

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按 (403)

我国化学品的风险评价及风险管理 王铁宇,周云桥,李奇锋,吕永龙 (404)

土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用 吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)

中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素 黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)

关中地区冬季PM_{2.5}中碳气溶胶的污染特征及来源解析 田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)

利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分 刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)

南京夏季市区VOCs特征及O₃生成潜势的相关性分析 杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)

北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系 孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)

重庆垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究 段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)

三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征 张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)

长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析 谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)

青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程 孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)

西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估 郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)

坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价 余成,陈爽,张路 (499)

近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征 沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)

舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征 郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄煊芳 (513)

模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究 李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)

中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究 王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)

江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献 韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)

巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征 奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)

合肥城郊典型农田溪流系统沉积物磷形态及释放风险分析 裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)

桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征 朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)

苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态 李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)

洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析 李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)

三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响 江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)

pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响 王辉,孙波,关小红 (588)

EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响 周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)

镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能 王婷,朱春山,胡承志 (602)

微生物对砷的氧化还原竞争 杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)

处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征 曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)

污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应 景明,王磊 (622)

异养硝化-好氧反硝化菌 *Burkholderia* sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析 邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫渊辉 (630)

基于新一代测序技术的A²O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析 田美,刘汉湖,申欣 (638)

1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性 孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)

纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究 舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)

3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性 徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)

合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究 范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)

芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性 吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)

芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能 张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)

季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响 林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)

增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响 陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)

基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征 王幼奇,白一茹,王建宇 (710)

不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制 朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)

紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素 王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)

几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)

河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征 吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶澍,刘文新 (740)

湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响 罗鹏程,李航,王曙光 (750)

溴酸盐对水生生物的急性毒性效应 王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)

自组装哑铃状Fe₃O₄微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解 黄鑫辰,宗刚,刘焯焯,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)

盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N₂O产生的影响 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)

污泥直接干化尾气中恶臭污染物重要性评价:以指标权重评分法为例 丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)

《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)

处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征

曾宪磊^{1,2}, 刘兴国^{2*}, 吴宗凡², 时旭², 陆诗敏²

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

摘要: 厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)是潜流湿地净化污水的重要功能, 目前关于潜流湿地厌氧氨氧化特征还不清楚. 为了解处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化特点, 采用16S rRNA基因克隆文库和实时荧光定量 PCR 技术以及多样性分析方法, 对处理水产养殖污水潜流湿地中 ANAMMOX 菌的结构、多样性和丰度进行了研究分析. 结果表明, 处理水产养殖污水潜流湿地中存在 *Candidatus brocadia* 和 *Candidatus kueningenia* 这 2 类已知的 ANAMMOX 菌和 3 类未知的 ANAMMOX 菌, 其优势种群为 *Candidatus brocadia*; 在不同季节中, 秋季潜流湿地中 ANAMMOX 菌的多样性最高 (H' , 1.21), 春季最低 (H' , 0.64); 在养殖周期内, 潜流湿地中 ANAMMOX 菌的丰度(以鲜重计, 下同)在 $8.0 \times 10^4 \sim 9.4 \times 10^6$ copies·g⁻¹ 之间, 总细菌丰度在 $7.3 \times 10^9 \sim 9.1 \times 10^{10}$ copies·g⁻¹ 之间; 在潜流湿地不同层面以及不同季节中, ANAMMOX 菌的丰度存在着明显的差异, 总细菌丰度则差异不明显, ANAMMOX 菌的丰度在不同层面上的差异没有随时间变化的规律性. 根据潜流湿地中 ANAMMOX 菌的分布特征, 改变养殖污水布水方式和调整湿地结构可以提高潜流湿地的反硝化效果. 该研究为进一步优化潜流湿地结构, 提高净化养殖污水效率提供了依据.

关键词: 潜流湿地; 厌氧氨氧化菌; 菌群结构; 丰度; 多样性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0615-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.02.029

Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland (SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water

ZENG Xian-lei^{1,2}, LIU Xing-guo^{2*}, WU Zong-fan², SHI Xu², LU Shi-min²

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China)

Abstract: Anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) is one of the important functions in waste water treatment by subsurface flow constructed wetland (SSFCW), however, there are few studies on ANAMMOX in SSFCW environment at present. The community characteristics of ANAMMOX in the SSFCW of processing aquaculture waste water were explored in this study. In order to analyze the structure, diversity and abundance of ANAMMOX bacteria, several 16S rRNA clone libraries were constructed and real-time PCR targeting specific 16S rRNA genes together with diversity analysis was adopted. The obtained results showed that the SSFCW identified a total of three unknown clusters and two known clusters including *Candidatus brocadia* and *Candidatus kueningenia*. The dominant cluster was *Candidatus brocadia*. The highest diversity levels of ANAMMOX bacteria occurred in autumn (H' , 1.21), while the lowest in spring (H' , 0.64). The abundance of ANAMMOX bacteria in SSFCW environment ranged from 8.0×10^4 to 9.4×10^6 copies·g⁻¹ of fresh weight and the copy number of total bacterial 16S rRNA genes ranged from 7.3×10^9 to 9.1×10^{10} copies·g⁻¹ of fresh weight during culture cycle. There were significant differences in the ANAMMOX bacteria abundances of different stratum and seasons in SSFCW environment, but the differences in total bacterial abundances were not obvious. In addition, the differences in ANAMMOX bacteria abundances in different stratum and seasons in SSFCW environment were irregular in different culture cycle. According to the distribution characteristics of ANAMMOX bacteria in the wetland, the denitrification effect of SSFCW could be improved by changing the supplying manners of aquaculture wastewater and adjusting the structure of wetland. The research results will provide reference for further optimizing the SSFCW and improving the efficiency of purification.

