

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	
..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)	
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	
..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)	
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	
..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)	
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	
..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)	
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	
..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)	
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	崔海, 张亚红 (1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	
..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)	
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

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

韩华杨, 李正魁*, 王浩, 朱倩

(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: 采用无扰动的人贡湖亲水河底泥柱芯以及上覆水进行实验, 探究了伊乐藻与固定化脱氮微生物技术对受污染的人贡湖湾河道的生态修复效果。运用稳定性 ^{15}N 同位素配对技术和基于16S rRNA高通量测序技术探讨了伊乐藻与固定化脱氮微生物联用技术(E-INCB)对亲水河底泥的反硝化速率、厌氧氨氧化速率以及脱氮微生物群落多样性的影响。结果表明, 添加了伊乐藻与固定化脱氮微生物以后, 亲水河水质得到明显改善, TN 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 的去除率分别为 72.03%、46.67%、76.65%, 同时, 添加了伊乐藻和固定化脱氮微生物以后, 泥水界面的反硝化细菌和厌氧氨氧化细菌表现出协同作用关系, 与对照组相比, 反硝化速率和厌氧氨氧化速率增加量分别为 $165 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $269.7 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。反硝化细菌与厌氧氨氧化细菌的群落多样性明显增加, 变形菌门 (Proteobacteria)、浮霉菌门 (Planctomycetes)、酸杆菌门 (Acidobacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 均具有优势增长。沉水植物与固定化脱氮微生物联用技术增强了河道底泥中的脱氮微生物多样性, 进一步提高了亲水河的氮素脱除能力。

关键词: 伊乐藻-固定化脱氮微生物技术; 反硝化; 厌氧氨氧化; ^{15}N 同位素配对技术; 高通量测序技术

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1397-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.04.026

Effect of *Elodea nuttallii*-immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay

HAN Hua-yang, LI Zheng-kui*, WANG Hao, ZHU Qian

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

Abstract: Undisturbed sediment cores and surface water from Qinshui River in Gonghu Bay were collected to carry out a simulation experiment in our laboratory. The remediation effect of *Elodea nuttallii*-Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria (INCB) was applied in the polluted inflow river. The denitrification rate, ANAMMOX rate and nitrogen microorganism diversity were measured by ^{15}N isotope pairing technology and high-throughput sequencing technology based on 16S rRNA. The TN , NH_4^+-N , NO_3^--N concentrations were reduced by 72.03%, 46.67% and 76.65% in the treatment with addition of *Elodea nuttallii* and INCB in our laboratory experiment. Meanwhile, denitrification bacteria and ANAMMOX bacteria had synergistic effect with each other. The denitrification and ANAMMOX rates were increased by $165 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ and $269.7 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. The diversities of denitrification and ANAMMOX bacteria also increased in our experiment. From the level of major phylum, Proteobacteria, Planctomycetes, Acidobacteria and Bacteroidetes all increased significantly. The results showed that the *Elodea nuttallii*-INCB assemblage technology could increase the bio-diversity of nitrogen cycling bacteria and promote the ability of nitrogen removal in Qinshui River.

Key words: *Elodea nuttallii*-INCB assemblage technology; denitrification; ANAMMOX; ^{15}N isotope pairing technology; high throughput sequencing technology

贡湖是太湖的重要组成部分, 是无锡苏州两市的饮用水水源地和太湖鱼类重要的产卵地与索饵地, 在水资源及生物多样性等方面具有重要作用, 然而由于太湖富营养化水平的持续居高不下, 加之周边城市的快速扩张, 贡湖流域面临水生生态系统结构单一, 污染净化能力下降等问题, 水质总体处于 V 类。而入太湖贡湖河道水体污染, 水体氮素含量的升高, 严重影响到太湖贡湖水生生态系统的生物多样性及稳定性^[1]。因此, 控制入贡湖河道污染, 改善入湖河道水体水质, 对于水源地水体保护以及保护

河道水环境的生态多样性具有重要意义。

目前, 国内外学者对于河道氮素去除, 水体富营养化控制以及脱氮机制等方面进行了广泛的研究。蒋跃等^[2]研究了美人蕉 (*Canna indica* Linn.)、再力花 (*Thalia dealbata*)、千屈菜 (*Lythrum salicaria*) 这 3 种浮床植物的生长特性以及其对氮、磷吸收的优化

收稿日期: 2015-11-12; 修订日期: 2015-12-10

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

作者简介: 韩华杨 (1990 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为河道水体修复, E-mail: hanhuayang007@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhkui@nju.edu.cn

