

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

**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

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析..... 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)

阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究 ..... 苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)

上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究 ..... 包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)

七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究 ..... 马娟娟, 李真 (2060)

冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究 ..... 宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)

大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价 ..... 徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)

深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征 ..... 王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)

表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 ..... 孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)

桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 ..... 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)

汾河源区不同景观带水文过程研究 ..... 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)

北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征 ..... 郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)

光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用 ..... 章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)

紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 ..... 陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)

基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究 ..... 陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)

镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价 ..... 周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)

两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 ..... 杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)

湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化 ..... 武晓飞, 李大鹏 (2164)

不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响 ..... 王尚, 李大鹏 (2171)

池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究 ..... 吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)

再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放 ..... 王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)

低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 ..... 赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)

活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂 ..... 刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)

准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学 ..... 刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)

AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究 ..... 涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)

镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究 ..... 杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)

微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究 ..... 刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)

聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究 ..... 唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)

丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响 ..... 侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)

聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化 ..... 周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)

鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟 ..... 弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)

基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估 ..... 廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)

农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策 ..... 谭冰, 王铁宇, 李奇锋, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)

渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 ..... 王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)

基于荧光传感器 F<sub>rex</sub> 的特性检测水质环境中生物毒性物质 ..... 赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)

对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放 ..... 张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)

基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育 ..... 赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)

酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究 ..... 刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)

河蚬 (*Corbicula fluminea*) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 ..... 王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)

海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态 ..... 田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)

DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响 ..... 吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)

重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究 ..... 田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)

1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性 ..... 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)

黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 ..... 江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)

黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应 ..... 李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)

宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征 ..... 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)

长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响 ..... 张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)

长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响 ..... 常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)

伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价 ..... 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)

江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价 ..... 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)

小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析 ..... 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)

保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 ..... 张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)

米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究 ..... 吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)

水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响 ..... 刘晓焯, 张洪, 李永峰 (2433)

《环境科学》征订启事 (2208) 《环境科学》征稿简则 (2400) 信息 (2084, 2200, 2229, 2391)

# 两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响

杨文斌, 李阳, 孙共献

(安徽师范大学环境科学与工程学院, 芜湖 241002)

**摘要:** 在实验室模拟研究沉水植物金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、苦草 (*Vallisneria spiralis* L.) 对上覆水、间隙水中可溶性无机氮 (dissolved inorganic nitrogen, DIN) 的浓度、赋存形态及 DIN 扩散通量的影响。结果表明, 金鱼藻和苦草对上覆水中 DIN 的去除效果均强于间隙水, 对各形态 DIN 的去除差异:  $\text{NO}_2^- \text{-N} > \text{NH}_4^+ \text{-N} > \text{NO}_3^- \text{-N}$ ; 金鱼藻对上覆水中 DIN 的去除效果明显强于苦草, 但对间隙水中 DIN 的去除效果弱于苦草; 金鱼藻和苦草减少了  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  的扩散通量, 显著增加了  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的扩散通量, 使  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  取代  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  成为间隙水向上覆水中扩散 DIN 的主要形态, 但对  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  扩散通量的影响, 金鱼藻和苦草之间差异不显著; 金鱼藻和苦草增加了上覆水和间隙水中 3 种形态 DIN 含量比例的变化幅度, 金鱼藻对上覆水中 DIN 含量比例影响强于苦草, 对间隙水中 DIN 含量比例的影响弱于苦草。总体来讲, 金鱼藻对上覆水中 DIN 形态影响较大, 苦草对间隙水中 DIN 形态影响较大, 两者对 DIN 扩散通量的影响差别不显著。

**关键词:** 金鱼藻; 苦草; 可溶性无机氮; 氮形态; 氮分配; 扩散通量

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2156-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.016

## Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water

YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian

(College of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China)

**Abstract:** *Ceratophyllum demersum* (*C. demersum*) and *Vallisneria spiralis* L. (*V. spiralis* L.) were studied as model submerged macrophytes. The effects of the submerged macrophytes on the forms and concentration of the dissolved inorganic nitrogen (DIN) in the overlying water and the interstitial water, as well as the diffusion flux of DIN in the water-sediment interface were investigated by batch simulation experiment. The results indicated that the removal effect of DIN in the overlying water was better than that in the interstitial water by submerged macrophytes. The removal efficiency of DIN in the overlying water and the interstitial water followed the order of  $\text{NO}_2^- \text{-N} > \text{NH}_4^+ \text{-N} > \text{NO}_3^- \text{-N}$ . The removal rate of DIN by *C. demersum* was higher than that of *V. spiralis* L. in the overlying water, while the result was converse in the interstitial water. *C. demersum* and *V. spiralis* L. decreased the diffusion flux of  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  and  $\text{NO}_2^- \text{-N}$ , and increased the diffusion flux of  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  significantly. Consequently,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  replaced  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  and became the main form of DIN, which diffused from the interstitial water to the overlying water. The impact of the diffusion flux of  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  between *C. demersum* and *V. spiralis* L. showed no significant difference, and the result was the same for  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ . *C. demersum* and *V. spiralis* L. increased the width of variation of the three nitrogen forms to total DIN in the overlying water and the interstitial water, the influence on the ratio of DIN by *C. demersum* was greater than that of *V. spiralis* L. in the overlying water, while the result was opposite in the interstitial water. In general, *C. demersum* had more influence in the overlying water, while *V. spiralis* L. had more influence in the interstitial water, and the influence of DIN diffusion flux was not significant.

