



全国中文核心期刊  
中国科技核心期刊

# 环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第9卷 第9期

Vol.9 No.9

中国科学院 主办  
生态环境研究中心  
科学出版社 出版

9  
2015

## 目 次

### 水 污 染 防 治

紫外线消毒对3种大肠杆菌的灭活效果和耐药性影响 .....	张崇森	庄凯	巨欣	王晓昌(4097)
强化除磷型 A/O-MBR 工艺运行稳定性 .....	任金柱	李军	王朝朝	刘彬 高金华 常江(4102)
超声波紫外线一体化推流式反应器中试装置用于污水消毒 .....				
.....	郭浩	周瑛	周晓琴	李子富 闫圆圆 靳昕(4107)
Ca <sup>2+</sup> 强化短程硝化颗粒污泥培养 .....	吕永涛	贾燕妮	鞠恺	赵洁 苗瑞 王磊(4112)
猪场废水厌氧自电解处理过程中关键参数优化 .....	王云	朱能武	沈伟航	李小虎 吴平霄(4117)
碳纳米管稳定纳米 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 的制备及降解染料橙 II .....		邓景衡	李佳喜	余侃萍 谢建国(4125)
湿式过氧化氢氧化活性艳蓝 KN-R .....	贺玲	刘红玉	杨春平	彭艳蓉 曾光明 王鹏 刘芬(4131)
草皮缓冲带对洱海流域面源污染的削减效果 .....			胡威	王毅力 储昭升(4138)
共培养条件下黄菖蒲和狭叶香蒲对铜绿微囊藻光合系统的影响 .....	陈国元	李青松	谢莆尧	陈燕虹(4145)
Fenton 试剂协同 TiO <sub>2</sub> 光催化降解三氯乙酸及协同机理 .....	王芬	赵宝秀	李想	李伟江 杨龙(4153)
城市大型缓流景观水体流场模拟及人工循环水动力优化 .....		贾泽宇	郑剑锋	孙力平 于静洁(4159)
短程硝化反硝化工艺处理低 C/N 餐厨废水 .....	张周	赵明星	阮文权	缪恒锋 任洪艳 黄振兴(4165)
改性天然菱铁矿去除水中六价铬 .....			周晓倩	郭华明 赵凯(4171)
2种载体对厌氧同步消化、反硝化的影响 .....	冉春秋	邹学军	范立明	崔玉波 周集体(4178)
基于有效去除铅(II)的中孔炭乙二胺改性及影响因素分析 .....				
.....	杨美蓉	李坤权	徐恩兵	乔小朵 潘根兴 郑正(4185)
城市污水处理过程中不同形态氮类营养物的转化特性 .....			金鹏康	宋利 任武昂(4193)
曝气对潜流人工湿地中木本植物的影响 .....	陈永华	吴晓芙	纪智慧	马群 陈明利(4199)
变权组合模型在景观水体水质模拟中的应用 .....			赵加斌	赵新华 彭森(4206)
鱼菜共生系统氮素迁移转化的研究与优化 .....	邹艺娜	胡振	张建	谢慧君 梁爽(4211)
基于虚拟治理成本法的生态环境损害量化评估 .....	蔡锋	陈刚才	彭枫	杨清玲 赵士波 鲜思淑 吴飞(4217)
漂浮型可见光催化剂 Fe-N-TiO <sub>2</sub> /FP-CTS 的制备及其对溶解性柴油的降解 .....				
.....	黄嘉瑜	王学江	卜云洁	张晶 马荣荣 赵建夫(4223)
非晶态 Co <sub>0.5</sub> Ni <sub>0.5</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 的制备及对水中五氯苯酚的吸附 .....		孙梦圆	崔春月	吴娟 宋姿蓉(4228)
pH 对同步硝化反硝化生物膜内溶解氧分布的影响 .....			黄胜娟	荣宏伟 林孟霞(4233)
稻壳制备介孔状二氧化硅的光催化性 .....			穆浩荣	张玲玲 白淑琴(4239)
玉米秆碳源去除地下水硝酸盐 .....		李同燕	李文奇	胡伟武 冯传平(4245)
提高低 C/N 值农村生活污水中 TN 的去除效果 .....	匡武	王翔宇	周其胤	杨远盛(4252)
油田聚驱采出液乳化特性及其破乳-絮凝 .....	翁艺斌	阎光绪	李敏	翟星月 郭绍辉 张佩佩(4259)
西安某人工湖水水质时空分布特征及其荧光特性 .....		于佳真	王晓昌	薛涛 陈荣(4265)
改性钙基蒙脱土酸性条件下吸附油酸钠 .....	任瑞晨	张乾伟	石倩倩	李彩霞 王秀兰 孟媛媛(4273)
天然沸石对海水中氨氮的吸附特性 .....	王文华	赵瑾	张晓青	成玉 王静 张雨山 李陆杨(4281)
微孔曝气器脉冲式充氧效果 .....		徐鹏	单继宏	金晓航 于江忠 孙毅 张建中(4287)
厌氧、好氧、厌氧/好氧交替状态对活性污泥性质的影响 .....		杨波	单晓明	田晴 李方 马春燕(4293)
城市人工湖的生态治理 .....		徐后涛	赵凤斌	张玮 王丽卿 郑小燕(4300)
载钴催化剂的制备及对染料降解 .....	李洁冰	李玉龙	Asif Hussain	王瑾 李登新(4309)
低温季大型表流湿地对微污染水体脱氮效果及优化运行 .....				
.....	左倬	仓基俊	朱雪诞	成必新 胡伟 商志清 卿杰(4314)
沸石负载高锰酸钾去除低浓度氨氮 .....	郭华	王军林	张小燕	王娜 刘俊良(4321)
2-乙基蒽醌修饰石墨毡催化电极电化学降解土霉素废水二级出水 .....				
.....	李贵霞	岳琳	潘贵芳	刘艳芳 李伟 李再兴(4326)
抗菌剂三氯卡班在水溶液中的光降解 .....		冯振涛	刘海津	汪应灵 冯家豪(4333)
磁性水滑石快速吸附水体中 Cu(II) 离子 .....	张琪	罗琳	张嘉超	刘武嫦 胡伟斌(4339)
零价铁对水中六价铬还原性能及沉淀污泥中铬的固定化 .....	陈忠林	李金春子	沈吉敏	王斌远 樊磊涛(4345)
椰壳活性炭对水中 N-DBP 前体物的吸附 .....			张一凡	金腊华 周元(4353)