配置^[2]. 李正魁等^[3]探讨了应用氮循环菌的方法对湖泊水体氮污染的修复,陈祈春等^[4]研究了沉水植物床-固定化微生物技术在水源地中的修复效果. 上述技术相比较挺水与沉水植物浮床系统,微曝气生态浮床^[5]等技术,在控制水体的富营养化方面具有较为显著的效果^[6,7]. 然而上述研究主要针对水体氮素的去除效果,而对水生植物-微生物具体如何影响入湖河道底泥中的脱氮微生物机制的研究尚不多见^[8,9]. 因此,本研究针对入贡湖亲水河氮素负荷较高、河道水体流速缓慢、水生植物逐渐死亡等特点,选取了脱氮微生物 (immobilized nitrogen cycling bacteria, INCB), 与伊乐藻种 (*Elodea nuttallii*) 相结合,进行模拟实验,分析原位亲水河的水体修复,通过提高亲水河氮素转化能力达到河道水体修复的目的. 同时本研究还探讨了伊乐藻与高效脱氮微生物联用下,对于河道泥水界面中脱氮微生物群落的影响,分析了河道氮素脱除的机制.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域主要位于入贡湖亲水河(图1),其位于太湖新城南部、环太湖高速公路北侧,东起蠡河

西,西至壬子港,全长 13.82 km. 沟通环太湖大堤北侧的大量断头浜,在改善太湖新城南部水环境中发挥着重要的作用. 亲水河是贡湖入太湖前的缓冲河流,拦截地表径流及各类污染物质进入贡湖水域. 根据 2011-10~2013-03 的长期水质跟踪监测资料,贡湖湾亲水河区域生态环境严重退化,污染负荷不断增加,流速减慢,河道的自净能力降低,水质恶化,其中总磷(TP)0.1~0.2 mg·L⁻¹,总氮(TN) 4~5 mg·L⁻¹,氨氮(NH₄⁺-N) 2~3 mg·L⁻¹,硝氮(NO₃⁻-N)0.5~1.0 mg·L⁻¹,总体为劣V类水. 具体数据见表1.

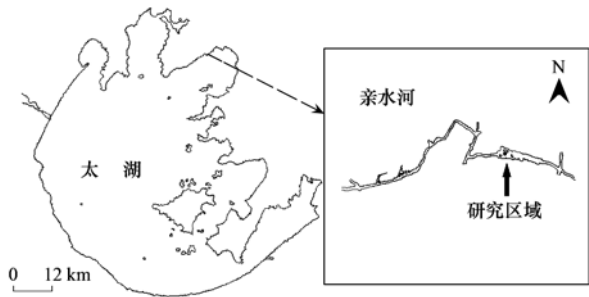


图1 太湖贡湖湾入湖河道(亲水河)实验修复地点
Fig. 1 Test remediation site of inflow river (Qinshui River) in Gonghu Bay, Taihu Lake

表1 实验区域表层底泥的物理化学性质

Table 1 Physio-chemical characteristics of surface layer of sampled sediment core

组别	TN /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	总有机碳 /mg·L ⁻¹	含水量 /%	有机物含量 /%	pH	溶解氧 /mg·L ⁻¹
含量	4.25	2.65	0.59	0.32	20.80	37.20	2.18	7.3	14

1.2 固定化高效脱氮微生物制备及应用

本研究采集了太湖流域底泥样品和水样,经过多次富集、平板划线分离、生理生化特性实验等方法分离与筛选出土著脱氮微生物.

采用甲基丙烯酸-β-羟乙酯(HEMA)、丙烯酸羟乙酯(HEA)与蒸馏水按特定体积比均匀混合,并用氮气进行密封,在⁶⁰Co-γ射线(辐射剂量1×10⁴ Gy), -78℃温度条件下辐照制备形成具有生物相容性的固定化脱氮微生物的载体^[10]. 将固定化载体放在去离子水中浸润3 h,直至完全溶胀(此时载体的孔径大小约为20~100 μm),然后将已经分离好的菌液与载体混合,同时加入培养微生物的营养液,在8 h好氧曝气培养,4 h厌氧培养(每72 h循环6次). 固定化载体具有微环境可供高效脱氮微生物生长并进行繁殖,制备成固定化脱氮微生物.

1.3 室内-原位实验设计

底泥和上覆水均从亲水河现场进行采集. 根据沿河流域的污染程度和工业源排放情况,研究选取了河道未受干扰的段位进行样品采集,以保证模拟原位实验的准确性. 底泥通过有机玻璃管(长度为60 cm,内径9 cm)进行采集,取样的底泥厚度约为30 cm. 共采集24根完整底泥柱在室内进行模拟原位实验. 同时采集原位上覆水. 所有的底泥柱以及水样在4 h内送至实验室进行处理. 室内实验培养时间2014-06~2014-08.

