

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM₁₀/PM_{2.5} 采样器的研制 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)

1992~2012年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素 郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)

青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究 陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)

化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析 李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)

烧结过程 NO_x 和 SO₂ 形成规律及烧结料组成对 NO_x 排放的影响 任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)

废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究 宋磊, 张彬, 邓文 (3674)

黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响 苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)

海河流域河流生态系统健康评价 郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)

台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析 刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)

山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究 包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)

岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例 王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)

岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价 蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)

废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险 陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)

海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价 王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)

大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素 杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)

辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究 邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)

伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响 刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)

地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究 陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)

地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟 白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)

茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能 万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)

紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨 王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)

水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性 彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)

二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯砷酸的研究 王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)

碳氮比对聚氨基酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响 谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)

城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究 佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)

快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估 韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)

重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试 杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)

应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量 李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)

植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化 李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)

硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响 唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)

外生菌根真菌对 Al³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应 张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)

长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究 黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳纬莹, 苏建强 (3869)

外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究 左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)

污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究 郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)

热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响 李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔骁勇, 马栋 (3888)

O₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响 杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)

施氮强度对不同土壤有机碳水平按树林温室气体通量的影响 李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)

¹³C₁₈O₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响 陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)

表面活性剂 *Burkholderia xenovorans* LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解 陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)

耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能 信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)

微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定 吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)

电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析 王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)

铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型 王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)

天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价 马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)

水生生物基准推导中物种选择方法研究 张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)

生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究 李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)

金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能 牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)

CuO(-CeO₂)/Al₂O₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究 查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)

生物毒性检测在水质安全评价中的应用 徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)

某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析 周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)

北京市再生水利用生态环境效益评估 范育鹏, 陈卫平 (4003)

我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建 王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)

环境损害评估: 构建中国制度框架 张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)

《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)

伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响

刘丹丹, 李正魁*, 叶忠香, 张万广

(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, 分别添加固定化氮循环细菌、水生植物伊乐藻建立室内微宇宙, 模拟生态修复, 探讨不同修复处理下, 硝氮的去除机制. 采用¹⁵N标记结合同位素配对技术测定了各生态模拟柱中的反硝化速率和植物吸收速率. 结果表明, 不同处理的实验柱反硝化速率差异明显, 同时添加了水生植物和固定化氮循环细菌的实验柱反硝化速率最高, 为 $99.35 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 植物氮吸收速率为 $36.55 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 沉水植物伊乐藻在自身吸收氮素的同时也提高了耦合硝化反硝化的作用. 与植物吸收相比, 反硝化过程是主要的氮去除途径. 沉水植物与固定化氮循环菌组合生态修复技术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; ¹⁵N稳定性同位素标记; 反硝化; 植物吸收; 生态修复

中图分类号: X172; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3764-05 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.10.017

Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake

LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, ZHANG Wan-guang

(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. Immobilized nitrogen cycling bacteria (INCB), *Elodea nuttallii* were added to four groups of restoration incubation chambers respectively to explore the nitrogen removal mechanism in different restoration treatments. ¹⁵N tracer and isotope pairing technique were used to determine the rates of plant uptake and denitrification in different treatments. The results showed that denitrification rates were significantly different among the treatments, while cores with addition of both INCB and *Elodea nuttallii* achieved the highest denitrification rate of $99.35 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and plant uptake rate of $36.55 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. *Elodea nuttallii* in the cores could assimilate nitrate itself and enhance coupled nitrification-denitrification. Compared with plant uptake, denitrification was the main pathway of nitrogen removal. The results also showed that the combination of *Elodea nuttallii* and INCB could promote benthic nitrogen removal and purification of water body.

Key words: *Elodea nuttallii*; nitrogen cycling bacteria; ¹⁵N stable isotope tracer; denitrification; plant uptake; ecological restoration

