胡银龙

(北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为实现硝化细菌规模化富集及包埋固定化技术的工业化应用, 以污水厂回流污泥为菌源, 利用工业级生物发酵罐, 连续投加并逐渐提高底物浓度, 控制 FA 和 FNA 实现硝化细菌的快速增长, 实现了氨氧化速率 $118 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 的高表达。高通量种群分析结果表明, 回流污泥生物多样性较大, 具有硝化作用的 *Nitrosomonas* 比例仅为 0.53%; 富集培养后污泥多样性明显降低, *Nitrosomonas* 比例上升至 10.27%, 相较于驯化前, 比例提高了 20 倍。以此为菌源, 用 PVA(聚乙烯醇)进行包埋固定化, 包埋填料填充率为 30%, 通过连续流的方式进行包埋填料的活性恢复, 仅用 27 d 填料的硝化速率达到 $62 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 证明包埋填料活性恢复。

关键词: 硝化细菌; 富集培养; 细菌包埋; 扩大培养; 高通量测序

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2763-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710099

Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization

YANG Hong, HU Yin-long

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

Abstract: In order to realize the industrialization of nitrifying bacteria enrichment cultivation and large-scale application of entrapment immobilization, activated sludge from a sewage treatment plant was used as the seed sludge. The concentration of substrate was increased progressively in an industrialized tank. Nitrifying bacteria were grown rapidly by controlling the concentration of FA and FNA, and the ammonia oxidation rate reached $118 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ eventually. The results of high-throughput sequencing showed that *Nitrosomonas*, nitrifying bacteria, was only 0.53% of the bacteria. After exposing it to an enrichment culture, the content of *Nitrosomonas* rose to 10.27%, 20 times larger than that in the raw sludge. Diversity was significantly smaller at the same time. After embedding immobilization with PVA (polyvinyl alcohol), the embedded fillers nitrification load was 30%. A continuous-flow approach was utilized in the recovery phase, and the nitrification loading rate reached a high level, $62 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, and efficient recovery of the biologically active fillers was achieved.

Key words: nitrifying bacteria; enrichment culture; embedding immobilization; intermediate culture; high-throughput sequencing

在污水处理中, 传统硝化-反硝化是一种常用的生物脱氮处理工艺^[1]。低温对硝化细菌活性抑制明显, 冬季污水厂出水总氮浓度达标困难。硝化速率与细菌浓度呈正相关, 富集培养大大提高了细菌浓度, 包埋固定化实现了定性定量投加, 因此国内外对于硝化细菌的富集培养以及包埋研究成为热点。

于濛雨等^[2]采用连续流运行方式培养 AOB, 以游离氨(FA)抑制亚硝酸盐氧化菌的生长, 最终实现氨氧化速率 $2.028 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 。盛晓琳等^[3]采用膜生物反应器(MBR)为富集装置, 结果表明经过 182 d 富集培养后, 污泥的硝化活性到达 $98.41 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 。徐晓毅等^[4]包埋固定化活性污泥, 结果表明在包埋颗粒的体积投加率为 10%, 稳定期包埋颗粒的最大总氮去除负荷为 $7.78 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 。前人对硝化细菌的富集培养和包埋填料的制备仅停留在实验室小规模和单菌种水平,

且存在细菌培养周期长及包埋体的活性低等问题。

本实验采用工业级大型发酵罐, 通过 PLC 控制实验参数(pH、DO 和温度), 同时实时控制 FA 和 FNA, 进行硝化细菌工业化实验生产为探究出适合城市污水处理氨氮高效氧化单元技术作准备, 以期大幅度提高城市污水处理系统的脱氮能力找到新的技术途径。

1 材料与方法

1.1 污泥富集培养材料与方法

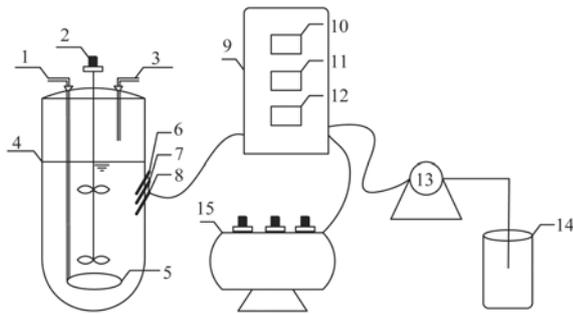
实验污泥取自北京高碑店污水处理厂回流污泥, 污泥富集培养装置见图 1, 反应器有效容积 1 200 L。

