

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

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

长三角典型站点冬季大气 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 污染特征	康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)
南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用	于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)
常州夏冬季 $PM_{2.5}$ 中无机组分昼夜变化特征与来源解析	刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)
天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的元素特征	王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)
北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价	张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)
山西省武乡县城大气 $PM_{2.5}$ 痕量重金属的生态和健康风险分析	郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)
隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征	李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)
河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征	王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)
城市道路行道树池裸地扬尘排放特征	李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)
DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响	楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)
南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律	黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)
广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险	樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)
西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源	张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)
太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程	李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)
海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价	曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)
天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响	许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)
太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析	查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)
春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性	李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)
不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素	周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)
水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)
深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替	商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 刘珍芳, 刘彤彤 (1141)
太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素	薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)
分层型水源水库沉积物需氧量特性	苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)
污水氮浓度和 NH_4^+ / NO_3^- 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)
水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响	周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)
化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除	菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)
铜铁氧体法处理模拟染料废水	韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)
草酸根对 α -FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验	苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)
生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性	邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)
铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性	郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)
PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能	刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)
二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用	马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)
一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制	李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)
中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征	闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)
硝化耦合 CANON 的铁锰氮生物净化工艺启动与运行	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)
纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)
$DO/NH_4^+ - N$ 实现短程硝化过程中生物膜特性	赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)
AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响	成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)
有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响	李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)
中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性	周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)
硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响	吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)
磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响	宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)
好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分	杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)
环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响	戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)
CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析	邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)
磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响	王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)
甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征	薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)
城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律	徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀臻, 郭明月 (1365)
氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落	严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)
近 30 年干草耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素	江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)
中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性	王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)
滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系	解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)
青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价	周雯雯, 李军, 胡健, 李兆洲 (1413)
基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析	卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)
铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用	费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)
我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征	王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)
《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293)	

CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析

邢金良^{1,2}, 张岩^{1*}, 陈昌明¹, 张博康¹, 郭威¹, 马翔山¹

(1. 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; 2. 冶金工业规划研究院, 北京 100711)

摘要: 本研究采用具有氨氮富集分离特性的阳离子交换膜-超滤(CEM-UF)组合膜与硝化/反硝化结合处理低 C/N 废水, 考察该系统不同流量比下低 C/N 废水的硝化、反硝化脱氮特性, 并通过对硝化、反硝化活性污泥进行 16S rDNA 高通量测序, 分析功能微生物群落结构特征。结果表明, 系统进水 TN 为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD/TN 为 2.65 下, 各流量比下硝化均有较好效果, 平均氨氮去除率为 98.7%, 流量比值由 1:2 上升到 1:6 过程中, 反硝化 $m(\text{COD})/m(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 随之升高, 1:6 时平均硝氮去除率达到最高, 为 86.28%, 系统总氮去除率由 22.56% 上升到 46.8%。Illumina 高通量测序结果表明, 硝化污泥中可以固氮的 Proteobacteria 菌门占 30.9%, 重要的亚硝酸盐氧化菌 Nitrospirae 菌门占 3.06%, 属水平上检测到氨氧化菌(AOB) *Nitrosomonas* 和 *Nitrosospira*, 亚硝酸盐氧化菌(NO) *Nitrospira* 和 *Nitrobacter*, AOB 与 NOB 菌比例较高, 与硝化反应器中较好的硝化效果相一致。反硝化污泥中 Proteobacteria 菌门占主导地位(53.13%), 其次是 Bacteroidetes 菌门(10.93%), 在属的水平上检测到 *Dechloromonas*, *Thauera*, *Castellaniella*, *Alicyclophilus*, *Azospira*, *Comamonas*, *Caldilinea* 和 *Saccharibacteria* 多种具有反硝化脱氮作用的相关菌属, 反硝化菌所占比例为 25.91%, 反硝化污泥中具有反硝化功能的微生物丰富, 反硝化效果良好。

关键词: 低 C/N 废水; 氨氮富集; 流量比; 高通量测序

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1342-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201707018

Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System

XING Jin-liang^{1,2}, ZHANG Yan^{1*}, CHEN Chang-ming¹, ZHANG Bo-kang¹, GUO Wei¹, MA Xiang-shan¹

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. China Metallurgical Industry Planning and Research Institute, Beijing 100711, China)

Abstract: In this study, a CEM-UF composite membrane with ammonia nitrogen enrichment and separation characteristics was combined with nitrification/denitrification to treat low C/N wastewater. The denitrification characteristics of low C/N wastewater at different flow ratios were investigated, and the structural characteristics of functional microbial communities in nitrifying and denitrifying activated sludge were analyzed by 16S rDNA high-throughput sequencing. The results showed that influent TN was $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD/TN was 2.65, the nitrification effect of each flow rate was good, and the average ammonia nitrogen removal rate was 98.7%. When the flow ratio increased from 1:2 to 1:6, the $m(\text{COD})/m(\text{NO}_3^- - \text{N})$ of denitrification was increased, and the removal of average nitrate nitrogen reached its highest level at 1:6, which was 86.28%, and the removal of total nitrogen increased from 22.56% to 46.8%. An analysis of Illumina sequencing showed that nitrogen fixing bacteria Proteobacteria accounted for 30.9%, and the important nitrite oxidizing bacteria, Nitrospirae, accounted for 3.06%. At the genus level, *Nitrosomonas* and *Nitrosospira*, belonging to the ammonia oxidizing bacteria (AOB) category and *Nitrospira* and *Nitrobacter*, belonging to the nitrite oxidizing bacteria (NOB) category were detected. The ratio of AOB and NOB bacteria was high, which is consistent with good nitrification in the nitrification reactor. The dominant bacteria in denitrification sludge were Proteobacteria (53.13%), followed by Bacteroidetes (10.93%). A variety of bacteria related to denitrification were detected at the genus level, such as *Dechloromonas*, *Thauera*, *Castellaniella*, *Alicyclophilus*, *Azospira*, *Comamonas*, *Caldilinea*, and *Saccharibacteria*. The proportion of denitrifying bacteria was 25.91% as denitrifying bacteria microbial species were rich in the denitrifying sludge, giving a good denitrification effect.

