

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响

王浩, 李正魁*, 张一品, 丁帮璟

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023)

摘要: 在入贡湖河道亲水河采集上覆水、伊乐藻及底泥柱芯样品进行室内实验, 探究伊乐藻与固定化高效脱氮微生物协同作用下脱除铵态氮的机制, 以及对污染水体的生态修复效果。运用 ^{15}N 同位素配对技术及高通量测序技术, 研究了4个不同处理组中 NH_4^+ 的转化机制, 其中, 处理组A: 裸泥组, 处理组B: 固定化高效脱氮微生物, 处理组C: 伊乐藻, 处理组D: 固定化高效脱氮微生物+伊乐藻。结果表明, 氮素脱除主要有底泥存储、伊乐藻吸收及微生物过程(反硝化和厌氧氨氧化)这3种途径。在添加沉水植物伊乐藻的处理组C和D中, 伊乐藻对 $^{15}\text{NH}_4^+$ 吸收率分别为25.44%和19.79%。不同处理组中底泥对 $^{15}\text{NH}_4^+$ 存储率分别为7.94%、5.52%、6.47%和4.86%, 微生物过程以气体形式释放的 $^{15}\text{NH}_4^+$ 分别为16.06%、28.86%、16.93%和33.09%。反硝化和厌氧氨氧化是产生含氮素气体的主要过程, 对于处理组D, 脱氮微生物丰度和多样性均得到不同程度的提升。4个不同处理组对 $^{15}\text{NH}_4^+$ 的总去除率分别为24%、34.38%、48.84%和57.74%, 伊乐藻与高效脱氮微生物联用技术(E-INCB)的应用, 可以提高水体氮素的脱除速率, 促进污染水体的净化。

关键词: 伊乐藻-固定化高效脱氮微生物联用技术; 铵态氮; 底泥存储; 植物吸收; N_2 和 N_2O 气体释放; 污染水体
中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4615-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201702120

Effect of *Elodea nuttallii*-Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water

WANG Hao, LI Zheng-kui*, ZHANG Yi-pin, DING Bang-jing

(State Key Laboratory of Pollutant Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Surface water, *Elodea nuttallii* and undisturbed sediment cores from the Qinshui River in Gonghu Bay were collected to carry out a simulation experiment in a laboratory to study the effect of *Elodea nuttallii*-immobilized nitrogen-cycling bacteria on nitrogen removal mechanisms from the river water. In this study, the transformation and fate of ammonium among four different treatment groups were investigated by using a stable ^{15}N isotope pairing technique combined with high-throughput sequencing technology [Treatment A: bare sediment, Treatment B: sediment + immobilized nitrogen cycling bacteria (INCB), Treatment C: sediment + *E. nuttallii*, Treatment D: sediment + INCB + *E. nuttallii*]. The results of the ^{15}N mass-balance model showed that there were three pathways to the ultimate fate of nitrogen: precipitated with the sediments, absorbed by *E. nuttallii*, and consumed by microbial processes [denitrification and anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX)]. The percentages of *E. nuttallii* assimilated in the $^{15}\text{NH}_4^+$ were 25.44% and 19.79% for treatments C and D. The sediment storage ratio of $^{15}\text{NH}_4^+$ accounted for 7.94%, 5.52%, 6.47% and 4.86% in treatments A, B, C, and D, respectively. The proportion of $^{15}\text{NH}_4^+$ lost as ^{15}N -labelled gas were 16.06%, 28.86%, 16.93% and 33.09% in the four different treatment groups, respectively. Denitrification and anammox were the bacterial primary processes in N_2 and N_2O production. The abundance and diversity of microorganisms was relatively higher in the treatment with *E. nuttallii*-immobilized nitrogen cycling bacteria (E-INCB) assemblage technology applied. Furthermore, the removal rates of $^{15}\text{NH}_4^+$ were 24%, 34.38%, 48.84% and 57.74% in treatments A, B, C and D, respectively. These results show that the E-INCB assemblage technology may improve the capacity for nitrogen removal from the river water.

Key words: *Elodea nuttallii*-INCB assemblage; NH_4^+ ; sediment storage; plant assimilation; N_2 and N_2O emission; polluted river water

随着我国社会经济的快速发展,大量富含氮的工业、农业及城市生活废水进入水环境,导致水体富营养化,严重破坏地表水环境^[1,2]。贡湖作为太湖的重要组成部分,由于周边城市化进程加快,污染排放加剧,正面临着水生生态系统严重退化、生物多样性减少及污染净化能力下降等问题^[3]。亲水河作为流入贡湖的主要河道,水体氮素含量的升高,会

对贡湖水生生态系统的生物多样性及水质稳定性造成严重影响。因此,采取合适的方法降低入贡湖河道水体氮素营养盐浓度,具有重要意义。

收稿日期: 2017-02-21; 修订日期: 2017-05-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理重大专项(2013ZX07101-014)

作者简介: 王浩(1991~),男,硕士研究生,主要研究方向为河道水体修复, E-mail: njuwanghao@163.com

* 通信作者, E-mail: zhukuili@nju.edu.cn

近年来,国内外学者均对河道水体富营养化的控制及氮素营养盐脱除机制等方面做了大量研究. 李宝珍等^[4]对植物吸收利用铵态氮和硝态氮分子调控及对氮素吸收优化配置进行了研究. 刘丹丹等^[5]研究了伊乐藻和氮循环菌联用技术对于太湖氮素营养盐的吸收和反硝化影响. 韩华杨等^[6]探讨了底泥反硝化及厌氧氨氧化细菌对河道底泥氮素营养盐去除贡献. Peipoch 等^[7]进行了河岸水生植物对硝态氮和铵态氮的吸收能力对比研究.

