

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

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

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究 颜金培,陈立奇,林奇,赵淑惠,李磊,朱大勇(2629)

利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征 赵仕伟,高晓清(2637)

秋冬季节华北背景地区 PM₁ 污染特征及来源 张周祥,张养梅,张小曳,王亚强,沈小静,孙俊英,周怀刚(2647)

杭州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献 吴丹,蔺少龙,杨焕强,杜荣光,夏俊荣,齐冰,刘刚,李凤英,杨孟,盖鑫磊(2656)

青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布 谢丹丹,祁建华,张瑞峰(2667)

西安市重污染与清洁天 PM_{2.5} 组分及其活性氧物质对比 王莹,韩永明,何世恒,张婷,刘随心,曹军骥(2679)

黄山 PM₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源 孟静静,侯战方,张二勋,董杰,刘晓迪,邢继钊,刘加珍(2688)

泉州市大气 PM_{2.5} 镧系元素组成特征及来源解析 张云峰,于瑞莲,胡恭任,孙境蔚,许文质,张棕巍(2698)

西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价 许亚宣,李小敏,于华通,董林艳,赵玉婷,姚懿函,邹广迅,张新民(2707)

G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析 张磷,张祥志,秦玮,茅晶晶,秦艳红,谢卫平,史文科,陈文泰(2718)

四川省 2005~2014 年农业源氨排放清单及分布特征 冯小琼,陈军辉,姜涛,钱骏,叶宏(2728)

长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单 鲁君,黄成,胡馨遥,杨强,井宝莉,夏阳,卢滨,唐伟,楼晟荣,陶士康,李莉(2738)

我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定 张秋秋,潘申龄,张昱,杨敏,安伟(2747)

地下水污染风险评估中污染源荷载量化方法的对比分析 赵鹏,何江涛,王曼丽,崔亚丰(2754)

胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析 张倩,宋金明,彭全材,李学刚,袁华茂,李宁,段雨琴,曲宝晓,王启栋(2763)

桂江流域夏季水-气界面 CO₂ 脱气的空间变化及其影响因素 张陶,李建鸿,蒲俊兵,吴飞红,李丽,袁道先(2773)

都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险 宁增平,肖青相,蓝小龙,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(2784)

太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险 陈政宏,郭敏,徐怀洲,刘丹,程杰,李江,张圣虎,石利利(2793)

洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异 李文章,张莉,王圣瑞,肖尚斌,钱伟斌,席银,许可宸,史玲珑(2801)

阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征 孙清清,陈敬安,王敬富,杨海全,计永雷,兰晨,王箫(2810)

北京市水环境中精神活性物质污染特征 张艳,张婷婷,陈卫平,郭昌胜,花镇东,张远,徐建(2819)

降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响 陈莹,王昭,吴亚刚,赵剑强,杨文娟(2828)

CaO₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用 徐焱,李大鹏,韩菲尔,宋小君,李鑫,周婧,黄勇(2836)

坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征 鲜青松,唐翔宇,朱波(2843)

微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果 陈友媛,吴亚东,孙萍,吴丹(2850)

氧化镁基生物质炭高效去除水体中磷的特性 王彬斌,林景东,万顺利,何锋(2859)

Pd/Fe⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺 张环,傅敏,魏俊富,王一冰,安慧颖,沈书怡(2868)

针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响 孔殿超,周跃飞,陈天虎,王进,李碧(2875)

污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律 韩慧慧,缪恒峰,张雅晶,陆敏峰,黄振兴,阮文权(2883)

微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水 孙靖云,范梦婕,陈英文,祝社民,沈树宝(2893)

水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用 苏文,陈洁,张胜鹏,孔繁翔(2901)

沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻 蔡小波,郁强强,刘锐,赵远,陈吕军(2910)

K⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能 吴国栋,于德爽,李津,周同,王晓静(2917)

包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行 于濛雨,刘毅,田玉斌,石欢,徐富,杨宏(2925)

ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布 李惠娟,彭党聪,陈国燕,姚倩,卓杨,王彬斌(2931)

厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体 李祥,林兴,王凡,袁砚,黄勇,袁怡,毕贞,刘忻,杨朋兵(2941)

基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理 林兴,王凡,袁砚,李祥,黄勇,袁澄伟(2947)

基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成 沈庆然,李田,曹熠,潘舆(2953)

罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响 高景峰,孙丽欣,樊晓燕,潘凯玲,李定昌(2961)

不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水 周贵忠,许硕,姚倩,银钗(2972)

CO₂-咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征 王博强,李晨阳,卢伟,樊昊,张冬至,汪治,吕聪,沈福东(2978)