培养过程中温度控制在 $28 \sim 30^\circ\text{C}$ ^[5,6], DO 为 1

收稿日期: 2017-10-16; 修订日期: 2017-12-04

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(Z161100004516015)

作者简介: 杨宏(1963~), 男, 教授, 主要研究方向为水环境恢复和水处理微生物技术, E-mail: yhong@bjut.edu.cn



1. 进气管; 2. 搅拌电机; 3. 加碱管; 4. 发酵罐; 5. 曝气环; 6. 溶解氧探头; 7. pH 计探头; 8. 温度探头; 9. PLC 控制柜; 10. pH 变送器; 11. DO 变送器; 12. 温度控制器; 13. 加碱泵; 14. 碱液桶; 15. 鼓风机

图 1 污泥富集培养装置示意

Fig. 1 Schematic of sludge enrichment and cultivation device

~1.5 mg·L⁻¹ [7~8], pH 为 7.2~7.4 [9~10]. 具体 pH 值应根据进水氨氮浓度调节, 从而控制体系的 FA 与 FNA 的浓度. 培养过程中间歇投加底物, 每隔 3 d 左右更换上清液, 并注入基础培养液, 成分见表 1, 始终维持体系的总有效体积为 1 200 L.

表 1 基础培养液的组成

Table 1 Composition of synthetic feed stock solution

成分	浓度/mg·L ⁻¹	成分	浓度/mg·L ⁻¹
NH ₄ Cl	50~150	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.50
NH ₄ H ₂ PO ₄	13.8~42	MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.50
MgSO ₄ ·7H ₂ O	1.80	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.40
CaCl ₂	0.90	NiCl ₂ ·6H ₂ O	0.20
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.40	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.05

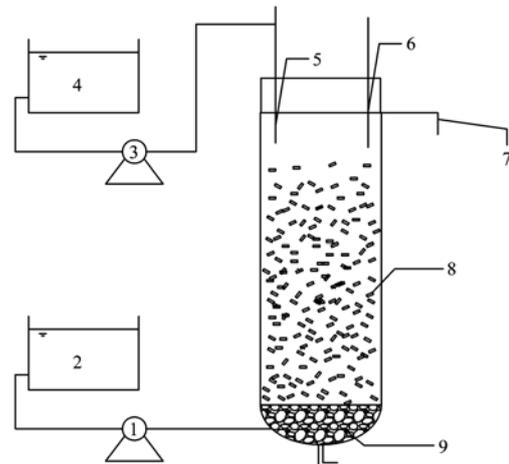
1.2 包埋填料的制备与应用

取培养后污泥 100 L, 用隔膜压滤机 (景津环保股份有限公司) 浓缩成含水率为 85% 的污泥, 与质量分数 15% PVA 凝胶混合. 同时, 加入添加剂碳酸钙 38.83 g·L⁻¹ [11~15], 放入过饱和的硼酸溶液交联 2 h, 再用自来水清洗后放入 70 g·L⁻¹ 的硫酸钠溶液中二次交联 3 h, 期间不断地调节交联剂的 pH 在 3.5 以下. 将包埋液均匀涂在圆柱体网格条子上 (长 50 cm, 直径 1.0 cm), 然后切成 1.5 cm 长度的小圆柱体. 包埋体活性恢复连续流装置见图 2, 反应器有效容积 202 L, 包埋填料填充率为 30%. 实验采用人工模拟氨氮废水, 其成分同上.

1.3 高通量测序分析方法

1.3.1 DNA 提取与 PCR 扩增

取原始污泥混合液和富集培养后的污泥混合液分别标记为 A01 和 A02, 提取 DNA 并用 1% 琼脂糖凝胶电泳和 Nanodrop2000 分光光度计检测 DNA 浓度. PCR 扩增区域选择样本 16S rRNA 的 V3~V4 区



1. 原水泵; 2. 原水箱; 3. 碱泵; 4. 碱水箱; 5. pH 计及加碱管路; 6. 溶解氧浓度探头; 7. 出水溢流管路; 8. 填料; 9. 石砾和曝气环

图 2 实验装置示意

Fig. 2 Schematic of experimental equipment

域, 用 1.5% 琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 扩增产物.

1.3.2 DNA 文库定量与测序

将检测合格的污泥样本 DNA 建库并做相应的检测, 并使用设定的 TAG 序列进行样本区分. 检测合格的文库采用 Illumina HiSeq2500 PE250 高通量测序平台对样品进行测序.