然而,以往的许多研究主要集中在水体氮素的去除效果,并未对各氮素脱除途径进行定量地分析,在伊乐藻-脱氮微生物联用系统中,有关底泥存储、水生植物吸收与微生物过程对于氮素去除的定量贡献研究尚不多见^[8,9].

因此,本研究主要针对亲水河氮素营养盐污染负荷高、水体流速趋于静止、含氧量低等特点,运用固定化高效脱氮微生物 (immobilized nitrogen cycling bacteria, INCB) 与沉水植物伊乐藻 (*Elodea nuttallii*) 相结合的生态修复技术,在室内进行原位模拟实验,通过提高污染水体的氮素转化能力进而

达到修复河道的目的. 与此同时,本研究还探讨了在脱氮微生物与伊乐藻联用系统下,底泥存储、水生植物吸收及微生物过程 3 种途径对污染水体氮素脱除机制的影响.

1 材料与方法

1.1 采样点与样品采集

2015 年 4 月于入贡湖河道亲水河(32°17'52"N, 120°20'20"E,图 1)采集水样、伊乐藻及底泥样品. 为确保模拟实验准确性,样品采集前根据亲水河污染及人为干扰情况,选取未受干扰段河道进行样品采集工作. 采用特制柱状采泥器(有机玻璃柱长度 100 cm,内径 9 cm)采集 24 根完整泥柱样品,底泥的取样深度约 40 cm. 所有采集的底泥、水样及伊乐藻样品于 4 h 内送至实验室. 2015 年 4 月~2015 年 10 月的水质长期跟踪监测资料显示,亲水河上覆水中总氮浓度(TN)2.5~3.5 mg·L⁻¹,总磷浓度(TP)0.1~0.2 mg·L⁻¹,铵态氮浓度(NH₄⁺-N)0.5~1.5 mg·L⁻¹,硝态氮浓度(NO₃⁻-N)0.5~1.0 mg·L⁻¹,底泥样品采集区域表层底泥(表层 5 cm)相关理化参数初始值见表 1.

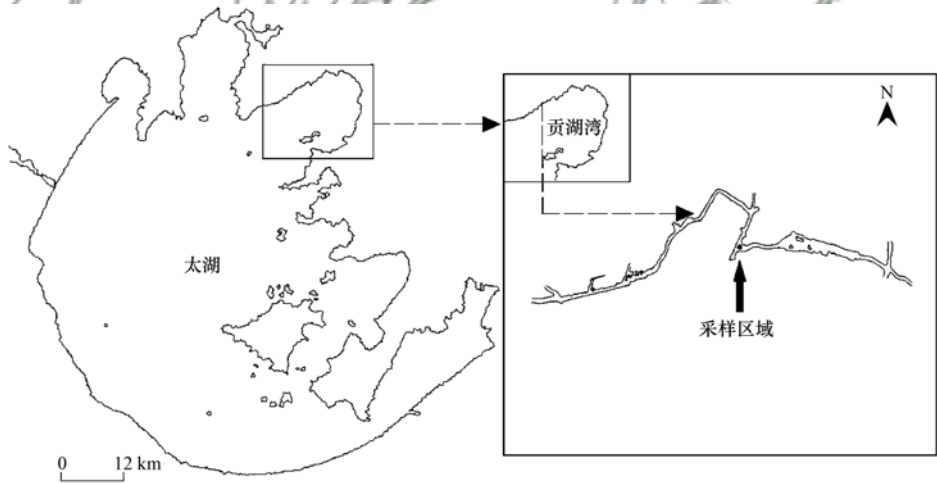


图 1 太湖贡湖湾入湖河道-亲水河采样点地理位置示意

Fig. 1 Geographical location of sampling points in Qinshui River, Gonghu Bay, Taihu Lake

表 1 实验区域表层底泥的物理化学参数(n=3)

Table 1 Physiochemical characteristics of surface layer of the sampled sediment core

表层底泥孔隙水氮素浓度				总有机碳/mg·L ⁻¹	pH
TN/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N/mg·L ⁻¹		
3.16 ± 0.24	1.33 ± 0.13	0.98 ± 0.09	0.25 ± 0.06	19.72 ± 1.37	7.14 ± 0.15

1.2 固定高效脱氮微生物的制备与应用

实验采用甲基丙烯酸-β-羟乙酯(HEMA)、丙烯酸羟乙酯(HEA)按特定体积比与蒸馏水均匀混合,在-78℃温度,⁶⁰Co-γ射线(吸收剂量 1 × 10⁴ Gy)条

件下辐照制备具有生物相容性的固定化载体^[10],载体内具有的多孔结构,可为高效脱氮微生物生长并进行繁殖提供微环境.

本研究采集亲水河底泥样品、水样及植物根区

微生物样品,经过多次富集、筛选分离得出土著脱氮微生物。通过连续培养,将脱氮微生物固定于载体之上,制备成固定化高效脱氮微生物。

1.3 室内实验设计

将在亲水河采集的 24 根底泥柱被分成平行的 6 排,每排分成 4 个不同的微环境处理系统,分别为:处理组 A,未经处理的裸泥组;处理组 B,仅添加 INCB,添加量为 $60 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$;处理组 C,仅添加伊乐藻,每支截取长度为 10 cm;处理组 D,添加沉水植物伊乐藻和固定化脱氮微生物(E-INCB),具体添加量如前所述。在室温约为 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 进行培养,为期约 6 个月的室内培养结束后,进行相关水质及理化数据的测定。

1.4 实验测试指标及方法

1.4.1 水质指标及测定方法

铵态氮采用纳氏试剂分光光度法测定;硝态氮采用紫外分光光度法测定;总氮采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法(日本岛津 UV-2450)测定;pH 采用便携式 pH 计(YSI pH100)进行测定;DO 采用便携式溶氧仪(YSI 550A)进行测定。