油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应 田冬,高明,黄容,吕盛,徐畅(2988)

模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响 腾昌运,沈建国,王忠,王行,李鸿毅,张志剑(3000)

秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素 杜璨,许晨阳,王强,张帆,马武功,和文祥,侯琳,耿增超(3010)

微生物对汞矿区农田土壤甲基化的影响 贾钦,朱雪梅,王琪,傅海辉,郝亚琼,何洁,杨子良(3020)

施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响 方至萍,廖敏,张楠,吕婷,黄小辉(3028)

BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用 刘伟,孟昭福,任爽,李文斌(3036)

1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比 李芬,王训,罗辑,袁巍,喻子恒,商立海(3045)

铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征 朱光旭,肖化云,郭庆军,张忠义,杨曦,孔静(3054)

膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用 周莉娜,蔡函臻,李荣华,王美净,赵军超,王权,张增强(3061)

餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比 郭香麟,左剑恶,史绪川,王凯军,李静(3070)

我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异 晏卓逸,岳波,高红,李志龙,黄启飞,聂小琴,汪群慧(3078)

甲烷催化还原 NO_x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化 潘华,建艳飞,陈宁娜,刘红霞,何焯,贺亚飞(3085)

《环境科学》征稿简则(2737) 《环境科学》征订启事(2809) 信息(2867, 2971, 3027)

包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行

于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏*

(北京工业大学水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为了提高包埋氨氧化细菌短程硝化的效率, 富集培养氨氧化细菌(AOB)并固定化. 富集培养阶段采用连续式运行方式, 以游离氨(FA)为抑制亚硝酸盐氧化菌(NOB)生长的手段, 并通过定时排泥方法使 NOB 逐渐从系统中淘洗出去. 富集培养结束后以聚乙烯醇(PVA)为包埋材料, 对筛选培养的氨氧化细菌进行固定化, 反应器包埋填充率为 8%. 采用连续式运行方式, 通过逐步增加氨氮负荷的方法提高氨氧化速率. 最终在富集培养系统中实现了污泥比氨氧化速率(以 $\text{NH}_4^+\text{-N/VSS}$ 计) $2.028 \text{ g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$ 的高表达和亚硝酸盐氮 90% 以上的高积累. 通过对污泥富集培养前后细菌群落组成的高通量测序分析, 结果表明, 培养前原污泥多样性较大, 具有硝化作用的 *Nitrosomonas* 仅有 0.24%, *Nitrospira* 有 2.7%. 富集培养后的活性污泥多样性明显变小, 优势菌种为 *Nitrosomonas* (18%), 而 *Nitrospira* 仅剩 0.02%; 包埋固定化后, 系统迅速实现了短程硝化, 最终短程硝化的速率达到了 $50 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 亚硝酸盐氮积累率稳定在 90% 以上.

关键词: 氨氧化细菌; 富集培养; 高通量测序; 固定化; 短程硝化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2925-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.201701089

Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria

YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, SHI Huan, XU Fu, YANG Hong*

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

Abstract: In order to improve the efficiency of shortcut nitrification by entrapping ammonia oxidizing bacteria, the technique of ammonia oxidizing bacteria(AOB) enrichment culture was studied. The continuous operation method was used to inhibit the growth of nitrite-oxidizing bacteria(NOB) by free ammonia, at the same time, the NOB was gradually washed out of the system through the technology of sludge discharge. Polyvinyl alcohol (PVA) was used as the embedding material to immobilize the ammonia oxidizing bacteria after enrichment culture. The embedding rate of the reactor was 8%. The ammonia oxidation rate was increased by improving ammonia nitrogen loading in the continuous operation mode. The results showed that the ammonia oxidation rate($\text{NH}_4^+\text{-N/VSS}$) was as high as $2.028 \text{ g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$ and the nitrite nitrogen accumulation rate was stabilized at more than 90%. High-throughput sequencing analysis was conducted on the bacterial community composition before and after enrichment culture, and the experimental result indicated that the culture diversity of raw sludge was larger. *Nitrosomonas* and *Nitrospirae*, which have nitrification function, accounted for 0.24% and 2.7%, respectively. The diversity of the activated sludge decreased significantly after the enrichment culture, *Nitrosomonas* (18%) became the dominant bacteria whereas *Nitrospira* occupied only 0.02%. After the embedding of ammonia oxidizing bacteria, the shortcut nitrification was realized rapidly. Finally, the shortcut nitrification rate reached $50 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ and the nitrite nitrogen accumulation was above 90%.