Key words: subsurface flow constructed wetland; anaerobic ammonium oxidation bacteria; microbial community structure; abundance; diversity

潜流湿地是一种人工构建的高效污水净化湿地, 它利用物理、化学、生物三重协同作用处理污水, 具有显著的环境、生态和经济效益^[1,2]. 目前, 已广泛应用于生活污水、垃圾渗滤液、养殖废水等处理^[3,4]. 湿地中的植物根系可以深入到表层以下 0.6~0.7 m 的基质层中, 并与基质形成透水的交织网络, 拦截和吸附分解污水中的 COD 和氮磷等物

质^[5]. 有研究表明, 在潜流湿地处理污水系统中, 污水中 70% 的氮通过微生物作用去除^[6], 其中厌氧氨

收稿日期: 2015-05-14; 修订日期: 2015-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31372570); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD25B01); 公益性行业(农业)科研专项(201203083)

作者简介: 曾宪磊(1990~), 男, 硕士, 主要研究方向为淡水水域生态修复, E-mail: Arvinxianlei@126.com

* 通讯联系人, E-mail: liuxingguo@fmiri.ac.cn

氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)菌在湿地氮循环中有重要的作用,潜流湿地系统中ANAMMOX菌群对污水中氮的去除率占到总去除率的24%^[7]. 相关研究认为,ANAMMOX广泛存在于海洋、河口、海湾、河流、湖泊、陆地和淡水湿地等生态系统之中^[8],ANAMMOX对区域海洋沉积物微生物氮循环的贡献率为1.0%~67.0%^[9,10],对河口和海湾沉积物微生物氮循环的贡献率为1.0%~42.0%^[11],对河流和湖泊微生物氮循环的贡献率最高可达40.0%~50.0%^[12]. 另外,Long等^[13]实验表明ANAMMOX在土壤氮循环中的贡献率达32.1%~77.9%. Zhu等^[14]研究发现白洋淀湿地中ANAMMOX对微生物氮循环的贡献率为2.4%~35.0%. 以上研究充分说明ANAMMOX在自然生态系统中的重要作用,但由于自然状态下ANAMMOX菌生长缓慢,难以检测,关于ANAMMOX菌的研究进展缓慢. 近年来,随着16S rRNA分析和荧光原位杂交等技术的不断发展,以16S rRNA、*hzo*、*nirS*、*hzs*和细胞色素C等基因克隆文库研究ANAMMOX菌的方法已经成熟^[15],ANAMMOX研究进入新阶段. 水产养殖污水含有较高的氮磷等富营养物质,对养殖环境的污染较大,采用人工湿地净化养殖污水是近年新兴起的技术,但由于相关研究较少,目前对人工湿地的净化养殖污水的机理还了解不足,尤其是缺少针对湿地中ANAMMOX的研究. 为了解处理水产养殖排放污水潜流湿地中的厌氧氨氧化

特征,本研究采用16S rRNA基因克隆文库、实时荧光定量PCR和多样性分析方法,探讨了潜流湿地中ANAMMOX菌的菌群结构、多样性、丰度特征,分析了提高潜流湿地的反硝化作用的方法,旨在为优化潜流湿地结构,提高潜流湿地净化养殖污水效率提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 潜流湿地

选择中国水产科学研究院池塘生态工程研究中心(上海泖港, N30°57'1.89", E121°08'52.21")用于处理养殖排放水的潜流湿地作为研究对象. 该潜流湿地面积1500 m²(宽40 m,长37.5 m),基质采用3级碎石配级,基质厚度70 cm,底部铺设0.5 mm HDPE 塑胶布做防渗处理. 潜流湿地的进、出水区为长1.5 m、粒径50~80 mm的碎石过滤区,中间净化区为长34.5 m的3层基质结构,其中底层基质厚度为30 cm、粒径50~80 mm的碎石层,中间基质为厚度30 cm、粒径20~50 mm的碎石层,上层基质为厚度10 cm、粒径10~20 mm碎石层,湿地的水力坡度0.5%~2%,孔隙率0.30~1.0. 湿地表面种植有美人蕉、鸢尾、菖蒲等植物,种植密度为每平方米4株. 潜流湿地结构如图1所示.