24根底泥柱被分成4个不同的微环境系统,分别为:处理组A,不做任何处理的裸泥组,作为对照;处理组B,添加了沉水植物伊乐藻(*Elodea nuttallii*)的处理组,选取长势良好的伊乐藻进行种植,伊乐藻长度为10 cm,株数为5株,株间距约为3 cm,每株的生物量约为10 g;处理组C,添加了固定化脱氮

微生物(INCB)的处理组,新鲜固定化载体湿重约为每包(60 ± 1) g,每包总生物量约为 4.5×10^5 cells·L⁻¹;处理组D,添加了固定化氮循环菌和沉水植物伊乐藻,添加量如上所述。所有的处理组均放在室温约为20℃ ± 1℃进行培养。在为期约1个月的室内培养结束后,进行相关水质及理化数据的测定。分别考察固定化氮循环菌、伊乐藻、伊乐藻-固定化脱氮微生物联用技术对河道水质改善的效果。

1.4 反硝化速率和厌氧氨氧化速率测定

反硝化速率和厌氧氨氧化速率的测定是通过 Risgaard-Petersen^[11] 和 Trimmer 等^[12] 提出¹⁵N同位素标记法进行的。底泥柱在实验之前,预处理放置24 h,以去除水体中残余的NO_x⁻。随后,将适宜浓度的同位素混合稀释液加入到底泥柱中。分为3个处理组进行投加,即:①¹⁵NH₄⁺ (¹⁵N at. % = 99.11), ②¹⁵NH₄⁺ + ¹⁴NO₃⁻, ③¹⁵NO₃⁻ (¹⁵N at. % = 99.16),使得最终每个处理组中的¹⁵N浓度约为100 μmol·L⁻¹。每个底泥柱有3个平行处理。在添加¹⁵N同位素之后,每个柱子上面用密封性能良好的橡胶塞进行密封,留有10 cm高度的顶空进行气体采集。整个底泥柱在室温(25℃ ± 1℃)下培养24 h后,向每个柱体中投加100 μL的ZnCl₂溶液(质量分数50%),使柱体中的微生物停止活动,然后采集水样,通过膜接口质谱仪(MIMS, Bay Instruments, Easton, MD, USA)进行同位素²⁸N₂、²⁹N₂、³⁰N₂的测定。最后通过如下公式所述计算得到厌氧氨氧化速率及反硝化速率。

$$A_{28} = A_{\text{total}} \times (1 - F_N)$$

$$A_{29} = A_{\text{total}} \times F_N$$

$$F_N = [(\text{NO}_3^-)_a - (\text{NO}_3^-)_b] / (\text{NO}_3^-)_a$$

$$D_{28} = D_{\text{total}} \times (1 - F_N)$$

$$D_{29} = D_{\text{total}} \times 2 \times (1 - F_N) \times F_N$$

$$D_{30} = D_{\text{total}} \times F_N^2$$

$$D_{\text{total}} = P_{30} \times F_N^{-2}$$

$$A_{\text{total}} = F_N^{-1} \times [P_{29} + 2 \times (1 - F_N^{-1})] \times P_{30}$$

式中, A_{28} 和 A_{29} 代表同位素实验中厌氧氨氧化过程各自的N₂产生量,μmol·L⁻¹; F_N 是NO₃⁻中¹⁵N的比例; $(\text{NO}_3^-)_a$ 和 $(\text{NO}_3^-)_b$ 是加入¹⁵NO₃⁻同位素前后的上覆水中¹⁵N丰度; D_{28} 、 D_{29} 、 D_{30} 代表了同位素实验过程中反硝化过程的气体产量,μmol·L⁻¹; P_{29} 和 P_{30} 是利用膜接口质谱仪测得的N₂产生量,μmol·L⁻¹。

1.5 微生物群落多样性对比分析

研究通过高通量测序平台(MiSeq)对4个不同的生态处理组进行微生物群落多样性的对比分析。

DNA提取:每个样品分别称取约500 mg后利用FastDNA Soil Kit (MP Biomedicals, CA, USA)提取各样品的总DNA,使用NanoDrop® ND-1000 (NanoDrop Technologies, Wilmington, DE, USA)对提取的总DNA样品进行浓度和纯度检测,保证各样品浓度大于20 ng·μL⁻¹,A260/A280介于1.80和2.00之间。