Key words: ammonia oxidizing bacteria; enrichment culture; high-throughput sequencing; immobilization; shortcut nitrification

在污水处理中, 由于硝化细菌是自养异养细菌且生长缓慢, 容易流失, 所以近年来固定化微生物技术的应用越来越受到人们的关注. 固定化微生物技术是通过化学或物理的手段, 将微生物细菌限定于载体空间区域内, 保持其活性并且可以反复利用^[1,2]. 与传统生物处理法相比, 固定化微生物技术具有微生物流失少、污泥产量少、抗冲击负荷能力强等优点, 可以包埋预先筛选出的特种菌种, 运用于污水处理系统中^[3-6]. 目前, 包埋固定化硝化细菌处理氨氮废水成为国内外学者的研究焦点. 郝婧^[7]所用的包埋固定化硝化细菌处理高氨氮废水, 在反应温

度为 28 ~ 30℃, pH 为 8.2, 包埋颗粒体积填充率为 25% 的条件下, 氨氧化速率最高约 $30 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 赖鼎东^[8]利用固定化氨氧化细菌进行含氮废水短程硝化时发现, 温度为 30℃, pH 为 8.5 时亚硝酸盐氮积累率可达 90% 以上, 氨氧化速率最高约为 $7.9 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. Inoue 等^[9]以聚乙烯醇为载体固定硝化细菌, 填充率为 50% 时处理低温氨氮废水, 硝化速率为 $17 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 由此可见包埋硝化细菌处理氨

收稿日期: 2017-01-11; 修订日期: 2017-02-28

作者简介: 于濛雨(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理技术, E-mail: 15810473752@163.com

* 通信作者, E-mail: yhyanke@163.com

氮废水反应效率通常较低,且包埋后需严格控制反应条件,达到亚硝酸盐氮的高积累。

因此,包埋硝化细菌实现短程硝化是可行的。但硝化细菌中氨氧化细菌含量较少,严重影响了硝化速率。为此,本实验研究氨氧化细菌的包埋固定化。以水厂回流污泥为菌源,定向筛选 AOB 并淘汰 NOB,以期达到细菌包埋完成后能实现较高的氨氧化速率和亚硝酸盐氮积累率。

1 材料与amp;方法

1.1 污泥来源与amp;实验装置

实验污泥取自北京高碑店污水处理厂硝化污泥。污泥富集培养连续流装置见图 1,反应池有效容积 22 L。

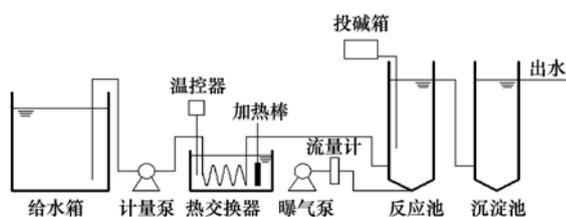


图 1 污泥富集培养装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of sludge enrichment and cultivation device

污泥富集培养实验采用人工模拟氨氮废水,主要成分有: NH_4Cl (投加量取决于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度), Na_2CO_3 (投加量取决于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度), K_2HPO_4 、 KH_2PO_4 (投加量取决于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,其中 N:P 为 5), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。每升进水中加入 0.5 mL 微量元素,其中 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ($0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($0.120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ($0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[10~13]。

培养过程中反应温度控制在 25°C , DO 为 $1 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, pH 为 $8 \sim 8.4$ 。实验起始时 MLSS 为 $4030 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, MLVSS 为 $2473 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 实验过程中每天连续排泥。初期进水氨氮浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 后逐步提高至 $700 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水力停留时间由 4 h 缩短到 2 h。

1.2 包埋填料的制备与应用

按照本实验室成熟的包埋技术,取 7 L 富集培养后的污泥进行离心浓缩,加入胶状体聚乙烯醇 (PVA) 混合制成包埋液,均匀涂装在条状载体上,

包埋液中 PVA 与浓缩污泥的浓度分别为 10% 和 25%^[14~16]。以硼酸和无水硫酸钠为交联剂交联 4 h。包埋连续流装置同上,包埋填料填充率为 8%。实验采用人工模拟氨氮废水,其构成同上。实验在室温下进行,反应 pH 为 $7.2 \sim 8$, DO 为 $2 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。实验进水氨氮浓度由 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐步提高至 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HRT 为 4 h。为适应高碑店污水处理厂的进水氨氮浓度,在氨氧化速率和亚硝酸盐氮积累率稳定后,降低进水氨氮浓度至 $30 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[17],并缩短水力停留时间至 2 h。

1.3 实验分析方法

1.3.1 高通量测序分析方法

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 Yu01 和 Yu02,提取 DNA 并对样本 16S rRNA 的 V3-V4 区域进行 PCR 扩增^[18~20]。