该潜流湿地于每年3月到11月的养殖期间运行,运行基本参数为:水体停留时间0.5~4 d,表面负荷率BOD₈₀~120 kg·(hm²·d)⁻¹.

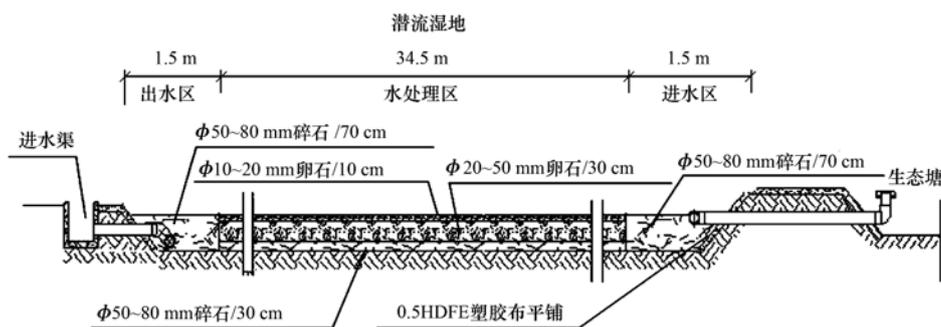


图1 湿地剖面示意

Fig. 1 Cross-section draw of the wetland

1.2 样品采集与处理

实验于2014年3月1日开始至11月15日结束. 分别于春季(3月20日)、夏季(6月20日)、秋季(9月20日)在湿地进出水口的上、中、下层取基质样.

采样位置及数量:在潜流湿地的进水口(W_1)2~3 m处、出水口(W_0)2~3 m处,上层(0~5 cm)、

中层(20~25 cm)、下层(40~45 cm)采集基质样,每次采集基质样6个.

采样及保存方法:基质样采用人工挖掘到一定深度抽取泥水混合样,取样后立即装入无菌塑料袋,排除空气,密封,所有样品用冰盒保存送至实验室冷冻保存.

实验室样品处理:基质样品分析测定前需进行

预处理,处理方法为在 500 mL 无菌塑料广口瓶中加入 200 mL 无菌水,放入半瓶基质样品,使用 $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 摇床振荡 30 min,去除基质,然后将泥水混合物经 $3000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min 或经 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后(泥土较少时)收集土壤,用于 DNA 提取。

1.3 DNA 提取与 PCR 扩增

使用 FastDNA SPIN Kit for Soil(美国 Mpbio 公司)试剂盒提取基质样品(收集的土壤)中的 DNA。DNA 质量经 1% 琼脂糖凝胶电泳检测,共得到 18 个样,分装成 2 份,一份用于菌群结构、多样性的分析,一份用于定量分析。

将每个同批样的 6 个 DNA 样等量混合,采用巢式 PCR 对样品中的 ANAMMOX 菌 16S rRNA 基因进行扩增。第一轮采用引物对 Pla46f-630r,第二轮采用引物对 Amx368f-Amx820r,反应条件参照文献[16]。PCR 反应体系为 Premix Ex Taq 12.5 μL ; Forward primer 1 μL ; Reverse primer 1 μL ; 模板 1 μL ; ddH₂O 9.5 μL 。

1.4 文库构建和测序

对巢式 PCR 扩增样进行琼脂糖凝胶电泳,然后采用特异片段切胶,经 GeneJET Gel Extraction Kit (Thermo) 试剂盒纯化后,用 pEASY-T1 Cloning Kit (全式金) 试剂盒连接,然后转入 Trans1-T1 感受态细胞。导入目的基因的感受态细胞经无氨苄 LB 培养基培养 1 h 后,涂布于含氨苄和蓝白斑检测试剂的固体 LB 平板上,经过夜培养后,每组样品挑取 20 个单克隆。采用菌落 PCR 进行阳性克隆检测,选出 18 个阳性克隆接种于 1 mL 氨苄 LB 液体培养基中,在 37℃ 摇床培养 10 h,送上海 Invitrogen 公司测序。

1.5 菌落结构,多样性分析

所得序列经 DNASTar 软件编辑,去除载体序列后,采用 Mothur 软件划分操作分类单元(OTU)。选出每个 OTU 代表序列,用 NCBI-BLAST 工具比对,搜索相似序列并下载。使用 MEGA 5.05 将相似序列与代表序列进行多重序列对齐,然后用邻接(Neighbor-Joining)法构建系统发育树。用 Mothur 软件计算菌落香农指数(Shannon index)、辛普森指数(Simpson index)、物种丰富度(chao)和覆盖率(coverage rate),对菌落多样性进行分析。

1.6 实时荧光定量 PCR 与数据分析

分别用 ANAMMOX 菌 16S rRNA 的特异性引物 AMX-808-F 和 AMX-1040-R 对 18 个样品中 ANAMMOX 菌的 16S rRNA 基因拷贝数进行定量,用细菌 16S rRNA 通用引物 1055F-1392R 对总微生物