近年来,随着社会和经济的发展,进入水体的营养盐也在急剧增加. 工业、农业和城市污水中排放的大量氮营养盐会导致水体的富营养化. 湖泊富营养化已经成为目前全世界共同面临的重大环境问题之一^[1]. 作为我国长江中下游五大淡水湖之一,太湖也处于富营养化状态. 因此,采取合适的方法降低湖泊氮素营养盐浓度,具有重要意义^[2]. 在湖泊生态系统中,水体中的氮素的去除转化过程包括微生物转化、植物吸收作用、挥发沉降过程、吸附和固定化过程^[3]. 氮循环微生物和水生植物能影响氮素的转化,促进湖泊水体氮素的去除^[4]. 近年来,许多学者对利用水生植物或固定化氮循环菌进行生态修复去除水中氮素进行了研究^[5-8]. 关于沉水植物固定化微生物联用进行生态修复去除水体中氮素的研究也已有报道^[9]. 然而以上的研究主要是针对水体氮素的去除效果研究,并没有定量地对氮素去除过程进行研究,对氮循环菌与沉水植物联合作用下,

反硝化过程和植物吸收过程降低水体氮素的机制研究尚不多见^[10]. 因此本研究选择种植沉水植物伊乐藻结合氮循环细菌,选取太湖污染较严重梅梁湾作为采样点,通过实验室模拟实验分析了添加氮循环细菌、种植伊乐藻对湖泊水体反硝化速率、植物氮吸收速率的影响,探讨了不同生态修复手段下氮素去除的机制.

1 材料与方法

1.1 采样点及实验设计

2013年1月用有机玻璃柱采泥器(内径90 mm,长600 mm)在太湖梅梁湾(31°12'14N,119°55'

收稿日期: 2014-03-25; 修订日期: 2014-05-07

基金项目: 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: 刘丹丹(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为湖泊水体修复, E-mail: liudandan602@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhkuili@nju.edu.cn

12E,图1)采集12根完整无扰动的泥柱样,每根柱样中泥深约为20 cm,保留部分原上覆水于柱样上部,两端用橡胶塞塞紧密封,垂直放置,无扰动地带回实验室,同时采集200 L上覆水并采集沉水植物伊乐藻,一并带回实验室.小心将采回的泥样分别移入相同尺寸的有机玻璃生态修复模拟柱中.将生态修复模拟培养柱分为3组,每一组中有4个柱样,对每组中的4个柱样分别进行以下处理:A柱中仅有泥样,为裸泥组,作为对照样不做任何处理;B柱中添加制备好的固定化氮循环细菌;C柱采用扦插法种植5株约10 cm长势茁壮的伊乐藻;D柱采用相同方法种植伊乐藻同时添加固定化氮循环菌.处理完后,在培养柱中尽量无扰动引采集上覆水,进行预培养,每周更换培养柱内上覆水和氮循环菌载体.6个星期后,实验柱内生态系统趋于稳定,柱内伊乐藻生长情况良好,用新采集的湖水更换柱内的水,更换氮循环菌载体,添加 $\text{Na}^{15}\text{NO}_3$,静置稳定24 h后,收集水样和植物样,测定实验柱中水体各理化指标以及 ^{15}N 同位素丰度,分析各实验柱中反硝化速率,植物同化吸收速率的变化.

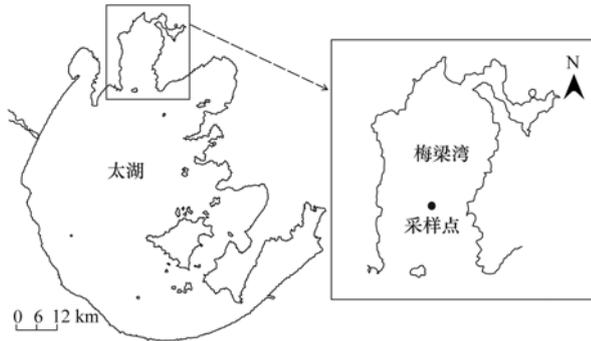


图1 太湖梅梁湾采样点示意

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

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,在选择性培养基上培养,并进行富集筛选得到纯化的太湖土著氨化细菌(*Alcaligenes* sp.)、硝化(*Nitrospira* sp.)、反硝化细菌(*Achromobacter xylosoxidans* subsp. *denitrificans* 与 *Achromobacter* sp.).通过连续培养将经活化培养的氮循环细菌固定于通过辐照法制成的载体上,得到固定化氮循环菌(immobilized nitrogen cycling bacteria, INCB)^[11].