Key words: low C/N wastewater; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ enrichment; flow ratio; high throughput sequencing

传统生物脱氮工艺具有同时去除有机物和氮, 水力停留时间短, 运行费用低, 处理水量大的优点, 在我国污水处理中广泛应用^[1], 但采用传统的生物脱氮工艺处理低 C/N 废水会存在种间竞争问题及微生物对碳源和氮源间的需求矛盾^[2]。充足的碳源是生物脱氮的关键, 因此, 利用传统的生物脱

氮工艺处理低 C/N 废水时常需要外加有机碳源来提高 C/N 比值以达到反硝化效果。

收稿日期: 2017-07-03; 修订日期: 2017-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478015)

作者简介: 邢金良(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理与资源化利用, E-mail: xingjinliangsl@163.com

* 通信作者, E-mail: yzhang@bjut.edu.cn

离子交换膜是一种具有离子交换性能的高分子材料薄膜,由于结构和功能的不同对不同离子具有选择透过性,这一特性使离子交换膜被广泛应用于水处理过程中,并逐渐被应用于废水处理中. Fukumoto^[3]等将离子交换膜与生物法结合处理养猪废水,在 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的去除方面获得了良好的效果. Park 等^[4]采用离子交换系统结合生物反应器系统(IEBR),有效地应用于同步去除 NH_4^+ 和有机物. 张岩等^[5,6]采用具有富集 NH_4^+ 和截留有机物特性的 CEM-UF 组合膜,考察了电极条件、电流强度、膜出水流量等对 CEM-UF 组合膜的氨氮富集效果和 COD 截留效果. 王修平^[7]利用针对 *amoA* 基因、*nirS* 基因的引物构建克隆文库,对 CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统的脱氮功能微生物群落结构进行研究. 由此可见,将离子交换法与生物法结合应用于废水处理中是可行的,但在处理低 C/N 废水过程中,由于 C/N 较低会影响反硝化效果,为此本实验进行离子交换膜结合硝化/反硝化法充分利用进水有机物达到高效脱氮的研究.

本研究采用 CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统,通过改变反硝化进水流量比以达到提高反硝化进水碳氮比的目的,进而最大效率利用进水有机物,为处理低 C/N 废水提供了新的方法. 分别考察不同流量比下 CEM-UF 组合膜的氨氮分离富集效果,硝化、反硝化脱氮特性,以及不同流量比下系统去除有机物和脱氮的效能,并依托 Illumina 高通量测序平台,对硝化、反硝化活性污泥中的细菌进行测定,弥补了特异性引物构建克隆文库在功能微生物研究过程中存在的缺陷,分析微生物多样性及菌群结构特征,探讨功能微生物与污水处理效果的相关关系,以期 CEM-UF 组合膜在低 C/N 废水处理中的应用和硝化/反硝化工艺实际运行提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置

CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统如图 1 所示,系统包括三部分,分别为氨氮分离器、硝化反应器和反硝化反应器. 氨氮分离器中,板式 CEM-UF 组合膜^[8]竖直放置于两电极板间,阳离子交换膜与阳极相对,超滤膜与阴极相对,两电极板连接直流电源.

原水通过蠕动泵进入氨氮分离器,水在蠕动泵的抽吸作用下通过超滤膜进入组合膜内,氨氮分离器中的 NH_4^+ 离子在电场力作用下透过具有一价阳离子选择透过性的阳离子交换膜迁移至组合膜内,在组合膜内形成高浓度的氨氮浓缩液;组合膜出水通过蠕动泵进入硝化反应器中,在硝化反应器中进行硝化反应;硝化出水与分离器出水按比例进入反硝化反应器中进行反硝化脱氮. 二沉池中的污泥通过污泥回流泵分别回流至硝化、反硝化反应器中.

CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统接种污泥取自北京某污水处理厂 A^2/O 工艺二沉池回流污泥,在硝化反应器与反硝化反应器中通过人工配水单独培养,出水水质稳定后进行系统的连接运行.

1.2 实验用水

实验用水采用人工配水模拟低 C/N 生活污水,水质情况如表 1 所示,进水平均 C/N 为 2.65.

表 1 人工配水成分

Table 1 Composition of artificial water

项目	试剂	投加量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
COD	可溶性淀粉(分析纯)	130.9 ~ 183.6	161.68
TN	NH_4HCO_3	56.34 ~ 67.7	60.98

1.3 运行参数及运行工况

氨氮分离器中电流强度为 0.25A、组合膜出水流量为 $4.8\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 、抽停比为 8:5. 硝化反应

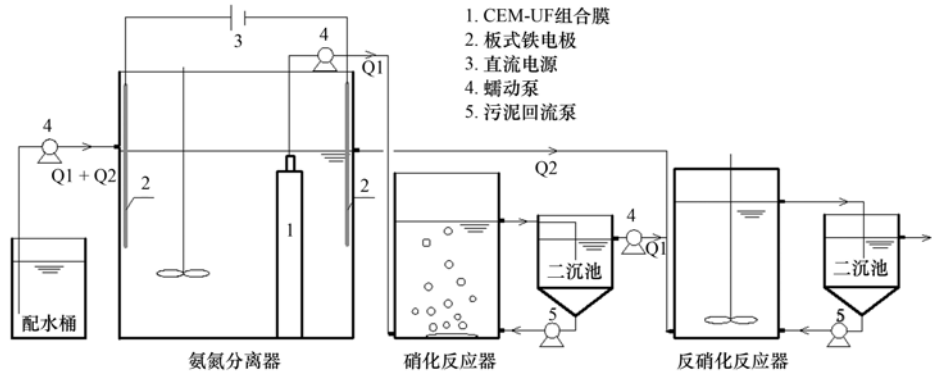


图 1 CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统

Fig. 1 CEM-UF combined membrane and nitrifying/denitrifying bioreactor

器中溶解氧浓度为 $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 为 7.0 ± 0.5 , 水力停留时间 8 h. 反硝化反应器中溶解氧浓度为 $0.2 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 为 7.5 ± 0.2 , 水力停留时间 6 h.