1.3.3 生物多样性分析

分析过程如图 3 所示, 要了解一个样品测序结果中的菌种、菌属等信息, 就需要对序列进行归类操作. 方法为将所有样本序列按照序列间的距离进行聚类, 后根据序列之间的相似性将序列分成不同的操作分类单元 (OTU). 通常相似性为 0.97 分为一个 OUT, 以不同的分类单元为基础, 进行 α 多样性分析, 其中反映群落丰度的指标为: Seq、Chao1 和 ACE, 反映微生物多样性的指标为: Shannon、Simpson 和盖度.

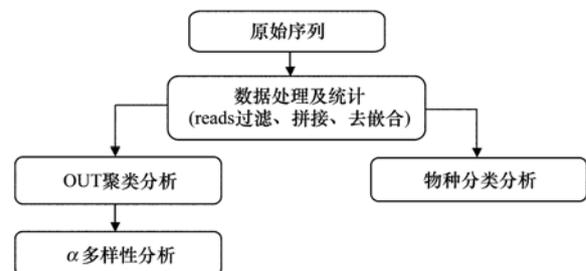


图 3 生物多样性分析流程

Fig. 3 Flow chart of biodiversity analysis

1.4 常规指标及检测方法

进行相应指标分析前, 样品需用慢速滤纸过滤或者需要在 121℃ 烘箱里烘干, 分析项目为

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、COD、污泥浓度 (MLSS) 等按照国家环境保护总局规定的标准检测方法, 具体方法见表 2。

表 2 检测项目及方法

Table 2 Analysis equipment and methods

分析项目	检测方法
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度	纳氏试剂光度法
$\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度	<i>N</i> -(1-萘基)-乙二胺光度法
$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度	紫外分光光度法
COD	重铬酸钾法
MLSS	滤纸烘干称重法
温度	在线仪表
pH	在线仪表
溶解氧	在线仪表

2 结果与讨论

2.1 硝化细菌富集培养结果及分析

有研究表明 AOB 对 FA (free ammonia) 的敏感度较 NOB 低, FA 对亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 的抑制浓度为 $0.1 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 对氨氧化菌 (AOB) 是 $10 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [16]。最近研究表明, FNA (free nitrous acid) 完全抑制 NOB 和 AOB 生长的浓度分别为 0.02 和 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [17~18], FA 浓度达到 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时就可完全抑制 NOB 的生长 [19]。

图 4 和图 5 表明, 在富集培养的过程中, 通过调节系统的 pH ($7.2 \sim 7.35$) 及进水氨氮的浓度, 来实现整个培养的过程中, FA 在 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,

FNA 稳定为 $0.007 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在第一阶段 ($0 \sim 14 \text{ d}$), 进水氨氮浓度维持在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水氨氮总体低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水亚硝氮维持在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 表明前期 AOB 和 NOB 受抑制作用较小。第二阶段 ($15 \sim 24 \text{ d}$) 进水氨氮提高到 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, FA 和 FNA 分别随着氨氮浓度提高及亚硝氮积累而增加。此时 FNA 浓度为 $0.002 \sim 0.007 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 达不到 NOB 的抑制阈值, 而 FA 浓度为 $1.1 \sim 1.9 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 对 NOB 有明显的抑制作用。同时, 培养过程中的定期排出上清液, 劣势菌种 NOB 被逐步淘洗出反应器, 反应器亚硝氮浓度逐渐升高。随着系统中亚硝氮的积累, 进一步加强了对 NOB 的抑制, 维持了短程硝化的稳定。