混凝和活性炭吸附深度处理制药废水中有机物去除特征 .....	崔凤国	杨 鹏	张伟军	王东升(4359)
Fenton 试剂氧化处理火炸药污染土壤淋洗液 .....	薛江鹏	王建中	赵泉林	王中友 叶正芳(4365)
微波法对吸附扑热息痛废水活性炭的再生 .....	吴 坚	夏洪应	彭金辉	张利波 郑照强 张声洲(4371)
ES 稳定重金属污染底泥效果 .....	蒋玉广	袁珊珊	杨 伟	梁静波 巢军委(4376)
<i>Halothiobacillus neapolitanus</i> 脱硫性能及限制性因素影响 .....			冯守帅	陈金才 杨海麟(4385)
曝气速率对附加微通道湍流促进器 SMBR 流体动力学性能的影响 .....			解 芳	王建敏 刘进荣(4391)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>0</sup> 、H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>2+</sup> 、H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>3+</sup> 3种体系处理印染废水 .....			姚 兴	颜幼平 冯 霞(4398)
以游泳馆污水为处理对象的 SBR 中不同污泥负荷下氨氧化菌群落的演变 .....				
.....	薛士琼	孙宝盛	于凤庆	王明圆 李 恺 薛圆圆(4403)
环糊精改性蛭石对水中 Cr(VI) 的吸附 .....			张太亮	吴 凤 阳 萍 欧阳斌(4409)
滤材的表面改性对淤泥脱水过程中渗透性能的影响 .....			浩 婷	王 曦 周 颜 吴 燕(4415)
不同混凝剂处理低温低浊水 .....				洪 云 徐 慧(4421)
SMBBR 工艺不同填料处理生活污水 .....	李卫平	李 杰	朱浩君	杨文焕 敬双怡 殷震育 刘 燕(4427)

## 大气污染防治

煤矿井下高压喷雾雾化特性研究 .....	王鹏飞	刘荣华	汤 梦	张 文	桂 哲(4433)
露天堆场防风抑尘网遮蔽效果的数值模拟 .....			潘武轩	宋翀芳	何鸿展(4440)
TEPA/TETA 改性 SBA-15 对 CO <sub>2</sub> 吸附性能的影响 .....			魏建文	和凯凯	孟令硕 廖 雷(4447)
改性粉煤灰基吸附剂烟气脱汞 .....			郑慧敏	刘清才	王 铸 孟 飞 牛德良(4453)
改性 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 脱硫剂脱除 H <sub>2</sub> S 反应特性 .....	沈洪波	张 辉	刘应书	李皓琰	张 贺 郝智天(4458)
一株鱼粉加工硫化氢恶臭气体脱除菌株的分离与鉴定 .....			孙佩璇	娄永江	庄荣玉 严小军(4465)
北京市近 12 年空气污染变化特征及其与气象要素的相关性分析 .....	谢志英	刘 浩	唐新明	李腾腾	张文君(4471)
循环灰加湿量对密相塔半干法脱硫效率的影响 .....			韩剑宏	黄永海	卢熙宁 童震松(4479)
折流式反应器空气净化效果 .....			刘 鹏	郑 洁	宋雪瑞 王小艳(4483)

## 固体废物处置

市政污泥干化动力学研究 .....	范海宏	武亚磊	李斌斌	马 增(4488)	
响应曲面法优化 CO <sub>2</sub> 活化制备夏威夷坚果壳基活性炭 .....	程 松	张利波	夏洪应	彭金辉	张声洲 周朝金(4495)
胞外聚合物对生物浸出线路板金属粉末中铜的作用 .....			杨 崇	朱能武	崔佳莹 吴平霄(4503)
微波超声协同处理废弃印刷线路板中非金属 .....			蔡丽楠	殷 进	张 桐 孔晓露(4509)
水淬钢渣碳化固定 CO <sub>2</sub> .....	涂茂霞	雷 泽	吕晓芳	赵宏欣	王丽娜 张军玲 陈德胜 宋文婉 齐 涛(4514)
O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 气氛下市政污泥混煤燃烧及动力学特性 .....			邵志伟	黄亚继	严玉朋 刘长奇(4519)
提高硅钙渣胶凝活性的热活化实验 .....			杨志杰	孙俊民	张战军 苗瑞平(4526)
医疗废物处理中生物指示剂湿热灭菌动力学方程 .....			靳登超	李 阳	鲍振博 刘 娜(4531)
三七渣固态发酵生产康宁木霉生防菌 .....	谭显东	王君君	王 浪	羊依金	郭俊元 彭 兰 覃璐琳(4535)
3 种畜禽粪便产气特性差异分析 .....			陈 芬	李 伟	刘奋武 张吴平 李筱梅 卜玉山(4540)
黑曲霉固态发酵三七渣产纤维素酶 .....			黄 凡	谭显东	胡 伟 羊依金 林巧玉 任晓霞(4547)
常温下好氧颗粒污泥的形成过程及除污性能 .....			姚 力	信 欣	郭 毅 宋 幻 李 姣(4553)
垃圾填埋场 HDPE 膜漏洞密度及其影响因素的统计分析 .....			徐 亚	能昌信	刘玉强 刘景财 董 路(4558)
富集同型产乙酸菌污泥厌氧产酸 .....			王 晋	李习伟	符 波 杨 彦 刘 和(4565)