16S rRNA 基因拷贝数进行定量。采用的 PCR 仪器为 iCycler iQ5 (Bio-Rad, California, USA), PCR 反应条件参照文献[16]。

2 结果与分析

2.1 潜流湿地中 ANAMMOX 菌群结构

对春季(3月20日)、夏季(6月20日)、秋季(9月20日)(图表中分别用取样月份 Mar、Jun、Sep 表示)样品进行测序,共得到 69 条有效序列。经 Mothur 3% 差异度划分 OTU,共得到 6 个 OTU。其中,Mar、Jun、Sep 样的 OTU 个数分别为 3、3、4,表明潜流湿地中的 ANAMMOX 菌在不同季节中的 OTU 个数差异不大。在所有 OTU 中,有 2 种 OTU 一直存在于潜流湿地中,为潜流湿地中 ANAMMOX 菌的优势种。其它 OTU 随着时间变化而出现或消失,在 Mar 和 Jun 样中分别发现一个该时期特有的 OTU,在 Sep 样中发现了 2 个该时期特有 OTU,以上 OTU 与已知 ANAMMOX 菌 16S rRNA 基因比对显示亲缘关系较远,可能是具有 ANAMMOX 作用的新菌种(图 2)。

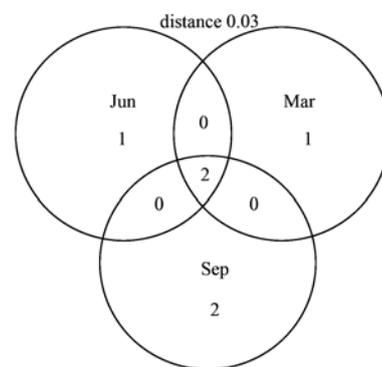


图 2 不同季节潜流湿地 ANAMMOX 菌群结构

Fig. 2 Microbial community structure of ANAMMOX bacteria in SSFCW environment in different seasons

采取系统发育分析方法对潜流湿地中获得的 ANAMMOX 菌 16S rRNA 基因进行比对分析(图 3)。发现潜流湿地中包含 *Candidatus brocadia*、*Candidatus kuenenia* 两类 ANAMMOX 菌。OTU 1# 和 OTU 2# 与 *Candidatus brocadia fulgida* 的 16S rRNA 序列相似度分别高达 98.2% ~ 99.8% 和 97% ~ 98.2%, 属于 *Candidatus brocadia* 属, 是潜流湿地中 ANAMMOX 菌的优势种。其中, OTU 1# 与河北沙河中发现的 ANAMMOX 菌序列相似度达到 98.4% ~ 100%, OTU 2# 与水稻田中发现的 ANAMMOX 菌序列相似度为 97.7% ~ 100% [17]。在图 3 中, OTU 4#

只存在于夏季 Jun 样中,与 *Candidatus kueningenia* 的 16S rRNA 序列相似度高达 98.4% ~ 98.9%,属于 *Candidatus kueningenia* 属,与杭州西溪湿地的 ANAMMOX 菌序列相似度高达 98.9% ~ 99.8%,应该是该时期特有种类。

图 3 中,OTU 3#、OTU 5#、OTU 6#与目前已知的 ANAMMOX 菌 16S rRNA 序列相似度小于 97%,为未知菌种。OTU 5#和 OTU 6#为秋季 Sep 特有的两个种类,与已知 ANAMMOX 菌的亲缘关系较远,

其中 OTU 5#与 *Candidatus kueningenia stuttgartiensis* 的 16S rRNA 序列相似度仅为 93.4% ~ 93.6%。OTU 6#虽与 *Candidatus brocadia caroliniensis* 的 16S rRNA 序列相似度为 93.1% ~ 93.4%,但与钱塘江发现的 ANAMMOX 菌基因序列相似度高达 97.5% ~ 98.4%。OTU 3#为春季 Mar 特有,与 *Candidatus anammoximicrobium* 的 16S rRNA 序列相似度仅为 76.4%,但与菖蒲根际土壤中发现的一些基因序列的相似度高达 99.5%。