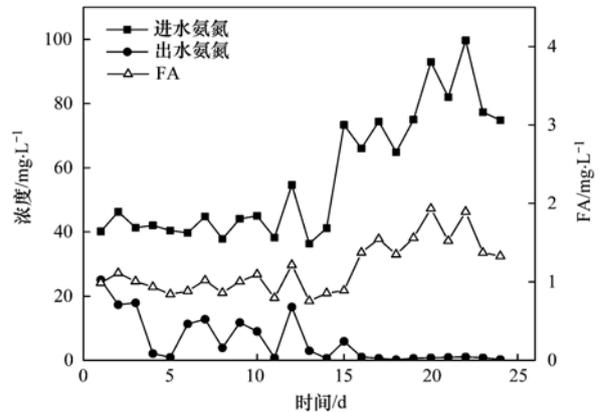


图 4 污泥进出水氨氮浓度及 FA 变化曲线

Fig. 4 Changes in sludge water ammonia concentration and FA

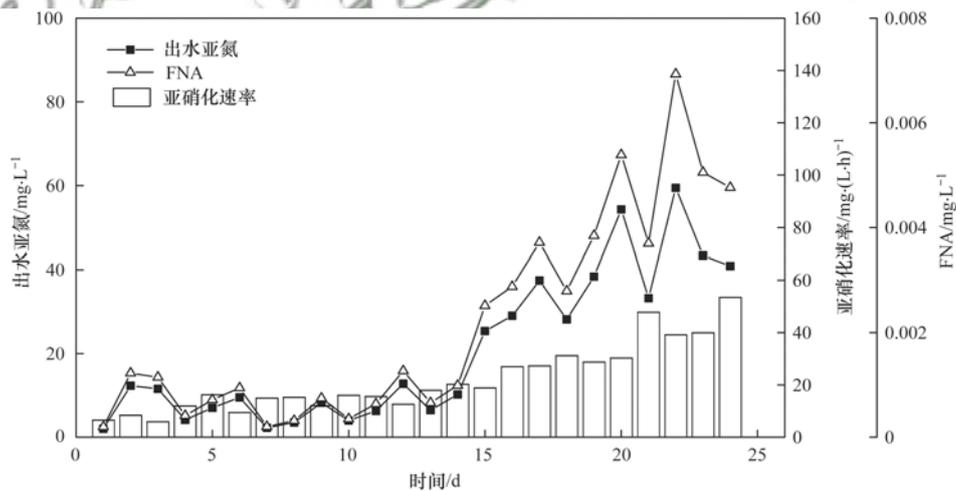


图 5 污泥出水亚硝氮、FNA 及亚硝化速率变化曲线

Fig. 5 Sludge effluent nitrogen, FNA, and nitrite removal rate

由图 6 中可知, 在第一阶段 ($0 \sim 14 \text{ d}$), 污泥浓度变化较小。排水后整个体系的污泥浓度减小, 换水 3 d 左右污泥浓度即可恢复, 污泥浓度变化曲线总体呈现上涨趋势。第二阶段 ($15 \sim 24 \text{ d}$), 随着反

应进水氨氮浓度的提高, 第 15 d 氨氧化速率迅速升高, 该变化与莫诺方程相吻合。经过 24 d 的培养, 体系的污泥浓度从 5472 增至 $6920 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 硝化速率从 7.5 增至 $118.3 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 表明此时污泥

的培养基本成熟.

2.2 高通量测序分析

2.2.1 微生物群落丰富度和多样性分析

通过对两组样品 16S rRNA 基因文库高通量测序, 污泥原样(A01)与筛选后的污泥样品(A02)的 α 多样性指标计算结果见表 3.

由表 3 可知, 两个样品的文库覆盖率均大于 0.95, 表明测序深度已经基本覆盖到样本中所有的物种. A02 的 Chao1 和 ACE 指数均大于 A01, 表明 A02 具有较大的 OTU 数, 即筛选后的污泥物种丰富度大于原始污泥, 具有较多的物种总数. 而 A01 的 Shannon 和 Simpson 多样性指数大于 A02, 说明原污泥群落多样性高于筛选后的污泥. 由此可知, 多样

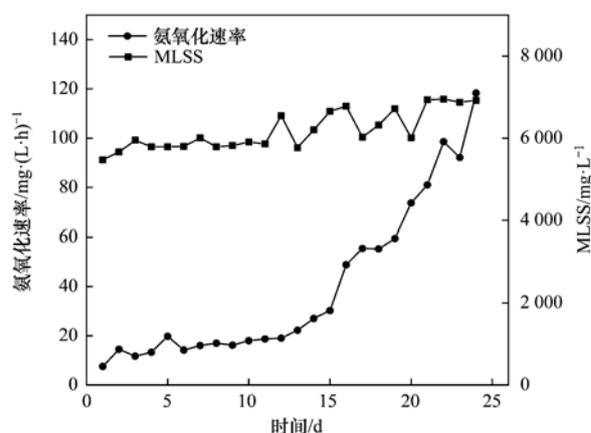


图 6 污泥培养中硝化负荷及污泥浓度的变化

Fig. 6 Changes in nitrification load and sludge concentration

表 3 α 多样性指标计算结果

Table 3 Calculation results of diversity index

编号	Seq 数量	Chao1 指数	ACE 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	盖度
A01	59131	16 026.50	24 839.28	6.08	9.8e-03	0.95
A02	62795	16 679.85	35 745.97	3.92	0.06	0.97

性指数较高的原始污泥群落各种之间个体分配较均匀, 而筛选后的污泥各种之间生物量差异较大, 优势种群明显.