## 土壤污染防治

海泡石及其复配原位修复镉污染稻田 .....	梁学峰	韩 君	徐应明	谭适娟	雷 勇 罗文军(4571)
水泥固封镉污染土离子释放规律与微观结构 .....				董祯琴	陆海军 李继祥(4578)

## 环境生物技术

嗜酸氧化亚铁硫杆菌脱煤矸石中硫影响因素的筛选及条件优化 .....					
.....	赵尚明	何 环	于忠琦	黄冠华	冷云伟 陶秀祥(4585)
高岭土固定 GY2B 优化其降解性能 .....			李跃武	吴平霄	李丽萍 党 志(4591)

## 环境 监 测

成都市道路细颗粒物污染特征 .....	袁小燕	叶芝祥	杨怀金	张 菊(4598)
基于远程图像色度的点源水质监测方法 .....			李 文	杨守波 罗学科(4603)
海洋石油工程新型溢油监测系统研究 .....	隋迎光	彭吉友	刘志明	任 华(4609)

# 鱼菜共生系统氮素迁移转化的研究与优化

邹艺娜<sup>1</sup> 胡振<sup>1\*</sup> 张建<sup>1</sup> 谢慧君<sup>2</sup> 梁爽<sup>1</sup>

(1. 山东大学环境科学与工程学院, 济南 250100; 2. 山东大学环境研究院, 济南 250100)

**摘要** 中国是世界上最大的水产养殖国,但是含有大量氮元素化合物的养殖废水对周围环境的污染已经成为影响该行业可持续发展的关键因素。鱼菜共生系统被认为是解决这一问题的有效途径。作为一种新兴的生态系统,目前对鱼菜共生系统中氮元素迁移转化规律的研究较少。通过对实验室规模的鱼菜共生系统进行研究,揭示系统内氮的迁移转化规律,掌握  $N_2O$  的释放规律,同时尝试采用填料级配分层、添加硝化细菌等方式对系统进行优化。研究表明,投入系统的饵料中氮素以氨氮的形式被排出鱼体外后,在微生物作用下转化为亚硝酸盐氮及硝酸盐氮,进一步被植物吸收利用,提高了氮的利用效率。鱼菜共生系统以  $N_2O$  形式释放的氮素约占氮素总输入的 1.54%,与普通水产养殖相比,其  $N_2O$  转化率没有明显增加。另外,采用填料级配分层以及添加硝化细菌等方法对系统进行优化,可促进系统内硝酸盐的积累,减少  $N_2O$  释放,提高系统的经济效益和环境效益。

**关键词** 鱼菜共生系统 氮素迁移转化  $N_2O$  释放 硝化反应

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2015)09-4211-06

## Investigation and optimization of nitrogen transformations in aquaponics

Zou Yina<sup>1</sup> Hu Zhen<sup>1</sup> Zhang Jian<sup>1</sup> Xie Huijun<sup>2</sup> Liang Shuang<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China;

2. Environmental Research Institute, Shandong University, Jinan 250100, China)

**Abstract** China is the largest aquaculture producer in the world. However, with the rapid development of the aquaculture industry, aquaculture effluent, which is rich of nitrogen compounds, has caused serious contamination to the surrounding environment. Water pollution caused by aquaculture system has become a key impediment in the sustainable development of the industry. Aquaponics, which is an integration of aquaculture and hydroponic systems, is considered to be an effective way to solve this problem. As an emerging ecosystem, to date, little attention has been paid to the nitrogen transformations in aquaponics. In this study, lab scale aquaponic systems were operated to investigate nitrogen transformations in aquaponics, and nitrous oxide ( $N_2O$ ) emissions from aquaponics were also observed. Results showed that nitrogen in fish feed was firstly excreted in the form of  $NH_4^+-N$ , then gradually oxidized to nitrite and nitrate through nitrification, and was eventually utilized by plant growth.  $N_2O$  emissions from aquaponics accounted for 1.54% of its total nitrogen input. The  $N_2O$  conversion ratio of aquaponics was similar as that of aquaculture system. Attempts (i. e., filter graduation and nitrifies addition) were conducted to optimize the nitrogen utilization efficiency of aquaponics. Both nitrifying bacteria addition and filter graduation could increase nitrate accumulation and decrease  $N_2O$  emissions of aquaponics, and would further lead to better economic output and higher environmental benefits.

