

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第8期

Vol.34 No.8

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2006 ~ 2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析	戴永立, 陶俊, 林泽健, 谢绍东, 曹军骥, 张仁健 (2925)
南京北郊秋季 VOCs 及其光化学特征观测研究	李用宇, 朱彬, 安俊琳, 高晋徽, 夏丽, 张祥志, 秦玮, 汤莉莉 (2933)
大气 PM _{2.5} 中水溶性离子在线观测技术的应用研究	程萌田, 潘月鹏, 王辉, 刘全, 王跃思 (2943)
一种纳米气溶胶发生系统的设计及性能测试	麦华俊, 蒋靖坤, 何正旭, 郝吉明 (2950)
焦炉顶和厂区内环境中有机碳和元素碳的粒径分布	刘效峰, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 宋耕芳 (2955)
昼夜增温对大豆田土壤 N ₂ O 排放的影响	胡正华, 周迎平, 崔海玲, 陈书涛, 肖启涛, 刘艳 (2961)
不同土地利用方式下冬季 N ₂ O 排放及其影响因素	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 侯海军, 陈春兰, 魏文学 (2968)
基于支持向量回归模型的水稻田甲烷排放通量预测研究	陈强, 蒋卫国, 陈曦, 袁丽华, 王文杰, 潘英姿, 王维, 刘孝富, 刘海江 (2975)
夏季黄海和渤海微表层和次表层海水中营养盐的分布特征	王文涛, 杨桂朋, 于娟, 吴冠伟 (2983)
氮磷浓度对东海原甲藻优势种群吸附 BDE28 和 BDE47 的影响	汪芳, 葛蔚, 柴超, 孟祥霞 (2992)
基于光学分类的太湖水体叶绿素 a 浓度高光谱遥感	孙德勇, 周晓宇, 李云梅, 陈晓玲, 黄昌春, 龚绍琦 (3002)
基于浮游细菌生物完整性指数的河流生态系统健康评价——以滇池流域为例	黄艺, 舒中亚 (3010)
珠江三角洲城市非点源 COD 影响因素分析及其负荷估算	廖义善, 卓慕宁, 李定强, 郭太龙 (3019)
珠江流域河流碳输出通量及变化特征	张连凯, 覃小群, 杨慧, 黄奇波, 刘朋雨 (3025)
三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征	曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 王佐庆 (3035)
三峡库区消落带典型草本植物淹水浸泡后可溶性有机碳的释放特征	谭秋霞, 朱波, 花可可 (3043)
混合层深度对藻类生长的影响研究	陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 张平, 刘德富 (3049)
伊乐藻-氮循环菌联用对太湖梅梁湾水体脱氮的研究	赵琳, 李正魁, 周涛, 吴宁梅, 叶忠香, 刘丹丹 (3057)
组合型生态浮床对上覆水和沉积物之间氮磷的影响	郑立国, 杨仁斌, 王海萍, 宋建军 (3064)
生物炭覆盖对底泥污染物释放的影响	李扬, 李锋民, 张修稳, 吴召富, 于辉 (3071)
东莞石马河流域重金属污染及生态毒性的时空差异	高磊, 陈建耀, 柯志庭, 王江, 杨雪韵, 清水裕太 (3079)
连环湖牙门气泡沉积物重金属演化 and 污染研究	肖海丰, 臧淑英, 关莹, 刘少军, 徐海凤, 孙清展, 王京京, 李苗 (3088)
人工湿地净化工业区含非污染降雨径流的效果研究	敬丹丹, 万金泉, 马邕文, 李东亚, 王艳, 黄明智 (3095)
四环素抗性基因在人工湿地中的去除及累积	郑加玉, 刘琳, 高大文, 刘超翔 (3102)
不确定节点水量下水质监测点优化选址方法	刘书明, 吴雪, 欧阳乐岩 (3108)
饮用水中含氮消毒副产物三氯硝基甲烷的形成过程和影响因素	丁春生, 邹邦文, 缪佳, 傅洋平, 沈嘉辰 (3113)
漆酶催化氧化水中雌激素的研究	夏青, 谢卫平, 刘国强, 廖云燕, 王斌楠, 孔德洋, 陆隼鹤 (3119)
碳纳米管电极电还原降解水中头孢他啶	朱宏, 胡翔, 李俊峰 (3125)
UV-vis 光照下喹类抗菌药氟康唑的光化学反应类型	葛林科, 李凯, 杨凯, 邢广水, 于春艳, 张蓬, 姚子伟 (3132)
氙灯/TiO ₂ 体系下敌草隆光催化降解动力学研究	阳海, 曾健, 黎源, 阳立平, 易兵 (3137)
羟基磷灰石对水中刚果红的吸附作用研究	詹艳慧, 林建伟 (3143)
乙醇处理对树脂基纳米水合氧化铁结构及其除砷性能的影响	万琪, 李旭春, 潘丙才 (3151)
污水中溶解性有机氮类化合物的氯化反应特性及其消毒副产物生成潜能	刘冰, 于鑫, 余国忠, 古励, 赵承美, 翟慧敏, 李清飞 (3156)
短程深度脱氮中试工艺的低温启动和维持	顾升波, 王淑莹, 彭永臻 (3164)
生物活性炭厌氧氨氧化反应器启动过程研究	赖玮毅, 周伟丽, 何圣兵 (3171)
东北三省畜禽养殖粪固氮激素排放及其潜在污染风险	刘妹芳, 李艳霞, 张雪莲, 冯成洪, 鲁肖飞, 杨明, 李帷, 朱铁群, 黄泽春 (3180)
淮河流域土壤中全氟化合物的空间分布及组成特征	孟晶, 王铁宇, 王佩, 吕永龙 (3188)
华北平原典型区土壤氟的形态及其分布特征	易春瑶, 汪丙国, 靳孟贵 (3195)
长期施磷的产量效应及其环境风险评价	颜晓, 王德建, 张刚, 冉景, 郑继成 (3205)
污灌渠中有机氯农药对沿岸土壤的影响	徐亮, 张彩香, 刘敏, 廖小平, 姚林林, 李佳乐, 向青清 (3211)
表面活性剂及其组合洗脱污染土壤中的硫丹	熊佰炼, 郑国灿, 张进忠, 邢贻, 徐卫红 (3216)
黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响	赵彤, 蒋跃利, 闫浩, 黄懿梅, 安韶山 (3223)
氮素添加对樟树林红壤微生物的影响	郁培义, 朱凡, 宿少锋, 王志勇, 闫文德 (3231)
医疗废物焚烧炉周边环境介质中二噁英的浓度、同系物分布与来源分析	黄文, 张素坤, 杜国勇, 张漫雯, 冯桂贤, 任明忠 (3238)
固相萃取和固相萃取评价多环芳烃降解过程中的生物有效性变化	郭美霞, 巩宗强, 李晓军, 刘丹, 王悦 (3244)
改良型固定化 <i>Pseudomonas oleovorans</i> DT4 降解四氢呋喃的研究	邵钱, 叶杰旭, 欧阳杜娟, 陈建孟, 陈东之 (3251)
PCR-DGGE 技术解析固体碳源表面生物膜的微生物群落结构	徐影, 仇天雷, 韩梅琳, 李军, 王旭明 (3257)
温度对嗜酸性硫杆菌活性和生物成因次生铁矿物形成的影响	宋永伟, 赵博文, 霍敏波, 崔春红, 周立祥 (3264)
小白菜对外源硝酸盐和亚硝酸盐动态吸收的差异及其机制研究	郭璐, 满楠, 梁东丽, 谢钧宇, 刘娟娟 (3272)
预处理对打捆麦秸贮存和厌氧生物产沼气的的影响	马慧娟, 陈广银, 杜静, 常志州, 叶小梅 (3280)
硝酸盐对淡水水生生物毒性及水质基准推导	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3286)
生物毒性测试微孔板 MTOXPlate 的分析性能研究	林奕云, 张国霞, 贺丽苹, 孙国萍, 许玫英 (3294)
两种实验设计研究 DES 和 EV 对 MCF-7 细胞增殖的联合作用	刘倩, 雷炳莉, 安静, 尚羽, 钟玉芳, 康佳, 文育 (3303)
中国近海海洋环境多氯联苯 (PCBs) 污染现状及影响因素	刘敏霞, 杨玉玉, 李庆孝, 王俊 (3309)
城市污水处理厂出水中的药品和个人护理品	郑少奎, 李晓峰 (3316)
生物炭封存技术研究进展	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (3327)
饮用水水源地严格管理水质的对策分析——对实行严格水资源管理问题上的看法和建议	傅国伟 (3334)
《环境科学》征稿简则 (2967) 《环境科学》征订启事 (3034) 信息 (3063, 3136, 3194, 3302)	