1.4.2 N_2 排放通量测定

经过为期 6 个月的室内培养,实验柱内系统趋于稳定,随后进行 N_2 排放通量测定,向 3 组平行的实验柱中加入同位素标记的 $^{15}\text{NH}_4^+$ (^{15}N at. % = 99.11),使得每个处理组中的 $^{15}\text{NH}_4^+$ 浓度约为 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,同位素添加之后,将实验柱用橡胶塞密封,随后在室温下($20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$)进行 24 h 无顶空密闭静态培养,培养结束后,用注射器采集水样,溢流收集到密封良好的采集管中,同时加入 0.5 mL ZnCl_2 溶液,用于抑制管中微生物活性,恒温保存样品,通过膜接口质谱仪(MIMS, Bay Instruments, Easton, MD, USA)对同位素其他 $^{28}\text{N}_2$ 、 $^{29}\text{N}_2$ 、 $^{30}\text{N}_2$ 进行测定。

1.4.3 ^{15}N 平衡模型实验

为确保自动化 C/N 同位素比质谱仪测定结果的准确性,需将系统初始 ^{15}N 丰度控制在 10% 以内。因此分别向 3 个平行组中加入同位素标记的 $^{15}\text{NH}_4^+$ (^{15}N at. % = 99.11) 500 μg ,每柱上部留有 10 cm 顶空用以进行气体采集,用橡胶塞密封后,在室温条件下($20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$)进行 24 h 培养,培养时间结束后,采集实验柱中气体、水体、植物及底泥样品,用以测定 ^{15}N 丰度及相关理化性质。

1.4.4 样品采集与 ^{15}N 丰度测定

水体 ^{15}N 丰度采用自动化 C/N 同位素比质谱仪

(Europa Scientific Integra, Crewe, UK) 测定。使用氧化镁戴氏合金法蒸馏分离 NO_3^- 和 NH_4^+ ,分别对 ^{15}N 丰度进行测定。在水样中加入氧化镁以蒸馏提取 NH_4^+ ,随后加入戴氏合金蒸馏分离出 NO_3^- ,蒸馏气体用硼酸指示剂吸收,使用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸溶液进行酸化,将蒸馏出的 NH_3 转化为含有 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液,于 80°C 烘箱烘干后进入同位素比质谱仪进行 ^{15}N 丰度的测定。

利用环形刀采集实验柱中底泥样品,去除底泥中石块与植物根茎,同时采集柱中伊乐藻样品,用去离子水洗净表面泥土后,将伊乐藻和底泥样品于 80°C 烘箱中烘至恒重,使用研钵将干燥后的底泥样品研磨成均匀粉末,将粉末样品过 100 目筛子。于万分之一天平称取定量底泥和植物样品,随后使用同位素比质谱仪和在线元素分析仪(Europa Scientific Integra, Crewe, UK)测定样品 ^{15}N 丰度及氮素百分比。

1.4.5 N_2O 排放通量测定

N_2O 排放通量采用静态箱-气相色谱法进行测定,实验柱上部预设有高度 10 cm 的气体顶空收集室。24 h 室内培养结束后,采用连有三通接头的注射器采集顶空气体,注入真空收集瓶中,使用气相色谱仪(Agilent 4890)测定 N_2O 浓度。 N_2O 排放通量计算公式如下所示^[11]:

$$J = \frac{dc}{dt} \cdot \frac{M}{V_0} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot H$$

式中, dc/dt 是 N_2O 气体浓度随时间变化曲线斜率; M 是气体摩尔质量; P 是采样处大气压; T 是采样时温度; V_0 、 P_0 、 T_0 分别是标准状况下气体摩尔体积,大气压强和空气温度; H 是水面上实验柱高度。

1.4.6 微生物群落多样性研究

通过高通量测序对 4 个处理组底泥中微生物群落多样性进行对比分析,包括 DNA 提取、PCR 扩增及纯化、建库及 MiSeq 测序、数据分析这 4 个主要步骤。

DNA 提取:分别称取 4 个处理组底泥样品约 500 mg,使用 DNA 快速提取试剂盒(MP Biomedicals, LLC)提取各底泥样品的 DNA,随后使用仪器 NanoDrop[®] ND-1000(NanoDrop Technologies, Willmington, DE, USA)对提取的 DNA 样品进行浓度和纯度检测,保证 DNA 样品浓度高于 $20 \text{ ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$, A_{260}/A_{280} 介于 1.80 ~ 2.00 之间。

PCR 扩增及纯化:利用 16S rRNA 基因序列的 V1-V3 区域对样品进行 PCR 扩增,正向引物为 515F

(5'-GTGCCAGCMGCCGCGG-3'), 反向引物为 907R (5'-CCGTCAATTCMTTTRAGTTT-3'). 使用仪器 ABI GeneAmp® 9700 (ABI, USA) 进行 PCR 扩增, 单个样品做 4 个 PCR 平行. 扩增条件为: 95℃ 2 min; 25 循环 (95℃ 30 s, 55℃ 30 s, 72℃ 30 s); 72℃ 5 min. 随后将各样品的 4 个平行 PCR 体系混合, 利用 PCR 纯化试剂盒 (Axygen, USA) 对 PCR 产物进行纯化, 最终洗脱体积为 30 μ L.

建库及 MiSeq 测序: 准确移取 100 ng PCR 纯化产物混合均匀, 进行建库. 建库完成后使用仪器 2100 Bioanalyzer (Agilent Technologies, Santa Clara, USA) 进行芯片电泳用以确认建库成功. 随后使用 Qubit 2.0 Fluorometer 对文库进行精确定量. 将建库成功的文库按照比例混合、变性并稀释至终浓度为 8 pmol·L⁻¹, 随后进行 MiSeq 上机测序.