**Key words:** *Ceratophyllum demersum*; *Vallisneria spiralis* L.; dissolved inorganic nitrogen (DIN); nitrogen conformation; nitrogen distribution; diffusion flux

对湖泊营养盐循环与生物地球化学过程研究是目前国内外湖泊及流域科学的学科前沿和优先领域。营养盐循环的生化动力学机制是该领域研究的重要内容, 其中水-沉积物界面营养盐的迁移转化规律研究是重中之重<sup>[1-3]</sup>。目前对营养盐的探讨多集中在物理化学性质<sup>[4]</sup>、营养元素的赋存形态<sup>[5]</sup>、吸附与解吸及其动力学<sup>[6,7]</sup>与环境因子<sup>[1]</sup>影响等方面, 以上研究主要考虑的是水-沉积物二相之间的作用, 而对湖泊水体中生物相的存在作用考虑的仍不够全面<sup>[8]</sup>。沉水植物作为湖泊生物相的重要组成之

一, 占据了湖泊中水和沉积物的主要界面, 对湖泊生态系统的物质循环和能量传递起到重要的调控作用<sup>[9,10]</sup>。沉水植物对水体的净化起到非常重要的作用<sup>[11]</sup>, 除了通过直接吸收同化去除环境中  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  外, 其代谢的过程会对周围物理、化学和微生物环境条件造成改变, 很大程度上会改变可溶性

收稿日期: 2013-11-07; 修订日期: 2013-12-28

基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (120805MD60); 安徽省教育厅自然科学研究项目 (KJ2010A151)

作者简介: 杨文斌 (1968 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水环境生态修复, E-mail: ywb1968@mail.ahnu.edu.cn

无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)的迁移和转化<sup>[12]</sup>,还有学者研究发现沉水植物对氮盐的吸收存在选择性<sup>[13]</sup>,均可能致使水体中 DIN 的赋存形态比例发生变化,进而对直接利用 DIN 的藻类和其他水生植物有直接的影响. 如胡章喜等<sup>[14]</sup>研究发现  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度对藻类的生长有显著的影响,王珺等<sup>[15]</sup>发现不同  $\text{NH}_4^+$ -N 与  $\text{NO}_3^-$ -N 的比值对轮叶黑藻的生理活动和生长具有明显的影响,因此研究沉水植物对 DIN 的影响是有必要的. 近年来,越来越多的研究着重于沉水植物系统降低水体中氮磷营养盐浓度的综合效应<sup>[16,17]</sup>,对沉水植物代谢过程中 DIN 在环境中赋存形态转化的研究相对较少,尤其是不同根系特点的沉水植物对上覆水和间隙水中 DIN 赋存形态变化的影响更鲜见报道.

本研究通过模拟浅水湖泊环境,选择根系差异较大的沉水植物金鱼藻和苦草,分析其对上覆水、间隙水中 DIN 浓度和赋存形态转化及 DIN 扩散通量的影响,以期为湖泊内源污染治理及湖泊生态修复提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

在芜湖市龙窝湖采集试验所需的沉积物和沉水植物. 金鱼藻为金鱼藻科金鱼藻属,其叶轮生,无根系;苦草为水鳖科多年生无茎草本沉水植物,根系较发达. 采集生长旺盛的金鱼藻和高约 10 cm 的苦草幼苗. 采集原上位上覆水备用,用迈克逊采泥器采集表层 10 cm 的沉积物. 采集的沉水植物在试验室条件下进行自然光照培养驯化;底泥样品经搅拌均匀,用筛孔径 2 mm 的金属筛子过滤去除腐叶和大颗粒物等杂质后,静置备用.

### 1.2 试验设计

试验选取 9 个圆形塑料桶(直径 65 cm,高 75 cm),设置 3 组,每组试验设 3 个平行样,在每个塑料桶内均匀铺上厚 15 cm 的沉积物,缓慢加入经 25 号浮游生物网( $\Phi 0.064$  mm)过滤后的原上位上覆水到桶内至 65 cm 高. 对照组不种植物,处理组分别种植经驯化后生长旺盛的金鱼藻和苦草,桶内初始生物量约为 500 g,试验期间定期在上覆水中添加去离子水,以维持上覆水水位恒定.