1.3 反硝化速率,植物吸收速率的测定

反硝化实验在柱内生态系统趋于稳定后进行.在反硝化实验前采集水样,土样以及植物样品,添加前测定 ^{15}N 丰度.向3组平行实验柱中分别加入

$\text{Na}^{15}\text{NO}_3^-$ (99.21%),使其在水中浓度最终达到 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,连续24 h进行无顶空密闭静态培养.在24 h后,小心的用注射器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_2 溶液(质量分数,50%),恒温保存收集到的样品并立即送往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(Prisma QMS200f)测定溶解性气体 $^{28}\text{N}_2$ 、 $^{29}\text{N}_2$ 、 $^{30}\text{N}_2$ 、 O_2 .另外,采集水样以及植物样,处理后送至南京师范大学地理科学学院使用同位素比质谱仪(Europa Scientific, Seron, Cheshire, UK)测定 ^{15}N 丰度^[12,13].

利用下列公式计算反硝化速率:

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

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

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

$$D_n = D_{14}$$

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

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

式中, r_{29} 和 r_{30} 分别代表 $^{29}\text{N}_2$ 和 $^{30}\text{N}_2$ 产生速率, D_{15} 代表利用 $^{15}\text{NO}_3^-$ 的反硝化速率, D_{14} 代表利用 $^{14}\text{NO}_3^-$ 的反硝化速率, D_w 代表非耦合硝化反硝化速率, D_n 耦合硝化反硝化速率, D_{tot} 代表总反硝化速率, ε 代表培养实验中 $^{15}\text{NO}_3^-$ 的丰度, a 代表添加同位素之前, b 代表添加同位素之后^[14,15].

利用下列公式计算植物吸收速率 $[\rho_t, \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}]$:

$$\rho_t = \frac{(\delta^{15}\text{N}_{(\text{veg}, \text{time} = t)}) - (\delta^{15}\text{N}_{(\text{veg}, \text{time} = \text{ambient})})}{[(\delta^{15}\text{N}_{(\text{water}, \text{time} = 0)}) - (\delta^{15}\text{N}_{(\text{water}, \text{time} = \text{ambient})})] \times t} \cdot \text{TN}_{(\text{veg})} \times \text{Biomass}_{(\text{veg})} \times 1000$$

式中, $\delta^{15}\text{N}_{(\text{water}, \text{time} = \text{ambient})}$ 表示添加前水中同位素 ^{15}N δ , $\delta^{15}\text{N}_{(\text{water}, \text{time} = 0)}$ 表示添加后立刻水中同位素 ^{15}N δ , $\delta^{15}\text{N}_{(\text{veg}, \text{time} = \text{ambient})}$ 表示添加前植物同位素 ^{15}N δ , $\delta^{15}\text{N}_{(\text{veg}, \text{time} = t)}$ 培养结束后植物的同位素 ^{15}N δ , $\text{TN}_{(\text{veg})}$ 表示植物总氮($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); $\text{Biomass}_{(\text{veg})}$ 表示柱子中植物总生物量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)^[16,17].

1.4 样品的采集及测定

1.4.1 植物样品的采集处理

收割实验柱中伊乐藻植株,用蒸馏水洗净,于恒温干燥箱中 60°C 烘48 h,称重.烘干后用球磨机将

烘干的样品磨成粉状,将粉末状植物样品包于锡囊中,于南京师范大学地理科学学院使用同位素比质谱仪(Europa Scientific, Seron, Cheshire, UK)测定 ^{15}N 丰度.

1.4.2 水质指标及测定方法

采用纳氏试剂分光光度法测定水中氨氮;采用紫外分光光度法测定水中硝态氮;总氮利用过硫酸钾氧化紫外分光光度计(日本岛津 UV-2450)测定;采用便携式 pH 计(YSI pH 计 pH100)测定水体;水中 DO 由便携式溶氧仪(550A)测定.

1.5 数据分析

本研究中的数据归纳采用 Excel 进行;图表分析采用 Origin 8.0 进行;数据统计分析采用 SPSS 13.0 分析,不同处理下水质参数比较采用方差分析 LSD 检验,显著性水平设置为 $P < 0.05$.