数据分析: 通过 Sickie 软件 (<https://github.com/najoshi/sickle>) 去除低质量的序列; 用 Mothur 软件 (http://www.mothur.org/wiki/Main_Page) 对测序数据按照样品筛分, 然后按照 Mothur 软件提供的标准流程进行降噪处理, 对降噪数据进行比对分析, 最终获得底泥样品中微生物群落结构信息.

1.4.7 数据分析方法

使用 SPSS 13.0 数据处理包对数据进行分析; 采用单向或双向方差分析 (ANOVA) 来区别不同处理组样品之间的差异性; 采用皮尔逊相关分析 (Pearson correlation) 评价数据变化的相关性; 采用 Origin 8.6 进行图形绘制. 不同处理组之间的显著性差异水平设置为 $P < 0.05$.

2 结果与讨论

2.1 水体¹⁵N测定结果分析

4 个处理组存积于水体中的同位素¹⁵N量及上覆水总氮浓度如图 2 所示, 不同处理组间水体¹⁵N存积量存在明显差异 (单向方差分析, $P < 0.05$). 处理组 A (裸泥组) 水体中¹⁵N的存积最高, 约为 380.02 μ g, 处理组 B (INCB 组) 和处理组 C (伊乐藻组) 相对 A 组较低, 分别为 328.12 μ g 和 255.79 μ g, 而处理组 D (INCB + 伊乐藻组) 水体中¹⁵N存积量最低, 约为 211.28 μ g. 同时, 上覆水总氮浓度与水体¹⁵N存积量有相同的趋势 ($r = 0.991$, $P < 0.05$), 处理组 A 上覆水总氮浓度最高, 处理组 D 的总氮浓度最低. 本实验结果说明, 相较于未经生态修复的处理组, 固定化高效脱氮微生物与沉水植物伊乐藻的协同作用强化了系统中氮素脱除能力.

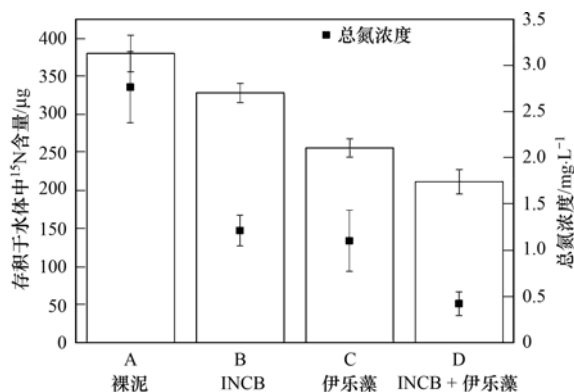


图 2 不同处理组上覆水中同位素¹⁵N存积量 ($n=5$) 及总氮浓度 ($n=3$)

Fig. 2 Isotopic ¹⁵N storage and TN concentration of overlying water in the different treatment groups

2.2 植物与底泥¹⁵N测定结果分析

同位素¹⁵N-NH₄⁺ 添加后, 种植伊乐藻的处理组 C 和组 D 中, 水生植物¹⁵N丰度均有增加. 如图 3 所示, 伊乐藻对¹⁵N-NH₄⁺ 的吸收量分别为 127.22 μ g 和 98.93 μ g, 占同位素¹⁵N-NH₄⁺ 总添加量的 25.44% 和 19.79%. 处理组 C 中可检测出的¹⁵N丰度明显高于 D 组 (单向方差分析, $P < 0.05$), 这可能是由于处理组 D 添加 INCB 后, 微生物丰度提高, 导致脱氮微生物与伊乐藻相互竞争氮素营养盐^[12], 部分含¹⁵N氮素被反硝化及厌氧氨氧化微生物利用, 以气体形式释放^[13]. 水生植物中大量存积¹⁵N, 说明铵态氮可以被植物大量吸收, 植物对氮素的吸收是水生生态系统脱氮的主要途径之一.

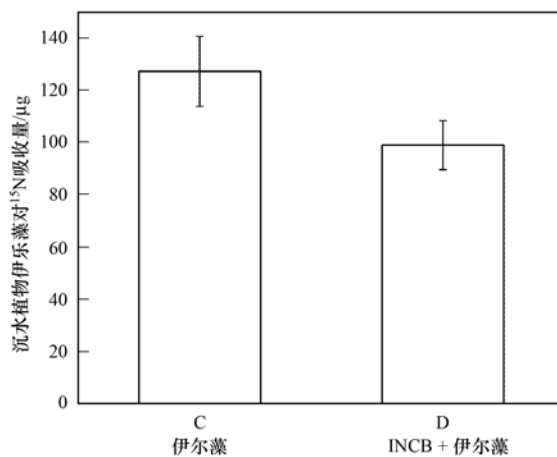


图 3 不同处理组中伊乐藻对¹⁵N的吸收量 ($n=5$)

Fig. 3 Isotopic ¹⁵N taken up by *Elodea nuttallii* in the different treatment groups

不同处理组中底泥对¹⁵N的存储量如图 4 所示, 底泥中¹⁵N-NH₄⁺ 的量介于 24.3 μ g (处理组 D) 到 39.68 μ g (处理组 A). 底泥对铵态氮的存储是氮素

循环的重要过程之一,存储强度受悬浮颗粒界面及特性的影响^[14]. 处理组 A 中底泥对¹⁵N 储存量略高于其他三组,主要由于 INCB 的添加或伊乐藻种植可能增加了底泥中脱氮微生物的丰度及活性,微生物的繁殖及伊乐藻生长会消耗底泥中的氮素营养盐^[15].

