

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

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

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值	王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)
2015年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征	张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)
北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用	邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)
基于实测的建筑类涂料挥发性有机物 (VOCs) 含量水平及组分特征	高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)
2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析	王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)
北京市大气环境 PM _{2.5} 和 PM ₁ 及其碳质组分季节变化特征及来源分析	樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)
南京春季北郊地区大气 PM _{2.5} 中主要化学组分及碳同位素特征	周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)
热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物	马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)
杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系	王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)
基于远程通讯技术的混动公交车 SCR 系统运行及 NO _x 排放特征	杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)
基于环境风险排序的流域优先污染物筛选	李奇峰, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)
重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)
黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征	宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)
脱甲河水系 N ₂ O 关键产生过程及氮素来源探讨	赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)
生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响	王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)
黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复	史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)
城市黑臭水体的吸收特性分析	丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)
岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化	范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)
防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征	林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)
基于 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的农业区地下河硝酸盐污染来源	盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)
垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征	彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)
铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为	梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)
基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制	张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)
AAO 工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性	李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)
抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除	李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)
磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧铁氨氧化菌对废水氨氮去除的影响	刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)
海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能	杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)
低温下 A ² /O-BAF 反硝化除磷脱氮特性	黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)
O ₃ -BAC 深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析	张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)
基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析	吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)
3 种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响	温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)
硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制	张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)
包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析	杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)
中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析	尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)
典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价	马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)
秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响	黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)
不同肥料施用对设施蔬菜地 NH ₃ 挥发和 N ₂ O 排放的影响	山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)
施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响	田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)
长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响	王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)
典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征	陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)
凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制	陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)
天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果	刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)
水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响	万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)
窖水中微生物降解污染物的关键细菌	杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)
砷氧化菌对胡敏酸络合 As(III) 的氧化作用	李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)
海域高温油田 1 株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制	杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)
1 株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Zobellella</i> sp. B307 的分离及脱氮特性	白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岍然 (4793)
1 株镰刀菌属 KY123915 的分离及其对 17 β -雌二醇的降解特性	吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)
氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响	李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)
林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析	任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)
DEP 对蚯蚓抗氧化酶系的影响及 DNA 损伤	平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)
生活垃圾焚烧灰灰矿物学特性及重金属分布	李建陶, 曾鸣 (4834)
《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)	

包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析

杨宏¹, 徐富¹, 孟琛¹, 苏珊¹, 袁星²

(1. 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; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100124)

摘要: 为了快速提高以污水厂反硝化池污泥为菌源的反硝化包埋填料的活性, 实现包埋固定化的工程化应用, 探究包埋填料的微生物群落特性, 采用批次实验研究不同碳氮比、温度、pH 对包埋填料活性的影响, 并采用高通量测序研究包埋填料的生物群落特性。结果表明, C/N 为 10、温度为 30℃、pH 为 7.5 ± 0.3 时, 经过 7 d 即可恢复 5.37 mg·(g·h)⁻¹ 的初始活性。在 C/N 为 10, 温度为 25℃, pH 为 8.0 的最优培养条件下, 15 d 后比反硝化速率即增大 15 倍至 80.17 mg·(g·h)⁻¹ 并实现稳定运行。SEM 结果显示包埋填料内部存在大量利于传质的通道, 内部的细菌呈团簇状生长良好。高通量测序表明, 包埋填料中具有反硝化功能的 *Thauera* 和 *Thermomonas* 为优势菌属, 所占比例分别为 24.27% 和 8.23%, 保证了反硝化填料脱氮的高效性。*Thauera* 优势菌属和 *Thermomonas* 菌属在最优培养条件下快速增殖是填料活性快速提高的主要原因。

关键词: 反硝化; 包埋填料; 比反硝化速率; 污泥发酵液; 群落分析

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4661-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201801064

Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis

YANG Hong¹, XU Fu¹, MENG Chen¹, SU Shan¹, YUAN Xing²

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, College of Architectural Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100124, China)

Abstract: The purpose of this study was to rapidly improve the denitrification packing activity in the denitrification pond sludge of sewage plants, to realize the engineering application of embedding immobilization, and to explore the characteristics of the microbial community of the embedding packing. The effects of different C/N ratios, temperature, and pH on the activity of embedding filler were studied by batch experiments, and the biological community characteristics of embedding filler were studied by high-throughput sequencing. Results showed that the embedding packing in C/N to 10, the temperature of 30℃, and pH of 7.5 ± 0.3, resumed 5.37 mg·(g·h)⁻¹ of the initial activity after 7 days. Under the optimized culture conditions of C/N ratio of 10, temperature of 25℃, and pH of 8.0, the specific rate of denitrification can be increased by 15 times to 80.17 mg·(g·h)⁻¹ after 15 days, and stabilized at that level. SEM results showed that there were a large number of mass transfer channels inside the embedding fillers, and that the bacteria grew well as clusters in the encapsulated fillers. The high throughput sequencing showed that the denitrifying function of *Thauera* and *Thermomonas* were 24.27% and 8.23% respectively, which ensured the high efficiency of denitrifying nitrogen removal. The rapid proliferation of *Thauera* dominant bacteria and *Thermomonas* under optimal culture conditions was the main reason for the rapid increase of packing activity.