伊乐藻-氮循环菌联用对太湖梅梁湾水体脱氮的研究

赵琳, 李正魁*, 周涛, 吴宁梅, 叶忠香, 刘丹丹

(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: 从太湖梅梁湾采集无扰动泥芯样, 分别添加伊乐藻、固定化氮循环菌, 模拟生态修复并探讨其机制。采用同位素配对技术测定了伊乐藻-氮循环菌技术对反硝化速率的影响。结果表明, 伊乐藻与氮循环菌联合作用的试验柱的反硝化速率(以N计)最高, 为 $104.64 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 与裸泥试验柱相比增加了150%。采用实时荧光定量PCR技术(RT-qPCR)对沉积物中反硝化菌功能基因 *nirS*、*nirK* 和 *nosZ* 进行定量研究, 结果显示, 反硝化菌的功能基因 *nirS* 和 *nosZ* 比对照裸泥组高出1~2个数量级, 表明较高的微生物量促进了反硝化脱氮的能力。室内模拟实验还表明, 沉水植物提高了耦合硝化反硝化的作用, 氮循环菌提高了非耦合硝化反硝化的作用, 沉水植物与微生物的联合作用提高了沉积物的总反硝化速率, 促进了湖泊水体氮素的脱除, 起到了净化作用。

关键词: 伊乐藻-氮循环菌联用; 反硝化; 生态修复; 同位素配对技术; RT-qPCR 技术

中图分类号: X172; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)08-3057-07

Denitrification Study of *Elodea nuttallii*-Nitrogen Cycling Bacteria Restoration in Meiliang Bay, Taihu Lake

ZHAO Lin, LI Zheng-kui, ZHOU Tao, WU Ning-mei, YE Zhong-xiang, LIU Dan-dan

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

Abstract: Undisturbed sediment cores were collected from Meiliang Bay, Taihu Lake, and the integrated *Elodea nuttallii*-nitrogen cycling bacteria technology was applied as a restoration method. The effects of the *Elodea nuttallii*-nitrogen cycling bacteria technology on sediment denitrification was observed by isotope pairing technique. The highest denitrification rate of $104.64 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ was achieved in sediments with *Elodea nuttallii*-nitrogen cycling bacteria assemblage. The abundance of *nirS*, *nirK* and *nosZ* genes involved in denitrification processes in the sediments (within 2 cm below the water-sediment interface) were measured by real-time quantitative PCR (RT-qPCR). The abundance of *nirS* and *nosZ* genes in the sediments with restoration treatments was increased, which was more than one order of magnitudes higher than that in bare sediments. The results indicated that the presence of macrophyte and nitrogen cycling bacteria could increase benthic nitrogen removal by facilitating coupled nitrification-denitrification and uncoupled nitrification-denitrification.

Key words: *Elodea nuttallii*-nitrogen cycling bacteria assemblage; denitrification; restoration; isotope pairing technique; RT-qPCR

近年来,随着社会经济的快速发展,城镇建设进程加快,大量含氮污染物被排入河流、湖泊,导致湖泊富营养化,使得湖泊水体生态系统的结构和功能发生改变,这些变化可能造成水体由草型稳态转换为藻型稳态^[1,2],从而威胁湖泊生态环境。因此,如何脱除湖泊水体中的氮素具有重要意义。

在湖泊生态系统中,氮素输入水体后,由氮循环细菌经氨化、硝化、反硝化作用最终以 N_2 、 N_2O 等气体形式离开湖泊系统;同时,水生植物及水生生物吸收同化水体氮素,经收割、捕捞后输出湖泊系统;另外,部分氮素经过沉积作用固定在底泥中^[3]。由此可见,氮循环细菌与水生植物在湖泊水体氮素脱除过程中扮演着重要作用。近年来,国内外学者对沉水植物吸收去除氮素效果及机制进行了大量研究^[4-7]。另外,利用固定化氮循环菌技术进行湖泊

氮素去除的应用研究也已见报道^[8-10]。目前,已有学者研究了固定化氮循环细菌技术与沉水植物联合作用去除水体氮素^[11]。然而上述研究主要针对水体氮素去除效果的研究,有关沉水植物与氮循环菌联合作用下降低水体氮负荷的机制研究尚不多见。因此,本研究选择秋冬季节生长良好的伊乐藻种(*Elodea nuttallii*),结合固定化氮循环细菌,通过实验室泥柱样模拟实验,分析了伊乐藻-氮循环菌联合作用下湖泊水体反硝化速率的变化,探讨其去除湖泊氮素的机制。

收稿日期: 2012-11-15; 修订日期: 2013-01-18

基金项目: 江苏省自然科学基金重点项目(BK2010056); 江苏省环境保护厅研究项目(201108); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-006, 2013ZX07101-014)

作者简介: 赵琳(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊水体生态修复, E-mail: zhaolin_qin@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhkuili@nju.edu.cn