2 结果与讨论

2.1 水体 DO、pH 变化

在实验进行中,在 10:00 ~ 20:00 期间,每隔 2 h 测定各实验柱中的 DO、pH 等参数,从而确定 DO、pH 的日变化(图 2 和图 3). 实验结果表明,各实验柱中水体 DO 值在实验过程中变化程度各不相同,有沉水植物与无沉水实验柱中 DO 值存在显著性差异($P < 0.05$). 添加沉水植物伊乐藻 C、D 实验柱中,最高溶解氧达到了 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,最大值出现在 14:00,此时是 1 d 中光照强度最强的时间,植物强烈的光合作用释放氧气,显著的改变水中 O_2 的含量,使水体 DO 增加达到过饱和状态^[18]. 16:00 后,随着光照强度的降低,光合作用也因此减弱,水体 DO 随之降低. 裸泥组的 DO 在实验过程中无明显变化. 添加氮循环菌的 B 组,溶解氧有轻微下降趋势,且 D 组的 DO 也比 A 组略低. 这可能是由于氮循环菌的添加,增加了水中氮循环菌的数量,细菌的新陈代谢活动消耗了水中的氧气. 从图 3 可以看出,添加了伊乐藻的 C、D 柱的 pH 高于未添加伊乐藻的 A、B 组,分别达到了 10.08 和 9.23,这可能是由于沉水植物光合作用过程会消耗水中二氧化碳,从而导致水体 pH 升高^[18]. 随着光合作用的降低,水体 pH 逐渐下降. 未添加植物的 A、B 组,水体 pH 变化不明显.

2.2 反硝化速率测定结果

采用同位素配对技术(IPT)测定不同处理情况下各实验柱的反硝化速率(图 4). 各实验组的总反硝化速率存在显著性差异($P < 0.05$). 裸泥对照组

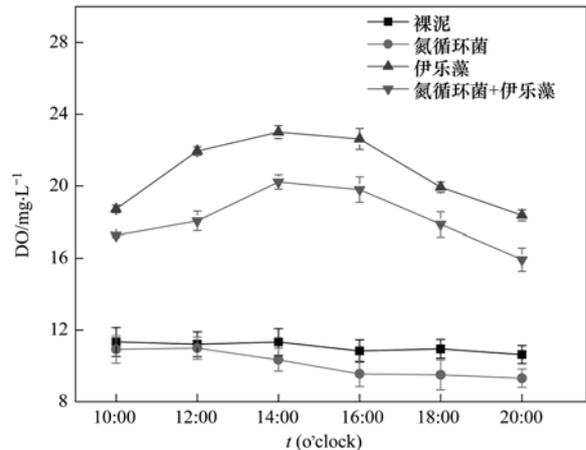


图 2 实验柱水体溶解氧变化

Fig. 2 Variation of DO in the experiment chambers

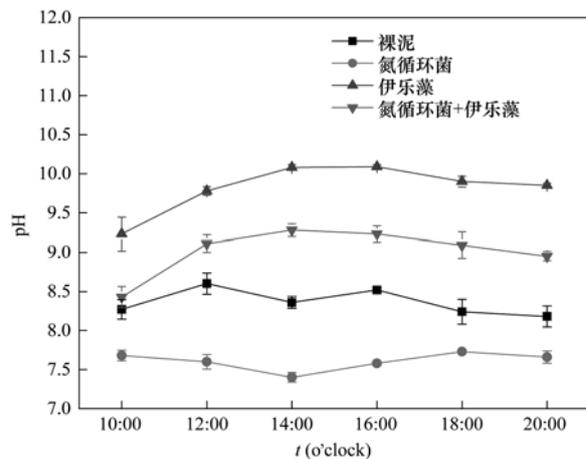


图 3 实验柱水体 pH 变化

Fig. 3 Variation of pH in the experiment chambers

A 组的总反硝化速率为最低,是 $25.31 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 添加氮循环菌的 B 组总反硝化速率为 $88.66 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 种植沉水植物伊乐藻的 C 组总反硝化速率为 $40.10 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 同时添加伊乐藻和氮循环菌的 D 组总反硝化速率最高,为 $99.35 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 通过添加氮循环菌可以增加系统中氮循环菌的数量,促进氮素形态转化,从而提高反硝化速率^[19]. 沉水植物根系提供了利于氮循环菌附着生长的表面,Eriksson 等^[20]提出湿地中沉水植物的表面对反硝化过程与底泥具有同等的重要性,同时植物根系分泌的有机物为反硝化作用提供了碳源,促进反硝化作用^[21-23]. 同时添加氮循环菌和种植沉水植物伊乐藻,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,从而更多硝态氮被反硝化,促进了非耦合反硝化. 植物为氮循环菌硝化-反硝化提供了合适的反应条件,促进了耦合反硝化^[24]. 实验结果表明,在植物