### 1.3 样品采集和测定

试验从 2012-07-22 开始,至 2012-09-07 结束,共进行 48 d,每隔 8 d 取样. 用毛细管在水-沉积物界面上方 5 ~ 10 cm 处采集上覆水 100 mL;用注射

器改装成的微型柱状采样器采集表层 0 ~ 5 cm 的沉积物,经离心( $3\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 10 min)获得间隙水. 水样经过  $0.45\ \mu\text{m}$  玻璃纤维滤膜过滤后,分别测定  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 浓度,测定方法依次为纳氏试剂光度法、紫外分光光度法、*N*-(1-萘基)-乙二胺光度法<sup>[18]</sup>. 孔隙率通过烘干法测定<sup>[19]</sup>. 监测采样时温度、pH(上海雷磁 PHSJ-3F)、DO(上海雷磁 JPB-607A)等理化指标,同时观察沉水植物金鱼藻与苦草的生长状况.

### 1.4 数据分析与计算

运用 SPSS 19.0 对数据进行统计分析,对上覆水和间隙水中 DIN 浓度和 DIN 在水-沉积物界面的扩散通量先用单因素方差分析(One-Way ANOVA),然后进行 Duncan 多重比较,用 Sigma Plot 10 进行绘图.

根据下式计算水体中第  $i$  天的氮素去除率(%):

$$\text{氮素去除率} = \frac{c_{i0} \times V_{i0} - c_i \times V_i}{c_{i0} \times V_{i0}} \times 100\%$$

式中, $c_{i0}$ 为第  $i$  天对照组水体中  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度; $V_{i0}$ 为第  $i$  天对照组水样体积; $c_i$ 为第  $i$  天处理组水体中  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 的浓度; $V_i$ 为第  $i$  天处理组水样体积. 氮素平均去除率为 7 次氮素去除率的平均值.

## 2 结果与讨论

### 2.1 两种沉水植物对上覆水和间隙水中 DIN 浓度的影响

试验期间,上覆水中 DIN 浓度随时间变化如图 1(a)、1(c)和 1(e)所示,对照组中 DIN 浓度均有先升后降的变化. 金鱼藻组和苦草组中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度随时间逐渐减少;  $\text{NH}_4^+$ -N 在第 8 d 有所减少,后缓慢增加;  $\text{NO}_2^-$ -N 在第 8 d 后有所减少并保持在较低浓度. 在第 48 d,对照组、金鱼藻组和苦草组上覆水中相应形态的 DIN 之间均存在显著差异( $P < 0.05$ ),见表 1,说明在微环境稳定后,金鱼藻和苦草对上覆水中 DIN 有明显的去除效果,并且金鱼藻对 DIN 的去除效果明显好于苦草.

间隙水中 DIN 浓度随时间变化的情况如图 1(b)、1(d)和 1(f)所示,2 个处理组间隙水中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度较对照组降低均不明显;  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度在试验前期降低均较明显,在试验后期趋于稳定;  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度在 3 组中均存在相似的变化. 在第 48 d,金鱼藻组和苦草组中相应形态的 DIN 与对照组

之间均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 在金鱼藻组和苦草组之间, 除间隙水中  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ) 外, 对应的  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 之间均无显著

差异 ( $P > 0.05$ ), 见表 1. 说明在微环境稳定后, 金鱼藻和苦草对间隙水中 DIN 的去除效果显著, 并且苦草对  $\text{NH}_4^+$ -N 的去除效果明显好于金鱼藻.

表 1 试验第 48 d 上覆水和间隙水中 DIN 浓度变化<sup>1)</sup>/mg·L<sup>-1</sup>

Table 1 Concentration of DIN in the overlying water and the interstitial water on the 48th day of the test/mg·L<sup>-1</sup>

项目	上覆水			间隙水		
	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N	$\text{NO}_2^-$ -N	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N	$\text{NO}_2^-$ -N
对照组	3.329 ± 0.072 <sup>a</sup>	0.94 ± 0.043 <sup>a</sup>	0.406 ± 0.016 <sup>a</sup>	7.329 ± 0.262 <sup>a</sup>	7.073 ± 0.638 <sup>a</sup>	0.074 ± 0.005 <sup>a</sup>
金鱼藻	1.505 ± 0.218 <sup>b</sup>	0.393 ± 0.045 <sup>c</sup>	0.019 ± 0.003 <sup>c</sup>	7.23 ± 0.367 <sup>ab</sup>	5.952 ± 0.503 <sup>b</sup>	0.047 ± 0.025 <sup>b</sup>
苦草	1.888 ± 0.024 <sup>c</sup>	0.605 ± 0.079 <sup>b</sup>	0.117 ± 0.004 <sup>b</sup>	6.487 ± 0.333 <sup>b</sup>	5.178 ± 0.687 <sup>c</sup>	0.038 ± 0.008 <sup>ab</sup>