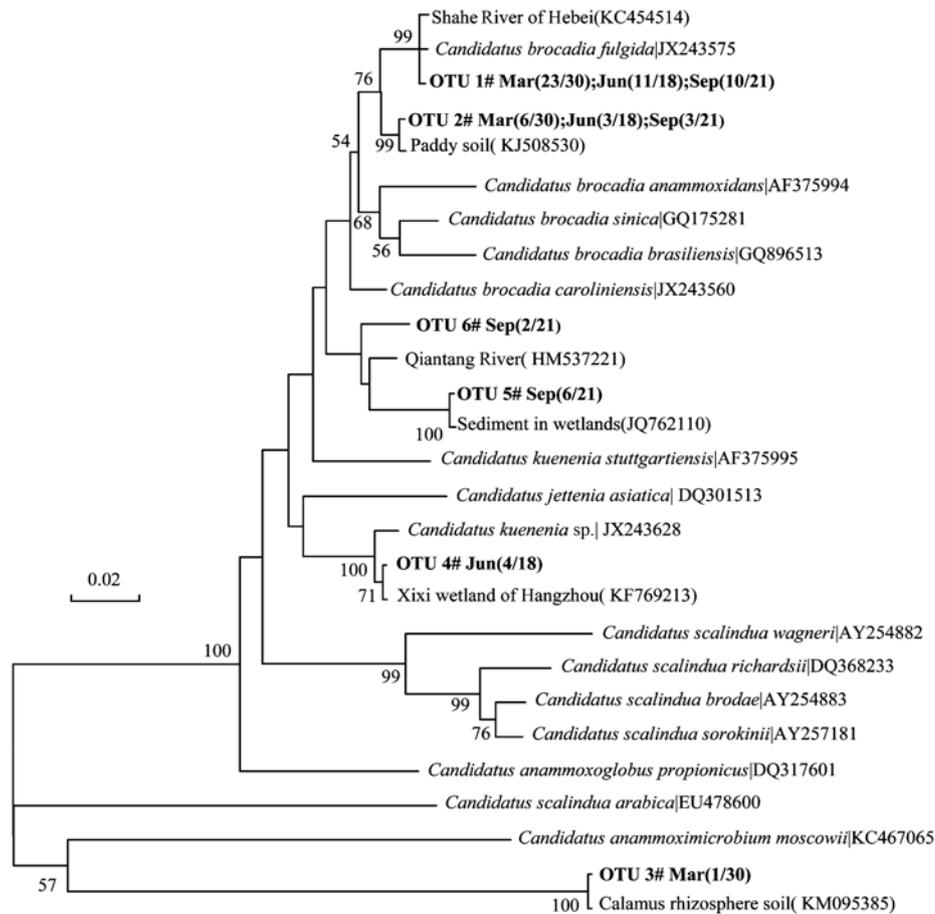


图 3 潜流湿地中 ANAMMOX 菌群序列与相似序列系统发育树

Fig. 3 Phylogenetic tree constructed by ANAMMOX sequences in SSFCW environment and similar sequences

2.2 潜流湿地 ANAMMOX 菌的多样性

采用 Mothur 方法对潜流湿地中 ANAMMOX 菌的多样性进行分析。结果发现,潜流湿地中 ANAMMOX 菌 16S rRNA 基因的克隆覆盖率超过 95% (表 1),表明本克隆文库结果能较好地代表潜流湿地 ANAMMOX

菌的菌群多样性水平。从表 1 中看出,不同季节 ANAMMOX 菌的香农多样性指数 (H') 在秋季 Sep 最高 (H' , 1.21),春季 Mar 最低 (H' , 0.64),说明随着养殖时间延长和水体富营养化程度增大,潜流湿地中的 ANAMMOX 菌多样性水平越来越高。

表 1 潜流湿地中 ANAMMOX 菌的多样性水平

Table 1 Diversity level of ANAMMOX bacteria in SSFCW environment

月份	覆盖率/%	香农指数 (H')	辛普森指数 (D')	物种丰富度
3 (Mar)	96.7	0.64	0.62	3
6 (Jun)	100	0.93	0.42	3
9 (Sep)	100	1.21	0.30	4

2.3 潜流湿地中 ANAMMOX 菌的丰度

使用定量 PCR 法对不同季节的 18 个样品进行分析. 结果表明, 不同季节的样品中均有 ANAMMOX 菌存在, 其丰度(以鲜重计, 下同)范围在 $8.0 \times 10^4 \sim 9.4 \times 10^6 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 且多数样品的丰度超过 $10^6 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$. 在不同季节中, 潜流湿地 ANAMMOX 菌的丰度差异较大, 其中春季 Mar 出水口的下层最低, 夏季 Jun 出水口的下层最大, 二者差异超过 10^2 倍(图 4).