**Key words** aquaponics; nitrogen transformations; nitrous oxide emissions; nitrification

中国是世界水产养殖第一大国,2011年,我国水产养殖产量和产值分别占世界水产养殖总产量和产值的 61.60% 和 47.42%<sup>[1]</sup>。但是,目前我国水产养殖仍采用以高密度、高投饵率、高换水率为特点的传统方法<sup>[2]</sup>,在养殖水体中随着饵料、粪便等物质的积累,大量氮元素( $NH_4^+-N$ ,  $NO_2^--N$ ,  $NO_3^--N$ )随着养殖废水的排放被排到周围环境中,既造成了浪费,又引起周围水体富营养化,给环境造成了负面影响<sup>[3-6]</sup>。鱼菜共生系统被认为是解决这一问题的有

效方法。所谓鱼菜共生系统,是指将水产养殖与蔬菜水培种植有机结合,利用鱼、植物和微生物之间的相互作用产出鱼和菜 2 种经济作物<sup>[7]</sup>。鱼菜共生系

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21307076);山东大学基本科研业务费专项资金资助 2014TB003

收稿日期:2014-10-18; 修订日期:2014-11-29

作者简介:邹艺娜(1992—),女,硕士研究生,主要从事废水处理及其资源化利用工作。E-mail:zouyina@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: huzhen885@sdu.edu.cn

统作为封闭的生态系统,运行过程中不向周围环境排放废水,可避免氮元素对周围水体的污染。投入系统的鱼饵料中氮元素最终大部分在鱼生物量及菜生物量中积累,氮素利用率提高。目前,对该系统的研究基本集中在优化系统设计上,Liang等<sup>[8]</sup>发现延长光照周期及增加喂食频率可以提高鱼和菜的产量;Roosta等<sup>[9]</sup>发现,通过在植物叶面喷洒钾,可避免蔬菜营养元素缺乏症状。但迄今为止,关于系统中氮素迁移转化规律的研究较少。对鱼菜共生系统中氮素迁移转化规律的深入研究,可以更好评估系统的能量流动,为该系统的进一步优化提供理论基础。

此外,在氮素迁移转化过程中,可能生成氧化亚氮( $N_2O$ )<sup>[10]</sup>。 $N_2O$ 是一种重要的温室气体,其单分子全球温室升温潜能是 $CO_2$ 的296倍,并且是破坏大气臭氧层的重要气体之一<sup>[11]</sup>。水产养殖和农作物种植均已被认定是 $N_2O$ 的重要人为排放源<sup>[12]</sup>,作为二者的有机结合,鱼菜共生系统也是一个潜在的 $N_2O$ 释放源。但是,目前尚缺乏这方面的研究。

本论文通过建立实验室规模的鱼菜共生系统,研究该系统中氮素的迁移转化规律,并对系统中 $N_2O$ 的释放情况进行监测,与传统水产养殖业进行对比,探究其在温室气体释放方面有无优势。另外,尝试采用填料级配分层、添加硝化细菌等方式对系统进行优化。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置与运行

本次实验所使用的装置如图1所示。该装置位于山东省济南市百花公园内,实验时间为2014年3月30日至5月23日,共53 d。实验设有3个处理组(A、B、C),每个处理组有2个平行,A处理组为常规鱼菜共生系统,作为对照;B处理组每周添加2粒市售BIOZYM淡水鱼专用硝化细菌,增加硝化细菌的数量,硝化细菌为胶囊颗粒,每粒含硝化细菌干粉末0.48 g;C处理组的蔬菜种植部分采用填料级配分层,为硝化细菌的生长提供充足的氧气。每套装置由鱼箱、菜箱、蠕动泵、鼓风机及曝气头组成。实验选用的鱼种为鲤鱼(*Cyprinus carpio L.*),菜苗品种为散叶生菜(*Lactuca sativa var. crispa L.*)。

鱼箱置于地面上,菜箱置于距地面65 cm的水泥台上。鱼箱内养殖水体有效体积为100 L,养殖水体通过蠕动泵提升至菜箱内,滴滤进入珍珠岩基

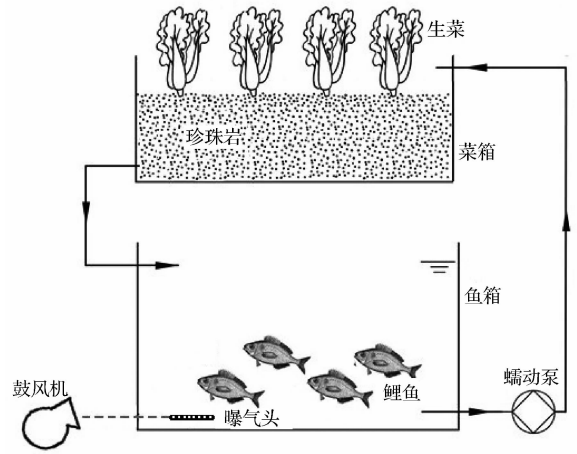


图1 鱼菜共生系统实验装置

Fig. 1 Experimental setup of aquaponics

质,循环速率为200 L/d。养殖废水滴滤进入珍珠岩基质,该基质充当生物滤池,过滤鱼排泄的废物,同时为微生物的附着生长提供巨大的表面积。养殖废水在菜箱内被净化后,在重力作用下回流至鱼箱,完成一个循环。鱼菜共生系统为全封闭式循环水养殖系统,除补充因蒸发、蒸腾作用散失的水分,与周围环境无水体交换。鱼箱配有盖子,保持避光状态,抑制藻类生长。

实验所用鲤鱼鱼种质量在40~80 g之间,随机分配到各鱼箱内,设计养殖密度为 $10 \text{ kg/m}^3$ ,即每个鱼箱内鲤鱼总质量为1 000 g左右。采用鼓风曝气为鱼箱内鲤鱼生长提供氧气,调节气体流量计设计曝气量为 $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ ,维持溶解氧浓度始终在6 mg/L以上。在正式实验开始时选取植株健康、根系发达的生菜幼苗移栽到菜箱内。

菜箱中,生菜种植密度为 $18 \text{ 株/m}^2$ 。A组和B组填充粒径4~6 mm的珍珠岩,填充厚度为30 cm,C组菜箱自下至上分别填充10 cm粒径2~3 cm粗砾石,10 cm粒径1~2 cm细砾石和10 cm珍珠岩。