Key words: denitrification; embedding filler; specific denitrification rate; sludge fermentation broth; community analysis

含氮污、废水不仅造成水环境富营养化等水质恶化问题, 而且直接危害着人体健康^[1]。由于脱氮的多个生化过程所涉及的环境条件(碳氮比、温度、pH、溶解氧等)、基质成分、微生物组成等不尽相同, 因此目前污水厂采用的传统 A²/O 工艺的单泥系统难以高效完成脱氮^[2~6]。包埋固定化技术因具有脱氮效率高、微生物抗性强、固液分离效果好等优点而成为污、废水处理领域的研究热点^[7~9]。驯化后的反硝化污泥^[10]和筛选过的特定菌株^[9]是包埋固定化技术处理含硝氮废水的主要菌源。但是, 由于富集和筛选菌株耗时较长且操作复杂^[11]或比

反硝化速率较低^[10], 固定化技术的工程化应用难以实现。曾金平等^[10]利用乙酸钠为碳源富集的反硝化菌, 经过 14 d 驯化, 包埋颗粒的最大比反硝化速率(以 NO_x⁻-N/MLVSS 计, 下同)仅为 2.9 mg·(g·h)⁻¹, 无法满足脱氮要求。孟婷等^[9]以筛选出高效反硝化菌为菌源制成的包埋填料, 经过 12 d 的培养, 比反硝化速率可达 87.57 mg·(g·h)⁻¹, 但

收稿日期: 2018-01-07; 修订日期: 2018-04-04

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

是单一菌源在复杂的环境中适应性较差^[6]且筛选过程相对繁琐。有研究表明,碳源利用的难易程度会显著地影响反硝化效率^[12],污泥发酵液做碳源的反硝化速率均高于乙酸和甲醇^[13],另有研究表明污泥的处置成本占到污水处理厂运行成本的30%~50%^[14],将剩余污泥作为反硝化碳源的处理方式可以在获得碳源的同时节约污水厂的运行成本。

基于此本实验以污泥发酵液为碳源,以污水厂的反硝化池污泥为菌源直接包埋,省去了污泥驯化过程,并采用批次实验确定填料最优的培养条件,通过缩短包埋填料的培养时间,提高反硝化包埋填料的比反硝化速率,实现“节能降耗”和包埋填料工程化应用的目的。本实验通过 SEM 观察不同阶段填料表面的结构变化,利用分子生物学检测细菌种类和种群的变化,以期反硝化污泥包埋固定化技术在水处理领域中工程化应用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 反硝化池污泥的特征

实验污泥取自北京某污水厂的反硝化池,污泥特征如表 1,量取 12 L 污泥混合液用于制作反硝化包埋填料的菌源。

表 1 实验污泥的基本特征

Table 1 Characteristic of sludge used in this study		
指标	反硝化池污泥	浓缩污泥
SCOD/mg·L ⁻¹	36.96~44.18	1 007.42~2 258.24
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0~1.26	0~8.16
NO _x ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0~1.05	0~1.57
PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹	0~0.24	0.24~0.47
MLSS/mg·L ⁻¹	3 500±500	20 000±1 000
pH	7.50±0.30	7.50~8.10

1.2 污泥发酵液的制备及特征

采用北京某污水厂的浓缩污泥制备污泥发酵液,浓缩污泥的特征如表 1 所示。制备方法如下,①取 6 个密闭的体积为 1 L 的锥形瓶,分别加入 800 mL 的浓缩污泥,并加入氢氧化钠溶液调节 pH 为 9.0±0.5,经密封后放入高压灭菌锅,于 121℃ 条件下水解 30 min;②待温度恢复至恒温后再加入 200 mL 浓缩污泥,密封放入恒温箱,于 30℃ 条件下,恒温发酵 3 d,期间控制 pH 为 9.0±0.5;③用离心机于 8 000 r·min⁻¹ 条件下离心 5 min,取其上清液,再将上清液在 121℃ 条件下灭菌 30 min 备用。表 2 反映了制取的污泥发酵液的基本特征。

表 2 污泥发酵液的基本特征

Table 2 Characteristics of the sludge fermentation liquid	
指标	污泥发酵液
SCOD/mg·L ⁻¹	7 452.12~8 012.42
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0~99.23
NO _x ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0~2.01
PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹	0~53.21
pH	9.0±0.5
挥发性脂肪酸/mg·L ⁻¹	4 904.61~5 421.12
乙酸/mg·L ⁻¹	2 034.19~2 641.54
丙酸/mg·L ⁻¹	431.24~503.16
丁酸/mg·L ⁻¹	127.32~135.51
戊酸/mg·L ⁻¹	80.21~87.79

1.3 包埋方法

①将 25.275 g 聚乙烯醇(PVA)絮状固体在 97℃ 条件下溶于 202.2 mL 的超纯水中,制成质量分数为 16% PVA 溶液^[15],待冷却至 35℃ 备用;②量取 12 L 活性污泥,放入离心机,在 8 000 r·min⁻¹ 下离心 5 min 所得浓缩污泥;③将浓缩后的污泥放入已制备好的 PVA 溶液中,再加入一定量的碳酸钙固体粉末,用玻璃棒搅拌均匀,最终制得活性污泥质量分数为 24% 包埋液^[8];④用包埋液均匀涂装在实验室特有的填料载体上;⑤将涂有包埋液的载体放入饱和硼酸溶液交联,用水冲洗后包埋填料制作完成。

1.4 实验方法

实验装置采用 12 个 1 L 的锥形瓶,分别加入 900 mL 的人工培养液,并置于摇床培养箱培养。人工培养液以 KNO₃ 为氮源,污泥发酵液为碳源并为细菌提供少量的微量元素,KH₂PO₄ 为细菌提供所需要的磷,并加入 MgSO₄·CaCl₂·2H₂O、ZnSO₄·7H₂O、FeCl₂·2H₂O 微量元素,其主要水质指标如表 3 所示。实验采用序批式运行,包埋填料活性恢复和批次实验反应周期均为 2 h,后期填料快速培养反应周期 1 h。

表 3 人工培养液水质特征/mg·L⁻¹

Table 3 Characteristics of the artificial medium/mg·L ⁻¹	
指标	进水
NH ₄ ⁺ -N	5.12~42.41
NO ₂ ⁻ -N	0~2.32
NO ₃ ⁻ -N	39.18~341.23
PO ₄ ³⁻ -P	4.86~38.74
SCOD	240.24~3 412.31
MgSO ₄	13.33~113.31
CaCl ₂ ·2H ₂ O	10.4~88.4
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	4.67~39.70
FeCl ₂ ·2H ₂ O	1.73~14.705

整个实验分为 3 个阶段, S_1 阶段: 将反硝化池污泥利用 1.3 节所述的包埋方法制成填料, 并以污泥发酵液为碳源, 在温度 30°C , pH 为 7.5 ± 0.3 , 控制进水硝氮浓度为 $(40 \pm 1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 加入 54 mL 的污泥发酵液, 以保证反应器中的碳氮比为 10 ± 0.5 , 将反应器放置在转速为 $80 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的摇床上恢复活性. 通过实验数据确定填料恢复到初始活性所需的时间, 将部分所制备好的填料分别做 SEM 和高通量测序的检测; S_2 阶段: 等填料恢复到初始活性后, 通过批次实验考察碳氮比、温度、pH 这 3 个因素对反硝化包埋填料活性的影响, 确定出包埋填料最优的活性恢复条件; S_3 阶段: 根据 S_2 阶段得出的结论, 选定效率最高的 3 组反应器, 在该条件下提高包埋填料活性至稳定运行, 并将效率最高组的样品填料分别做电镜扫描和高通量测序的检测.