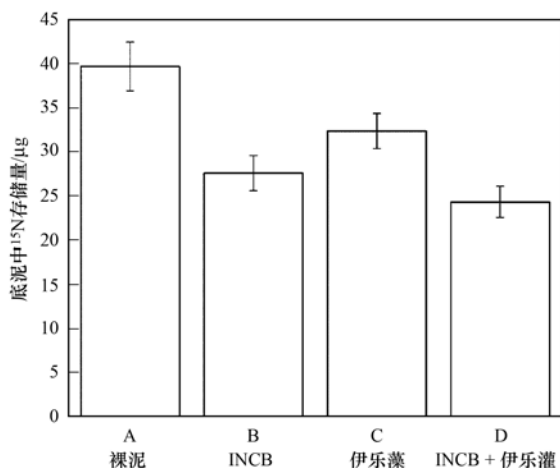


图4 不同处理组底泥中¹⁵N存储量($n=5$)

Fig. 4 Isotopic ¹⁵N storage in sediment in the different treatment groups

2.3 N₂ 排放通量结果分析

¹⁵NH₄⁺ 添加后经过 24 h 的密闭培养,不同处理组 N₂ 排放通量如图 5 所示,相较于其他 3 个处理组,处理组 B 具有最高的氮气排放通量为 164.32 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,最低的氮气排放通量出现在处理组 C,排放通量为 49.65 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ (处理组 B 高于处理组 D,处理组 C 低于处理组 A; 单向方差分析, $P < 0.05$). 添加 INCB 的两个处理组(处理组 B 和处理组 D)中的¹⁵N 标记的 N₂ 排放通量高于处理组 A 和 C,这一结果说明 INCB 的添加促进了氮素向 N₂ 的转化.

反硝化和厌氧氨氧化是两个主要微生物作用产生 N₂ 的过程^[16],图 6 显示了 4 个不同处理组泥水界面的微生物组成种类,从门级别分类结果来看,在处理组 A 中主要是变形杆菌门微生物(Proteobacteria)和蓝细菌门微生物(Cyanobacteria),占微生物群落组成的 85.5% 和 11.73%;变形杆菌门微生物(Proteobacteria)、拟杆菌门微生物(Bacteroidetes)和酸杆菌门微生物(Acidobacteria)在处理组 B 中分别占 65.61%、11.14% 和 4.76%;而在处理组 C 中,变形杆菌门微生物(Proteobacteria)和硝化螺菌门(Nitrospira)的丰度较高,占 73.54% 和 8.64%;处理组 D 中微生物组成结构与其他三

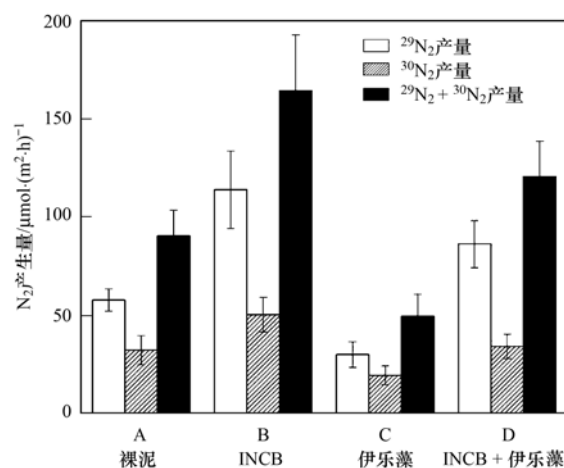


图5 不同处理组中 N₂ 排放通量($n=5$)

Fig. 5 N₂ emission fluxes in the different treatment groups

组不同,变形杆菌门微生物(Proteobacteria)占 46.65%,其次是拟杆菌门微生物(Bacteroidetes)占 18.72%,酸杆菌门微生物(Acidobacteria)7.03%和硝化螺菌门(Nitrospira)5.88%. 4 个不同处理组中变形门微生物所占比例显著高于其他门级别微生物($P < 0.05$),在变形门微生物中较常见的细菌有氨化细菌、硝化细菌和反硝化细菌,最常见反硝化细菌都属于变形菌门^[17]. 同时,对于添加了 INCB 的处理组(处理组 B 和处理组 D),浮霉状菌门微生物(Planctomycetes)的丰度明显提升($P < 0.05$),在 4 个处理组占比分别为 0.21%、2.68%、1.96% 和 3.82%. 现有研究表明厌氧氨氧化细菌属于浮霉状菌,厌氧氨氧化细菌广泛存在于自然和人工生态系统,是生态系统氮素循环过程的重要环节^[18, 19]. 根据 N₂ 产生量及微生物多样性测定结果,拟杆菌门微生物(Bacteroidetes)、酸杆菌门微生物(Acidobacteria)和硝化螺菌门(Nitrospira)等在氮循环中具有重要作用的微生物丰度同样得到提升.

同时,通过对泥水界面底泥溶解氧侵蚀深度的研究,4 个不同处理组之间存在显著性差异($P < 0.05$). 如图 7 所示,种植伊乐藻的 C、D 两组溶解氧侵蚀深度约 30 mm,而 A、B 两组未种植伊乐藻的处理组中溶解氧侵蚀深度仅约 14 mm. 对比裸泥组及添加 INCB 的处理组之间,其氧侵蚀深度并无明显区别,说明 INCB 的添加对氧侵蚀深度无显著影响. 在种植伊乐藻的处理组 C 和 D 中,由于植物根部释放氧气,氧侵蚀深度得到增加,在根系周围底泥形成好氧-厌氧微环境的同时,还会导致根区土壤氧化还原电位的变化^[20, 21]. 因此,添加 INCB 或沉水植物的处理组中反硝化细菌和厌氧氨氧化细菌丰度