1 材料与方法

1.1 泥样采集及实验设计

2011 年 9 月在太湖梅梁湾 (31°27'59"N, 120°10'48"E, 图 1) 用有机玻璃柱状采样器 (内径 9 cm, 长 60 cm) 采集 24 根未扰动泥柱样, 柱样上部保留部分原上覆水样, 柱样两端用橡胶塞密封, 垂直放置, 尽量无扰动带回实验室, 同步采集 100 L 上覆水及伊乐藻, 一起带回实验室. 小心将泥柱样分别移入相同尺寸的有机玻璃柱状培养柱 (内径 9 cm, 长 100 cm) 中, 培养柱中保留原泥柱上层 20 cm 的泥样. 培养柱分为 6 组, 每 4 个柱样为 1 组, 每组的 4 个柱样分别进行不同的处理: A 柱作为空白对照, 不做任何处理; B 柱添加用柔性网孔材料包覆的固定化氮循环菌; C 柱用扦插法种植 5 株 10 cm 长的长势良好的伊乐藻; D 柱添加用柔性网孔材料包覆的固定化氮循环菌, 同时用同样方法种植伊乐藻. 处理完后, 用注射器尽量无扰动将采集的上覆水注入培养柱中, 进行预培养, 实验柱内上覆水和氮循环菌载体每周更换一次. 6 个星期后, 实验柱内伊乐藻生长良好, 柱内生态系统趋于稳定, 更换氮循环菌载体, 用新采集的湖水更换柱内的水, 静置稳定 24 h 后, 测定实验柱中 N_2 排放及水体中各理化指标, 分析各试验柱中反硝化速率变化及各形态氮素的变化.

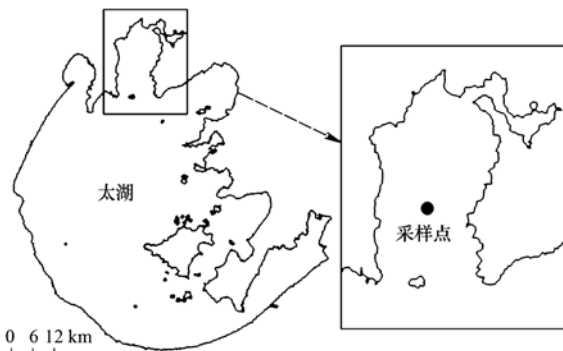


图 1 太湖梅梁湾采样点示意

Fig. 1 Location of the sampling site in Meiliang Bay of Lake Taihu

1.2 固定化氮循环菌制备

采集太湖水样、底泥、植物根区微生物样品, 接种于选择性培养基上, 进行富集筛选, 得到纯化的太湖土著氨化、亚硝化、硝化、反硝化细菌. 将亲水性玻璃态单体甲基丙烯酸- β -羟乙酯 [2-Hydroxyethyl methylacrylate (HEMA)]、丙烯酸羟乙酯 [2-Hydroxyethyl acrylate (HEA)] 与蒸馏水按特定体积比均匀混合, 并用氮气饱和, 采用 ^{60}Co - γ 射线 (辐射剂量 10 kGy), 在 -78℃ 温度条件下辐照制备

形成生物相容性固定化聚合物载体^[9]. 将辐射聚合后制备的固定化载体切成 5 mm 见方的小块, 用蒸馏水浸泡至充分膨胀, 再用氮循环细菌培养基浸泡, 待培养基进入载体内部后, 加入经活化培养进入对数生长期的氮循环细菌 (氨化、硝化、亚硝化和反硝化细菌培养液各 200 mL), 利用曝气设备在 28℃ 条件下按照 16 h 曝气搅动, 8 h 静置的模式连续培养, 使氨化、硝化、亚硝化和反硝化细菌交替在有氧条件及厌氧条件下吸附于固定化载体表面, 并通过增殖进入多孔载体内部使之固定, 制备成固定化氮循环菌 (immobilized nitrogen cycling bacteria, INCB).

1.3 反硝化速率的测定

1.3.1 反硝化速率测定方法

采用同位素配对技术, 结合膜接口质谱仪 (membrane inlet mass spectrometry, MIMS) 测定同位素反硝化产物 N_2 , 计算反硝化速率. 同位素配对技术是指向上覆水中添加 $^{15}\text{NO}_3^-$ 同位素指示剂, $^{15}\text{NO}_3^-$ 与水中原有的 $^{14}\text{NO}_3^-$ 混合进入沉积物, 经过反硝化作用, 生成氮气同位素产物 $^{28}\text{N}_2$ 、 $^{29}\text{N}_2$ 、 $^{30}\text{N}_2$. 然后通过膜接口装置将水体中的溶解性气体转化为气体形态, 直接进入质谱在线测定水样中氮气, 利用测定出的氮气同位素产物与同位素配对法计算出耦合和非耦合的反硝化脱氮速率^[12]. 耦合反硝化 (D_n) 是指反硝化过程中的 NO_3^- 来自氨氮经硝化过程生成, 非耦合反硝化 (D_w) 是指反硝化过程所需的 NO_3^- 来自上覆水体.

1.3.2 反硝化速率的测定和计算方法

反硝化实验在培养 6 个星期后进行, 选择 3 组培养柱, 向每个培养柱分别加入 $\text{Na}^{15}\text{NO}_3$ (99.16%), 使其终浓度为 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. 07:00 ~ 16:00 连续进行无顶空密闭静态培养 9 h. 9 h 后, 用注射器小心采集沉积物表层水样, 在无气泡产生情况下溢流收集到细长的气体采集管中, 气体采集管中预先加入 0.5 mL ZnCl 溶液 (质量分数, 50%), 收集的样品恒温保存, 立即送中国科学院南京地理与湖泊研究所分析中心使用膜接口质谱仪测定溶解性气体 $^{28}\text{N}_2$ 、 $^{29}\text{N}_2$ 、 $^{30}\text{N}_2$ 、 O_2 .

通过生成的 $^{29}\text{N}_2$ 、 $^{30}\text{N}_2$, 运用下述公式计算反硝化速率.

利用 $^{15}\text{NO}_3^-$ 发生的反硝化速率:

$$D_{15} = r_{29} + 2r_{30}$$

利用 $^{14}\text{NO}_3^-$ 发生的反硝化速率:

$$D_{14} = D_{15} \times \frac{r_{29}}{2r_{30}}$$

非耦合硝化反硝化速率:

$$D_w = D_{15} \times \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$$

耦合硝化反硝化速率:

$$D_n = D_{14}$$

总反硝化速率:

$$D_{tot} = D_w + D_n$$

式中, r_{29} 、 r_{30} 分别代表 $^{29}\text{N}_2$ 、 $^{30}\text{N}_2$ 产生速率.

$$\varepsilon = \frac{[\text{NO}_3^-]_a - [\text{NO}_3^-]_b}{[\text{NO}_3^-]_a}$$

式中, ε 代表培养实验中 $^{15}\text{NO}_3^-$ 的丰度, a、b 分别代表添加同位素之后和之前^[12-14].