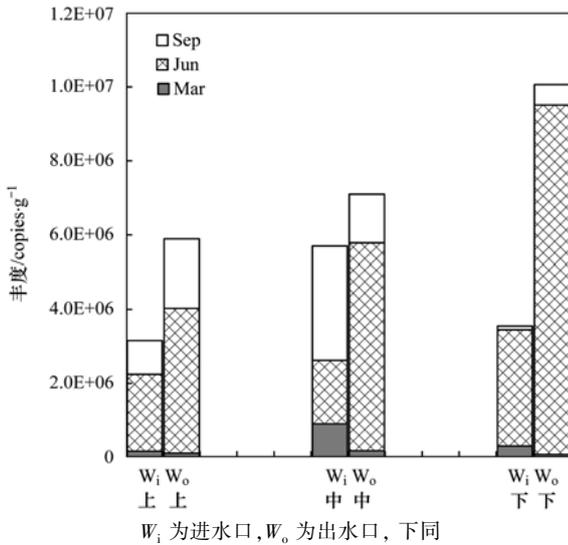


图 4 不同季节不同层面厌氧氨氧化菌丰度对比

Fig. 4 Abundance comparison of ANAMMOX in different stratum and seasons

对不同季节潜流湿地不同层面中 ANAMMOX 菌的丰度分析发现, 在潜流湿地的水平方向, 春季 Mar 进水口的上、中、下层中 ANAMMOX 菌的丰度均高于出水口的上、中、下层. 夏季 Jun 出水口的上、中、下层中 ANAMMOX 菌的丰度均高于进水口的上、中、下. 秋季 Sep 则表现为进水口上层和下层中的 ANAMMOX 菌丰度低于出水口的上层和下层, 进水口中层 ANAMMOX 菌的丰度显著高于出水口中层(图 4).

在潜流湿地的垂直方向, 春季 Mar 和秋季 Sep 均呈现为湿地中间层 ANAMMOX 菌的丰度高于上、下层, 但夏季 Jun 的 ANAMMOX 菌丰度却表现为下层 > 中层 > 上层(图 5).

以上结果表明, 潜流湿地中 ANAMMOX 菌的丰度存在明显的空间差异, 包括水平分布和垂直分布差异, 但这种差异没有随时间变化的规律性(图 4 和图 5).

2.4 潜流湿地中总细菌的丰度

对不同季节潜流湿地不同层面中的总细菌丰度

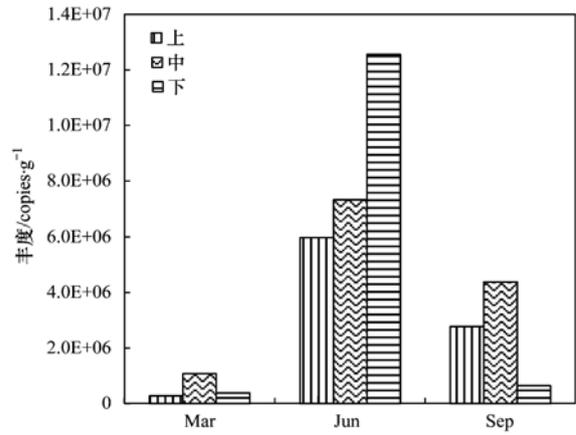


图 5 不同季节厌氧氨氧化菌丰度垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of ANAMMOX abundance in different seasons

进行了测定. 结果显示, 潜流湿地中总细菌的丰度在 $7.3 \times 10^9 \sim 9.1 \times 10^{10} \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 最小值出现在春季 Mar 出水口的上层, 最大值出现在夏季 Jun 出水口上层(图 6). 分析显示, 不同季节潜流湿地不同层面中的总细菌丰度在时空上差异不明显, 潜流湿地中 ANAMMOX 菌占总细菌的比率范围在 $0.74 \times 10^{-5} \% \sim 10.8 \times 10^{-5} \%$ 之间.

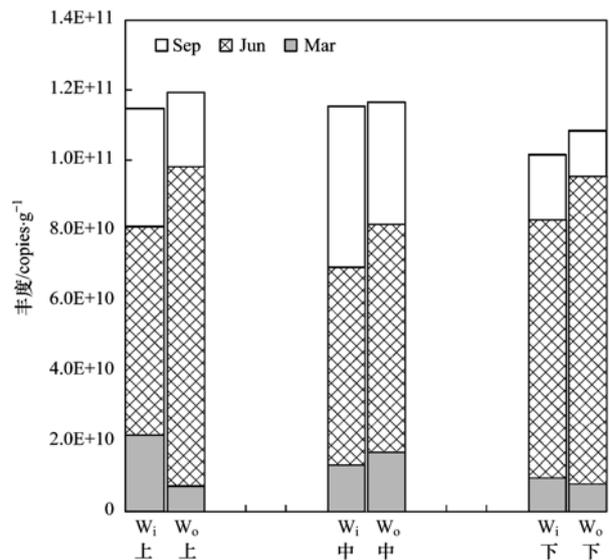


图 6 不同季节不同层面总细菌丰度对比

Fig. 6 Abundance comparison of total bacteria in different stratum and seasons

3 讨论

本研究通过巢式 PCR 技术在处理养殖排放水的潜流湿地中检测出了 2 种已知和 3 类未知 ANAMMOX 菌. 其中 *Candidatus brocadia* 属在潜流湿地中分布最广, 为处理养殖排放水潜流湿地中 ANAMMOX 菌的优势种, 与大多数淡水水域