反硝化进水流量比为硝化反应器出水进入反硝

化反应器的流量(Q_1):氨氮分离器出水进入反硝化反应器的流量(Q_2), 系统的进水流量为($Q_1 + Q_2$). 根据反硝化进水流量比的变化将运行分为 4 个工况, 实验运行工况如表 2 所示, 每个工况初始条件相同.

表 2 实验运行工况表

Table 2 Experimental design

运行工况	$Q_1/\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$	$Q_2/\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$	$Q_1:Q_2$	$Q_1 + Q_2/\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$	运行时间/d
工况 I	3	6	1:2	9	20
工况 II	3	9	1:3	12	20
工况 III	3	12	1:4	15	20
工况 IV	3	18	1:6	21	18

1.4 分析方法

COD、氨氮、硝氮和亚硝氮的测定采用标准方法^[9]. 采用 16Sr DNA 高通量测序方法分析微生物种群结构, 委托生工生物(中国,上海)进行测序.

氨氮富集率:

$$\eta = [(c_2 - c_1)/c_1] \times 100\%$$

式中, η 为 NH_4^+ -N 富集率(%), c_2 为 IEM-UF 组合膜出水的 NH_4^+ -N 浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), c_1 为氨氮分离器中的 NH_4^+ -N 浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

2 结果与讨论

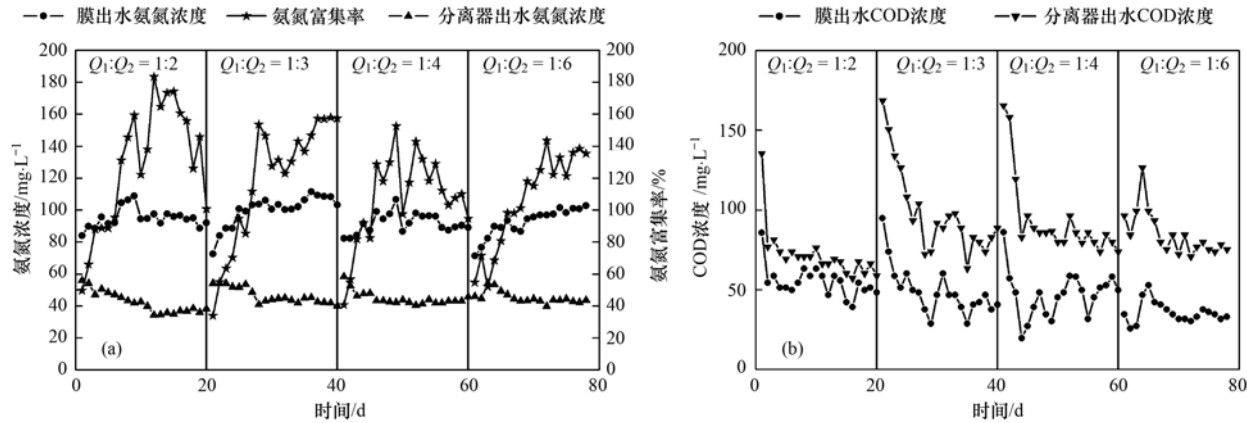
2.1 不同流量比下氮和有机物在各反应器中的转化

流量比为 1:2、1:3、1:4、1:6 工况下, 膜出水、分离器出水的氨氮浓度及氨氮富集率变化如图 2 (a) 所示. 膜出水的氨氮浓度在 4 种工况下稳定时膜出水平均氨氮浓度分别为 94.6、104.9、92.4 和 $98.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 分离器出水平均氨氮浓度分别为 38、43.1、42.7 和 $43.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 经计算 4 个工况下的氨氮富集率分别为 148.9%、143.3%、122.7% 和

128.8%. 工况 I、II、III 的氨氮富集率逐渐减小, 这可能是由于流量比的增加使得氨氮分离器进水流量增加, 分离器的水力停留时间减小, 氨氮富集率随之降低. 在工况 IV 时, 氨氮富集率小幅度增加, 说明进水流量增加到一定程度时, 水力停留时间不再是制约氨氮富集的重要因素.

4 种工况下膜出水、分离器出水的 COD 浓度变化如图 2 (b) 所示. 4 个工况下分离器出水平均 COD 浓度分别为 67.34、83.11、84.42 和 $79.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 数据表明, 流量比从 1:2 升到 1:3 时, 分离器出水的 COD 浓度上升明显; 流量比从 1:3 升到 1:6 时, 分离器出水的 COD 浓度变化不明显.

硝化进水均来自于组合膜出水, 各工况下的硝化进水流量不变且进水浓度变化不大, 因此流量比的改变对于硝化反应基本无影响. 硝化反应器中氨氮浓度、硝态氮浓度及氨氮去除率变化如图 3 所示. 运行稳定时硝化出水主要以硝酸盐形式存在, 亚硝酸盐浓度很低, 在 $0 \sim 0.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动, 平均值为 $0.083 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 表明硝化作用进行较完



(a)膜出水、分离器出水氨氮浓度及氨氮富集率变化;(b)膜出水、分离器出水 COD 浓度的变化

图 2 氨氮和 COD 在氨氮分离器内的转化

Fig. 2 Transformation of ammonia nitrogen and COD in the system

全. 运行稳定时平均出水氨氮浓度为 $1.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均氨氮去除率为 98.7%.