PCR扩增及纯化:利用上下游分别带有不同的9碱基标签序列的V1/V2区引物对各样品进行PCR扩增,上游引物序列结构为“G + 8碱基标签序列 + AGAGTTTGATYMTGGCTCAG”,下游引物序列结构为“G + 8碱基标签序列 + TGCTGCCTCCCGTAGGAGT”。用TaKaRa Ex Taq® (TaKaRa Bio, Japan)进行PCR扩增,单个样品做4个PCR平行。扩增条件为:98℃ 5 min; 20循环(98℃ 30 s, 50℃ 30 s, 72℃ 40 s); 72℃ 10 min。PCR完成后将每个样品的4个平行PCR体系混合后利用试剂盒进行PCR产物纯化,最终洗脱体积为30 μL。

建库以及MiSeq测序:准确移取等质量的100 ng的PCR纯化产物混合均匀,进行建库。建库完成后利用2100 Bioanalyzer (Agilent Technologies, Santa Clara, USA)进行芯片电泳以确认建库成功。同时再次使用Qubit 2.0 Fluorometer对文库进行精确定量。将建库成功的文库按比例混合、变性并稀释至终浓度8 pmol·L⁻¹后进行MiSeq上机测序。

数据分析:通过Sickle软件(<https://github.com/najoshi/sickle>)去除低质量序列,用Mothur软件包(http://www.mothur.org/wiki/Main_Page)对测序数据按样品筛分,然后在Mothur官网提供的标准流程进行降噪处理,最终对降噪数据进行比对分析,获得样品中微生物群落结构信息。

1.6 水质指标及测定方法

氨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进行测定;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;底泥表层DO采用溶解氧微电极系统进行测定(Micro TX3, Presens, 德国)。

1.7 数据分析方法

采用了SPSS 13.0数据处理包进行数据分析;

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)进一步评价数据变化的相关性;采用 Origin 8.0 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 室内模拟原位实验水质改善效果对比

2.1.1 氮素营养盐水平变化

模拟实验研究于 2014-06 ~ 2014-08 月进行. 采用生态模拟修复柱进行,在柱内微生物和植物已经稳定生长后,用原位河道水进行更换,然后跟踪监测一个星期的水质变化,每天下午 17:00 进行水样的采集. 总氮、硝氮、氨氮、亚硝氮的含量变化如图 2 ~ 5 所示. 实验结果表明,4 个处理组中,添加了伊乐藻和固定化氮循环菌的处理组总氮去除率为 72.03% (图 2),硝氮的去除率为 76.65% (图 3),在 4 个处理中均为最高,水体总氮与硝氮变化规律一致($r = 0.993$, $P < 0.05$)说明沉水植物与固定化氮循环菌联用技术强化水体的氮素脱除能力. 从图 4 和图 5 中,水体中氨氮和亚硝氮含量本底值不高,且呈现一个波动变化. 添加了固定化高效脱氮微生物的处理组,氨氮和亚硝氮含量均表现为初期增加,而后逐渐降低的趋势;未添加固定化脱氮微生物的处理组没有增加的现象. 由于脱氮细菌的存在,水体中存在大量的氨化反应、硝化反应、硝酸盐异化还原为铵以及反硝化反应等生物化学作用,氨氮在好氧状态下被氨氧化细菌转化为亚硝氮,同时在厌氧条件下,亚硝氮可通过硝酸盐异化还原为铵(DNRA)转化为氨氮,这些过程都会导致水体中的氨氮和亚硝氮在短时间发生互相转化^[13]. 因此氨

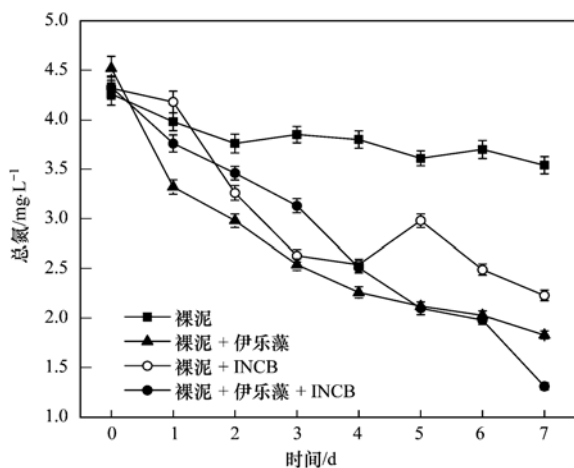


图 2 实验柱中不同处理组总氮变化对比

Fig. 2 Comparison of variation of TN in different groups

氮和亚硝氮短期升高,可能是由于水体中同时存在氨化细菌的矿化作用和氨氧化细菌所造成. 随后随着硝化细菌的不断转化,使得氨氮和亚硝氮含量逐渐下降. 从图 5 中可以看出,添加了伊乐藻和固定化脱氮微生物的处理组的亚硝氮的含量高于裸泥组的亚硝氮浓度(ANOVA, $P < 0.05$). 亚硝氮作为水体中脱氮过程一个中间产物^[14, 15],在柱体脱氮过程中会出现一个短暂性的累积现象.