在本次研究中,采用人工喂食法,鱼饵料为市售含蛋白质含量32%,含水率10%的漂浮型鱼粮。喂食量根据Ako等<sup>[13]</sup>提供的方法并略作修改,投入鱼粮15 min后,根据所剩鱼粮颗粒数调整下次喂食量,直至所剩鱼粮颗粒数占投入颗粒的5%~10%,为防止残余鱼粮污染水质,摄食结束后将未食用鱼粮捞出,并估算其质量。另外,为保障植物正常生长,防止叶面枯黄,每周均向各个鱼箱内添加Fe-EDTA( $Fe^{2+}$ 浓度5 000 mg/L)<sup>[13]</sup>,前3周每箱添加40 ml,自第4周及以后添加50 mL,维持 $Fe^{2+}$ 浓度



2~2.5 mg/L,此浓度为生菜生长的最佳条件,且对鲤鱼生长无害<sup>[14,15]</sup>。

### 1.2 分析测试方法

#### 1.2.1 水质理化参数

实验过程中主要对养殖水体中的总氨氮(TAN)、亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)、硝酸盐氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)进行测定,以上项目均采用国家标准方法进行测定<sup>[16]</sup>,总氨氮采用纳氏试剂光度法,亚硝酸盐氮采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法,硝酸盐氮采用紫外分光光度法。水体取样时间为上午10:00,水样放在带标签的100 mL聚乙烯瓶中,并立即放至冰箱内4℃保存,24 h内完成测试。

同时,现场测量水体温度、pH、电导率、溶解氧,并记录每天每个鱼箱内饵料投加量以及补充水量。

#### 1.2.2 N<sub>2</sub>O 释放通量

在系统运行稳定后,利用采气罩对鱼箱和菜箱进行采气,采样时间为上午10:00~12:00,在安置好采样箱后的0、20、40、60、80、100和120 min时用大气采样泵将气体采集到专用铝箔气体采样袋中。同时记录实验期间采样箱内的气温、水温及采样点压强,气体样品N<sub>2</sub>O浓度采用Wu等<sup>[17]</sup>描述的方法测定。

对于菜箱,无曝气,根据Zhang等<sup>[18]</sup>描述的静态箱法采气,该方法广泛用于环境样品中N<sub>2</sub>O的分析测试<sup>[19,20]</sup>。即利用气罩内一段时间N<sub>2</sub>O浓度增加的斜率计算释放通量,计算公式如下:

$$J = (dc/dt) (P/P_0) (T_0/T) (M/V_0) (V/s) \quad (1)$$

式中: $J$ 为气体通量( $\mu\text{g}/(\text{m} \cdot \text{h})$ ), $dc/dt$ 为采样时气体体积分数随时间变化的回归曲线斜率( $\text{mL}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ ), $M$ 为被测气体N<sub>2</sub>O摩尔质量( $\text{g}/\text{mol}$ ), $P$ 为采样点气压(Pa), $T$ 为采样时绝对温度(K), $V_0$ 、 $P_0$ 、 $T_0$ 分别为标准状态下的气体摩尔体积( $\text{mL}/\text{mol}$ )、空气气压(Pa)和绝对温度(K), $V$ 为采气罩体积( $\text{m}^3$ ), $S$ 为采气罩覆盖面积( $\text{m}^2$ )。

对于鱼池,有曝气,根据Hu等<sup>[21]</sup>描述的方法采气,利用采气罩内一段时间N<sub>2</sub>O浓度的平均值计算释放通量,计算公式如下:

$$J = Q \cdot C \cdot M \cdot P / (R \cdot T \cdot S) \quad (2)$$

式中: $J$ 为气体通量( $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ), $Q$ 为养鱼箱曝气量( $\text{m}^3/\text{h}$ ), $C$ 为各采样点N<sub>2</sub>O平均浓度( $\text{mL}/\text{m}^3$ ), $M$ 、 $P$ 、 $T$ 同上, $R$ 为通用气体常数 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ , $S$ 为采气罩覆盖面积( $\text{m}^2$ )。

## 2 结果和讨论

本文所涉及不同处理组的实验结果均以各平行系统的平均值表示。

### 2.1 系统中氮化合物浓度变化

图2(a)~图2(c)分别为氨氮浓度、亚硝酸盐氮浓度和硝酸盐氮浓度随时间的变化图。从图中可看出,在系统运行前12天,氨氮浓度迅速升高,第12天时达到峰值13 mg/L,亚硝氮和硝氮浓度一直未增加,低于2 mg/L;系统运行第12~23天,氨氮浓度急剧下降,同时亚硝氮浓度迅速升高达到峰值16 mg/L,硝氮浓度一直未增加,低于2 mg/L;系统运行24~30 d,亚硝氮浓度达到峰值后急剧下降,硝氮浓度迅速升高,氨氮浓度一直低于2 mg/L;30 d