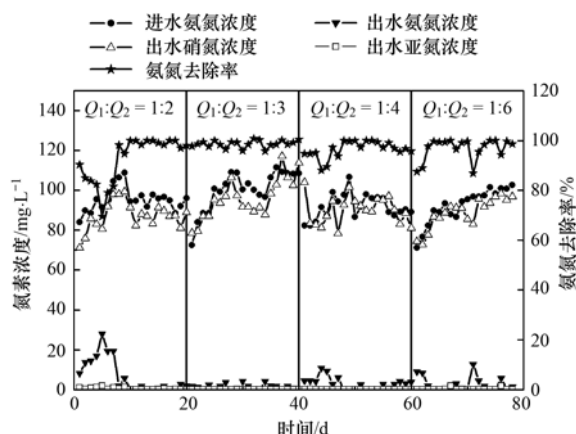


图3 硝化反应器中氨氮、硝态氮浓度及氨氮去除率变化

Fig. 3 Changes of ammonia nitrogen, nitrate nitrogen concentration and ammonia nitrogen removal efficiency in the nitrification reactor

反硝化反应器中硝态氮浓度、硝态氮去除率及 C/N 变化如图 4 所示. 4 个工况下反硝化出水平均硝氮浓度分别为 23.1, 13.93, 7.71 和 $0.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 计算得反硝化进水 $m(\text{COD})/m(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 分别为 1.65、2.72、3.77、5.28, 硝氮去除率随流量比增大而提高, 工况 IV 时硝氮去除率最高为 86.28%. 反硝化反应器中 $m(\text{COD})/m(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 的变化主要依靠流量比变化产生的稀释作用, 反硝化完全进行 C/N 的理论值为 2.86, 实际的反硝化过程所需的 C/N 远高于 2.86^[10,11], 工况 I、II 尚且不满足反硝化 C/N 的理论值, 导致硝氮去除率低下; 随反硝化进水流量比的增加反硝化进水 C/N 增加, 使得硝氮去除率随之提高.

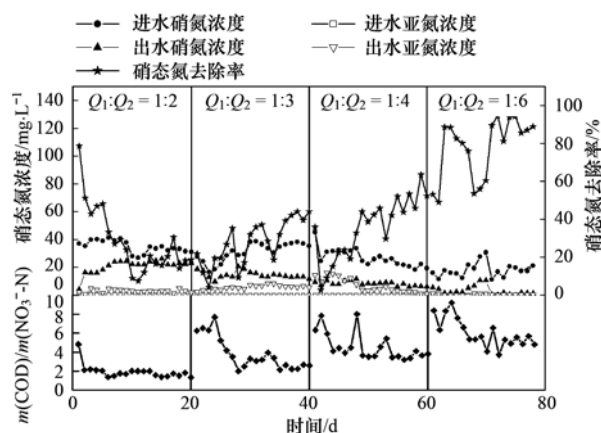


图4 反硝化反应器中硝态氮浓度、硝态氮去除率及 C/N 变化

Fig. 4 Changes in nitrate concentration, nitrate removal efficiency and C/N in the denitrification reactor

2.2 不同流量比下系统总氮和有机物的去除

系统进出水总氮浓度和总氮去除率变化如图 5

所示. 随流量比增加出水总氮浓度逐渐下降, 平均总氮去除率分别为 22.56%、27.59%、38.98% 和 46.8%. 出水总氮来自于两部分: ①氨氮分离器中组合膜富集不完全进入反硝化反应器的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, 该部分氨氮在反硝化反应器中基本不反应; ②反硝化反应器中反应不完全剩余的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$. 系统出水中的氮主要以 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 形式存在, 在实验范围内, 氨氮浓度随流量比增加的趋势小于硝氮浓度降低的趋势, 说明随流量比的增加, 第①部分氨氮的增加量小于第②部分硝氮的去除量, 使得出水总氮浓度随流量比的增加而降低, 总氮去除率增加.

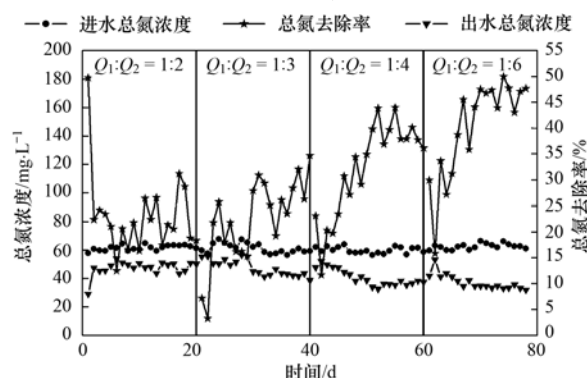


图5 系统进出水总氮浓度和总氮去除率变化

Fig. 5 Changes in total nitrogen concentration and total nitrogen removal rate in the system

系统进出水 COD 浓度和 COD 去除率变化如图 6 所示. 各工况下系统出水的 COD 浓度较为稳定, 均小于 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $27.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》的一级 A 标准. 在实验浓度范围内, CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统对 COD 的去除率均在 80% 以上, 最高可达 93.97%.