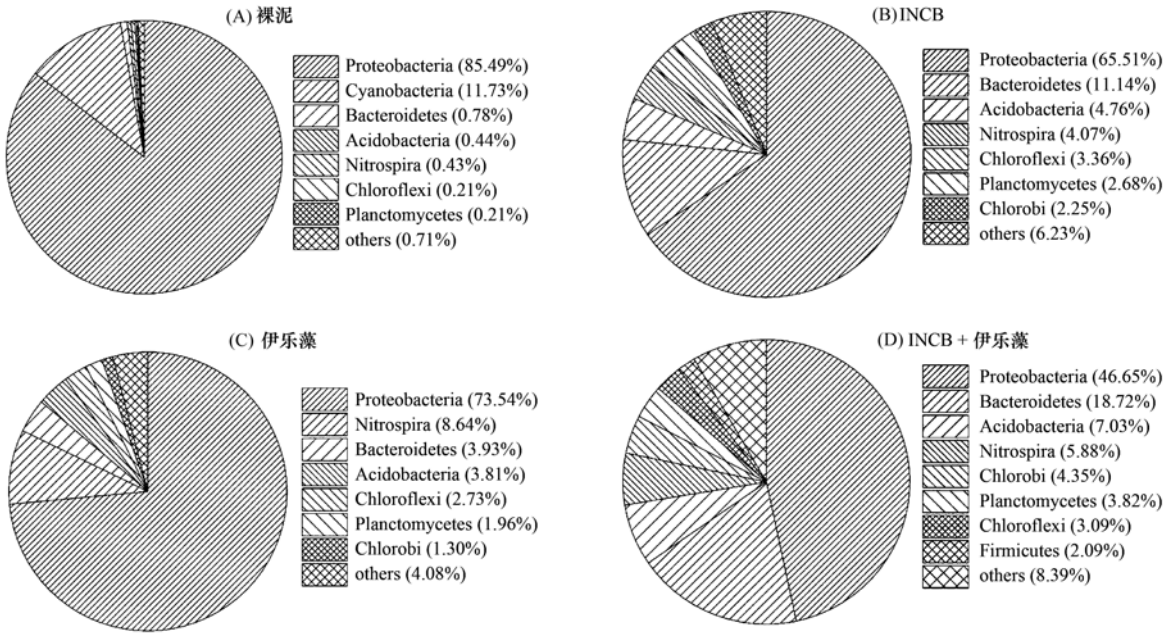


图 6 不同处理组的微生物群落门级别分类相对丰度 ($n=1$)

Fig. 6 Relative abundance of the phyla identified among the four different treatment groups

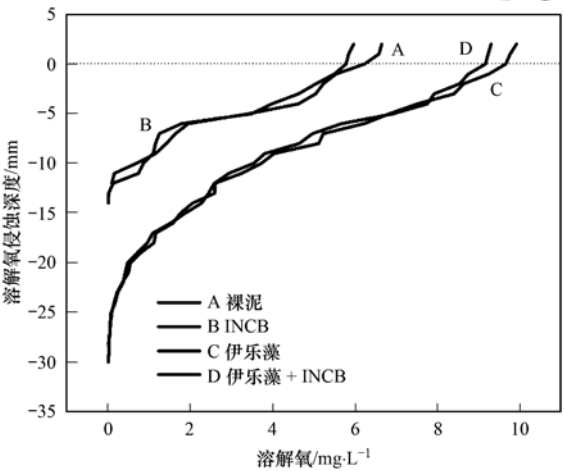


图 7 不同处理组底泥溶解氧侵蚀深度 ($n=1$)

Fig. 7 Dissolved oxygen profiles in the different treatment sediments

均有所上升,微生物群落结构发生改变,提升了氮素转化效率,氮气产生速率得到提高。

2.4 N_2O 排放通量结果分析

不同处理组中 N_2O 排放通量如图 8 所示, N_2O 排放通量介于 $217.90 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $55.06 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 之间。其中处理组 A 的排放通量最低,处理组 D 的排放通量最高,添加 INCB 的处理组(处理组 B 和处理组 D)相较于未添加 INCB 的处理组(处理组 A 和处理组 C)具有更高的 N_2O 排放通量 ($P < 0.05$)。底泥微生物参与的硝化和反硝化过程是产生 N_2O 的主要途径^[22], N_2O 是硝化和反硝化过程的中间产物之一^[23],根据图 6 所示结果,在种植

伊乐藻的处理组 C 和 D,硝化螺菌门(*Nitrospira*)微生物丰度得到明显提升,更高的微生物丰度和底泥溶解氧浓度会导致更高 N_2O 释放量^[24]。 N_2O 排放通量及微生物丰度测定结果说明,固定化高效脱氮微生物与伊乐藻联用技术的应用改善了底泥中微生物生存环境,提升微生物丰度及活性,促进氮素循环。 N_2O 是一种温室气体,对于添加了 INCB 和伊乐藻的处理组 D, N_2O 排放通量较高。表 2 显示在相关研究中 N_2O 排放通量,其仅占总氮素气体比例极少部分。本研究结果发现,水生植物的种植和微生物的活性会对 N_2O 的释放产生影响。

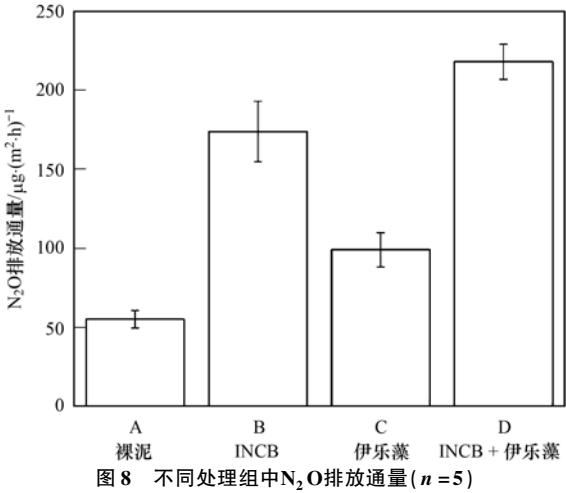


图 8 不同处理组中 N_2O 排放通量 ($n=5$)