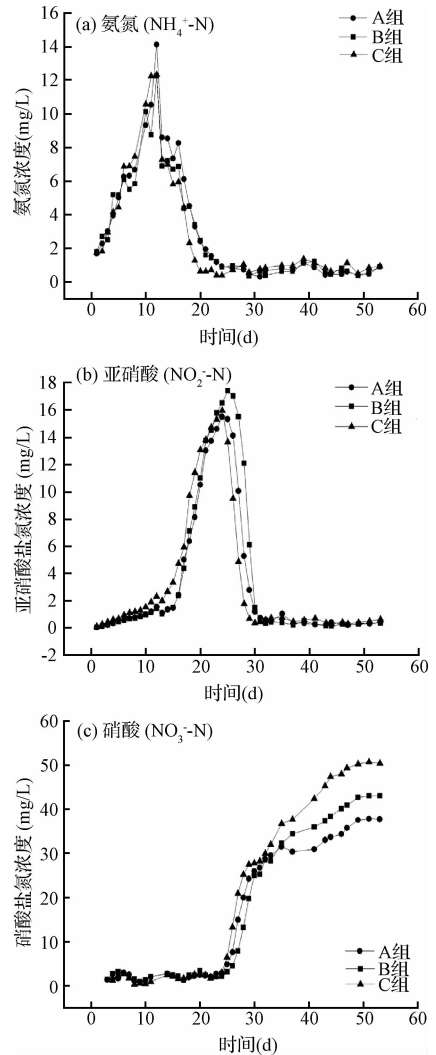


图2 氨氮、亚硝酸盐氮及硝酸盐氮浓度随时间变化  
 Fig. 2 Variation of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentrations during research period

后,系统运行达到稳定,硝氮浓度缓慢增加至不再明显增加,氨氮浓度和亚硝氮浓度则一直低于 2 mg/L,该浓度对鱼类无害。

研究表明,养殖水体中氮的生物转化与微生物种类存在关系,氮素通过微生物的硝化反硝化作用在不同形态之间迁移转化<sup>[22]</sup>。在本实验中,分析如下,系统建立初期,1~12 d,饵料中的氮经过鱼体内的新陈代谢,随着鱼排泄废物排出,以氨氮的形式排放到周围,但由于充当生物滤池的菜池基质中硝化细菌的不足,不能及时将氨氮转化为亚硝氮,因而表现为水体中氨氮浓度急剧增加,亚硝氮和硝氮浓度较低。至系统运行 12 d 后,对比图 2(a)和图 2(b)可看出,亚硝化细菌已经适应环境,并且开始发挥作用,能够迅速氧化以获得能源固定无机碳,于是表现为亚硝酸盐氮浓度急剧增加,而氨氮浓度急剧下降。至系统运行 24 d 之后,亚硝酸盐氮浓度急剧下降,硝酸盐氮浓度增加,说明此时硝化细菌开始发挥作用并逐渐占优势,迅速将亚硝酸盐氮转化为硝酸盐氮。30 d 后,系统稳定运行,产生的氨氮能够在微生物作用下及时转化为亚硝酸盐及至硝酸盐氮,所以系统内无氨氮和亚硝氮的积累,硝酸盐氮浓度缓慢增加。

系统中硝化细菌开始发挥作用的时间与 Dediu 等<sup>[23]</sup>进行的实验相比,时间较长,是因为系统运行前 20 天水温较低,平均温度为 18.16℃,低于硝化细菌生长的最适温度。同时,硝化细菌生长受抑制导致实验初期 3 个处理组之间的各含氮化合物数据无明显差异。系统运行 25 d 之后,各个处理组的差异逐渐表现出来。

由图 2(c)图可知,后期硝酸盐氮浓度增加趋于平稳,分析原因为此时生菜进入快速生长期(5 月份),需要吸收大量氮素,而硝酸盐最易被其吸收<sup>[24]</sup>,硝化反应生成的硝酸盐氮和植物吸收利用的硝氮之间达到动态平衡,硝酸盐浓度不再增加。

## 2.2 N<sub>2</sub>O 释放及氮素利用

本文通过对释放气体的采集,估算系统内 N<sub>2</sub>O 的释放量。经分析计算,A 组、B 组、C 组 3 个处理组 N<sub>2</sub>O 释放通量及 N<sub>2</sub>O 转化率如表 1 所示。

以该释放量作为实验期间释放量的平均值粗略估计鱼菜共生系统中 N<sub>2</sub>O 的转化率。氮投入根据饵料投加量,按饲料蛋白质含量百分比 32%,蛋白质中氮平均含量 16% 计算<sup>[10]</sup>。实验期间共向 A 组、B 组、C 组 3 个处理组鱼箱内投加饵料 230.80、

表 1 N<sub>2</sub>O 释放通量及转化率

处理组	A 组	B 组	C 组
菜箱 ( $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ )	342.80	224.04	242.93
鱼箱 ( $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ )	254.98 ± 33.57	280.80 ± 22.59	286.61 ± 32.28
总释放速率 ( $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ )	597.78	504.85	529.53
转化率(%)	1.54	1.17	1.38

243.76 和 217.39 g。经计算,3 个系统中以 N<sub>2</sub>O 形式释放的氮素约占氮素总投入的 1.54%、1.17% 和 1.38%,该数值与 Hu 等<sup>[25]</sup>报道的普通集约型水产养殖 N<sub>2</sub>O 的释放数值 1.3% 无明显差异,可认为在饵料投入量相同的情况下,鱼菜共生系统不会向环境贡献更多 N<sub>2</sub>O。并且通过优化系统,可以减少 N<sub>2</sub>O 的排放,降低对环境的破坏。

同时,通过称量鱼的初始质量及最终质量,计算鱼菜共生系统的饲料转化率,简略评估系统的氮素利用率。饲料转化率按照如下公式计算<sup>[26]</sup>:

饲料转化率 = 供给的干饲料总重/鱼湿重增加

经计算,A 组、B 组和 C 组鱼体重的净增量为 69.37、75.16 和 69.65 g,饲料转化率为 3.33、3.24 和 3.12,该转化率与普通水产养殖转化率<sup>[27,28]</sup>相比略高,是由于前两周为鱼种驯化期所致。