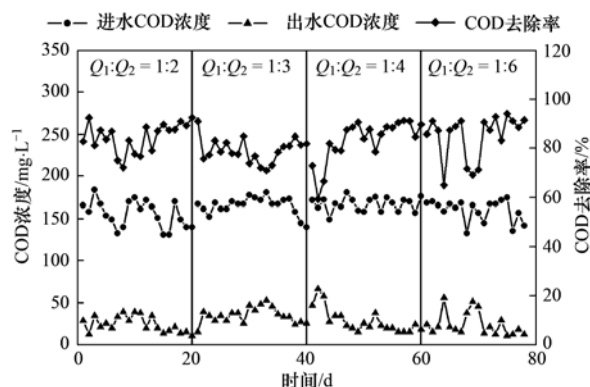


图6 系统进出水 COD 浓度和 COD 去除率变化

Fig. 6 Changes in COD concentration and removal rate of COD in the system

2.3 活性污泥种群结构分析

在总氮去除率最高的流量比 ($Q_1:Q_2 = 1:6$) 下利用 16S rDNA 高通量测序方法分别对硝化反应器

中活性污泥(样本1)菌群结构和反硝化反应器中活性污泥(样本2)菌群结构进行分析. 2个样本的有效序列分别为51 748个和44 517个,按照优化标准对结果进行去杂,得到51 266个和43 915个序列. 根据序列之间的相似性将序列分成不同的操作单元(OTU),得到 OTU 数分别为3 176和2 728,在 97%相似度水平下进行多样性指数分析和群落结构的分类学分析. Chao1 和 Ace 均是用来估计群落中含 OTU 数目的指数,在生态学中常被用来估计物种总

数; Shannon 用来估算样品中微生物多样性指数, Shannon 越大,群落多样性越高; 盖度表示各样品文库的覆盖率,盖度越大,样本中序列没有被测出的概率越低.

硝化、反硝化活性污泥的 α 多样性统计如表 3 所示,表明两反应器中的活性污泥均具有较高的菌群丰度和多样性,同时样本的盖度值较高,说明测序数据量足够大,可以反映样本中绝大多数的微生物信息.

表 3 α 多样性统计

Table 3 The α diversity statistics table				
样本	Chao1 指数	ACE 指数	Shannon 指数	盖度
硝化活性污泥(样本1)	15 738. 81	32 020. 59	4. 7	0. 96
反硝化活性污泥(样本2)	16 133. 49	34 966. 40	3. 97	0. 95

对两个样本进行门水平下的菌种相对丰度分析如图 7、表 4 所示. 与一些早期的关于活性污泥的研究相似,样本1(硝化反应器中活性污泥)中主要菌群有 Bacteroidetes(拟杆菌门 41. 04%)、Proteobacteria(变形菌门 30. 9%)、Acidobacteria(酸杆菌门 10. 24%)和 Nitrospirae(硝化螺旋菌门 3. 06%). 样本2(反硝化反应器中活性污泥)中主要菌群有 Proteobacteria(变形菌门 53. 13%)、Bacteroidetes(拟杆菌门 10. 93%)、Candidatus Saccharibacteria(10. 6%)和 Chloroflexi(绿弯菌门 5. 56%).

表 4 各菌种在菌群中的比例(菌种水平大于 1%)

Table 4 Proportion of bacteria to all micro-flora (the proportion of bacteria higher than 1%)		
菌种	样本 1 相对丰度 /%	样本 2 相对丰度 /%
Bacteroidetes	41. 04	10. 93
Proteobacteria	30. 9	53. 13
Acidobacteria	10. 24	1. 14
Chloroflexi	3. 13	5. 56
Planctomycetes	6. 18	1. 49
Candidatus Saccharibacteria	0. 1	10. 6
Nitrospirae	3. 06	0. 02

其中 Bacteroidetes 可以降解蛋白质、糖类等物质^[12]. Proteobacteria 是细菌中最大的一门,其中包括很多可以固氮的细菌,在降解有机物的同时可以完成系统的脱氮除磷功能^[13]. Acidobacteria 大多数为嗜酸菌,有 8 种不同的类群,广泛存在于自然界的各种环境中,在生态系统中具有重要作用,可去除 COD^[14]. Planctomycetes 为一小门水生细菌,其中一类 Planctomycetes sp. 被称作厌氧氨氧化菌,可

以在缺氧环境下利用亚硝酸盐氧化铵离子生成氮气. Chloroflexi 细菌是兼性厌氧生物,有绿色的色素,在光合作用中不产生氧气且不能固氮,主要用于分解糖类物质和硝化、反硝化脱氮^[15]. Candidatus Saccharibacteria 广泛存在于自然界中,对其生态学和发展史了解较少,在有氧条件下可降解有机物和糖类,厌氧条件下降低硝酸盐含量. 样本 1 中的 Nitrospirae 是一类革兰氏阴性细菌,为重要的亚硝酸盐氧化菌,其中的 Nitrospira(硝化螺旋菌属)为硝化细菌,可将亚硝酸盐氧化成硝酸盐^[16, 17]. 样本 2 中的优势菌门 Proteobacteria 中 84. 68% 为 β -Proteobacteria 纲, β -Proteobacteria 纲中大部分微生物趋于在厌氧环境下通过分解有机物来获取营养物质,被认为与污泥反硝化作用密切相关^[18]. 下文将从属水平更详细地探讨硝化反应器中活性污泥样本和反硝化反应器中活性污泥样本的微生物种群结构.