Fig. 8 N_2O emission fluxes in the different treatment groups

2.5 ^{15}N 平衡模型

4个不同处理组内氮素平衡模型如图9所示,

表 2 相关研究中N₂O排放通量及占总氮素气体比例

Table 2 Reported values of N ₂ O emission and contribution to total nitrogen released in form of gas			
研究体系	N ₂ O 排放通量	占总氮素气体比例%	文献
垂直流人工湿地	<0.04 mmol·(m ² ·d) ⁻¹	<6	[25]
	<960 mg·(m ² ·d) ⁻¹	<16	[26]
水平流人工湿地	<30.66 mg·(m ² ·d) ⁻¹	<6	[27]
	<36 mg·(m ² ·d) ⁻¹	<3.3	[26]
反硝化反应器	<22.4 mg·L ⁻¹	<1.6	[28]
处理组 A(裸泥)	<1.32 mg·(m ² ·d) ⁻¹	<2.06	本研究
处理组 B(INCB)	<4.17 mg·(m ² ·d) ⁻¹	<3.52	本研究
处理组 C(伊乐藻)	<2.38 mg·(m ² ·d) ⁻¹	<6.43	本研究
处理组 D(INCB + 伊乐藻)	<5.23 mg·(m ² ·d) ⁻¹	<5.87	本研究

在处理组 C 和 D 组中沉水植物伊乐藻对¹⁵NH₄⁺吸收率分别为 25.44% 和 19.79%。在 4 个不同处理组中,底泥对于¹⁵NH₄⁺存储率分别为 7.94%、5.52%、6.47% 和 4.86%。¹⁵NH₄⁺的总去除率分别为 24%、34.38%、48.84% 和 57.74%,在加入伊乐藻和 INCB 的 D 组中,虽然 INCB 降低了植物对氮营养盐的吸收速率,但总体氮素去除率仍大于添加 INCB 的 B 组和添加伊乐藻的 C 组。实验结果表明,在各生态处理系统中,植物吸收和微生物脱氮作用都能去除水体中的氮素,均是氮素脱除有效途径。伊乐藻与高效脱氮微生物联用技术(E-INCB)的应用,可以提高水体氮素的脱除速率,对于促进水体净化具有重要作用。

(2)通过种植沉水植物伊乐藻和添加固定化高效脱氮微生物,增加了底泥微生物的生物活性和丰度,且在添加伊乐藻与脱氮微生物处理组中氮素脱除效率最高。

(3)在添加伊乐藻和固定化高效脱氮微生物的处理组中,变形杆菌门微生物(Proteobacteria)、拟杆菌门微生物(Bacteroidetes)、硝化螺菌门微生物(Nitrospira)和浮霉状菌门微生物(Planctomycetes)等微生物丰度均得到提高,说明伊乐藻和固定化高效脱氮微生物的加入,增强了河道底泥中的脱氮微生物的多样性。

(4)根据室内模拟实验结果,植物吸收和微生物生化作用去除水体中的氮素是氮素脱除的有效途径,通过对伊乐藻与高效脱氮微生物联用技术的应用,可以提高水体氮素的脱除速率,对于促进水体净化具有重要作用。

参考文献：

[1] Yang X Y, Liu Q, Fu G T, *et al.* Spatiotemporal patterns and source attribution of nitrogen load in a river basin with complex pollution sources[J]. *Water Research*, 2016, **94**: 187-199.

[2] Wu H M, Zhang J, Li C, *et al.* Mass balance study on phosphorus removal in constructed wetland microcosms treating Polluted River water[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2013, **41** (9): 844-850.

[3] 吴锋, 战金艳, 邓祥征, 等. 中国湖泊富营养化影响因素研究——基于中国 22 个湖泊实证分析[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(1): 94-100.

Wu F, Zhan J Y, Deng X Z, *et al.* Influencing factors of lake eutrophication in China——a case study in 22 lakes in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(1): 94-100.

[4] 李宝珍, 范晓荣, 徐国华. 植物吸收利用铵态氮和硝态氮的分子调控[J]. *植物生理学通讯*, 2009, **45**(1): 80-88.

Li B Z, Fan X R, Xu G H. Molecular regulation for uptake and utilization of ammonium and nitrate in plant[J]. *Plant Physiology and Molecular Biology*, 2009, **45**(1): 80-88.

[5] 刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 等. 伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10):

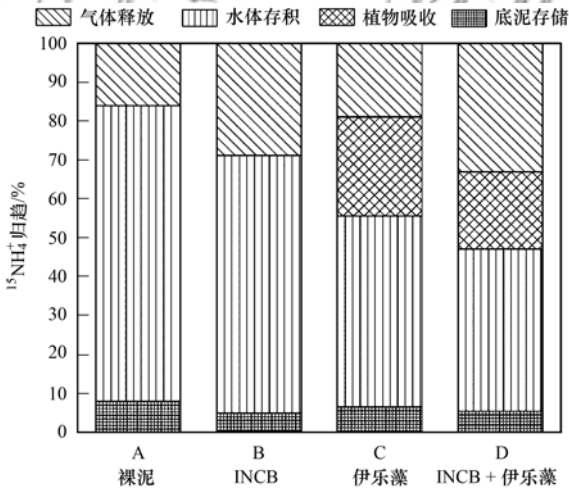


图 9 不同处理组不同途径对于¹⁵NH₄⁺的转化情况

Fig. 9 Proportion of ¹⁵NH₄⁺ transformed by different pathways in the different treatment groups