1.4 反硝化菌定量实验

采用实时荧光定量 PCR 技术 (RT-qPCR) 对反硝化菌的功能基因亚硝酸还原酶 (*nirS*、*nirK*) 和氧化亚氮还原酶 (*nosZ*) 进行定量研究. 分别采集经过不同生态修复方法处理的 4 根试验柱表层 2 cm

的沉积物,使用土壤 DNA 提取试剂盒 (FastDNA® Spin Kit for Soil MP, Biomedicals, CA, USA) 提取表层 2cm 沉积物中的 DNA,提取的 DNA 在 -20℃ 储存. *nirS*、*nirK* 和 *nosZ* 这 3 种功能基因的引物分别为 cd3aF-R3cd、FlaCu-R3Cu^[15] 和 nosZ2F-nosZ2R^[16] (表 1),由华大基因合成. RT-qPCR 反应体系为 20 μL; SYBR Premix Ex Taq 10 μL; PCR 正向引物 0.4 μL (10 μmol·L⁻¹); PCR 反向引物 0.4 μL (10 μmol·L⁻¹); DNA 模板 8 μL; 去离子水 1.2 μL. PCR 扩增反应条件如表 1 所示. 用表 1 中所示的引物分别对 3 种基因 (*nirS*、*nirK* 和 *nosZ*) 的目的片段进行扩增,之后对 PCR 扩增产物进行克隆并提取质粒 (MinBEST Plasmid Purification Kit Ver3.0,大连宝生物公司),通过紫外分光光度计测量 DNA 浓度,根据质粒的分子量将质量换算为拷贝数即得到定量标准品. 通过标准品绘制标准曲线对 DNA 样品进行定量^[17]. 标准曲线的绘制及检测结果的计算由软件 Rotor-Gene 6000 Series Software1.7 完成.

表 1 引物对及 RT-qPCR 扩增条件

Table 1 Primer pairs and PCR profiles used for the real-time PCR			
目标基因	引物名称	序列 (5'-3')	PCR 扩增条件
<i>nirS</i>	cd3aF	G TSAACG TSAAGGARACSGG	95℃/3 min, 40cycles of 95℃/20 s, 58℃/20 s, 72℃/40 s
	R3cd	GASTTCGGRTGSGTCTTGA	
<i>nirK</i>	FlaCu	ATCATGGTCTGCCGCCG	95℃/3 min, 40cycles of 95℃/20 s, 60℃/20 s, 72℃/40 s
	R3Cu	GCCTCGATCAGRTTGTGGTT	
<i>nosZ</i>	nosZ2F	CGCRACGGCAASAAGGTSMSST	95℃/3 min, 40cycles of 95℃/20 s, 60℃/20 s, 72℃/40 s
	nosZ2R	CAKRTGCAKSGCRTGGCAGAA	

1.5 水质指标及测定方法

氨氮: 纳氏试剂分光光度法; 硝态氮: 紫外分光光度法; 总氮: 过硫酸钾氧化、紫外分光光度法; pH: 便携式 pH 计; DO: 便携式溶氧仪.

1.6 测定仪器设备及数据分析

美国 Thermo Scientific 紫外分光光度计 Nanodrop 2000; 澳大利亚 Corbett Life Science 实时定量 PCR 仪 Rotor-Gene™ 6000; 日本岛津 UV-2450 紫外可见分光光度计; 便携式 YSI pH 计 pH100; 便携式 YSI 溶氧仪 550A; 温度计.

本研究中数据归纳采用 Excel 进行; 图表分析采用 Origin 7.5 进行

2 结果与讨论

2.1 反硝化速率测定结果

采用同位素配对技术结合膜接口质谱仪,测定

反硝化同位素气体产物²⁸N₂、²⁹N₂、³⁰N₂,得到不同处理情况下的反硝化速率(图 2). 实验结果表明,空白柱 A 的总反硝化速率 (D_{tot}) 最低,为 41.69 μmol·(m²·h)⁻¹; 添加微生物的 B 柱总反硝化速率为 83.76 μmol·(m²·h)⁻¹; 种植伊乐藻的 C 柱总反硝化速率为 53.85 μmol·(m²·h)⁻¹; 种植伊乐藻同时添加微生物的 D 柱的总反硝化速率最高,为 104.64 μmol·(m²·h)⁻¹. 表明种植沉水植物伊乐藻,添加氮循环菌后显著提高了湖泊水生态系统的反硝化速率,促进了氮素脱除水体. 不同生态修复处理柱中,耦合反硝化速率 (D_n) 占总反硝化速率的比率 (D_n/D_{tot}) 表现为种植伊乐藻的 C 柱最高 (64.69%), 添加固定化氮循环菌的 B 柱最低 (35.45%); 耦合反硝化 (D_n) 所需的 NO₃⁻ 是硝化作用的产物,硝化作用是需氧过程,沉积物氧气侵蚀深度越大,沉积物上部的好氧层厚度越大,越有助于

硝化作用,从而促进耦合反硝化作用^[12~14]. 水生植物日间的光合作用促进根部释氧量增加,从而能使沉积物氧气侵蚀深度加深,Wang 等^[18]研究发现种植了沉水植物的沉积物氧气侵蚀深度大于 20 mm,而无植物生长的沉积物氧气侵蚀深度只有 4 mm. 氧气侵蚀深度越大越有利于沉积物硝化作用的进行. 因此,有伊乐藻生长的试验柱耦合反硝化速率均较无伊乐藻的试验柱速率高. D_w 占总反硝化速率的比值则是 B 柱最高 (64.55%), C 柱最低 (35.31%). 非耦合反硝化 (D_w) 速率所需的 NO_3^- 来自上覆水,沉积物氧气侵蚀深度越小,上覆水中的 NO_3^- 越容易进入沉积物的反硝化层,进行非耦合反硝化^[12]. 因此,无植物生长的试验柱 A、B 非耦合反硝化速率比有植物生长的试验柱 C、D 高 14% ~ 17%. 同时,固定化氮循环细菌的加入提高了微生物的数量,反硝化菌的整体活性增强,从而同化转换更多硝态氮,促进非耦合反硝化. 总体而言,同时种植沉水植物,添加固定化氮循环菌的实验柱反硝化速率最高. 伊乐藻的存在促进了氧气的侵蚀深度,沉积物中的好氧层增大,从而使硝化作用加强,直接促进沉积物的耦合硝化反硝化^[19]. 虽然氧气侵蚀深度增加了水体中 NO_3^- 进入反硝化层的距离^[12,20],阻碍了非耦合反硝化过程的进行,但是氮循环菌的加入,促进了非耦合反硝化的进行. 沉水植物与氮循环菌共同作用提高了反硝化速率,有效地去除氮素.