2.2.2 菌群变化分析

有研究表明 AOB 可分为 5 个属^[20], 分别为亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*)、亚硝化球菌属 (*Nitrosococcus*)、亚硝化螺菌属 (*Nitrospira*)、亚硝化弧菌属 (*Nitrosovibrio*) 和亚硝化叶菌属 (*Nitrosolobus*), NOB 分为将 NOB 分为 4 个属, 分别为硝化杆菌属 (*Nitrobacter*)、硝化球菌属 (*Nitrococcus*)、硝化刺菌属 (*Nitrospina*) 和硝化螺菌属 (*Nitrospira*), 研究表明在污水处理厂经常出现的 AOB 主要是亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*) 和亚硝化螺菌属 (*Nitrospira*)^[21]; 经常出现的 NOB 主要是硝化杆菌属 (*Nitrobacter*) 和硝化螺菌属 (*Nitrospira*)^[22].

图 7 和图 8 是全样本在属层次群落结构分析结果. 由图 7 可知, 原泥中的菌属分布较均匀, 培养前 A01 样本中未分类菌属比例为 29%, other 是比例很小菌属的总和 (37.17%). 前三类优势菌属为 *Dokdonella* (6.39%)、*Ottowia* (2.48%) 和 *Ferruginibacter* (2.44%). *Ferruginibacter* 属于鞘脂杆菌属, *Dokdonella* 和 *Ottowia* 是与生物脱氮性能无关的菌属, 相关研究表明在厌氧消化污泥中常检测到两者^[23]. *Nitrospira* 所占比例相对较少,

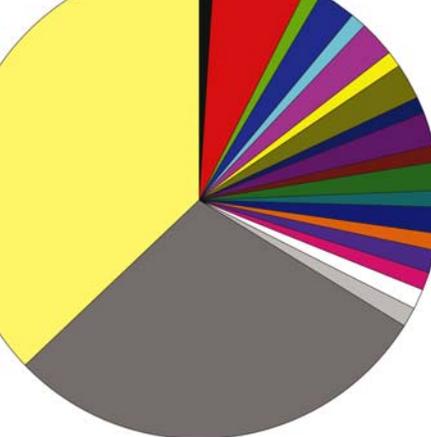
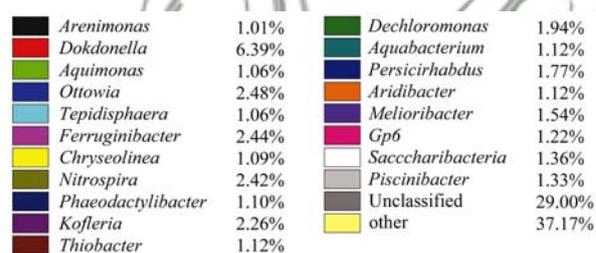


图 7 污水厂原始污泥种群分布 (属层次)

Fig. 7 Distribution of raw sludge (genus)

Nitrosomonas 几乎没有检测到. 培养后样品 A02 中未分类的菌属比例为 6.23%, other 的比例减少到 10.44%, 前三类优势菌属为 *Comamonas* (19.75%), *Terrimonas* (15.79%) 和 *Nitrosomonas* (10.27%). *Terrimonas* 属于鞘脂杆菌属, 不属于常

Terrimonas	15.79%	Thermomonas	1.40%
Leifsonia	0.61%	Chryseolinea	3.08%
Nitrosomonas	10.27%	Simplicispira	1.49%
Tepidisphaera	0.70%	portibacter	2.68%
Ferruginibacter	8.25%	Bdellovibrio	1.56%
Acidovotax	0.80%	Nitrospira	1.73%
Unclassified	6.23%	Afipia	1.72%
Ottowia	0.81%	other	10.44%
Aridibacter	5.80%	Comamonas	19.75%
Sphingobium	1.27%	Phaselicystis	0.61%
Dokdonella	5.02%		

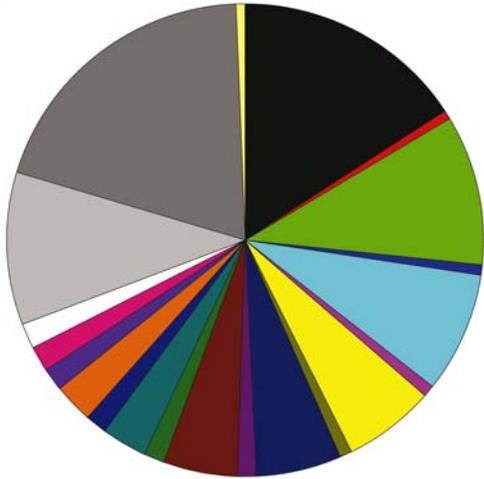


图 8 污水厂培养后污泥种群分布(属层次)

Fig. 8 Distribution of sludge population after cultivation (genus)