采用 Illumina HiSeq2500 PE250 高通量测序平台对样品进行测序。针对测序数据进行环境微生物的 16S 分析,首先对原始的 paired-end reads 进行过滤得到高质量 reads,然后通过序列拼接得到较长的序列,将其与 16S 参考数据库作比对,同时去除嵌合体序列,最终将过滤后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),设定阈值的序列相似性为 0.97 分为同一类,分成的一个类就是一个 OTU,代表一个种^[21]。接着根据 OTUs 结果进行 α 多样性的计算。 α 多样性指标包括丰富度指数 (ACE)、多样性指数 (Shannon、Simpson)、goods_coverage 和 observed_species 等。其中丰富度衡量单个样本中物种种类个数,实际通过估算 OTU 的个数来衡量;多样性指数衡量群落的异质性。goods_coverage 表示样品文库的覆盖率,即测序深度指数,其数值越高,则样本中序列没有被测出的概率越低。Observed_species 代表该样品中 OTU 的个数。

1.3.2 其他分析方法

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定^[22]; pH 采用 SX711 便携式 pH 计测定;溶解氧采用 JPSJ-605F 型溶解氧仪测定。

2 结果与amp;讨论

2.1 氨氧化细菌富集培养阶段结果及amp;分析

2.1.1 进水氨氮浓度与amp;污泥比氨氧化速率变化情况分析

从图 2 可以看出,反应起始阶段 (1~5 d) 进水

氨氮控制在 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HRT 为 4 h, 污泥比氨氧化速率开始由 $0.103 \text{ g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$ 缓慢增长至 $0.348 \text{ g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$. 此时还处于活性恢复阶段, 为了提高污泥比氨氧化速率, 从第 6 d 开始提高进水氨氮浓度并将 HRT 缩短为 3 h. 至第 22 d, 由于污泥比氨氧化速率增长较快, 提高进水氨氮浓度至 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 并同时缩短 HRT 至 2 h 并保持不变.

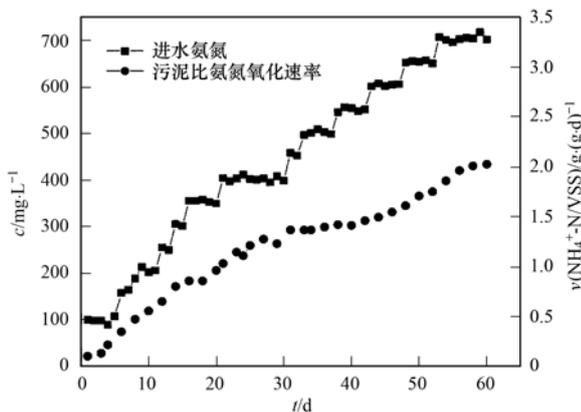


图2 污泥进水氨氮浓度及污泥比氨氧化速率变化

Fig. 2 Changes of influent ammonia nitrogen concentration and sludge specific ammonia oxidation rate

经过 30 d 的富集培养, 污泥比氨氧化速率呈指数增长至 $1.368 \text{ g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$. 随着污泥比氨氧化速率的不断提高, 在水力停留时间 2 h 内出水氨氮浓度逐渐减小为零, 此时反应较易向全程硝化转化. 所以继续增加进水氨氮浓度至 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 此时污泥比氨氧化速率增长缓慢, 说明高浓度氨氮对氨氧化细菌的活性有一定抑制作用. 而后继续增加进水氨氮浓度至 $700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 可以发现在短暂的适应期过后, 污泥比氨氧化速率继续增长, 最终高达 $2.028 \text{ g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$. 污泥比氨氧化速率的持续增长可以证明富集培养阶段氨氧化细菌活性不断增强.

2.1.2 污泥浓度变化情况

由于反应体系中始终保持着较高浓度的亚硝酸盐氮, 作为 NOB 的反应底物, 亚硝酸盐氮的积累对 NOB 的生长有一定的促进作用. 为了将 NOB 彻底淘洗出去, 实验过程中每天不断排泥. 从图 3 可以看出, 前 23 d 系统中 MLVSS 不断增长, 这是由于前期排泥量较小. 为保持系统中稳定的污泥浓度, 第 24 d 开始加大排泥量, 污泥浓度逐渐减小, 至第 35 d 基本稳定. 尽管每天不间断排泥, 系统总污泥浓度仍不间断增长, 后由高通量测序可知污泥中氨氧化细菌大量增长.