3 结论

(1)伊乐藻与固定化高效脱氮微生物联用修复技术的应用,改变了泥水界面微环境,增加了氧侵蚀深度,为脱氮微生物提供良好的好氧-缺氧生存环境,促进微生物对氮素吸收转化过程。

- 3764-3768.
- Liu D D, Li Z K, Ye Z X, *et al.* Nitrogen uptake and denitrification study on the joint treatment of aquatic vegetation and immobilized nitrogen cycling bacteria in Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3764-3768.
- [6] 韩华杨, 李正魁, 王浩, 等. 伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡湖河道脱氮机制的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1397-1403.
- Han H Y, Li Z K, Wang H, *et al.* Effect of *Elodea nuttallii*-immobilized nitrogen cycling bacteria on nitrogen removal mechanism in an Inflow river, Gonghu Bay [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1397-1403.
- [7] Peipoch M, Gacia E, Blesa A, *et al.* Contrasts among macrophyte riparian species in their use of stream water nitrate and ammonium: insights from ^{15}N natural abundance [J]. *Aquatic Sciences*, 2014, **76**(2): 203-215.
- [8] 赵琳, 李正魁, 周涛, 等. 伊乐藻-氮循环菌联用对太湖梅梁湾水体脱氮的研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3057-3063.
- Zhao L, Li Z K, Zhou T, *et al.* Denitrification study of *Elodea nuttallii*-nitrogen cycling bacteria restoration in Meiliang Bay, Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3057-3063.
- [9] Meng P P, Hu W R, Pei H Y, *et al.* Effect of different plant species on nutrient removal and rhizospheric microorganisms distribution in horizontal-flow constructed wetlands [J]. *Environmental Technology*, 2014, **35**(5-8): 808-816.
- [10] Li Z K, Pu P M, Hu W P, *et al.* Improvement of Taihu water quality by the technology of immobilized nitrogen cycle bacteria [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2002, **13**(2): 115-118.
- [11] Song C C, Wang Y S, Wang Y Y, *et al.* Emission of CO_2 , CH_4 and N_2O from freshwater marsh during freeze-thaw period in northeast of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(35): 6879-6885.
- [12] Toet S, Huibers L H F A, Van Logtestijn R S P, *et al.* Denitrification in the periphyton associated with plant shoots and in the sediment of a wetland system supplied with sewage treatment plant effluent [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **501**(1-3): 29-44.
- [13] Li C, Ren H Q, Xu M, *et al.* Study on anaerobic ammonium oxidation process coupled with denitrification microbial fuel cells (MFCs) and its microbial community analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **175**: 545-552.
- [14] Bédard C, Knowles R. Physiology, biochemistry, and specific inhibitors of CH_4 , NH_4^+ , and CO oxidation by Methanotrophs and Nitrifiers [J]. *Microbiological Reviews*, 1989, **53**(1): 68-84.
- [15] Eriksson P G, Weisner S E B. An experimental study on effects of submersed macrophytes on nitrification and denitrification in ammonium-rich aquatic systems [J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, **44**(8): 1993-1999.
- [16] Risgaard-Petersen N, Nielsen L P, Rysgaard S, *et al.* Application of the isotope pairing technique in sediments where anammox and denitrification coexist [J]. *Limnology and Oceanography-Methods*, 2003, **1**(1): 63-73.
- [17] 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 等. 16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1704-1716.
- Yang H, Zhang G Z, Yang X N, *et al.* Microbial community structure and diversity in cellar water by 16S rRNA high-throughput sequencing [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1704-1716.
- [18] Schmid M C, Maas B, Dapena A, *et al.* Biomarkers for *in situ* detection of anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(4): 1677-1684.
- [19] Schmid M C, Risgaard-Petersen N, Van De Vossenberg J, *et al.* Anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in marine environments: widespread occurrence but low diversity [J]. *Environmental Microbiology*, 2007, **9**(6): 1476-1484.
- [20] Soana E, Bartoli M. Seasonal variation of radial oxygen loss in *Vallisneria spiralis* L.: an adaptive response to sediment redox? [J]. *Aquatic Botany*, 2013, **104**: 228-232.
- [21] Christensen P B, Revsbech N P, Sand-Jensen K. Microsensor analysis of oxygen in the rhizosphere of the aquatic macrophyte *Littorella uniflora* (L.) ascherson [J]. *Plant Physiology*, 1994, **105**(3): 847-852.
- [22] Bouwman A F. Nitrogen oxides and tropical agriculture [J]. *Nature*, 1998, **392**(6679): 866-867.
- [23] Kimochi Y, Inamori Y, Mizuochi M, *et al.* Nitrogen removal and N_2O emission in a full-scale domestic wastewater treatment plant with intermittent aeration [J]. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 1998, **86**(2): 202-206.
- [24] Sun H Y, Zhang C B, Song C B, *et al.* The effects of plant diversity on nitrous oxide emissions in hydroponic microcosms [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 544-547.
- [25] Davidsson T E, Stepanauskas R, Leonardson L. Vertical patterns of nitrogen transformations during infiltration in two wetland soils [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(9): 3648-3656.
- [26] Søvik A K, Augustin J, Heikkinen K, *et al.* Emission of the greenhouse gases nitrous oxide and methane from constructed wetlands in Europe [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**(6): 2360-2373.
- [27] Maltais-Landry G, Maranger R, Brisson J. Effect of artificial aeration and macrophyte species on nitrogen cycling and gas flux in constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(2): 221-229.
- [28] Elgood Z, Robertson W D, Schiff S L, *et al.* Nitrate removal and greenhouse gas production in a stream-bed denitrifying bioreactor [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(11): 1575-1580.

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physiochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)