见的脱氮菌属系列；Comamonas 是新型的异养硝化菌属^[24]，Nitrosomonas 属于亚硝化球菌属；具有硝化作用的 AOB (Nitrosomonas) 与 NOB (Nitrospira) 菌属在原始污泥中比例分别为 0.53% 和 2.42%，经过富集培养以后比例分别为 Nitrosomonas 10.27%、Nitrospira 为 1.73%。结果表明富集培养后 Nitrosomonas 是优势菌种^[25]，宏观上表现为污泥硝化速率由 7.5 mg·(L·h)⁻¹ 经培养后达到 118.3 mg·(L·h)⁻¹。后期 FA 的抑制作用和定期的排上清液导致体系中 NOB 较原始活性污泥低，从经济角

度考虑，短程硝化具有节能降耗的效果，所以体系中 AOB 的快速增长是具有一定意义的。

2.3 包埋填料恢复及处理人工废水应用

2.3.1 包埋填料活性恢复阶段

此阶段对包埋填料进行活性恢复，包埋填料占反应器有效容积的 30%。由图 9 可知，第一阶段(0~17d)进水氨氮浓度为 50 mg·L⁻¹左右，控制反应器的 DO(2~3 mg·L⁻¹)，第 17 d 出水氨氮浓度处于较低水平。第二阶段(17~27 d)提高进水氨氮浓度提高到 100 mg·L⁻¹，控制 DO 维持在 3~4 mg·L⁻¹。由硝化速率变化曲线可知，第 17 d 后硝化速率明显增加。第二阶段末期，氨氧化速率由原污泥的 0.29 mg·(L·h)⁻¹ 提高至 63.66 mg·(L·h)⁻¹，实现了大幅度的提升。第 1~17 d 亚硝氮积累率随着氨氮浓度的提高而增加，与包埋前 NOB 占有比例少相符合，第 17~27 d 积累率下降，与 DO 的提高和细菌在包埋体内增殖有关。在低溶解氧环境中 AOB 的竞争力强于 NOB，更有利于实现亚硝酸盐的积累。所以溶解氧的提高会破坏或者降低系统内的亚硝酸盐的积累^[26]。

2.3.2 包埋体二次恢复阶段

为证明填料可重复利用性，在填料放置一个月以后，对填料进行为期 13 d 的二次恢复。采用逐渐提高负荷的恢复策略，进水氨氮由 52 mg·L⁻¹ 逐渐增加到 137 mg·L⁻¹，控制 pH 在 7.3~7.5，DO 在 2~4 mg·L⁻¹ 之间。由图 10 可以看出硝化速率从 4.75 mg·(L·h)⁻¹ 升到 29.68 mg·(L·h)⁻¹，亚硝氮积累率在 30% 以上。二次恢复的最高速率是第一次的 47%，是污水厂活性污泥硝化速率的 2~3 倍，由此说明填料可重复利用。