2.1.3 污泥亚硝酸盐氮积累率变化情况分析

从图 4 可以看出, 反应起始阶段(1~5 d)亚硝

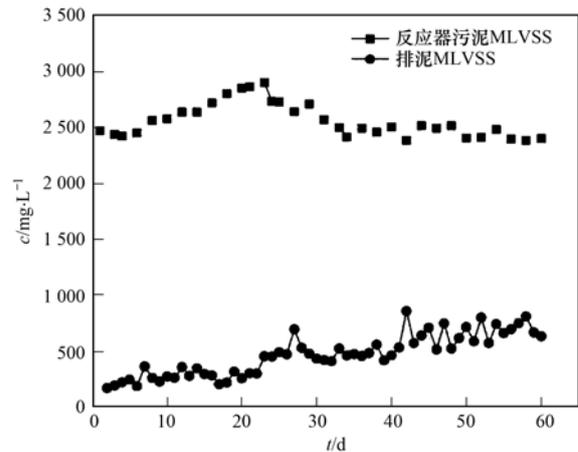


图3 污泥浓度变化

Fig. 3 Changes of sludge concentration

酸盐氮积累率由 33% 迅速增长至 70%. 从第 6 d 开始提高进水氨氮浓度后, 亚硝酸盐氮积累率进一步增加至 85% 以上并逐渐稳定. 此后由于氨氮浓度不断提高, FA 对 NOB 的抑制作用不断增大, 且每天不间断地排泥, 致使 NOB 活性越来越低且数量越来越少. 而此时氨氧化细菌大量增长且活性不断增强, 在系统中占有明显的生态优势. 这使得亚硝酸盐氮积累率从第 20 d 起始终保持在 90% 以上.

本实验进行至第 60 d, 污泥比氨氧化速率的高表达和亚硝酸盐氮的高积累已达到预期效果, 此时取污泥样品进行高通量测序, 结果表明氨氧化细菌已成为优势菌种, 可以进行后续包埋实验. 另外, 本实验污泥富集培养阶段出水用于反硝化实验, 脱氮后排放.

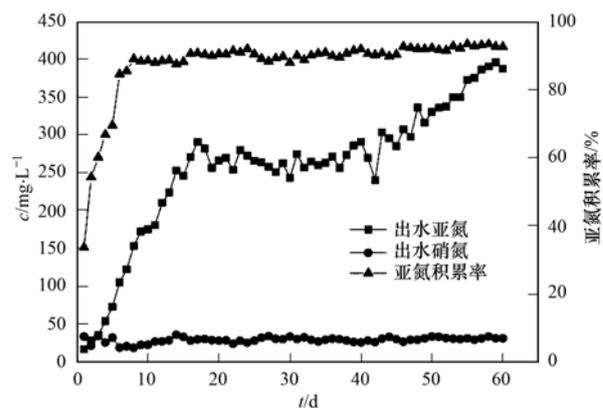


图4 污泥亚氮积累率变化

Fig. 4 Changes of nitrite nitrogen accumulation rate of sludge

2.1.4 污泥多样性及菌群变化分析

通过对两组样品 16S rRNA 基因文库高通量测序, 污泥原样 (Yu01) 与富集培养后的污泥样品 (Yu02) α 多样性指标计算结果见表 1.

表 1 α 多样性指标计算结果Table 1 The α diversity index calculation results

编号	observed_species	ACE 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	goods_coverage
Yu01	1 881	1 989.304	8.399 019	0.991 981	0.994 8
Yu02	2281	3101.566	5.4275629	0.878 507	0.981 6

由表 1 可知,两个样品的文库覆盖率均大于 0.98,表明测序深度已经基本覆盖到样本中所有的物种. Yu01 的 Shannon 多样性指数和 Simpson 多样性指数大于 Yu02,说明原污泥群落多样性高于筛选后的污泥. 多样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.

为了更深入研究系统的优势菌种,计算每个样本在属级的相对丰富度. 表 2、表 3 列出了每个样品前三类优势菌属及与硝化作用相关的 *Nitrospira* 和 *Nitrosomonas* 所占百分比及系统分类.