和氮循环共同作用下,湖泊生态系统的反硝化速率得到了显著提高,沉水植物与氮循环菌组合能促进水体氮素去除。

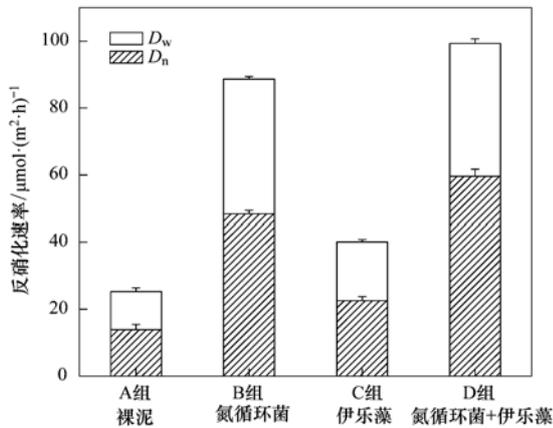


图4 不同生态处理实验柱的反硝化速率

Fig. 4 Denitrification rates of different treatments

2.3 植物吸收速率测定结果

采用微宇宙 $^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ 实验测定水生植物对 NO_3^- 的吸收速率,得到不同处理组中沉水植物对 NO_3^- 的吸收速率(图5)。结果表明,对照组A组和微生物B组未添加伊乐藻,所以吸收速率是 $0\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 。添加伊乐藻的C组植物吸收速率是 $36.55\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,种植伊乐藻同时添加氮循环菌的D组的植物吸收速率为 $20.34\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 。添加氮循环菌及植物组的植物吸收速率低于仅添加植物组。这可能是由于氮循环菌的加入,增加了系统中氮循环菌的数量,促进硝态氮的反硝化,与植物的吸收产生了竞争作用,降低了植物氮吸收速率^[25]。

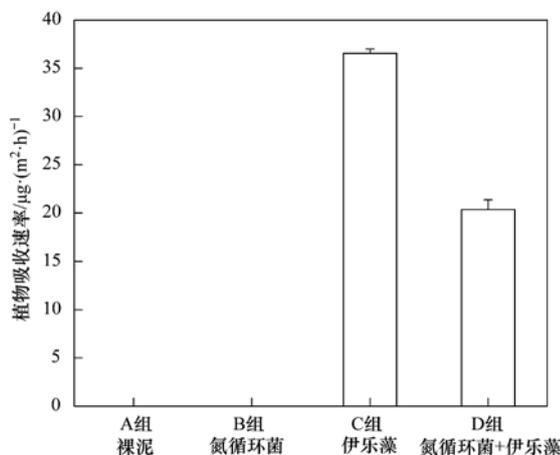


图5 不同生态处理实验柱的植物吸收速率

Fig. 5 Plant uptake rates of different treatments

2.4 植物吸收速率与反硝化速率的比较

通过换算对各处理下实验柱植物吸收速率与反

硝化速率进行比较(表1)。结果表明,在模拟生态柱A和B中,由于没有水生植物,主要的氮去除是通过反硝化过程,在模拟生态柱C和D中,反硝化速率分别是 $40.10\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $99.35\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,而植物吸收速率分别为 $2.61\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $1.45\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 。反硝化氮素去除速率要大于水生植物的氮吸收速率,沉水植物对微生物反硝化过程的促进大于它本身对于氮素的吸收作用,在加入伊乐藻和氮循环菌的D组,氮循环菌的加入降低了植物吸收速率,但是总体的氮素去除大于只添加氮循环菌的B组和只添加伊乐藻的C组。结果表明,在各生态模拟系统中,植物吸收和反硝化作用都能去除水中的氮素,与植物吸收相比,反硝化过程是更主要的氮去除途径^[26~28]。

表1 植物吸收速率与反硝化速率比较/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$

项目	A组 裸泥	B组 微生物	C组 伊乐藻	D组 氮循环菌+伊乐藻
反硝化速率	25.31	88.65	40.10	99.35
植物吸收速率	0	0	2.61	1.45