表 5 中列出了样本 1 在属水平下鉴定出的优势菌、氨氧化菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO₂)及其丰度. 丰度最高的是 Flaviumibacter, 其次是 Terrimonas 和 Sediminibacterium, 三者均属于拟杆菌门,硝化细菌 Nitrosomonas、Nitrospira 和 Nitrobacter 属于变形菌门, Nitrospira 属于硝化螺旋菌门. 有研究表明^[19],氨氧化菌可将氨氧化成亚硝酸盐,主要包含的菌属有:亚硝化单胞菌属(Nitrosomonas)、亚硝化螺菌属(Nitrospira)、亚硝化球菌属(Nitrosococcus)、亚硝化弧菌属(Nitrosovibrio)和亚硝化液菌属(Nitrosolobus),硝酸盐氧化菌将亚硝酸盐进一步氧化成硝酸盐,主要

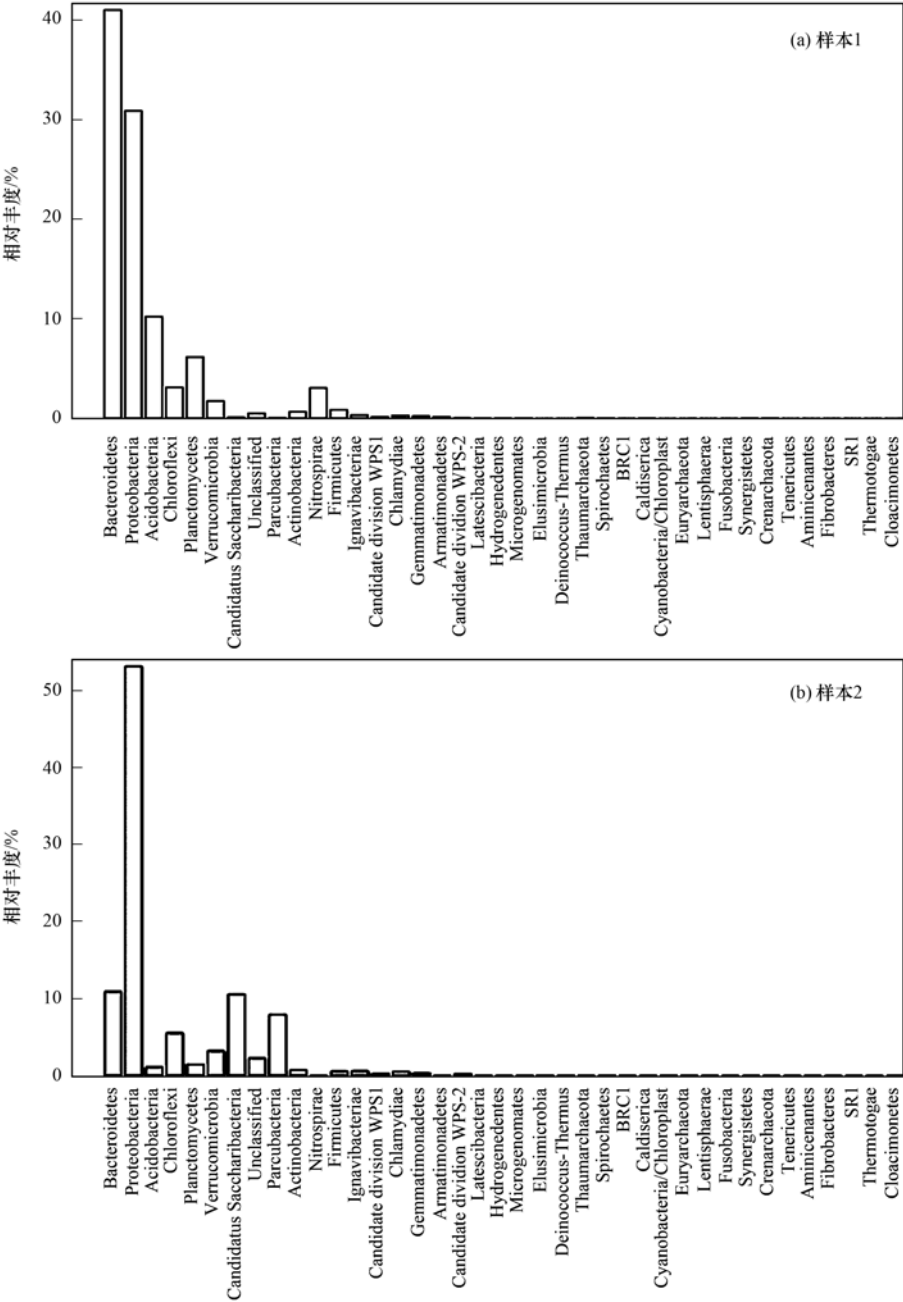


图 7 样本 1、样本 2 在门水平上物种相对丰度柱状图

Fig. 7 Bar graph of sample 1 and sample 2 at phylum level indicating the relative abundance of the bacterial community

包括硝化螺旋菌属 (*Nitrospira*)、硝酸菌属 (*Nitrobacter*) 等. 本研究在属水平上共发现了两种 AOB 细菌 *Nitrosomonas*、*Nitrosospira* 和两种 NOB 细菌 *Nitrospira*、*Nitrobacter*. 具有硝化作用的异养型细菌产碱菌属 (*Alcaligenes*) 及秸秆菌属 (*Arthrobacter*) 均未在污泥样品中检出. 样本 1 中检测到 AOB 菌 (5.1%) 和 NOB 菌 (3.12%) 比例较高, 这与硝化反应器中较好的硝化效果相一致, 同时在微生物层面体现了 CEM-UF 组合膜分离氨氮与有机物, 保证硝化反应器中自养硝化细菌为优势菌种, 使硝化效果

维持在较高水平的优势.

表 5 样本 1 在属水平上鉴定出的优势菌、AOB、NOB 及其丰度
Table 5 Relative abundance of the dominant bacteria and AOB and NOB at the genus levels in sample 1

属	相对丰度/%
<i>Flaviumibacter</i>	18.7
<i>Terrimonas</i>	6.69
<i>Sediminibacterium</i>	5.33
<i>Nitrosomonas</i> (亚硝化单胞菌属)	3.9
<i>Nitrosospira</i> (亚硝化螺旋菌属)	1.2
<i>Nitrospira</i> (硝化螺旋菌属)	3.06
<i>Nitrobacter</i> (硝酸菌属)	0.06

在反硝化反应器活性污泥样本中共检测到微生物 183 个属, 据文献[20]报道反硝化细菌约有 50 多个属, 130 多个种, 本研究发现在属水平上具有反硝化脱氮作用的相关菌属及其相对丰度如表 6 所示.