在该系统中,氮素除积累在鱼体内部分,还有大量积累在蔬菜体内,所以相比普通水产养殖业,鱼菜共生系统可以产出鱼和菜 2 种经济作物,氮素利用率提高,且在此基础上 N<sub>2</sub>O 释放量并未增加,是未来可供选择的持续型零排放的低碳生产模式。

## 2.3 系统优化

通过图 2 比较 2 种系统优化方法对氮素迁移转化途径的影响。由图 2 可知,在系统的初始阶段,由于水温较低,总氨氮浓度的变化以及亚硝酸盐氮、硝酸盐氮浓度变化并没有显著不同。而后期系统稳定后,硝酸盐浓度的积累在不同处理组中呈现明显不同,主要表现为 C 组 > B 组 > A 组,硝酸盐作为该系统中植物氮肥最重要的来源,其积累可以促进植物的生长,提高系统的经济效益。分析原因,可能是由于 C 组的基质部分孔隙率较高,通风性较好,适合硝化细菌的生长,而 B 组每周补充硝化细菌也可使硝化细菌保持较高的活性,积累更多硝酸盐。

通过表 1 比较 2 种系统优化方法对 N<sub>2</sub>O 释放的影响。通过计算可知系统添加硝化细菌和填料级

配分层相对于普通鱼菜共生系统均可进一步减少  $N_2O$  的释放,尤其是蔬菜水培种植部分, $N_2O$  总转化率在本次实验中分别减少 24.02% 和 10.39%。分析原因,Webster 等<sup>[29]</sup> 提出细菌的反硝化作用相比硝化作用产生更多的  $N_2O$ ,反硝化细菌喜缺氧环境,而 C 组基质通风性好,B 组硝化细菌占优势,都不利于反硝化细菌的生长,因而该两种优化方法均可以减少系统中  $N_2O$  的产生。

结果表明,系统中添加硝化细菌以及蔬菜种植部分基质填料分层可促进系统中硝酸盐氮的积累及减少  $N_2O$  释放。因此为了更好发展鱼菜共生系统,可同时采用这两种处理方法,提高系统的经济效益和环保效益。

## 2.4 节水性能

鱼菜共生系统作为全封闭式循环水养殖系统,与传统水产养殖业相比,不仅减轻了由于废水排放对周围环境造成的污染,而且在节水方面表现出巨大优势。实验运行期间,为补充因蒸发蒸腾作用散失的水分,共向系统加水 ( $68.71 \pm 7.49$ ) L。若以普通循环水养殖系统日换水量 5% 计算<sup>[30]</sup>,系统运行 53 d,需换水 265 L,两相比较,鱼菜共生系统比普通循环式养殖系统节水 74%。

节水效果明显。在水资源短缺、水质下降的地方,尤其适合以鱼菜共生系统的形式发展水产养殖业。

## 3 结论

鱼菜共生系统为新型水产养殖系统,提高了氮的利用效率,降低了对水资源的依赖性,适应当前可持续发展的要求,具有良好的发展前景。通过本研究可得出以下结论:

(1) 在鱼菜共生系统运行过程中,对鱼类有毒害作用的含氮化合物在微生物的作用下转化为对鱼类危害较小硝酸盐氮,供植物生长。“一氮两用”,提高了系统对氮的利用效率;

(2) 鱼菜共生系统  $N_2O$  转化率为 1.54%,与普通水产养殖产业相比无明显区别,不会增加  $N_2O$  的释放;

(3) 通过改变蔬菜种植部分的基质结构,并向系统中添加硝化细菌可促进系统中硝酸盐氮的积累以及减少  $N_2O$  的释放,提高系统的经济效益和环境效益。

## 参考文献

- [1] FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2012
- [2] 李岩,张饮江,马海峰,等. 陆域水产养殖废水序批式循环处理与再利用系统研究. 江苏农业科学, 2012, 40(9): 297-302  
Li Yan, Zhang Yinjiang, Ma Haifeng, et al. Sequencing batch recirculation treatment and reuse of terrestrial aquaculture wastewater. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(9): 297-302 (in Chinese)
- [3] 刘道玉,范立民,王琼,等. 脱氮副球菌的好氧反硝化特性及对养殖水体中氮素的控制. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2249-2255  
Liu Daoyu, Fan Limin, Wang Qiong, et al. The aerobic denitrification characteristics of *Paracoccus Denitrificans* and its nitrogen control for aquaculture water. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(11): 2249-2255 (in Chinese)
- [4] Mook W. T., Chakrabarti M. H., Aroua M. K., et al. Removal of total ammonia nitrogen (TAN), nitrate and total organic carbon (TOC) from aquaculture wastewater using electrochemical technology: A review. Desalination, 2012, 285: 1-13
- [5] Zhang Qiuzhuo, Achal V., Xu Yatong, et al. Aquaculture wastewater quality improvement by water spinach (*Ipomoea aquatica Forsskal*) floating bed and ecological benefit assessment in ecological agriculture district. Aquacultural Engineering, 2014, 60: 48-55
- [6] Nora' aini A., Mohammad A. W., Jusoh A., et al. Treatment of aquaculture wastewater using ultra-low pressure asymmetric polyethersulfone (PES) membrane. Desalination, 2005, 185(1-3): 317-326
- [7] Lennard W. A., Leonard B. V. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system. Aquaculture International, 2006, 14(6): 539-550
- [8] Liang J. Y., Chien Y. H. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia-water spinach raft aquaponics system. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, 85: 693-700
- [9] Roosta H. R. Effects of foliar spray of K on mint, radish, parsley and coriander plants in aquaponic system. Journal of Plant Nutrition, 2014, 37(14): 2236-2254
- [10] Hu Zhen, Lee J. W., Chandran K., et al. Nitrous oxide ( $N_2O$ ) emission from aquaculture: A review. Environmental Science & Technology, 2012, 46(12): 6470-6480
- [11] 张苗,黄少斌,肖念. C/N 和 pH 值对高温好氧反