3 结论

(1)沉水植物可以通过本身吸收作用去除水中的氮素,并且通过光合作用提高水体溶解氧,增加底泥溶解氧侵蚀深度,创造好氧-厌氧微环境,促进微生物的硝化-反硝化作用。

(2)通过添加氮循环菌,种植沉水植物伊乐藻的生态修复方法处理显著增加了梅梁湾沉积物的反硝化速率,在伊乐藻与氮循环菌组合技术生态修复下,实验柱中的反硝化速率最高。

(3)氮循环菌会与植物竞争利用水中的硝氮,微生物的反硝化速率大于植物氮吸收速率,与植物吸收相比,反硝化过程是更主要的氮去除途径。

(4)室内模拟实验表明,伊乐藻与氮循环菌组合技术可以通过植物吸收和微生物反硝化去除水体氮素,显著提高湖泊水体氮素的去除速率,促进湖泊水体净化。

参考文献:

- [1] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. Science, 2008, 320(5878): 889-892.
- [2] Hamilton D P, Landman M J. Preface: Lake restoration: an experimental ecosystem approach for eutrophication control[J]. Hydrobiologia, 2011, 661(1): 1-3.

- [3] Zhao Y, Yang Z F, Xia X H, *et al.* shallow lake remediation regime with *Phragmites australis*: Incorporating nutrient removal and water evapotranspiration [J]. *Water Research*, 2012, **46**: 5635-5644.
- [4] 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.
- [5] 马久远, 王国祥, 李振国, 等. 太湖两种水生植物群落对沉积物中氮素的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4240-4250.
- [6] 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(8): 1447-1450.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 王易超, 李正魁, 周莉, 等. 伊乐藻-固定化氮循环菌技术入湖河道修复研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(3): 510-516.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Zhang J B, Zhu T B, Cai Z C, *et al.* Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil nitrogen transformations[J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, **63**(1): 75-85.
- [13] Feast N A, Dennis P F. A comparison of methods for nitrogen isotope analysis of groundwater[J]. *Chemical Geology*, 1996, **129**(1-2): 167-171.
- [14] 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.
- [15] Nielsen L P. Denitrification in sediment determined from nitrogen isotope pairing[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 1992, **86**(4): 357-362.
- [16] Kreiling R M, Richardson W B, Cavanaugh J C, *et al.* Summer nitrate uptake and denitrification in an upper Mississippi River backwater lake: the role of rooted aquatic vegetation [J]. *Biogeochemistry*, 2011, **104**(1-3): 309-324.
- [17] Dugdale R C, Wilkerson F P. The use of ¹⁵N to measure nitrogen uptake in eutrophic oceans; experimental considerations [J]. *Limnology and Oceanography*, 1986, **31**(4): 673-689.
- [18] 王永平, 王小冬, 秦伯强, 等. 苦草光合作用日变化对水质的影响[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(10): 1141-1144.
- [19] 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.
- [20] Eriksson P G, Weisner S E B. Nitrogen removal in a wastewater reservoir; The importance of denitrification by epiphytic biofilms on submersed vegetation[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, **26**(3): 905-910.
- [21] Eriksson P, Weisner S. Functional differences in epiphytic microbial communities in nutrient-rich freshwater ecosystems: an assay of denitrifying capacity[J]. *Freshwater Biology*, 1996, **36**(3): 555-562.
- [22] Champion P D, Tanner C C. Seasonality of macrophytes and interaction with flow in a New Zealand lowland stream [J]. *Hydrobiologia*, 2000, **441**(1): 1-12.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Weisner S E B, Eriksson P G, Graneli W, *et al.* Influence of macrophytes on nitrate removal in wetlands[J]. *AMBIO*, 1994, **23**: 363-366.
- [26] Matheson F E, Nguyen M L, Cooper A B, *et al.* Fate of ¹⁵N-nitrate in unplanted, planted and harvested riparian wetland soil microcosms[J]. *Ecological Engineering*, 2002, **19**(4): 249-264.
- [27] Wu H M, Zhang J, Wei R, *et al.* Nitrogen transformations and balance in constructed wetlands for slightly polluted river water treatment using different macrophytes[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(1): 443-451.
- [28] Harrison M D, Groffman P M, Mayer P M, *et al.* Nitrate removal in two relict oxbow urban wetlands; a ¹⁵N mass-balance approach [J]. *Biogeochemistry*, 2012, **111**(1-3): 647-660.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propranolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytic Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrozoobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LU Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《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)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

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