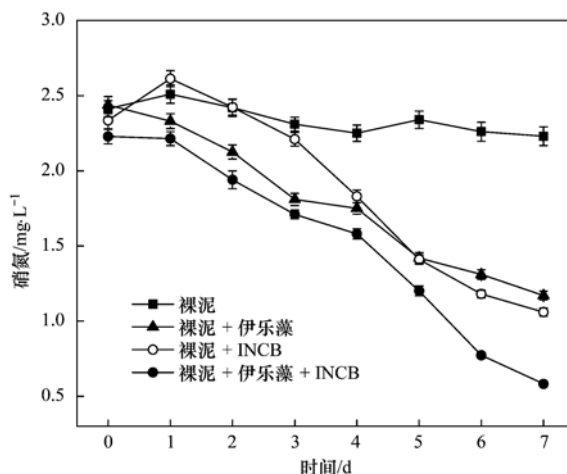


图 3 实验柱中不同处理组硝氮浓度变化

Fig. 3 Comparison of variation of NO_3^- -N in different groups

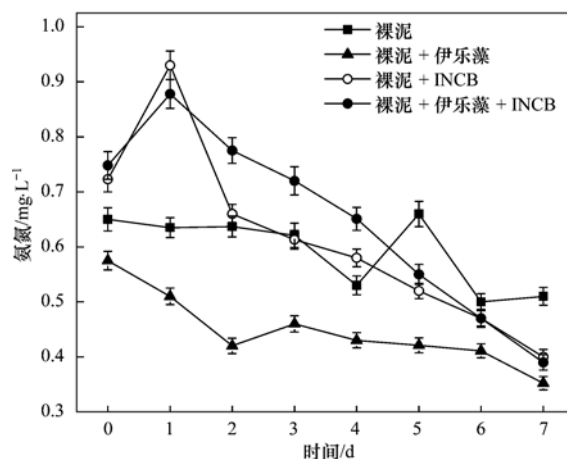


图 4 实验柱中不同处理组氨氮变化对比

Fig. 4 Comparison of variation of NH_4^+ -N in different groups

2.1.2 不同处理组溶解氧浓度变化

模拟原位河道的反应柱中种植了伊乐藻的处理组与未种植伊乐藻的处理组,溶解氧的变化有明显的差异. 从图 6 可以看出,种植了伊乐藻的处理组,最高溶解氧浓度为 $23.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,时间为 14:00 左右,由于此时一般为一天光照强度最强的时候,因此沉水植物伊乐藻的光合作用也最强,使得水体中的溶解氧浓度达到过饱和状态. 同时,在 16:00 以后,

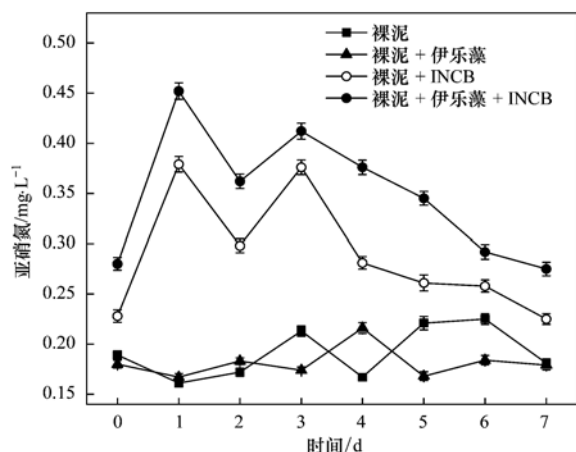


图5 实验柱中不同处理组亚硝氮变化对比

Fig. 5 Comparison of variation of NO_2^- -N in different groups

由于植物光合作用减弱,水体中的溶解氧浓度也逐渐下降. 通过 Pearson 相关性分析发现,添加了伊乐藻的处理组中总氮与溶解氧呈负相关 ($P < 0.05$, $r = -0.894$) 实验结果表明,伊乐藻的稳定生长增加柱体底泥的溶解氧,改变了泥水界面处的溶解氧情况,这与之前的一些研究具有一致性^[16]. 白天期间,沉水植物伊乐藻通过光合作用会产生氧气^[17]. 同时,伊乐藻的根系会释放氧气,从而改变根系周围的氧气分布. 氧气侵蚀深度的变化^[18],使得原本厌氧或缺氧的底泥变成了缺氧-好氧间歇分布的区域,这样的变化为泥水界面处的脱氮微生物提供了适宜的生存环境,从而进一步提高了脱氮效率.