表 6 样本 2 在属水平上鉴定出的反硝化脱氮作用相关菌属及其丰度

Table 6 Relative abundance of denitrifying bacteria at the genus levels in sample 2

属	相对丰度/%
<i>Dechloromonas</i>	3.48
<i>Thauera</i> (陶厄氏菌属)	3.25
<i>Castellaniella</i>	2.43
<i>Azospira</i> (固氮螺菌属)	0.91
<i>Alicyciphilus</i>	1.38
<i>Comamonas</i> (丛毛单胞菌属)	0.59
<i>Saccharibacteria</i>	10.6
<i>Caldilinea</i>	3.27

反硝化脱氮有关的主要菌属多属于 Proteobacteria 菌门, 这与 Heylen 等^[21]的研究结果一致, 本研究的 Proteobacteria 菌门中所含有的反硝化细菌种类主要有厌氧反硝化菌 *Dechloromonas*、*Thauera*、*Castellaniella*、*Alicyciphilus* 和好氧反硝化菌 *Azospira*、*Comamonas*^[22, 23], 其中 *Dechloromonas* 可以利用有机物提供电子将 NO_3^- 还原成 N_2 ^[24]. *Thauera* 属细菌属于 β -Proteobacteria 纲, 是一类广泛存在于各类型废水处理装置中并具有多种芳香族污染物降解能力的重要功能类群. *Castellaniella* 是一种可以高效地将硝酸盐还原为 NO 、 N_2O 和 N_2 进而降低污水中硝酸盐浓度的细菌^[25]. *Azospira* 可作为电子受体可以还原硝酸盐^[26]. *Alicyciphilus* 以 H_2 作为电子供体进行反硝化作用^[27]. *Caldilinea* 和 *Saccharibacteria* 均可以消耗有机物, 将硝酸盐和亚硝酸盐作为电子受体, 减少硝氮含量^[28, 29]. 反硝化反应器中存在多种具有反硝化功能的微生物, 占全部细菌的 25.91%, 对系统反硝化脱氮有一定的贡献.

3 结论

(1) 采用 CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 人工废水, 硝化过程在各流量比下均进行较完全, 运行稳定时平均出水氨氮浓度为 $1.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均氨氮去除率为 98.7%; 随流量比的增加反硝化进水 $m(\text{COD})/m(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 增加, 硝氮去除率随之增加.

(2) 系统总氮去除率随流量比增加逐渐增加, 流量比从 1:2、1:3、1:4 增加到 1:6 时, 总氮去除率从 22.56% 增加到 46.8%; COD 去除率在各流量比下均在 80% 以上, 最高可达 93.97%.

(3) 硝化反应器中 AOB 菌与 NOB 菌占总菌比例分别为 5.1% 和 3.12%, 这与硝化反应器中较好的硝化效果相一致, 在微生物层面体现了 CEM-UF 组合膜富集氨氮分离有机物的优势. 反硝化反应器活性污泥中在属水平上检测到多种具有反硝化功能的微生物, 反硝化菌所占比例为 25.91%, 对系统反硝化脱氮有一定的贡献.

参考文献:

[1] 彭永臻, 王建华, 陈永志. A^2O -BAF 联合工艺处理低碳氮比生活污水[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(4): 590-595.
Peng Y Z, Wang J H, Chen Y Z. Treating low carbon and nitrogen ratio sewage with an A^2O -BAF system[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(4): 590-595.

[2] 杨高华, 章北平, 杨群, 等. 生活污水脱氮的 A/O/N 工艺和 A/O 工艺对比实验研究[J]. 工业用水与废水, 2012, 43(3): 24-27.
Yang G H, Zhang B P, Yang Q, et al. Comparative research on A/O/N process and A/O process removing nitrogen from domestic sewage[J]. Industrial Water & Wastewater, 2012, 43(3): 24-27.

[3] Fukumoto Y, Haga K. Advanced treatment of swine wastewater by electrodialysis with a tubular ion exchange membrane[J]. Animal Science Journal, 2004, 75(5): 479-485.

[4] Park W, Jang E, Lee M J, et al. Combination of ion exchange system and biological reactors for simultaneous removal of ammonia and organics [J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(4): 1148-1153.

[5] 张岩, 陈敬, 王修平, 等. 新型淹没式组合膜的氨氮富集性能[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3391-3395.
Zhang Y, Chen J, Wang X P, et al. Ammonia nitrogen enrichment with new submerged composite membrane [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7): 3391-3395.

[6] 张岩, 史扬, 张博康, 等. 新型组合膜工艺不同电极条件下的富集分离性能分析[J]. 水处理技术, 2017, 43(1): 40-45.
Zhang Y, Shi Y, Zhang B K, et al. Analysis of the enrichment and separation performance under different electrode conditions in a new composite membrane process [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(1): 40-45.

[7] 王修平. 新型浸没式 IEM-MF 组合膜-O/A 系统脱氮及微生物特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016. 60-70.

[8] 张岩, 刘焕光, 张中, 等. 一种膜组件[P]. 中国专利: CN 201310269398.4, 2015-07-29.

[9] 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.