1.5 微生物群落多样性分析

1.5.1 DNA 提取

由于包埋填料样品表面和内部富有菌群, 需要进行预处理. 可取适量样品, 直接在样品管中加入适量的 $1 \times \text{PBS}$ 溶液强烈振荡, 使样品表面菌体能够被洗到液体中, 取适量洗过之后的液体 $12000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 2 min, 留取沉淀, 具体提取步骤参照 OMEGA 试剂盒 E. Z. N. ATM Mag-Bind Soil DNA Kit 的试剂盒提取 DNA, 提取完成后, 进行琼脂糖凝胶检测 DNA 完整性.

1.5.2 PCR 扩增

利用 Qubit 3.0 DNA 检测试剂盒对基因组 DNA 的浓度进行测定, 以确定 PCR 反应加入的 DNA 量. PCR 所用的引物已经融合了 MiSeq 测序平台的 V3-V4 通用引物.

341F 引物: CCCTACACGACGCTCTTCCGATCTG (barcode) CCTACGGGNGGCWGCAG.

805R 引物: GACTGGAGTTCCTTGGCACCCGAGAATTCAGACTACHVGGGTATCTAATCC.

按照相应体系进行 PCR 扩增. 利用 Qubit3.0 DNA 检测试剂盒对回收的 DNA 精确定量, 以方便按照 1:1 的比例等量混合后测序. 等量混合时, 根据每个样品的 DNA 浓度计算移液枪所需吸取的体积, 使得每个样品吸取后 DNA 的量为 10 ng, 最终测序浓度为 20 pmol, 测序在生工生物工程(上海)股份有限公司进行.

1.6 检测方法

实验过程中所有样品经过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜抽滤处理, 三氮的测定方法均为标准分析法^[16]; 氨氮采

用纳氏试剂分光光度法(UV-754); 亚硝氮采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定(UV-1600); 硝氮采用紫外分光光度计法测定(UV-1600); SCOD 采用 COD 快速测定仪测定(连华科技 5B-1 型); 污泥质量浓度采用滤纸重量法测定; pH 采用 pH 计测定(上海三信 PHS-3C 型); 挥发性脂肪酸采用气相色谱法测定^[17](安捷伦 6890n 气相色谱仪).

2 结果与讨论

2.1 反硝化包埋填料的活性恢复

反硝化包埋填料制作完成后, 在温度为 30°C 条件下进行活性恢复, 为了保证反硝化反应足够的碳源^[9], 控制反应器中的碳氮比为 10, pH 为 7.5 ± 0.3 . 经过 7 d 培养后, 反硝化包埋填料表现出良好的反硝化效果, 反应效果如图 1 所示.

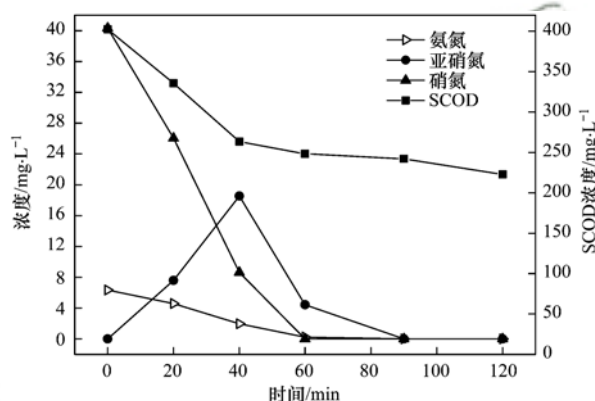


图 1 反硝化包埋填料的反应效果

Fig. 1 Denitrifying performance of embedding filler

由图 1 可知, 经过 90 min 的生物作用, 反应器中的氨氮浓度由 $5.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降到了 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应器中可能存在异养硝化过程^[18]导致氨氮浓度降低. 硝氮在 0 ~ 60 min 内, 由初始 $40.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 亦降至 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由于亚硝氮还原速率比硝氮还原速率低^[19], 亚硝氮变化呈现先增加后减少的趋势, 在第 40 min 时积累量达到最大, 为 $18.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 90 min 时, 反应过程中产生的亚硝氮完全去除, 总氮去除率达到了 100%. SCOD 在 0 ~ 1 h 内由初始的 $402.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 $248.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但在 1 ~ 2 h 内仅有 $25.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降, 这可能是由于反应初期, 反硝化细菌过量吸附碳源^[11]且优先利用易被降解的有机物进行反硝化脱氮, 所以 SCOD 的降幅达到 $154.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但是, 由于反硝化细菌利用发酵液中难降解的有机物效率很低^[19], 所以 1 ~ 2 h 内的 SCOD 降幅平缓. 经过 7 d 的培养, 包埋填料的比反硝化速率达到了 $5.37 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 大于活性污泥

的 $5.33 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 初始的比反硝化速率, 标志着包埋填料活性恢复成功。