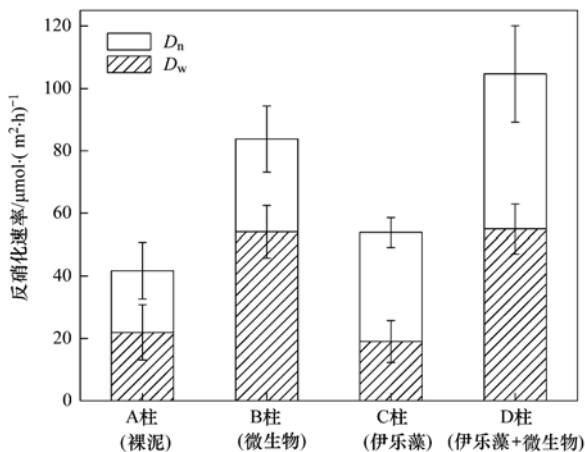


图2 不同生态处理柱的反硝化速率

Fig. 2 Denitrification in sediments of different treatments

2.2 水体 DO、pH 变化

实验过程中,在 07:00 ~ 23:00 每隔 3 h 测定试验柱内 DO、pH 等参数. 研究结果表明,4 个试验柱水体的 DO 值在实验过程中均有不同程度的变化

(图3). 添加伊乐藻的 C、D 试验柱的溶解氧最高值均达到了 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,表明沉水植物在日间光照充足的情况下,会因其强烈的光合作用而使水体呈明显的过饱和状态;16:00 以后,随着光照强度的降低,光合作用减弱,溶解氧浓度也逐渐降低. 裸泥柱和添加 INCB 试验柱的 DO 变化不明显,均在 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,表明由于氮循环细菌生命代谢活动消耗氧气,增强了系统的厌氧反硝化过程. 从图4可以看出,添加伊乐藻的 C、D 两试验柱的 pH 分别增加到 9.52 和 9.64,沉水植物强烈的光合作用大量消耗 CO_2 ,从而导致水体 pH 的增加^[21]; 16:00 以后,由于光合作用的减弱,呼吸作用释放 CO_2 使水体 pH 再次降低^[21]. 另外,未添加伊乐藻的 A、B 两柱 pH 值均在 7.5 以下,实验过程中 pH 值基本没有发生变化.

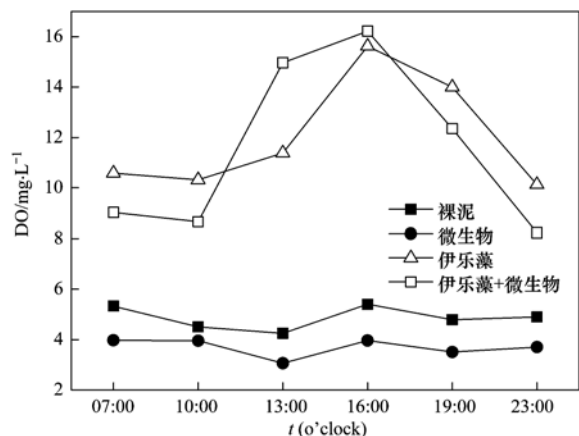


图3 实验柱水体溶解氧变化趋势

Fig. 3 Variation of DO in the experiment tubes

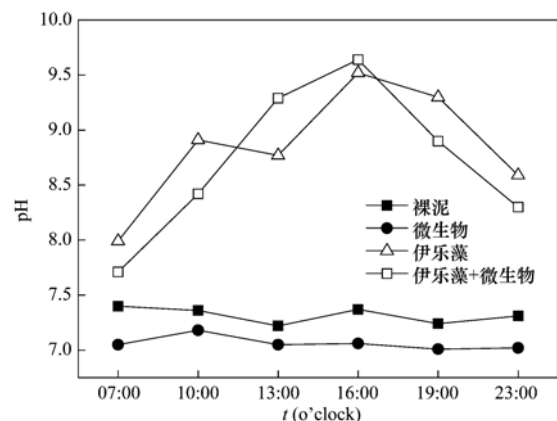


图4 实验柱水体 pH 变化趋势

Fig. 4 Variation of pH in the experiment tubes

2.3 沉积物孔隙水氮素营养盐变化

经过 6 个星期的模拟生态修复培养后,将上层

沉积物每隔 1 cm 切片,分别研究各层孔隙水中氮素营养盐的变化. 研究表明,与裸泥对照组沉积物相比,伊乐藻-氮循环菌的应用改变了沉积物孔隙水中不同形态氮的垂直分布(图 5). 由图 5(a)可知,处理柱 C、D 沉积物孔隙水中 NH_4^+ 的浓度比 A、B 两试验柱高. 由于沉水植物根部释氧增加了沉积物好氧硝化层的深度,固定化氮循环技术使微生物扩散进入沉积物,加强了硝化作用,因此处理柱 B、D 的沉积物表层 2 cm 中 NO_3^- 浓度高于另外两柱沉积物[图 5(b)]. 由于伊乐藻与氮循环菌的相互作

用,处理柱 D 沉积物孔隙水中总氮浓度较高[图 5(c)]. 水生植物根部释放氧气会改变沉积物好氧-厌氧层的分布,Jespersen 等^[22]研究发现,水生植物生长 4 星期后,沉积物中的好氧层范围增加了 4~6 倍. 沉积物好氧-厌氧层分布的改变会影响氮循环菌的硝化、反硝化过程,从而影响各形态氮在沉积物中的分布. 另外,水生植物对营养盐有吸收同化作用,结合氮循环菌的生理代谢过程,沉积物孔隙水氮营养盐的分布发生了变化.

2.4 反硝化菌群数量

经过 6 个星期的模拟生态修复培养后,采集沉积物表层 2 cm 的底泥,应用 RT-qPCR 技术检测反硝化菌群数量. 研究表明,伊乐藻、固定化氮循环菌的添加提高了沉积物中的反硝化菌群(图 6),相比于裸泥对照组,其他各柱沉积物中反硝化菌的功能基因 *nirS* 和 *nosZ* 的拷贝数均有明显的增加. *nirS* 和 *nosZ* 的拷贝数在试验柱 D 中的拷贝数最大,其中 *nirS* 由原来的每克底泥 2.3×10^7 个拷贝增加到每克底泥 2.95×10^9 个拷贝,而 *nosZ* 由原来的每克底泥 1.55×10^8 个拷贝增加到每克底泥 3.59×10^9 个拷贝. 上述结果表明,在实验过程中,由于固定化氮循环菌技术采用具有良好生物相容性的载体富集 4 种氮循环细菌,这 4 种菌可以对氮素进行形态转化,同时载体中的细菌可以向水体中释放,进入沉积物中,维持较高的微生物数量,促进氮素营养盐的去除. 另外,沉水植物的光合作用引起水体 DO 及 pH 等环境因子的变化^[21,23],环境因子的变化能够引起微生物活性的变化^[24,25]. 由图 6 看出,反硝化菌功能基因 *nirK* 在 4 组试验柱中的变化不明显. *nirS* 和 *nirK* 是两种不同类型的编码亚硝酸还原酶