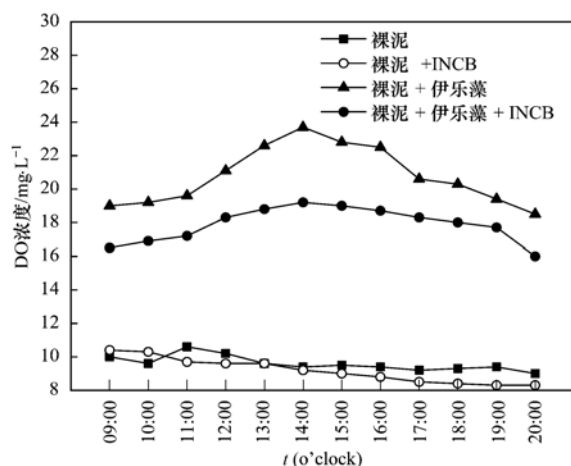


图6 实验柱中不同处理组溶解氧变化

Fig. 6 Variation of oxygen profiles in different treatment groups

2.2 反硝化速率及厌氧氨氧化速率

4 个处理组中,厌氧氨氧化的氮气产量,反硝化过程的氮气产生速率以及柱体总的氮气产生速率均得到了增强(图 7),仅添加了固定化脱氮微生物的处理组的 N_2 产生速率在 4 个处理组中最高,说明脱

氮微生物活动得到了明显的增强,对于河道脱氮过程具有明显的影响,这些过程与河道生态系统中的氮素循环以及生态修复都有着密切的关系^[19]. 对比添加了固定化脱氮微生物的两个处理组的 N_2 产生速率,虽然两者的氮气产生速率均高于未添加固定化脱氮微生物的处理组,但是添加了伊乐藻的处理组(处理组 B 和处理组 D)的 N_2 产生速率要显著低于没有添加伊乐藻的处理组(处理组 A 高于处理组 C,处理组 C 要高于处理组 D) (ANOVA, $P < 0.05$). 由于沉水植物的存在,可能会在一定程度上抑制厌氧氨氧化过程以及反硝化过程的氮气产生速率,从而导致了底泥柱中总的 N_2 产量的下降. 脱氮微生物将水体中的氨氮和硝氮转化为 N_2 的过程,是一个较为复杂的生物化学过程,其中会经过 N_2O 的一个中间产气过程,而将 N_2O 转化为 N_2 的过程,需要一个在相对缺氧的条件下进行^[20, 21]. 沉水植物伊乐藻的存在,会丰富泥水界面处的氧气含量,改变氧气含量(图 6),因此会在一定程度上抑制 N_2O 转化为 N_2 的过程. 同时,沉水植物通过根部释放氧气,在改变沉积物的氧气侵蚀深度后,还会引起根区土壤的氧化还原电位的改变^[22]. 固定化脱氮微生物从载体释放到水体及泥水界面中,因为其中氨化细菌、氨氧化细菌、硝化细菌以及反硝化细菌的存在,会引发一系列的生物化学过程,从而改变水体中的 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的含量. 反硝化过程与厌氧氨氧化过程互相之间有着紧密的联系,有研究发现厌氧氨氧化过程需要的 NO_2^- 可以来自于反硝化细菌还原 NO_3^- 的过程^[23]. 同时,有报道已经发现厌氧氨氧化过程和反硝化过程在低 C/N 比的情况下,具有良好的协同作用^[24, 25],同时,在微溶解氧区域(OMZ)内,反硝化过程和厌氧氨氧化过程可以同时发生^[26]. 在表层的泥水界面中,氨氮的氧化导致孔隙水中有更多能被反硝化菌利用的硝氮的生成^[27],同时硝氮的还原也使得孔隙水中更多的亚硝酸盐可以被厌氧氨氧化细菌利用. 因为研究区域的 NO_3^- -N 含量要远高于 NO_2^- -N 的含量,因此更多的硝酸盐氧化过程对于厌氧氨氧化过程更加有利. 因此,添加了 INCB 的实验柱体沉积物中厌氧氨氧化过程和反硝化过程大大提高,表现为 N_2 产生速率明显提高.