2.2 碳氮比对反硝化包埋填料去除硝酸盐效果的影响

为了探究不同碳氮比对包埋填料的影响, 设置碳氮比分别为 6、8、10、12 的 4 组平行实验^[9,20], 4 个反应器均置于 $80 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的摇床上培养, 控制培养温度为 30°C , pH 为 7.5。实验过程中, 反应器中的硝氮、亚硝氮、SCOD 浓度变化分别如图 2 和图 3 所示。当碳氮比为 6 和 8 时, 0~40 min 内, 由于可利用的有机物较多, 比反硝化速率较高, 分别为 $3.94 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $7.35 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 硝氮浓度迅速下降, 后期由于反应系统中有机物浓度的限制, 造成了部分硝氮剩余和一定程度的亚硝氮积累, 亚硝氮积累率分别为 43.48% 和 30.48%。虽然 60~120 min 时 SCOD 都有剩余, 但发酵液中剩余的有机物不易被细菌高效利用^[20]。当碳氮比为 10 和 12 时, 由于反硝化细菌可利用的碳源充足^[9], 硝氮反应完全且无亚硝氮积累, 其比反硝化速率分别为 $9.57 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $10.94 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 由此可见, 随着碳氮比增大, 比反硝化速率也随之增加。由于外加碳源的使用势必增加水厂的运行成本, 并且碳氮比过大也会造成出水 COD 浓度过大, 造成碳源浪费, 且当 SCOD 为 10 时, 即可保证反硝化填料所需碳源, 为避免碳源过度浪费^[21], 反硝化包埋填料的适宜碳氮比采用 10。

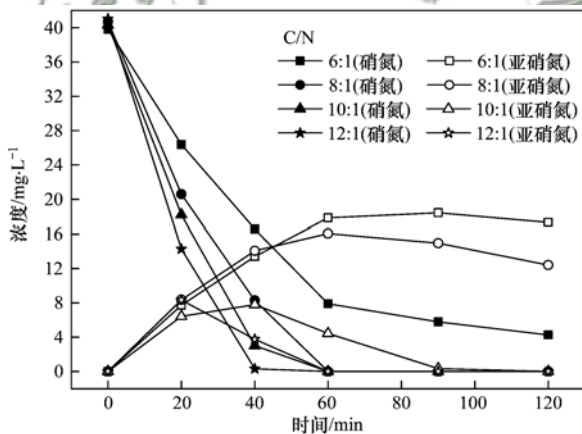


图 2 不同碳氮比时硝氮、亚硝氮浓度变化

Fig. 2 Change of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and $\text{NO}_2^- \text{-N}$ concentration under different C/N ratios

2.3 温度对反硝化包埋填料去除硝酸盐效果的影响

为了探究不同温度对包埋填料的影响, 设置温度分别为 15、20、25、 30°C ^[3,9] 的 4 组平行实验, 控

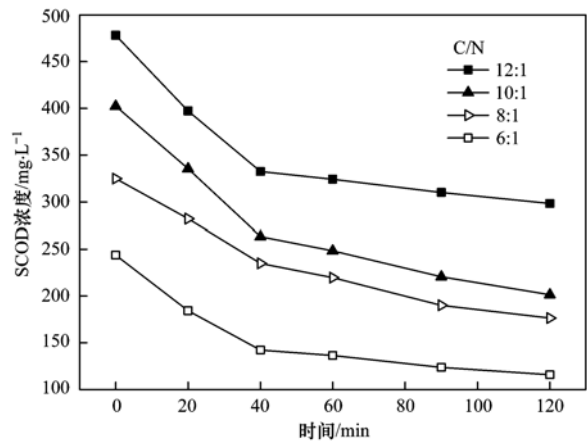


图 3 不同碳氮比时 SCOD 浓度变化

Fig. 3 Change of SCOD concentration under different C/N ratios

制 4 个反应器中的污水的碳氮比为 10, pH 为 7.5, 于 $80 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的摇床上进行培养。反应器中的硝氮、亚硝氮浓度变化如图 4 所示。

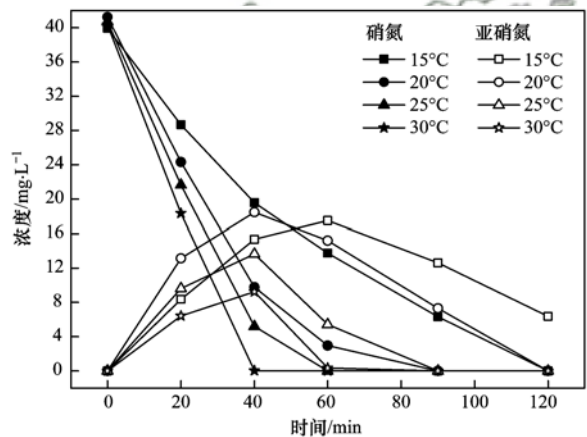


图 4 不同温度下硝氮、亚硝氮浓度变化

Fig. 4 Change of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and $\text{NO}_2^- \text{-N}$ concentration under different temperatures

由图 4 可知, 硝氮的去除率未受到温度降低的影响, 但亚硝氮还原反应受低温影响, 出现明显下降^[22]。15°C 时亚硝氮积累率为 15.96%, 此时填料的比反硝化速率仅为 $4.47 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 但仍高于活性污泥 $2.37 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 的比反硝化速率^[23], 这可能是因为反硝化细菌对污泥发酵液中的碳源利用率要高于甲醇, 且通过固定化包埋技术可以增强细菌抵抗环境温度变化的能力^[9]。分析图 4 可知, 在 20、25、 30°C 条件下, 包埋填料的比反硝化速率分别为 6.03 、 9.40 、 $10.66 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 以实验所在水厂为例, 污水温度最高仅为 26°C , 所以包埋填料的培养温度选定为 25°C 。

2.4 pH 对反硝化包埋填料去除硝酸盐效果的影响

设置 4 组平行实验以探究不同 pH 对包埋填

料的影响, 4 个反应器的 pH 分别为 6.5、7.0、7.5、8.0^[24,25], 控制 4 个反应器中的碳氮比为 10, 温度为 30℃, 将反应器置于 80 r·min⁻¹ 条件下摇床培养. 反应器中硝氮、亚硝氮浓度变化如图 5 所示.