表 2 Yu01 优势菌属

Table 2 Dominant genera of Yu01

百分比%	属	纲	门
50.05		unclassified	
5.62	<i>Tetrasphaera</i>	Actinobacteria	Actinobacteria
4.27	<i>Ferruginibacter</i>	Sphingobacteriia	Bacteroidetes
4.06	<i>Terrimonas</i>	Sphingobacteriia	Bacteroidetes
2.7	<i>Nitrospira</i>	Nitrospira	Nitrospirae
0.24	<i>Nitrosomonas</i>	β -Proteobacteria	Proteobacteria

表 3 Yu02 优势菌属

Table 3 Dominant genera of Yu02

百分比%	属	纲	门
51.4		unclassified	
18	<i>Nitrosomonas</i>	β -Proteobacteria	Proteobacteria
4.27	<i>Arenimonas</i>	γ -Proteobacteria	Proteobacteria
4.06	<i>Fluviicola</i>	Flavobacteriia	Bacteroidetes
0.02	<i>Nitrospira</i>	Nitrospira	Nitrospirae

与常规分子生物学手段相比,高通量测序可以提供更丰富的微生物信息. 尽管如此, Yu01 与 Yu02 仍有 50.5% 与 51.4% 的序列无法归入已知细菌属. 原泥样品菌群分布较均匀,均为废水处理系统中的常见菌种^[23,24]. 其中与硝化作用相关的为 *Nitrospira* 和 *Nitrosomonas*. 已知的 *Nitrospira* 菌属为硝酸盐氧化细菌, *Nitrosomonas* 菌属为氨氧化细菌,前者为后者的 11.25 倍. 筛选后的污泥样品中, *Nitrosomonas* 成为优势菌,这与 Wells 等^[25]的研究结果一致,即绝大多数反应器中 *Nitrosomonas* 是 AOB 的优势菌种. 而 *Nitrospira* 仅占系统的 0.02%,此时

Nitrosomonas 是 *Nitrospira* 的 900 倍.

2.2 包埋氨氧化细菌短程硝化阶段结果及分析

2.2.1 包埋填料短程硝化效率与亚氮积累率变化情况

对包埋填料进行活性恢复. 由图 5 可知起始阶段系统进水氨氮浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氧化速率由 $1 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 缓慢增加至 $6 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 此时氨氧化速率较低,从第 12 d 起为提高反应速率将进水氨氮浓度增加至 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可以发现随着氨氮浓度的增加,氨氧化速率增长加快,至第 19 d 迅速增长至 $20 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 因此,通过逐步增加进水氨氮浓度的方法提高氨氧化速率是可行的. 此后继续阶段性地提高进水氨氮浓度至 $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氧化速率最可高达 $50 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$.

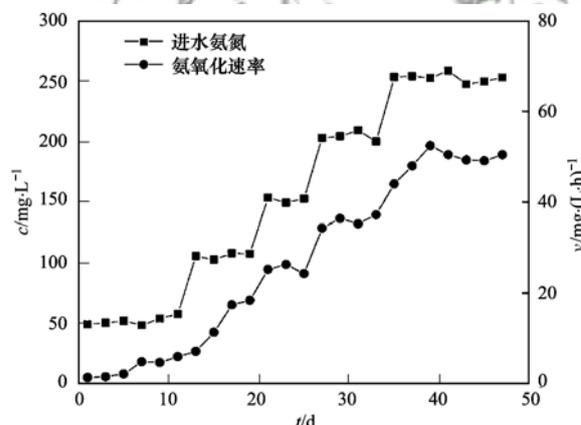


图 5 包埋填料氨氧化速率变化

Fig. 5 Changes of ammonia oxidation rate of immobilization filler

从图 6 可以看出,实验过程中系统始终保持 95% 以上亚硝酸盐氮积累率. 证明系统中氨氧化细菌始终保持着绝对的生态优势. 由此可以证明,包埋固定本实验筛选后的氨氧化细菌有利于实现硝化系统中稳定的亚硝酸盐氮积累.

2.2.2 模拟水厂进水氨氮浓度下的处理效果

为适应高碑店污水处理厂的进水氨氮浓度,在氨氧化速率和亚硝酸盐氮积累率稳定后,降低进水氨氮浓度至 $30 \sim 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 由图 7、8 可以看出,系统始终保持着 90% 以上的氨氮去除率以及亚硝酸盐氮积累率.