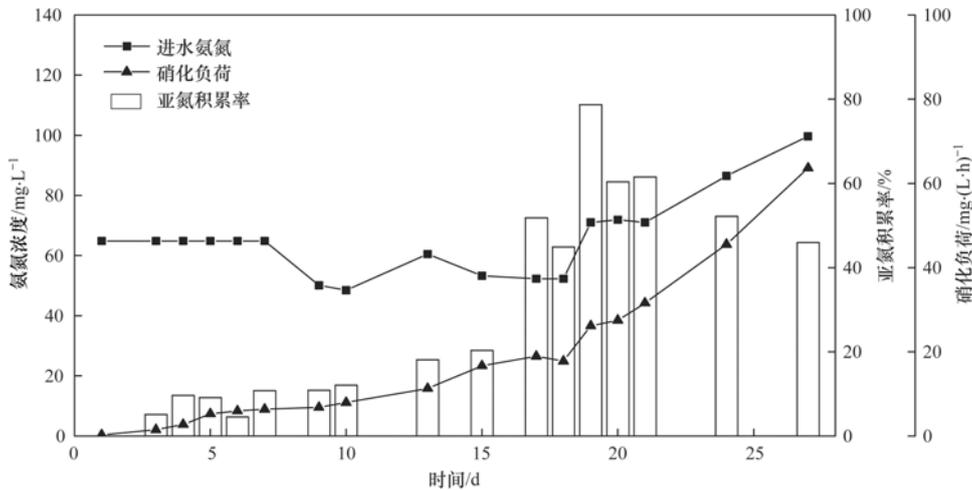


图 9 包埋填料活性恢复过程

Fig. 9 Active recovery process of entrapped fillers

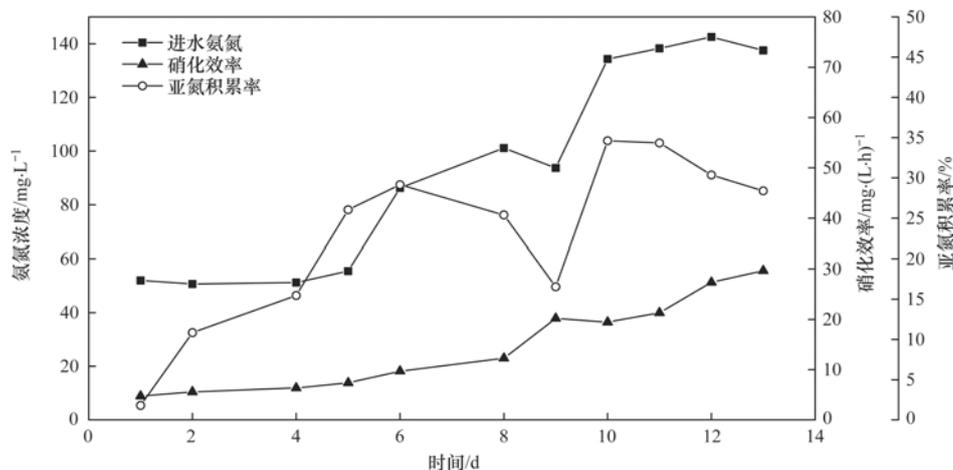


图 10 填料的二次恢复速率变化

Fig. 10 Change in efficiency of fillers after two recovery cycles

2.3.3 处理人工废水的应用

从图 11 可知,在填料二次恢复的基础上,基质氨氮维持在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,进水 COD(加入葡萄糖)在 $110 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, HRT 维持在 2h, 连续运行 5d. 硝化速率保持在较高水平,表明加入 COD 对氨氮的去除没有影响. 出水 COD 在 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 填料对 COD 的去除率只有 27%, 由于填料表面的吸附作用以及包埋前培养的污泥中含有的细菌种类繁多, 存在部分好氧反硝化的作用. 高 COD 出水能够使后续反硝化工艺很好地运行, 有利于整个 A²O 工艺的运行.

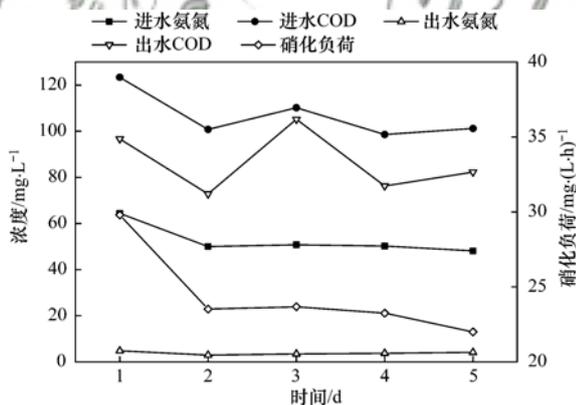


图 11 常温下 COD 及不同温度下的硝化负荷变化

Fig. 11 Changes in COD and nitrification load at different temperatures

3 结论

(1) 采用逐渐提高基质浓度, 控制游离氨 (FA) 和游离亚硝酸 (FNA) 浓度并采用定期排水的方式, 实现了硝化细菌的规模化富集, 最终氨氧化速率为 $118 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 亚硝氮积累率稳定在 50% 左右.

(2) 高通量测序结果表明, 筛选后的污泥系统

多样性较原污泥小, 硝化细菌大量增长, *Nitrosomonas* 成为系统的优势菌种, 证明工业级的富集培养是可行的.

(3) 包埋筛选富集后的活性污泥, 通过短期的恢复, 氨氧化速率为 $62 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 将停止运行一个月后的填料进行二次恢复, 运行 14 d 后氨氧化速率为 $30 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$.

(4) 利用人工废水进行填料的二次恢复, 氨氮去除效率达 96% 左右, COD 平均去除率为 32.6%.

参考文献:

- [1] 张自杰, 顾夏声. 排水工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [2] 于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 等. 包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行 [J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2925-2930.
Yu M Y, Liu Y, Tian Y B, et al. Efficient and stable operation of shortcut nitrification by entrapping ammonia oxidizing bacteria [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2925-2930.
- [3] 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 等. 硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 [J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1697-1703.
Sheng X L, Cui C C, Wang J D, et al. Pilot-scale experiment on enrichment of nitrifying activated sludge and its application in enhancing a wastewater biological treatment system against ammonia shocking loads [J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1697-1703.
- [4] 许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 等. 包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 [J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 2052-2058.
Xu X Y, You X L, Lü C P, et al. Nitrogen removal performance and microbial community analysis of activated sludge immobilization [J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 2052-2058.
- [5] Durán U, Val del Río A, Campos J L, et al. Enhanced ammonia removal at room temperature by pH controlled partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation [J]. Environmental Technology, 2014, **35**(4): 383-390.