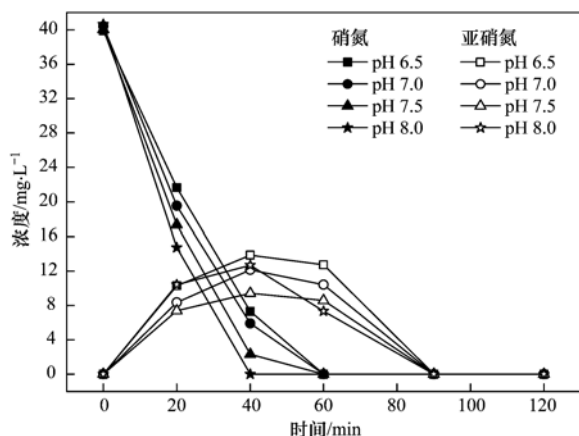


图 5 不同 pH 下硝氮、亚硝氮浓度变化

Fig. 5 Change of NO_3^- -N and NO_2^- -N concentration under different pH

分析图 5 可知, 在 2 h 反应周期内, 包埋填料在 pH 为 6.5~8.0 时, 硝氮和亚硝氮均可完全去除, 但是不同 pH 条件下比反硝化速率不同, 这是因为高 pH 会抑制亚硝酸盐还原酶的活性^[26], 所以当反应器中的 pH 由 6.5 增大至 8.0 时, 亚硝氮的比反硝化速率呈现出逐渐降低的趋势, 分别为 6.79、5.56、4.58、3.92 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 但是, 由于 pH 对硝酸盐还原酶的活性影响不大^[27], 所以图 5 中的硝氮的比反硝化速率变化较小. 根据理论计算, 当反应器中的 pH 由 6.5 增大至 8.0 时, 包埋填料的比反硝化速率亦呈现出逐渐增加的趋势, 分别为 7.23、8.00、8.39、8.87 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 考虑到实验制取的污泥发酵液偏碱性 (9.0 ± 0.5), 且 pH 过高易造成亚硝氮积累^[27], 所以控制包埋填料的最适宜培养 pH 为 8.0.

2.5 包埋填料活性快速提升培养

在 25℃ 条件下, 将效率恢复至初始活性 [比反硝化速率为 5.37 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$] 的 3 组反应器, 置于 80 r·min⁻¹ 的摇床上, 进行活性快速提升培养, 实验过程中控制反应器内的 pH 为 8.0, 碳氮比为 10. 实验初始硝盐氮负荷为 80 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 实验过程中根据出水硝氮和亚硝氮负荷, 梯级增加进水硝氮负荷. 培养过程中的包埋填料活性如图 6 所示, 2~15 d, 细菌处在对数增长期^[28], 比反硝化速率由 15.21 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 增大到 80.15 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$.

当进水硝酸盐氮负荷低于 300 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反应器中的硝氮和亚硝氮均可完全去除, 但是当反应负荷达到 340 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 出水中亚硝氮和硝氮显著升高, 去除率由 100% 下降至 88.2%, 此时的比反硝化速率达到最大, 为 80.17 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 并趋于稳定, 此时包埋填料中的反硝化细菌进入了稳定期^[29].

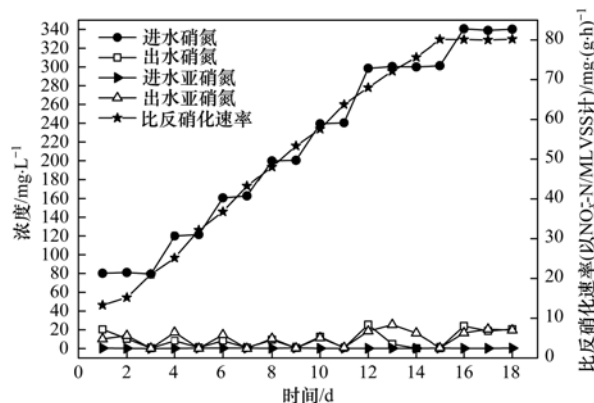


图 6 包埋填料的活性提升

Fig. 6 Increasing efficiency of embedding filler

2.6 包埋填料实物及 SEM 表征结果

图 7(a) 为实验所用的包埋填料的实物图, 填料为外圆中空的圆柱状, 比表面积相对较大, 增加了填料与基质的基础面积, 保证了细菌与基质的完全反应^[30]. 经历了 100 多天的实验, 生物膜没有脱落, 适宜工程应用.

包埋填料在经过 15 d 快速培养后, 不同放大倍数下 SEM 结果如图 7(b)、7(d) 所示. 由图 7(b) 可知, 包埋填料内存在大量的空隙, 即细菌传质代谢的通道, 保证了包埋填料与培养液的传质畅通^[7], 由图 7(c)、7(d) 可知, 细菌在填料内部呈团簇状形式生长良好, 与初始包埋后的填料相比, 活性提升后的网状结构更加致密, 这更加利于提高填料的比反硝化速率.

2.7 包埋填料的多样性指数分析

表 4 为两个样本的 α 多样性指数统计, 从中可知, 两个样本覆盖率为 96%, XF (初始包埋后填料) 有 60 565 条有效序列, XF2 (活性提高后填料) 有 59 834 条有效序列, 表明测序深度已经达到了标准, 基本覆盖了所有物种. 填料经过一段时间的驯化后, ACE 指数和 Chao1 指数分别从 34 965.10、17 460.65 增加到 42 786.59、18 766.93, 表明活性快速提高后的包埋填料多样性增大.