ANAMMOX 菌优势种一致^[14,18,19]。另据其他研究邻近水域厌氧氨氧化的报道,在长江口、西湖底质中检测出 *Candidatus brocadia*、*Candidatus kueningenia*、*Candidatus scalindua* 这 3 类 ANAMMOX 菌^[11,20],在太湖底质中检测出 *Candidatus brocadia*、*Candidatus kueningenia*、*Candidatus jettenia* 这 3 类 ANAMMOX 菌^[21]。本实验在潜流湿地中共检测出 *Candidatus brocadia* 和 *Candidatus kueningenia* 这 2 类已知 ANAMMOX 菌,虽然与附近水域相比种属较少,但与白洋淀湿地和东江河完全一致^[14,22]。在养殖期间的 3 个季节,潜流湿地中 *Candidatus brocadia* 属一直都存在,说明是潜流湿地 ANAMMOX 菌的优势种。本实验发现 *Candidatus kueningenia* 属只出现在夏季,可能与该期间养殖水环境中的某些因子剧烈变化相关。多数研究认为,盐度是影响 *Scalindua* 属分布的重要因子,但也有研究表明影响 ANAMMOX 菌种群的因素有很多,氮素、碳氮比、温度等因素对 ANAMMOX 菌种群分布都有影响。由于养殖排放水中的污染物以碳氮磷为主,关于碳氮磷等的比例、组成等对 ANAMMOX 的影响作用研究还需进一步深入。

本研究发现处理养殖排放水的潜流湿地中 ANAMMOX 菌的香农多样性指数在不同季节依次表现为秋季(Sep) > 夏季(Jun) > 春季(Mar),说明潜流湿地中 ANAMMOX 菌的多样性随着养殖时间延长和养殖饲料投入增加而增高。王谨^[23]研究发现,秋季典型淡水养殖池塘中厌氧氨氧化细菌的多样性比夏季更高,认为秋季是水产养殖饲料等投入最大的时期,也是水产养殖环境变化的高峰期,为适应外部环境,ANAMMOX 菌可能表现出了更高的多样性。

本研究发现处理养殖排放水潜流湿地 ANAMMOX 菌的丰度范围在 $8.0 \times 10^4 \sim 9.4 \times 10^6$ copies·g⁻¹ 之间,与淡水湿地生态系统中监测到的 ANAMMOX 菌丰度相当^[24~27]。另外,Zhu 等^[16]在研究水稻土壤中 ANAMMOX 菌丰度垂直分布特征时发现,土壤深度为 40~50 cm 处的 ANAMMOX 菌丰度最高,与本研究发现的夏季(Jun)潜流湿地 ANAMMOX 菌的垂直分布特征一致。不同的是处理养殖废水潜流湿地表层(0~5 cm)的 ANAMMOX 菌丰度要低于中层(20~25 cm),这与 Zhu 的研究结果相反,可能与潜流湿地相对较为疏松的基质结构有关。总体看,夏季(Jun)潜流湿地中 ANAMMOX 菌的丰度高于秋季(Sep),但秋季(Sep) ANAMMOX 菌的多样性却高于夏季(Jun)。前面分析认为

ANAMMOX 菌多样性增高是适应外部环境的结果,虽然夏季(Jun)不是饲料等营养物投入的高峰期,但进入夏季后大量投入的富营养物可能会引起 ANAMMOX 菌的大量生长。

反硝化是潜流湿地的重要功能。目前,在处理水产养殖污水的潜流湿地设计中一般只关注湿地的硝化反应和植物作用等,对湿地的反硝化作用重视不足。鉴于 ANAMMOX 在湿地氮循环中具有重要的作用,提高湿地反硝化效果可以极大地提高湿地的净化效率。本研究发现不同季节潜流湿地 ANAMMOX 菌的多样性和丰度差异巨大,这种现象除与养殖排放水的污染浓度不同外,可能还与湿地的结构以及布水方式有关,为了提高湿地的污水净化效率,在夏秋季节适当缩短潜流湿地的水力停留时间或将传统推流布水方式改为垂直流进水有可能会提高湿地的反硝化效果,另外采用多波段的湿地结构可能也是提高反硝化的重要方法。总之,随着对湿地反硝化研究的深入,将会为处理养殖排放水提供更高效的人工湿地技术。

4 结 论

(1) 处理水产养殖污水的潜流湿地中存在 *Candidatus brocadia* 和 *Candidatus kueningenia* 两类厌氧氨氧化菌和 3 类未知的 ANAMMOX。

(2) 处理水产养殖污水的潜流湿地中 ANAMMOX 菌的多样性在不同季节存在差异,且多样性随着养殖时间延长而逐步增大。

(3) 处理养殖排放水的潜流湿地中 ANAMMOX 菌的丰度在水平分布和垂直分布上存在明显差异,但无季节变化规律。

参 考 文 献:

- [1] Chen X, Luo A C, Sato K, et al. An introduction of a multi-soil-layering system: a novel green technology for wastewater treatment in rural areas[J]. Water and Environment Journal, 2009, 23(4): 255-262.
- [2] Maltais-Landry G, Maranger R, Brisson J, et al. Nitrogen transformations and retention in planted and artificially aerated constructed wetlands[J]. Water Research, 2009, 43(2): 535-545.
- [3] Yalcuk A, Ugurlu A. Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(9): 2521-2526.
- [4] Guan Y D, Chen X, Zhang S, et al. Performance of multi-soil-layering system (MSL) treating leachate from rural unsanitary landfills[J]. Science of the Total Environment, 2012, 420: 183-190.