- 硝化菌产  $N_2O$  的影响研究. 环境工程学报, **2012**, 6(1): 275-279
- Zhang Miao, Huang Shaobin, Xiao Xiannian. Effect of C/N ratio and pH on nitrous oxide production of themophilic aerobic denitrifier. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2012**, 6(1): 275-279(in Chinese)
- [12] Pathak H., Upadhyay R. C., Muralidhar M., et al. Measurement of Greenhouse Gas Emission from Crop, Livestock and Aquaculture. New Delhi: Indian Agricultural Research Institute, **2013**
- [13] Ako H., Baker A. Small-scale lettuce production with hydroponics or aquaponics. Honolulu: University of Hawaii, **2009**
- [14] 刘士哲, 罗健, 罗庆云, 等. 铁营养对水培芥菜和生菜生长及根系一些酶类特性的影响. 华南农业大学学报, **1995**, 16(2): 19-24
- Liu Shizhe, Luo Jian, Luo Qingyun, et al. The effect of Fe on the growth and the activities of some enzymes in the roots of lettuce and mustard in hydroponic culture. Journal of South China Agricultural University, **1995**, 16(2): 19-24 (in Chinese)
- [15] Javed M., Abdullah S. Studies on acute and lethal toxicities of iron and nickel to the fish. Pakistan Journal of Biological Sciences, **2006**, 9(3): 330-335
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社, **2002**
- [17] Wu Juan, Zhang Jian, Jia Wenlin, et al. Impact of COD/N ratio on nitrous oxide emission from microcosm wetlands and their performance in removing nitrogen from wastewater. Bioresource Technology, **2009**, 100(12): 2910-2917
- [18] Zhang Jinbo, Song Changchun, Yang Wenyan. Cold season  $CH_4$ ,  $CO_2$  and  $N_2O$  fluxes from freshwater marshes in northeast China. Chemosphere, **2005**, 59(11): 1703-1705
- [19] Huang Lei, Gao Xu, Guo Jinsong, et al. A review on the mechanism and affecting factors of nitrous oxide emission in constructed wetlands. Environmental Earth Sciences, **2013**, 68(8): 2171-2180
- [20] Alves B. J. R., Smith K. A., Flores R. A., et al. Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean  $N_2O$  flux from soils. Soil Biology and Biochemistry, **2012**, 46: 129-135
- [21] Hu Zhen, Zhang Jian, Xie Huijun, et al. Effect of anoxic/aerobic phase fraction on  $N_2O$  emission in a sequencing batch reactor under low temperature. Bioresource Technology, **2011**, 102(9): 5486-5491
- [22] 李谷, 吴振斌, 侯燕松, 等. 养殖水体氮的生物转化及其相关微生物研究进展. 中国生态农业学报, **2006**, 14(1): 11-15
- Li Gu, Wu Zhenbin, Hou Yansong, et al. Nitrogen biotransformation and its relative microorganism in aquaculture waters. Chinese Journal of Eco-Agriculture, **2006**, 14(1): 11-15(in Chinese)
- [23] Dediu L., Cristea V., Docan A., et al. Evaluation of condition and technological performance of hybrid bester reared in standard and aquaponic system. Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation, **2011**, 4(4): 490-498
- [24] 王波, 沈其荣, 赖涛, 等. 不同铵硝比营养液对生菜生长发育影响的研究. 土壤学报, **2007**, 44(3): 561-565
- Wang Bo, Shen Qirong, Lai Tao, et al. Effects of  $NH_4^+$ -N/ $NO_3^-$ -N ratio in nutrient solution on growth of lettuce in hydroponics. Acta Pedologica Sinica, **2007**, 44(3): 561-565(in Chinese)
- [25] Hu Zhen, Lee J. W., Chandran K., et al. Nitrogen transformations in intensive aquaculture system and its implication to climate change through nitrous oxide emission. Bioresource Technology, **2013**, 130: 314-320
- [26] Li W., Wei Q. W., Luo H. Special collector and count method in a recirculating aquaculture system for calculation of feed conversion ratio in fish. Aquacultural Engineering, **2014**, 60: 63-67
- [27] Wang Xiaofang, Li Xiaoqin, Leng Xiangjun, et al. Effects of dietary cottonseed meal level on the growth, hematological indices, liver and gonad histology of juvenile common carp (*Cyprinus carpio*). Aquaculture, **2014**, 428-429: 79-87
- [28] Milstein A., Ahmed A. F., Masud O. A., et al. Effects of the filter feeder silver carp and the bottom feeders mrigal and common carp on small indigenous fish species (SIS) and pond ecology. Aquaculture, **2006**, 258(1): 439-451
- [29] Webster E. A., Hopkins D. W. Nitrogen and oxygen isotope ratios of nitrous oxide emitted from soil and produced by nitrifying and denitrifying bacteria. Biology and Fertility of Soils, **1996**, 22(4): 326-330
- [30] 齐巨龙, 赖铭勇, 王茂元, 等. 鳊循环水高密度养殖试验研究. 上海海洋大学学报, **2012**, 21(2): 212-217
- Qi Julong, Lai Mingyong, Wang Maoyuan, et al. Research on the cultivating eel in a recirculating aquaculture system. Journal of Shanghai Fisheries University, **2012**, 21(2): 212-217(in Chinese)