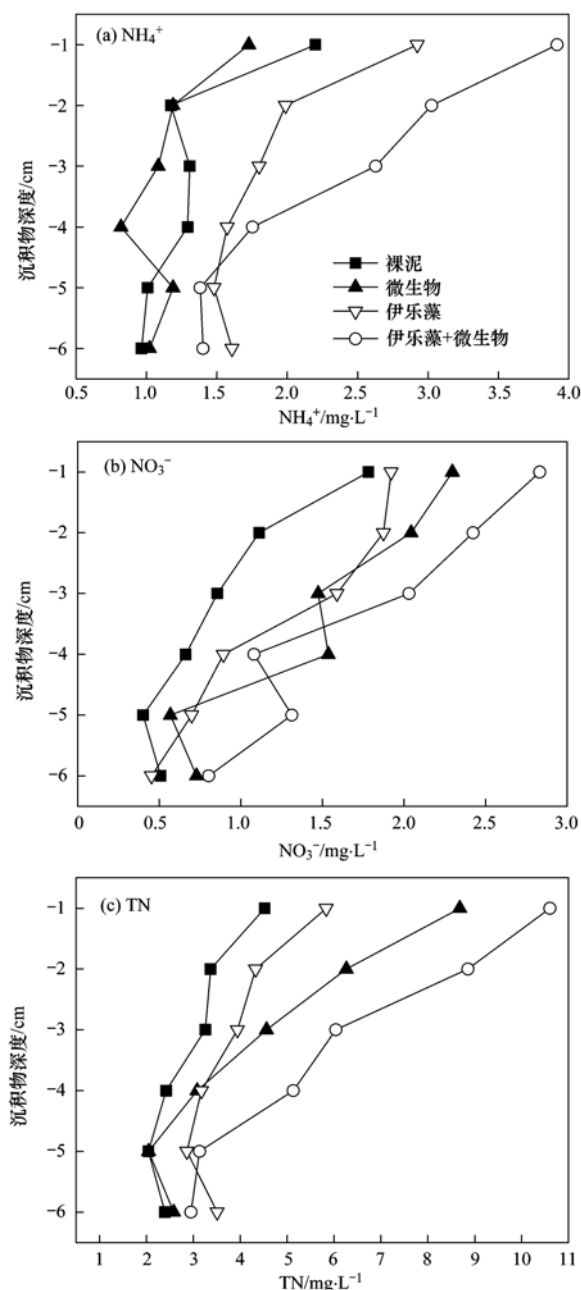


图 5 实验柱沉积物孔隙水 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 TN 垂直变化趋势

Fig. 5 Ammonia, nitrate and total nitrogen profiles in sediment pore waters after restoration incubation

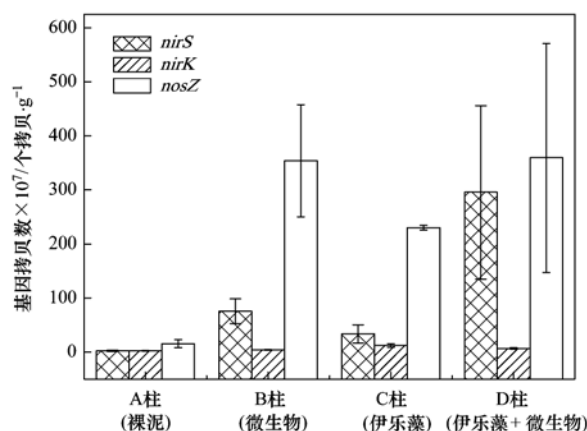


图 6 不同生态处理柱 *nirS*、*nirK* 和 *nosZ* 基因拷贝数

Fig. 6 Abundances of *nirS*, *nirK*, *nosZ* genes in sediment cores after restoration with different columns

的基因,可能是由于受到 PCR 实验方法的影响,如引物的专一性等^[26,27],造成两种基因的差异. 亚硝酸还原酶是反硝化过程中的限制酶^[28],*nirS* 基因拷贝数的增加促进反硝化作用的加强. *nosZ* 基因是编码氧化亚氮还原酶的基因,*nosZ* 基因拷贝数的增加促进了反硝化作用氮气产量增加,提高了脱氮的能力.

3 结论

(1) 梅梁湾沉积物通过种植沉水植物伊乐藻,添加固定化氮循环菌的生态修复方法处理后,反硝化速率显著提高,伊乐藻与固定化氮循环菌联合作用的试验柱中的反硝化速率最高. 沉水植物提高了耦合硝化反硝化的作用,氮循环菌提高了非耦合硝化反硝化的作用,沉水植物与微生物的联合作用提高了沉积物的总反硝化速率,促进了氮素的去除. 伊乐藻-氮循环菌的联合作用对水体氮素去除能力要明显优于单独使用沉水植物或微生物.

(2) 室内模拟实验表明,沉水植物日间强烈的光合作用促进了水体溶解氧浓度,促进沉积物好氧层增加,从而促进微生物的硝化作用,进而提高了耦合硝化反硝化作用,增加了反硝化脱氮能力.

(3) 本研究采用固定化氮循环菌技术,微生物通过扩散,增加了水体、沉积物中的微生物数量. RT-qPCR 实验结果表明,反硝化菌的功能基因 *nirS* 和 *nosZ* 有明显的增加,微生物量的增加促进了反硝化脱氮的能力.

(4) 室内模拟实验表明,伊乐藻-氮循环菌的联合作用提高了反硝化速率,促进了湖泊水体氮素的脱除,起到了净化作用.

参考文献:

- [1] Scheffer M, Van Nes E H. Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size[J]. *Hydrobiologia*, 2007, **584**(1): 455-466.
- [2] 年跃刚, 宋秀伟, 李英杰, 等. 富营养化浅水湖泊稳态转换理论与生态恢复探讨[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(1): 67-70.
- [3] 曾巾, 杨柳燕, 肖琳, 等. 湖泊氮素生物地球化学循环及微生物的作用[J]. *湖泊科学*, 2007, **19**(4): 382-389.
- [4] 张超兰, 陈秀娟, 韦必帽, 等. 沉水、挺水培养水生植物去除污水中氮磷的效果研究[J]. *西南农业学报*, 2009, **22**(3): 786-790.
- [5] 王圣瑞, 金相灿, 崔哲, 等. 沉水植物对水-沉积物界面各形态氮含量的影响[J]. *环境化学*, 2006, **25**(5): 533-538.
- [6] Lauridsen T L, Jensen J P, Jeppesen E, *et al.* Response of submerged macrophytes in Danish lakes to nutrient loading reductions and biomanipulation[J]. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**(1-3): 641-649.
- [7] Veraart A J, De Bruijne W J J, De Klein J J M, *et al.* Effects of aquatic vegetation type on denitrification[J]. *Biogeochemistry*, 2011, **104**(1-3): 267-274.
- [8] 李正魁, 濮培民. 秋冬季环境下固定化氮循环细菌净化湖泊水体氮污染动态模拟[J]. *湖泊科学*, 2000, **12**(4): 321-326.
- [9] 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.
- [10] 杨竹攸, 李正魁, 石鲁娜, 等. 固定化氮循环细菌修复城市湖泊水体脱氮效果及 N₂O 排放[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(6): 789-794.
- [11] 常会庆, 杨肖娥, 方云英, 等. 伊乐藻和固定化细菌共同作用对富营养化水体中养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(3): 114-117.
- [12] 徐徽, 张路, 商景阁, 等. 太湖梅梁湾水土界面反硝化和厌氧氨氧化[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(6): 775-781.
- [13] Steingruber S M, Friedrich J, Gächter R, *et al.* Measurement of denitrification in sediments with the ¹⁵N isotope pairing technique[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(9): 3771-3778.
- [14] Nielsen L P. Denitrification in sediment determined from nitrogen isotope pairing[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 1992, **86**(4): 357-362.
- [15] Zhou F Z, Zheng Y M, Shen J P, *et al.* Response of denitrification genes *nirS*, *nirK*, and *nosZ* to irrigation water quality in a Chinese agricultural soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **18**(9): 1644-1652.
- [16] Henry S, Bru D, Stres B, *et al.* Quantitative detection of the *nosZ* gene, encoding nitrous oxide reductase, and comparison of the abundances of 16S rRNA, *narG*, *nirK*, and *nosZ* genes in soils[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, **72**(8): 5181-5189.
- [17] 赵大勇, 燕文明, 冯景伟. 实时荧光定量 PCR 技术对氨氧化细菌的研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(12): 8-13.
- [18] Wang Y C, Li Z K, Zhou L, *et al.* Effects of macrophyte-associated nitrogen cycling bacteria on denitrification in the sediments of the eutrophic Gonghu Bay, Taihu Lake[J]. *Hydrobiologia*, 2013, **700**(1): 329-341.
- [19] Piña-Ochoa E, Álvarez-Cobelas M. Denitrification in aquatic environments: a cross-system analysis[J]. *Biogeochemistry*, 2006, **81**(1): 111-130.
- [20] Risgaard-Petersen N, Rysgaard S, Nielsen L P, *et al.* Diurnal variation of denitrification and nitrification in sediments colonized by benthic microphytes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, **39**(3): 573-579.
- [21] 王传海, 李宽意, 文明章, 等. 苦草对水中环境因子影响的日变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(2): 798-800.
- [22] Jespersen D N, Sorrell B K, Brix H. Growth and root oxygen release by *Typha latifolia* and its effects on sediment

- methanogenesis [J]. *Aquatic Botany*, 1998, **61** (3): 165-180.
- [23] 陈祈春, 李正魁, 王易超, 等. 沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33** (1): 83-87.
- [24] Ruiz-Rueda O, Hallin S, Bañeras L. Structure and function of denitrifying and nitrifying bacterial communities in relation to the plant species in a constructed wetland [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, **67** (2): 308-319.
- [25] Cuhel J, Šimek M, Laughlin R J, *et al.* Insights into the effect of soil pH on N_2O and N_2 emissions and denitrifier community size and activity [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76** (6): 1870-1878.
- [26] Yoshida M, Ishii S, Otsuka S, *et al.* Temporal shifts in diversity and quantity of *nirS* and *nirK* in a rice paddy field soil [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, **41** (10): 2044-2051.
- [27] Bárta J, Melichová T, Vaněk D, *et al.* Effect of pH and dissolved organic matter on the abundance of *nirK* and *nirS* denitrifiers in spruce forest soil [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **101** (1-3): 123-132.
- [28] Kim O S, Imhoff J F, Witzel K P, *et al.* Distribution of denitrifying bacterial communities in the stratified water column and sediment-water interface in two freshwater lakes and the Baltic Sea [J]. *Aquatic Ecology*, 2011, **45** (1): 99-112.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2012 年 12 月 7 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续 11 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响。