- [6] Cho K H, Kim J O, Kang S, *et al.* Achieving enhanced nitrification in communities of nitrifying bacteria in full-scale wastewater treatment plants via optimal temperature and pH[J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, **132**: 697-703.
- [7] Li J P, Elliott D, Nielsen M, *et al.* Long-term partial nitrification in an intermittently aerated sequencing batch reactor (SBR) treating ammonium-rich wastewater under controlled oxygen-limited conditions[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, **55**(3): 215-222.
- [8] Wang L K, Zeng G M, Yang Z H, *et al.* Operation of partial nitrification to nitrite of landfill leachate and its performance with respect to different oxygen conditions [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2014, **87**: 62-68.
- [9] 杨宏, 姚仁达. pH 和硝化细菌浓度对氨氮氧化速率的影响 [J]. *环境工程学报*, 2017, **11**(5): 2260-2265.
Yang H, Yao R D. Effects of pH level and nitrifying bacteria concentration on ammonia oxidation rate[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(5): 2260-2265.
- [10] Ciudad G, González R, Bornhardt C, *et al.* Modes of operation and pH control as enhancement factors for partial nitrification with oxygen transport limitation [J]. *Water Research*, 2007, **41**(20): 4621-4629.
- [11] 管清坤, 杨宏. PVA 凝胶内基质扩散系数测定及其传质性能的优化[J]. *环境工程学报*, 2017, **11**(3): 1375-1382.
Guan Q K, Yang H. Determination of diffusion coefficient of PVA gel and optimization of its mass transfer performance[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(3): 1375-1382.
- [12] Zhang S F, Wang Y Y, He W T, *et al.* Linking nitrifying biofilm characteristics and nitrification performance in moving-bed biofilm reactors for polluted raw water pretreatment [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **146**: 416-425.
- [13] Huang W L, Wang W L, Shi W S, *et al.* Use low direct current electric field to augment nitrification and structural stability of aerobic granular sludge when treating low COD/NH₄-N wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **171**: 139-144.
- [14] Yao C, Lei H Y, Yu Q, *et al.* Application of magnetic enhanced bio-effect on nitrification: a comparative study of magnetic and non-magnetic carriers[J]. *Water Science & Technology*, 2013, **67**(6): 1280-1287.
- [15] Dong Y W, Zhang Y Q, Tu B J, *et al.* Immobilization of ammonia-oxidizing bacteria by calcium alginate[J]. *Ecological Engineering*, 2014, **73**: 809-814.
- [16] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1976, **48**(5): 835-852.
- [17] Vadivelu V M, Yuan Z G, Fux C, *et al.* The inhibitory effects of free nitrous acid on the energy generation and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(14): 4442-4448.
- [18] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia and free nitrous acid concentration on the anabolic and catabolic processes of an enriched *Nitrosomonas* culture[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2006, **95**(5): 830-839.
- [19] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture[J]. *Water Research*, 2007, **41**(4): 826-834.
- [20] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [21] Siripong S, Rittmann B E. Diversity study of nitrifying bacteria in full-scale municipal wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2007, **41**(5): 1110-1120.
- [22] Daims H, Nielsen J L, Nielsen P H, *et al.* In situ characterization of *Nitrospira*-Like nitrite-oxidizing bacteria active in wastewater treatment plants[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(11): 5273-5284.
- [23] Zhao G, Ma F, Wei L, *et al.* Using rice straw fermentation liquor to produce biofloculants during an anaerobic dry fermentation process [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **113**: 83-88.
- [24] 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, Lu 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.
- [25] Wells G F, Park H D, Yeung C H, *et al.* Ammonia-oxidizing communities in a highly aerated full-scale activated sludge bioreactor: betaproteobacterial dynamics and low relative abundance of Crenarchaea [J]. *Environmental Microbiology*, 2009, **11**(9): 2310-2328.
- [26] 郑敏, 杨波, 汪诚文, 等. 中试 MBBR 装置强化氨氮去除速率的影响条件研究 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(10): 1778-1783.
Zheng M, Yang B, Wang C W, *et al.* Enhanced ammonia removal rate in a pilot-scale MBBR [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(10): 1778-1783.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)