[10] 张静, 陈洪斌. 低碳源污水的脱氮除磷技术研究进展[J]. 水处理技术, 2014, 40(1): 1-6, 15.
Zhang J, Chen H B. Review on nitrogen and phosphorus removal

- technology for low C/N municipal wastewater treatment [J]. *Technology of Water Treatment*, 2014, **40**(1): 1-6, 15.
- [11] Choi C, Lee J, Lee K, *et al.* The effects on operation conditions of sludge retention time and carbon/nitrogen ratio in an intermittently aerated membrane bioreactor (IAMBR) [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(13): 5397-5401.
- [12] Sly L I, Taghavi M, Fegan M. Phylogenetic heterogeneity within the genus *Herpetosiphon*: transfer of the marine species *Herpetosiphon cohaerens*, *Herpetosiphon nigricans* and *Herpetosiphon persicus* to the genus *Levinella* gen. nov. in the *Flexibacter-Bacteroides-Cytophaga* phylum [J]. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1998, **48**(3): 731-737.
- [13] 王海燕, 周岳溪, 戴欣, 等. 16S rDNA 克隆文库方法分析 MDAT-IAT 同步脱氮除磷系统细菌多样性研究[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(6): 903-911.
- Wang H Y, Zhou Y X, Dai X, *et al.* Bacterial diversity study for the simultaneous nitrogen and phosphorus removal system (MDAT-IAT) by 16S rDNA cloning method[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(6): 903-911.
- [14] 王春香, 田宝玉, 吕睿瑞, 等. 西双版纳地区热带雨林土壤酸杆菌(*Acidobacteria*)群体结构和多样性分析[J]. *微生物学通报*, 2010, **37**(1): 24-29.
- Wang C X, Tian B Y, Lv R R, *et al.* Distribution and diversity of *Acidobacteria* in tropical rain forest soil of Xishuangbanna[J]. *Microbiology China*, 2010, **37**(1): 24-29.
- [15] 乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 等. 玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1531-1539.
- Qiao J T, Guo R B, Yuan X Z, *et al.* Phylogenetic analysis of methanogenic corn stalk degrading microbial communities [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1531-1539.
- [16] Burrell P, Keller J, Blackall L L. Characterisation of the bacterial consortium involved in nitrite oxidation in activated sludge[J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(6): 45-52.
- [17] Lee H W, Lee S Y, Lee J W, *et al.* Molecular characterization of microbial community in nitrate-removing activated sludge[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2002, **41**(2): 85-94.
- [18] Feng C J, Zhang Z J, Wang S M, *et al.* Characterization of microbial community structure in a hybrid biofilm-activated sludge reactor for simultaneous nitrogen and phosphorus removal[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2013, **34**(2S): 489-499.
- [19] Utäker J B, Nes I F. A qualitative evaluation of the published oligonucleotides specific for the 16S rRNA gene sequences of ammonia-oxidizing bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1998, **21**(1): 72-88.
- [20] 肖晶晶, 郭平, 霍炜洁, 等. 反硝化微生物在污水脱氮中的研究及应用进展[J]. *环境科学与技术*, 2009, **32**(12): 97-102.
- Xiao J J, Gou P, Huo W J, *et al.* Application of denitrifying microbes to wastewater denitrification[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **32**(12): 97-102.
- [21] Heylen K, Gevers D, Vanparys B, *et al.* The incidence of *nirS* and *nirK* and their genetic heterogeneity in cultivated denitrifiers [J]. *Environmental Microbiology*, 2006, **8**(11): 2012-2021.
- [22] 方晶晶, 马传明, 刘存富. 反硝化细菌研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(S1): 206-210, 264.
- Fang J J, Ma C M, Liu C F. The advance of study on denitrifying bacteria[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(S1): 206-210, 264.
- [23] 肖可可, 周律, 贺北平, 等. 城市污水 A²/O 移动床生物膜工艺菌群结构分析[J]. *中国给水排水*, 2016, **32**(9): 20-24, 29.
- [24] Coates J D, Chakraborty R, Lack J G, *et al.* Anaerobic benzene oxidation coupled to nitrate reduction in pure culture by two strains of *Dechloromonas* [J]. *Nature*, 2001, **411**(6841): 1039-1043.
- [25] Pang C M, Liu W T. Community structure analysis of reverse osmosis membrane biofilms and the significance of *Rhizobiales* bacteria in biofouling[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(13): 4728-4734.
- [26] Nam J H, Ventura J R S, Yeom I T, *et al.* A novel perchlorate- and nitrate-reducing bacterium, *Azospira* sp. PMJ [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(13): 6055-6068.
- [27] Hao R X, Meng C C, Li J B. An integrated process of three-dimensional biofilm-electrode with sulfur autotrophic denitrification (3DBER-SAD) for wastewater reclamation [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(16): 7339-7348.
- [28] Kragelund C, Thomsen T R, Mielczarek A T, *et al.* Eikelboom's morphotype 0803 in activated sludge belongs to the genus *Caldilinea* in the phylum *Chloroflexi* [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2011, **76**(3): 451-462.
- [29] Kindaichi T, Yamaoka S, Uehara R, *et al.* Phylogenetic diversity and ecophysiology of Candidate phylum Saccharibacteria in activated sludge[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, **92**(6): fiw078.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i>	(990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i>	(997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i>	(1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i>	(1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i>	(1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang	(1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i>	(1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i>	(1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i>	(1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i>	(1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i>	(1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i>	(1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i>	(1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i>	(1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i>	(1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i>	(1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i>	(1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i>	(1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i>	(1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i>	(1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	(1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i>	(1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen	(1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng	(1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocculation-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i>	(1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i>	(1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i>	(1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i>	(1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LU Yu-feng, <i>et al.</i>	(1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i>	(1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i>	(1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i>	(1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i>	(1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i>	(1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i>	(1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i>	(1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i>	(1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i>	(1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i>	(1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i>	(1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i>	(1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i>	(1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i>	(1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua	(1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i>	(1438)