2.3 不同处理组之间微生物群落多样性变化

4 个不同处理组的底泥柱中,添加了固定化脱氮微生物的处理组与固定化脱氮微生物与伊乐藻联用的处理中微生物多样性不断增加,其中以变形菌门(Proteobacteria)最多,在裸泥组、沉水植物组、固

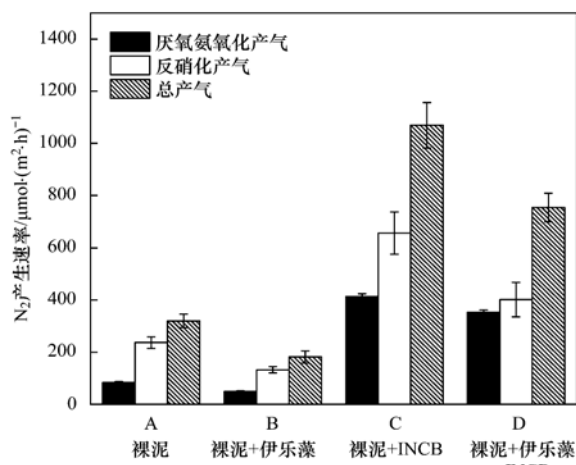


图7 实验柱中不同处理组氮气产生速率变化对比

Fig. 7 Comparison of N₂ production rate in different treatment groups

定化脱氮微生物组以及固定化脱氮微生物与伊乐藻联用组所占比例分别为 96.98%、95.03%、58.95% 和 63.24% (图 8)。变形菌门中常见的脱氮微生物有氨化细菌、硝化细菌以及反硝化细菌^[28]。同时,添加了固定化脱氮微生物的处理组中浮霉菌门(Planctomycetes)的丰度得到明显提高,而多数厌氧氨氧化细菌多见于浮霉菌门^[29]。从微生物的多样性的分析上看,添加了固定化脱氮微生物后,柱体中的反硝化细菌和厌氧氨氧化细菌具有更高的丰度。酸杆菌门(Acidobacteria)和拟杆菌门(Bacteroidetes)同样具有较高的丰度,这些细菌在生态系统中也具有重要的作用。4 个处理组中微生物群落结构的改变主要是因为受固定化微生物和沉水

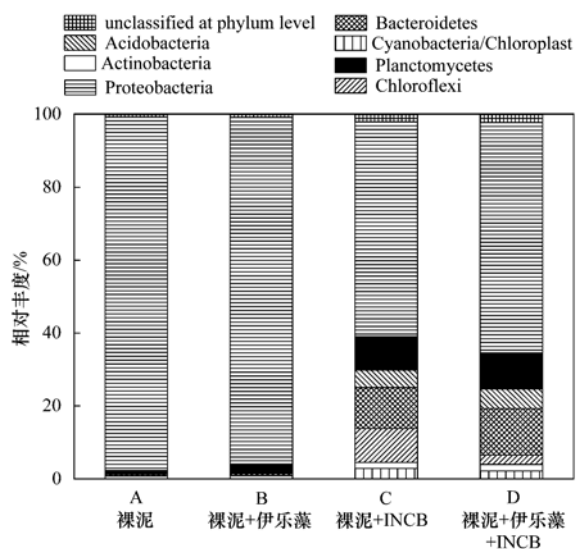


图8 实验柱中不同处理组的微生物群落变化情况

Fig. 8 Variation of microbial communities in different treatment groups

植物伊乐藻的影响。固定化脱氮微生物带来了大量的氨化细菌、硝化细菌和反硝化细菌。同时,由于沉水植物伊乐藻的存在,植物根系会释放碳、O₂,会改变根系周围土壤底泥的理化条件^[30],从而使得底泥柱中的微生物的群落结构发生改变。同时,温度、营养盐、光照等条件也会对脱氮等微生物的群落结构造成影响。

3 结论

(1) 伊乐藻与固定化脱氮微生物联合作用改变了泥水界面的溶解氧浓度,为脱氮微生物提供了缺氧-好氧的生存环境,促进微生物氮素转化过程。

(2) 伊乐藻与固定化脱氮微生物联用技术提高了沉积物的反硝化速率,同时厌氧氨氧化速率也得到提高。E-INCB 技术可以利用反硝化细菌与厌氧氨氧化细菌的协同促进关系,同时提高反硝化速率与厌氧氨氧化速率。

(3) 添加了伊乐藻和固定化脱氮微生物的处理组,变形菌门(Proteobacteria)以及浮霉菌门(Planctomycetes)类菌群均得到了显著的提高,说明加入固定化脱氮微生物以后,显著增强了河道底泥中的脱氮微生物的多样性。