CONTENTS

Characteristics of Haze and Its Impact Factors in Four Megacities in China During 2006-2009	DAI Yong-li, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2925)
Characteristics of VOCs and Their Photochemical Reactivity in Autumn in Nanjing Northern Suburb	LI Yong-yu, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2933)
On-Line Measurement of Water-Soluble Composition of Particulate Matter in Beijing	CHENG Meng-tian, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2943)
Design and Evaluation of an Aerosol Nanoparticle Generation System	MAI Hua-jun, JIANG Jing-kun, HE Zheng-xu, <i>et al.</i> (2950)
Aerosol Size Distribution of Organic Carbon and Elemental Carbon on the Top of Coke Oven and in the Plant Area	LIU Xiao-feng, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (2955)
Effects of Diurnal Warming on Soil N ₂ O Emission in Soybean Field	HU Zheng-hua, ZHOU Ying-ping, CUI Hai-ling, <i>et al.</i> (2961)
N ₂ O Flux in Winter and Its Affecting Factors Under Different Land Use Patterns	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2968)
Prediction of Methane Emission of Paddy Field Based on the Support Vector Regression Model	CHEN Qiang, JIANG Wei-guo, CHEN Xi, <i>et al.</i> (2975)
Distributional Characteristics of Nutrients in the Sea-surface Microlayer and Subsurface Water of the Bohai and Yellow Sea in Summer	WANG Wen-tao, YANG Gui-peng, YU Juan, <i>et al.</i> (2983)
Effect of Nitrogen and Phosphorus Concentrations on the Adsorption of BDE28 and BDE47 by <i>Prorocentrum donghaiense</i> Dominant Population	WANG Fang, GE Wei, CHAI Chao, <i>et al.</i> (2992)
Hyperspectral Remote Sensing of Chlorophyll a Concentrations in the Lake Taihu, Based on Water Optical Classification	SUN De-yong, ZHOU Xiao-yu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (3002)
Bacterioplankton Index of Biotic Integrity (BP-IBI): An Approach for Assessing River Ecosystem Health in Dianchi Watershed	HUANG Yi, SHU Zhong-ya (3010)
Estimation of Urban Non-Point Source Pollution Loading and Its Factor Analysis in the Pearl River Delta	LIAO Yi-shan, ZHUO Mu-ning, LI Ding-qiang, <i>et al.</i> (3019)
Transported Fluxes of the Riverine Carbon and Seasonal Variation in Pearl River Basin	ZHANG Lian-kai, QIN Xiao-qun, YANG Hui, <i>et al.</i> (3025)
Characteristics of Nutrient Loss of Lanlingxi Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, XIAO Wen-fa, HUANG Zhi-lin, <i>et al.</i> (3035)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Release Under Inundation from Typical Grass Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Qiu-xia, ZHU Bo, HUA Ke-ke (3043)
Research on the Influence of Mixing Layer Depth on Algal Growth	CHEN Yang, YANG Zheng-jian, HUANG Yu-ling, <i>et al.</i> (3049)
Denitrification Study of <i>Elodea nuttallii</i> -Nitrogen Cycling Bacteria Restoration in Meiliang Bay, Taihu Lake	ZHAO Lin, LI Zheng-kui, ZHOU Tao, <i>et al.</i> (3057)
Influence of Combined Ecological Floating Bed on Nitrogen and Phosphorus Between Overlying Water and Sediment	ZHENG Li-guo, YANG Ren-bin, WANG Hai-ping, <i>et al.</i> (3064)
Effects of Biochar Covering on the Release of Pollutants from Sediment	LI Yang, LI Feng-min, ZHANG Xiu-wen, <i>et al.</i> (3071)
Temporal-spatial Difference of Ecotoxicity and Heavy Metals Pollution in Shima Catchment, Dongguan	GAO Lei, CHEN Jian-yao, KE Zhi-ting, <i>et al.</i> (3079)
Evolution and Pollution of Heavy Metals in Core Sediments from Yamenqi Lake in Lianhuan Lake, China	XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying, GUAN Ying, <i>et al.</i> (3088)
Effect of Constructed Wetland on the Purification of Industrial Zone Rainfall Runoff Contaminated with Phenanthrene	JING Dan-dan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3095)
Removal and Accumulation of the Tetracycline Resistance Gene in Vertical Flow Constructed Wetland	ZHENG Jia-yu, LIU Lin, GAO Da-wen, <i>et al.</i> (3102)
Method for Optimal Sensor Placement in Water Distribution Systems with Nodal Demand Uncertainties	LIU Shu-ming, WU Xue, OUYANG Le-yan (3108)
Formation Process of Nitrogenous Disinfection Byproduct Trichloronitromethane in Drinking Water and Its Influencing Factors	DING Chun-sheng, ZOU Bang-wen, MIAO Jia, <i>et al.</i> (3113)
Removal of Estrogens in Laccase Catalyzed Oxidative Processes	XIA Qing, XIE Wei-ping, LIU Guo-qiang, <i>et al.</i> (3119)
Study on Electrochemical Degradation of Cefazidime by Carbon Nanotubes Electrode	ZHU Hong, HU Xiang, LI Jun-feng (3125)
Photochemical Reaction Types of the Azole Fungicide Fluconazole Under UV-vis Irradiation	GE Lin-ke, LI Kai, YANG Kai, <i>et al.</i> (3132)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Diuron by TiO ₂ and Simulated Sunlight	YANG Hai, ZENG Jian, LI Yuan, <i>et al.</i> (3137)
Adsorption of Congo Red from Aqueous Solution on Hydroxyapatite	ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei (3143)
Ethanol-Induced Influence on the Structure and Arsenate Adsorption of Resin-based Nano-hydrated Ferric Oxide	WAN Qi, LI Xu-chun, PAN Bing-cai (3151)
Chlorination Characteristic and Disinfection By-product Formation Potential of Dissolved Organic Nitrogen Compounds in Municipal Wastewater	LIU Bing, YU Xin, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (3156)
Start-up and Maintenance Method for Short-Cut Advanced Nitrogen Removal Process in a Pilot-Scale Reactor at Low Temperature	GU Sheng-bo, WANG Shu-ying, PENG Yong-zhen (3164)
Study on the Start-Up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process in Biological Activated Carbon Reactor	LAI Wei-yi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing (3171)
Excretion of Manure-Borne Steroid Hormones and Their Potential Risk in the Three Northeast Provinces of China	LIU Shu-fang, LI Yan-xia, ZHANG Xue-lian, <i>et al.</i> (3180)
Spatial Distribution and Composition of Perfluorinated Compounds in Soils Around the Huaihe River	MENG Jing, WANG Tie-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (3188)
Fluorine Speciation and Its Distribution Characteristics in Selected Agricultural Soils of North China Plain	YI Chun-yao, WANG Bing-guo, JIN Meng-gui (3195)
Effects of Long-Term Manure and Crop Residues Incorporation on Yield and Phosphorus Saturation in a Paddy Soil	YAN Xiao, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (3205)
Influence of Organochlorine Pesticides in Wastewater on the Soil Along the Channel	XU Liang, ZHANG Cai-xiang, LIU Min, <i>et al.</i> (3211)
Elution of Endosulfan from Contaminated Soil by Surfactants and Their Combination	XIONG Bai-lian, ZHENG Guo-can, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Different Aspects on Soil Microbial Biomass and Dissolved Organic Carbon of the Loess Hilly Area	ZHAO Tong, JIANG Yue-li, YAN Hao, <i>et al.</i> (3223)
Effects of Nitrogen Addition on Red Soil Microbes in the <i>Cinnamomum camphora</i> Plantation	YU Pei-yi, ZHU Fan, SU Shao-feng, <i>et al.</i> (3231)
Concentration, Profile Distribution and Source Identification of PCDD/Fs in Environmental Medium Around a HSWI	HUANG Wen, ZHANG Su-kun, DU Guo-yong, <i>et al.</i> (3238)
Assessment of Bioaccessibility of PAHs in Microbial Degradation Process Using Solid Phase Micro Extraction and Solid Phase Extraction	GUO Mei-xia, GONG Zong-qiang, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3244)
Biodegradation of Tetrahydrofuran by Combined Immobilized of <i>Pseudomonas oleovorans</i> DT4	SHAO Qian, YE Jie-xu, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3251)
Analysis on Microbial Community in Biofilm Coating onto Solid Carbon Source Using the PCR-DGGE Technique	XU Ying, QIU Tian-lei, HAN Mei-lin, <i>et al.</i> (3257)
Effect of Temperature on Activity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> and Formation of Biogenic Secondary Iron Minerals	SONG Yong-wei, ZHAO Bo-wen, HUO Min-bo, <i>et al.</i> (3264)
Differences of Selenium Uptake Pattern of Pakchoi and the Possible Mechanism When Amended with Selenate and Selenite	GUO Lu, MAN Nan, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (3272)
Effect of Pretreatment on Storage and Biogas Production of Baling Wheat Straw	MA Hui-juan, CHEN Guang-yin, DU Jing, <i>et al.</i> (3280)
Toxicity of Nitrate-N to Freshwater Aquatic Life and Its Water Quality Criteria	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3286)
Analysis Performance of Biological Toxicity Testing MTOXPlate Using Microplate	LIN Yi-yun, ZHANG Guo-xia, HE Li-ping, <i>et al.</i> (3294)
Study of Combined Effects of DES and EV on the Proliferation of MCF-7 Cells by Two Experimental Designs	LIU Qian, LEI Bing-li, AN Jing, <i>et al.</i> (3303)
Status and Influencing Factors of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Pollution in the Coastal Areas in China	LIU Min-xia, YANG Yu-yi, LI Qing-xiao, <i>et al.</i> (3309)
Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Effluent of Sewage Treatment Plants	ZHENG Shao-kui, LI Xiao-feng (3316)
Research Progress on Biochar Carbon Sequestration Technology	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (3327)
Countermeasures for Strict Water Quality Management of Drinking Water Sources: Some Thoughts and Suggestions on Implementing Strict Water Resources Management	FU Guo-wei (3334)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年8月15日 34卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 8 Aug. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人