2.8 包埋填料的群落结构分布

包埋填料快速提升培养后菌种比例变化最多的

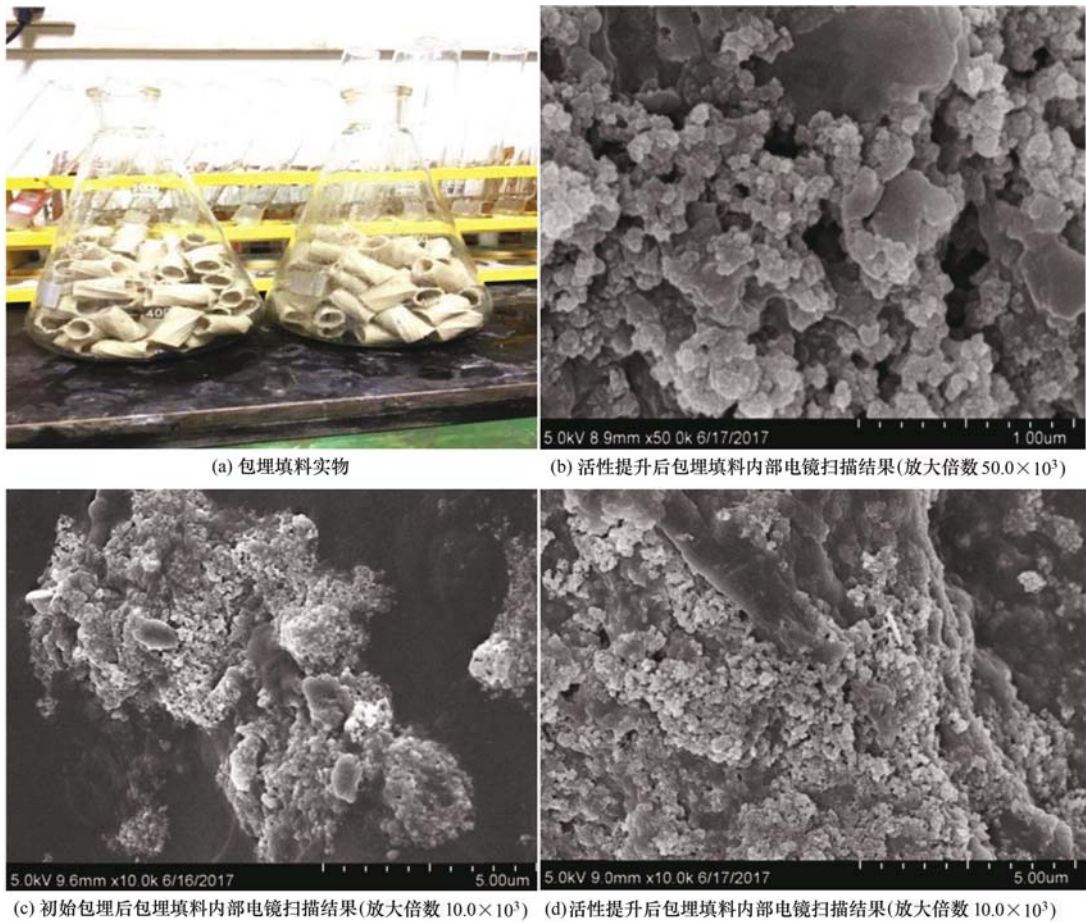


图 7 包埋填料实物及 SEM 表征结果
Fig. 7 Embedded filler material and SEM characterization results

表 4 包埋填料的多样性指数统计

Table 4 The α diversity index of the embedding filler

样品	序列数	OTUs	Shannon 指数	ACE 指数	Chao1 指数	覆盖度	Simpson 指数
XF	60565	3148	5.14	34 965.10	17 460.65	0.96	0.02
XF2	59834	2939	4.40	42 786.59	18 766.93	0.96	0.05

细菌名称和比例如表 5 所示,包埋填料在属水平下的样本群落结构分布如图 8 所示,图 8 显示,经历活性快速提升培养阶段后, *Thauera* 和 *Thermomonas* 成为包埋填料的优势菌种. *Thauera* 所占比例由活性快速提升培养前的 0.01% 增长到了活性快速提升培养后的 24.27%. *Thauera* 是 β -Proteobacteria 纲下的一类具有反硝化能力的革兰氏阴性细菌,且具有降解多种芳香族污染物能力^[31~34]. *Thermomonas* 菌由活性快速提升培养前的 5.7% 增长到了活性快速提升培养后的 8.23%, *Thermomonas* 是一类属于变形菌门的反硝化细菌^[35~37]. 活性快速提高培养过程中, *Thauera* 和 *Thermomonas* 表现出了很强的增殖能力,反硝化包埋填料的培养周期比孟婷等^[9] 的实验明显缩短,且比反硝化速率高达 80.17

$\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 明显优于曾金平等^[10] 的研究. *Thauera* 优势菌属的快速增值的能力和高比例保证了反硝化包埋填料的高效脱氮率. 包埋填料的群落结构分布中还存在 *Alcaligenes* 异养硝化菌,其所占比例为 1.37%,由此进一步证明图 1 中存在异养硝化过程,由此导致氨氮浓度有所降低.

表 5 包埋填料内优势菌属

Table 5 Dominant genera of the embedding filler

细菌名称	XF/%	XF2/%
<i>Thauera</i>	0.01	24.27
unclassified	13.99	5.44
<i>Saccharibacteria_genera_incertae_sedis</i>	17.81	0.07
<i>Thermomonas</i>	5.7	8.23
<i>Tetrasphaera</i>	5.21	0.02