(4) 室内模拟实验表明,伊乐藻与固定化脱氮微生物联用技术可以有效去除河道水体中的氮素,提高亲水河的水体自净能力。

参考文献:

- [1] Binnerup S J, Sørensen J. Nitrate and nitrite microgradients in barley rhizosphere as detected by a highly sensitive denitrification bioassay[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1992, 58(8): 2375-2380.
- [2] 蒋跃, 童琰, 由文辉, 等. 3 种浮床植物生长特性及氮、磷吸收的优化配置研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(5): 774-780.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 李海英, 冯慕华, 李玲, 等. 微曝气生态浮床净化入湖河口污染河水原位模型实验[J]. 湖泊科学, 2009, 21(6): 782-788.
- [6] 刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 等. 伊乐藻和氮循环细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): 3764-3768.
- [7] 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.
- [8] Tao W D, Wang J. Effects of vegetation, limestone and aeration on nitrification, anammox and denitrification in wetland treatment systems[J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(5): 836-842.
- [9] Zhao Y Q, Xia Y Q, Kana T M, *et al.* Seasonal variation and controlling factors of anaerobic ammonium oxidation in freshwater river sediments in the Taihu Lake region of China [J]. Chemosphere, 2013, **93**(9): 2124-2131.
- [10] Chen F Z, Song X L, Hu Y H, *et al.* Water quality improvement and phytoplankton response in the drinking water source in Meiliang Bay of Lake Taihu, China[J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(11): 1637-1645.
- [11] Risgaard-Petersen N, Nielsen L P, Rysgaard S, *et al.* Erratum: Application of the isotope pairing technique in sediments where anammox and denitrification co-exist [J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2004, **2**: 315.
- [12] Trimmer M, Risgaard-Petersen N, Nicholls J C, *et al.* Direct measurement of anaerobic ammonium oxidation (anammox) and denitrification in intact sediment cores [J]. Marine Ecology Progress Series, 2006, **326**: 37-47.
- [13] Kumar M, Lin J G. Co-existence of anammox and denitrification for simultaneous nitrogen and carbon removal-Strategies and issues[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **178**(1-3): 1-9.
- [14] Seitzinger S P. Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: ecological and geochemical significance [J]. Limnology and Oceanography, 1988, **33**(4): 702-724.
- [15] 彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 等. 循环流廊道湿地中氮归趋过程模拟研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1311-1317.
- [16] Risgaard-Petersen N, Jensen K. Nitrification and denitrification in the rhizosphere of the aquatic macrophyte *Lobelia dortmanna* L. [J]. Limnology and Oceanography, 1997, **42**(3): 529-537.
- [17] Laskov C, Horn O, Hupfer M. Environmental factors regulating the radial oxygen loss from roots of *Myriophyllum spicatum* and *Potamogeton crispus*[J]. Aquatic Botany, 2006, **84**(4): 333-340.
- [18] 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.
- [19] Mortensen E, Jeppesen E, Søndergaard M, *et al.* Nutrient dynamics and biological structure in shallow freshwater and brackish lakes[M]. Netherlands: Springer, 1994.
- [20] Lam P, Kuypers M M M. Microbial nitrogen cycling processes in oxygen minimum zones[J]. Annual Review of Marine Science, 2011, **3**(1): 317-345.
- [21] 陈诺, 廖婷婷, 王睿, 等. 碳底物含量对厌氧条件下水稻土 N_2 , N_2O , NO , CO_2 和 CH_4 排放的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3595-3604.
- [22] 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.
- [23] Risgaard-Petersen N, Meyer R L, Revsbech N P. Denitrification and anaerobic ammonium oxidation in sediments: effects of microphytobenthos and NO_3^- [J]. Aquatic Microbial Ecology, 2005, **40**(1): 67-76.
- [24] Long A, Heitman J, Tobias C, *et al.* Co-occurring anammox, denitrification, and codenitrification in agricultural soils [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, **79**(1): 168-176.
- [25] Lotti T, Van Der Star W R L, Kleerebezem R, *et al.* The effect of nitrite inhibition on the anammox process [J]. Water Research, 2012, **46**(8): 2559-2569.
- [26] Ward B B, Devol A H, Rich J J, *et al.* Denitrification as the dominant nitrogen loss process in the Arabian Sea[J]. Nature, 2009, **461**(7260): 78-81.
- [27] An S, Joye S B. Enhancement of coupled nitrification-denitrification by benthic photosynthesis in shallow estuarine sediments[J]. Limnology and Oceanography, 2001, **46**(1): 62-74.
- [28] 方芳, 陈少华. 功能基因在反硝化菌群生态学研究中的应用[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(9): 1836-1845.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caoheidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行