- [5] García J, Rousseau D P L, Morató J, *et al.* Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2010, **40**(7): 561-661.
- [6] Kusch P, Wiessner A, Kappelmeyer U, *et al.* Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate [J]. *Water Research*, 2003, **37**(17): 4236-4242.
- [7] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **380**(1-3): 48-65.
- [8] 沈李东. 湿地亚硝酸盐型厌氧氨氧化和厌氧甲烷氧化微生物生态学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. 11-17.
- [9] Shao S D, Luan X W, Dang H Y, *et al.* Deep-sea methane seep sediments in the Okhotsk Sea sustain diverse and abundant anammox bacteria[J]. *Federation of European Microbiological Societies, Microbiology Ecology*, 2014, **87**(2): 503-516.
- [10] Song B, Buckner C T, Hembury D J, *et al.* Impact of volcanic ash on anammox communities in deep sea sediments [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2014, **6**(2): 159-166.
- [11] Hou L J, Zheng Y L, Liu M, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation (anammox) bacterial diversity, abundance, and activity in marsh sediments of the Yangtze Estuary[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, **118**(3): 1237-1246.
- [12] Yoshinaga I, Amano T, Yamagishi T, *et al.* Distribution and diversity of anaerobic ammonium oxidation (anammox) bacteria in the sediment of a eutrophic freshwater lake, Lake Kitaura, Japan[J]. *Microbes and Environments*, 2011, **26**(3): 189-197.
- [13] Long A, Heitman J, Tobias C, *et al.* Co-occurring anammox, denitrification, and codenitrification in agricultural soils [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, **79**(1): 168-176.
- [14] Zhu G B, Wang S Y, Wang W D, *et al.* Hotspots of anaerobic ammonium oxidation at land-freshwater interfaces [J]. *Nature Geoscience*, 2013, **6**(2): 103-107.
- [15] Li M, Hong Y G, Cao H L, *et al.* Community structures and distribution of anaerobic ammonium oxidizing and *nirS*-encoding nitrite-reducing bacteria in surface sediments of the South China Sea[J]. *Microbial Ecology*, 2013, **66**(2): 281-296.
- [16] Zhu G B, Wang S Y, Wang Y, *et al.* Anaerobic ammonia oxidation in a fertilized paddy soil[J]. *International Society for Microbial Ecology*, 2011, **5**(12): 1905-1912.
- [17] Yang X R, Li H, Nie S A, *et al.* Potential contribution of anammox to nitrogen loss from paddy soils in southern china[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, **81**(3): 938-947.
- [18] Zhang Y, Ruan X H, Op den Camp H J M, *et al.* Diversity and abundance of aerobic and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in freshwater sediments of the Xinyi River (China) [J]. *Environmental Microbiology*, 2007, **9**(9): 2375-2382.
- [19] Wenk C B, Bles J, Zopfi J, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation (anammox) bacteria and sulfide-dependent denitrifiers coexist in the water column of a meromictic south-alpine lake [J]. *Limnology & Oceanography*, 2013, **58**(1): 1-12.
- [20] 沈李东, 胡宝兰, 郑平, 等. 西湖底泥中厌氧氨氧化菌的分子生物学检测 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(8): 1609-1615.
- [21] Zhao Y Q, Xia Y Q, Kana T M, *et al.* Seasonal variation and controlling factors of anaerobic ammonium oxidation in freshwater river sediments in the Taihu Lake region of China [J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(9): 2124-2131.
- [22] Sun W, Xu M Y, Wu W M, *et al.* Molecular diversity and distribution of anammox community in sediments of the Dongjiang River, a drinking water source of Hong Kong [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2014, **116**(2): 464-476.
- [23] 王谨. 典型淡水养殖池塘厌氧氨氧化细菌的菌群结构、多样性和定量研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013. 43-60.
- [24] Humbert S, Zopfi J, Tamawski S E. Abundance of anammox bacteria in different wetland soils [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2012, **4**(5): 484-490.
- [25] Sonthiphand P, Neufeld J D. Evaluating primers for profiling anaerobic ammonia oxidizing bacteria within freshwater environments[J]. *PLoS One*, 2013, **8**(3): e57242.
- [26] Wang Y F, Feng Y Y, Ma X J, *et al.* Seasonal dynamics of ammonia/ammonium-oxidizing prokaryotes in oxic and anoxic wetland sediments of subtropical coastal mangrove[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, **97**(17): 7919-7934.
- [27] Shen L D, Liu S, Lou L P, *et al.* Broad distribution of diverse anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in Chinese agricultural soils[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, **79**(19): 6167-6172.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qingbang Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland (SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行