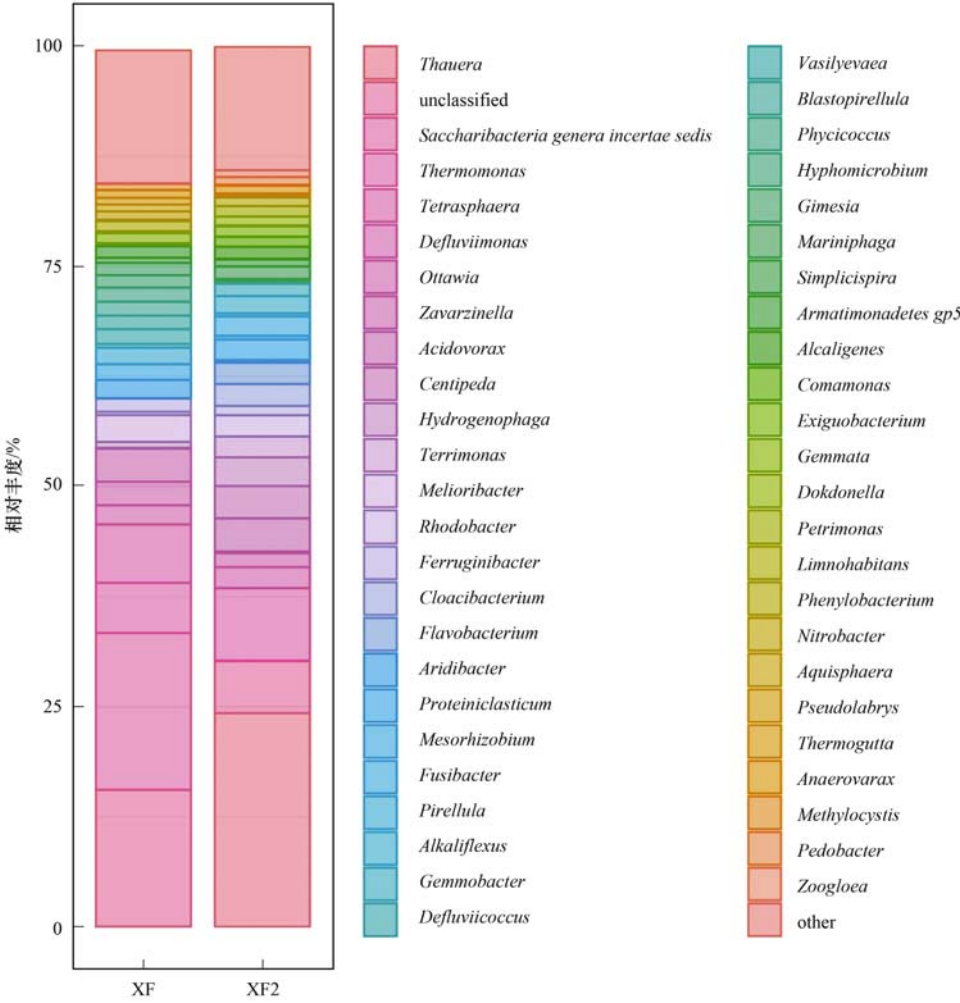


图8 genus 水平 XF 和 XF2 样本群落结构分布

Fig. 8 Distribution barplots of XF and XF2 microbial communities at the genus level

3 结论

(1)包埋后的水厂反硝化池污泥，在温度为30℃，碳氮比为10，pH 为7.5 条件下经过7 d 的培养后，比反硝化速率即可恢复至 $5.37\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 活性。

(2)包埋填料的最优培养条件：碳氮比为10，温度为25℃，pH 为8.0，在此条件下，经过15 d 的驯化，其比反硝化速率可由最初的 $5.37\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 增大到 $80.17\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ，并稳定运行。

(3)SEM 显示在填料内部细菌呈团簇状生长良好，并且存在大量细菌传质代谢通道。

(4)高通量测序的结果显示填料在活性提高后，反硝化菌种增多、比例增大，*Thauera* 高比例的优势菌属保证了填料反硝化脱氮的高效性。

参考文献：

[1] Xia S Q, Li J Y, Wang R C. Nitrogen removal performance and

microbial community structure dynamics response to carbon nitrogen ratio in a compact suspended carrier biofilm reactor[J]. Ecological Engineering, 2008, **32**(3): 256-262.

[2] 王弘宇, 马放, 苏俊峰, 等. 不同碳源和碳氮比对一株好氧反硝化细菌脱氮性能的影响[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(6): 968-972.

Wang H Y, Ma F, Su J F, *et al.* Influence of carbon source and C/N ratio on nitrogen removal of aerobic denitrifier[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, **27**(6): 968-972.

[3] 马娟, 彭永臻, 王丽, 等. 温度对反硝化过程的影响以及 pH 值变化规律[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(11): 1004-1008.

Ma J, Peng Y Z, Wang L, *et al.* Effect of temperature on denitrification and profiles of pH during the process[J]. China Environmental Science, 2008, **28**(11): 1004-1008.

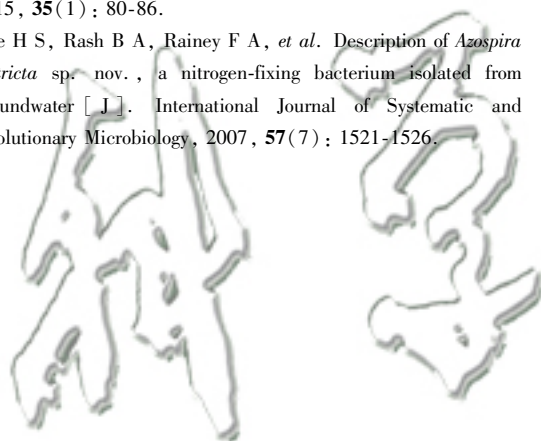
[4] Glass C, Silverstein J. Denitrification kinetics of high nitrate concentration water: pH effect on inhibition and nitrite accumulation[J]. Water Research, 1998, **32**(3): 831-839.

[5] Gómez M A, Hontoria E, González-López J. Effect of dissolved oxygen concentration on nitrate removal from groundwater using a denitrifying submerged filter[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, **90**(3): 267-278.