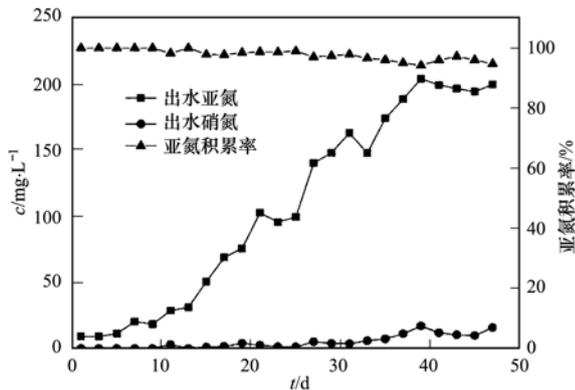


图6 包埋填料亚氮积累率变化曲线

Fig. 6 Changes of nitrite nitrogen accumulation rate of immobilization filler

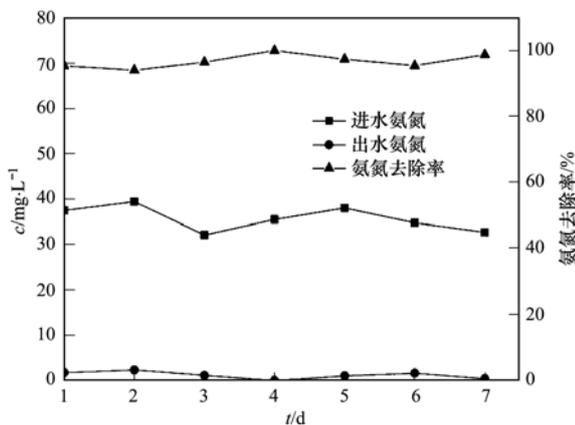


图7 系统氨氮去除率变化

Fig. 7 Changes of ammonia nitrogen removal rate in the nitrification system

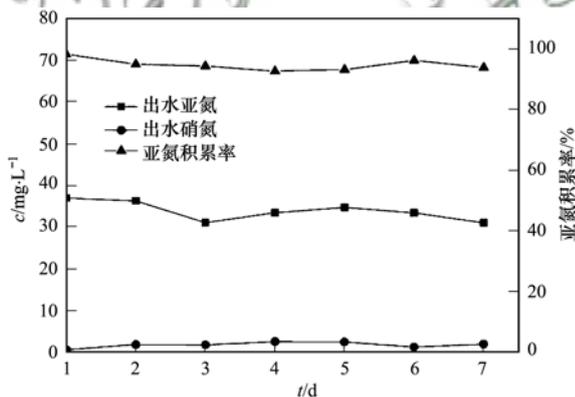


图8 系统亚氮积累率变化

Fig. 8 Changes of nitrite nitrogen accumulation rate in the nitrification system

3 结论

(1) 采用连续流运行方式逐步提高进水氨氮浓度,可以促进氨氧化细菌活性的增强并使之大量增长,从而大大地提高氨氧化速率,但高浓度氨氮对氨氧化细菌的活性有一定的抑制作用。

(2) 固定化富集培养后的氨氧化细菌,反应器包埋填充率为 8% 时,氨氧化速率最高可达 $50 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,亚硝酸盐氮积累率稳定在 90% 以上。

(3) 用包埋填料处理水厂模拟污水,氨氮去除率和亚硝酸盐氮积累率均可保持在 90% 以上。

参考文献:

- [1] 沈耀良, 黄勇, 赵丹, 等. 固定化微生物污水处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] 王建龙, 施汉昌, 钱易. 固定化微生物技术在难降解有机污染物治理中的研究进展[J]. 环境科学研究, 1999, 12(1): 60-64.
- [3] Wang J L, Shi H C, Qian Y. The advances in biodegradation of refractory organic pollutants by immobilized microbial cells[J]. Research of Environmental Science, 1999, 12(1): 60-64.
- [4] 张彤, 曹国民, 赵庆祥. 固定化微生物脱氮技术进展[J]. 城市环境与城市生态, 2000, 13(2): 17-20.
- [5] Zhang T, Cao G M, Zhao Q X. study on biodenitrification using immobilized microbes[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2000, 13(2): 17-20.
- [6] 李贤胜, 施永生. 固定化微生物技术在废水脱氮中的应用[J]. 云南环境科学, 2006, 25(3): 30-33.
- [7] Li X S, Shi Y S. Application of immobilized microorganism to remove nitrogen in wastewater treatment [J]. Yunnan Environmental Science, 2006, 25(3): 30-33.
- [8] Vanotti M B, Hunt P G. Nitrification treatment of Swine wastewater with acclimated nitrifying sludge immobilized in polymer pellets[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(2): 405-413.
- [9] 王磊, 兰淑澄. 微生物固定化技术在污水生物脱氮中的应用[J]. 环境科学, 1995, 16(6): 76-78.
- [10] Wang L, Lan S C. Application and development of immobilized microbial cells technology in the biological denitrification process of wastewater[J]. Environmental Science, 1995, 16(6): 76-78.
- [11] 郝婧. 包埋固定化脱氮菌群用于处理高氨氮废水的研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [12] 赖鼎东, 李正魁, 张晓姣, 等. 固定化氨氧化细菌短程硝化特性研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(11): 13-16.
- [13] Lai D D, Li Z K, Zhang X J, et al. Characterization of short-cut nitrification using immobilized ammonia-oxidizing bacteria [J]. Environmental Pollution and Control, 2008, 30(11): 13-16.
- [14] Inoue M, Yamamoto Y, Nishimura O, et al. Improvement of nitrogen removal efficiency of an anaerobic filter-aerobic biological filtration process by using nitrifying bacteria immobilized pellets [J]. Japanese Journal of Water Treatment Biology, 2003, 39(3): 99-107.
- [15] 章正勇, 陈旭, 安立超. 氨氧化细菌富集培养的实验研究[J]. 化学与生物工程, 2007, 24(7): 63-64, 67.
- [16] Zhang Z Y, Chen X, An L C. Experimental research on enrichment technique for ammonia oxidizing bacteria [J]. Chemistry & Bioengineering, 2007, 24(7): 63-64, 67.
- [17] 戴昕, 吴亚杰, 安立超, 等. 氨氧化细菌的富集培养及影响因素的研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(4): 44-48.
- [18] Dai X, Wu Y J, An L C, et al. Study on enrichment culture and influencing factors of ammonia oxidizing bacteria [J].