[6] 欧阳科, 刘俊新. 膜生物反应器与传统活性污泥反应器内生

- 物群落特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 499-503.
- Ouyang K, Liu J X. Analysis of characteristics of microbial communities in membrane bioreactor and conventional activated sludge process[J]. Environmental Science, 2009, **30**(2): 499-503.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 孟婷, 杨宏. 高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3339-3346.
- Meng T, Yang H. Analysis of high-efficiency denitrifying bacteria and embedding filler performance and microflora[J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3339-3346.
- [10] 曾金平, 陈光辉, 李军, 等. 不同初始 pH 值下反硝化包埋颗粒的动力学特性[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(2): 526-533.
- Zeng J P, Chen G H, Li J, *et al.* Kinetic characteristics of immobilized denitrification granules under different initial pH[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(2): 526-533.
- [11] 曹相生, 钱栋, 孟雪征. 乙酸钠为碳源时的污水反硝化规律研究[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(21): 76-79.
- Cao X S, Qian D, Meng X Z. Characteristics of denitrification process with sodium acetate as sole carbon source[J]. China Water & Wastewater, 2011, **27**(21): 76-79.
- [12] 王丽丽, 赵林, 谭欣, 等. 不同碳源及其碳氮比对反硝化过程的影响[J]. 环境保护科学, 2004, **30**(1): 15-18.
- Wang L L, Zhao L, Tan X, *et al.* Influence of different carbon source and ratio of carbon and nitrogen for water denitrification[J]. Environmental Protection Science, 2004, **30**(1): 15-18.
- [13] Gao Y Q, Peng Y Z, Zhang J Y, *et al.* Biological sludge reduction and enhanced nutrient removal in a pilot-scale system with 2-step sludge alkaline fermentation and A²O process[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(5): 4091-4097.
- [14] 付强. 膜生物反应器剩余污泥气浮浓缩技术应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Toward understanding the mechanism of improving the production of volatile fatty acids from activated sludge at pH 10.0[J]. Water Research, 2008, **42**(18): 4637-4644.
- [18] 司文攻, 吕志刚, 许超. 耐受高浓度氨氮异养硝化菌的筛选及其脱氮条件优化[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3448-3454.
- Si W G, Lü Z G, Xu C. Isolation of heterotrophic nitrifiers which can tolerate high concentration of ammonia-nitrogen and the optimization of their nitrogen removal efficiency in wastewater[J]. Environmental Science, 2011, **32**(11): 3448-3454.
- [19] 王淑莹, 操沈彬, 杜睿, 等. 污泥发酵液为碳源的反硝化过程亚硝酸盐积累[J]. 北京工业大学学报, 2014, **40**(5): 743-750.
- Wang S Y, Cao S B, Du R, *et al.* Nitrite Accumulation during the denitrification process with sludge fermentation liquid as carbon source[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, **40**(5): 743-750.
- [20] 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.
- [21] 阎宁, 金雪标, 张俊清. 甲醇与葡萄糖为碳源在反硝化过程中的比较[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2002, **31**(3): 41-44.
- Yan N, Jin X B, Zhang J Q. A comparison between the processes of denitrification with glucose and methanol as carbon source[J]. Journal of Shanghai Teachers University (Natural Sciences), 2002, **31**(3): 41-44.
- [22] 孙洪伟, 王淑莹, 王希明, 等. 低温 SBR 反硝化过程亚硝酸盐积累试验研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3619-3623.
- Sun H W, Wang S Y, Wang X M, *et al.* Nitrite accumulation during the denitrification process in SBR at low temperature[J]. Environmental Science, 2009, **30**(12): 3619-3623.
- [23] 王淑莹, 殷芳芳, 侯红勋, 等. 以甲醇作为外碳源的生物反硝化[J]. 北京工业大学学报, 2009, **35**(11): 1521-1526.
- Wang S Y, Yin F F, Hou H X, *et al.* Biological denitrification with methanol as external carbon source[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, **35**(11): 1521-1526.
- [24] Baumann B, van der Meer J R, Snozzi M, *et al.* Inhibition of denitrification activity but not of mRNA induction in paracoccus denitrificans by nitrite at a suboptimal pH[J]. Antonie van Leeuwenhoek, 1997, **72**(3): 183-189.
- [25] 徐亚同. pH 值、温度对反硝化的影响[J]. 中国环境科学, 1994, **14**(4): 308-313.
- Xu Y T. The influence of pH values and temperature on denitrification[J]. China Environmental Science, 1994, **14**(4): 308-313.
- [26] 何岳兰, 王淑莹, 李夕耀, 等. 不同剩余污泥发酵液对 NO_x⁻ 还原的影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(10): 2964-2971.
- He Y L, Wang S Y, Li X Y, *et al.* Effect of different waste activated sludge fermentation supernatants on NO_x⁻ reduction process[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(10): 2964-2971.
- [27] 杨俊杰, 张秋. 生物脱氮技术[J]. 发酵科技通讯, 2007, **36**(2): 32-34.
- [28] 李卫芬, 傅罗琴, 邓斌, 等. 1 株好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2403-2408.
- Li W F, Fu L Q, Deng B, *et al.* Identification and denitrification

- characteristics of an aerobic denitrifier [J]. Environmental Science, 2011, **32**(8): 2403-2408.
- [29] 孟婷, 杨宏. 高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3816-3822.
- Meng T, Yang H. Rapid culture, microbial community structure, and diversity of high-efficiency denitrifying bacteria [J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3816-3822.
- [30] 杨宏, 孟婷, 姚仁达, 等. 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.
- [31] 毛跃建. 废水处理系统中重要功能类群 *Thauera* 属种群结构与功能的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [32] 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 等. 1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 809-814.
- Tan W B, Ma X D, Huang C, *et al.* Isolation, identification and metabolic chaeacteeistics of a heteeoteophilic deniteifying sulfue bacteeial steain [J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 809-814.
- [33] 李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 等. 序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 342-349.
- Li W H, Sun Y J, Liu Z L, *et al.* Analysis on diversity of denitrifying microorganisms in sequential batch bioreactor landfill [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 342-349.
- [34] 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.
- [35] 常玉梅, 杨琦, 郝春博, 等. 城市污水厂活性污泥强化自养反硝化菌研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1210-1216.
- Chang Y M, Yang Q, Hao C B, *et al.* Experimental study of autotrophic denitrification bacteria through bioaugmentation of activated sludge from municipal wastewater plant [J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 1210-1216.
- [36] 张楠, 初里冰, 丁鹏元, 等. A/O 生物膜法强化处理石化废水及生物膜种群结构研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 80-86.
- Zhang N, Chu L B, Ding P Y, *et al.* Enhanced treatment of petrochemical wastewater by using A/O biofilm reactor and analysis of biofilm community [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(1): 80-86.
- [37] Bae H S, Rash B A, Rainey F A, *et al.* Description of *Azospira restricta* sp. nov., a nitrogen-fixing bacterium isolated from groundwater [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2007, **57**(7): 1521-1526.



CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM _{2.5} , PM ₁ and Their Carbonaceous Components in Beijing	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM _{2.5} in the Northern Suburb of Nanjing in Spring	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO _x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ¹⁵ N and ¹⁸ O Isotope Technique	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamnox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A ² /O-BAF at Low Temperatures	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O ₃ -BAC and Analysis of Consortium Structure	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH ₃ and N ₂ O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(Comammox <i>Nitrospira</i>) in a Neutral Paddy Soil	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China: Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17 β -estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Lincomycin Mycelia Dreg with Manure	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)