- Environmental Science and Management, 2015, **40**(4): 44-48.
- [12] Balmelle B, Nguyen K M, Capdeville B, *et al.* Study of factors controlling nitrite build-up in biological processes for water nitrification[J]. Water Science & Technology, 1992, **26**(5-6): 1017-1025.
- [13] Grunditz C, Dalhammar G. Development of nitrification inhibition assays using pure cultures of *Nitrosomonas* and *Nitrobacter*[J]. Water Research, 2001, **35**(2): 433-440.
- [14] 茆云汉, 王建龙. 聚乙烯醇固定化微生物新方法的研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 370-376.
Mao Y H, Wang J L. Immobilization of activated sludge in PVA matrix using innovative methods [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(2): 370-376.
- [15] 晋凯迪, 于鲁冀, 陈慧敏, 等. 亚硝化细菌吸附-包埋固定化方法的优化及其脱氮性能[J]. 水处理技术, 2015, **41**(7): 57-60, 64.
Jin K D, Yu L J, Chen H M, *et al.* The optimization and nitrogen removal performance of nitrification bacteria's adsorption and embedding immobilization method[J]. Technology of Water Treatment, 2015, **41**(7): 57-60, 64.
- [16] 苗娟, 魏学锋, 贾晓平, 等. 3种包埋剂固定化硝化细菌的制备与性能[J]. 工业安全与环保, 2016, **42**(11): 61-63, 82.
Miao J, Wei X F, Jia X P, *et al.* Preparation and performance of immobilized nitrobacteria by three embedding materials [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, **42**(11): 61-63, 82.
- [17] 邢娅, 任锋, 杭世珺. 高碑店污水处理厂一期工程出水水质改造工程工艺设计[A]. 见: 中国土木工程学会水工业分会排水委员会第四届第一次年会论文集[C]. 天津: 中国土木工程学会, 2001.
- [18] 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 等. 基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2652-2658.
Chen C J, Zhang H Q, Wang Y Q, *et al.* Characteristics of microbial community in each compartment of ABR ANAMMOX reactor based on high-throughput sequencing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2652-2658.
- [19] 夏围围, 贾仲君. 高通量测序和 DGGE 分析土壤微生物群落的技术评价[J]. 微生物学报, 2014, **54**(12): 1489-1499.
Xia W W, Jia Z J. Comparative analysis of soil microbial communities by pyrosequencing and DGGE [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2014, **54**(12): 1489-1499.
- [20] 闫媛, 黎力, 王亚宜, 等. 采用高通量测序分析全程自养脱氮(CANON)系统不同脱氮效能下的微生物群落结构[J]. 北京工业大学学报, 2015, **41**(10): 1485-1492.
Yan Y, Li L, Wang Y Y, *et al.* Microbial community characteristics of a completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) system based on high-throughput sequencing technology [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, **41**(10): 1485-1492.
- [21] Claesson M J, O'Sullivan O, Wang Q, *et al.* Comparative analysis of pyrosequencing and a phylogenetic microarray for exploring microbial community structures in the human distal intestine[J]. PLoS One, 2009, **4**(8): e6669.
- [22] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [23] Snaird J, Amann R, Huber I, *et al.* Phylogenetic analysis and in situ identification of bacteria in activated sludge[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, **63**(7): 2884-2896.
- [24] Amann R, Fuchs B M. Single-cell identification in microbial communities by improved fluorescence *in situ* hybridization techniques[J]. Nature Reviews Microbiology, 2008, **6**(5): 339-348.
- [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.

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China: A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)