1) 不同字母表示经 Duncan 检验数据之间的差异显著 ( $P < 0.05$ )

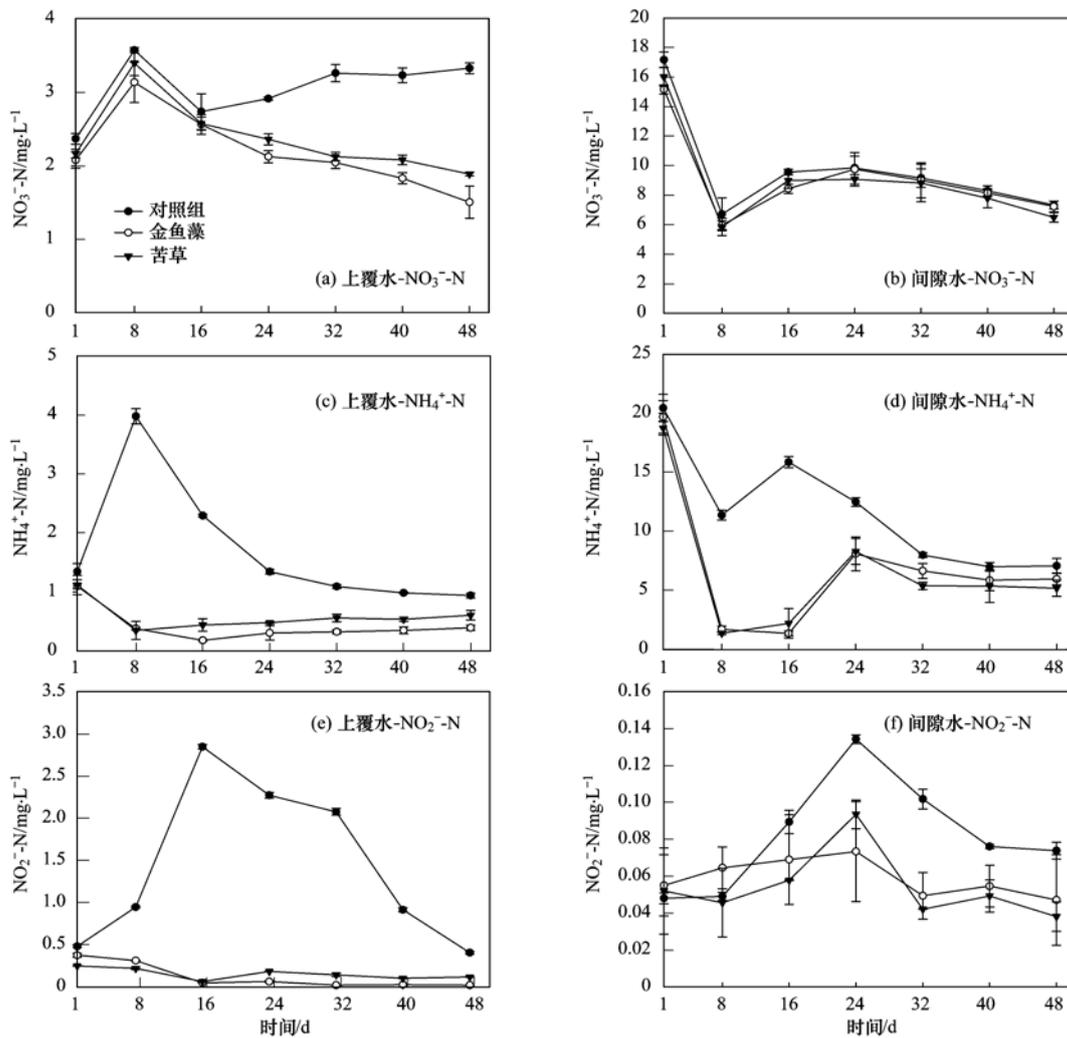


图 1 沉水植物对上覆水和间隙水中 DIN 的影响(平均值 ± 标准误)

Fig. 1 Effects of three species submerged macrophytes on the DIN in the overlying water and the interstitial water (Mean ± SE)

对照组上覆水中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度先升后降的变化, 主要是  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 在上覆水和间隙水中存在较明显的浓度梯度(见图 1), 由间隙水中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 向上覆水释放所导致<sup>[20,21]</sup>, 这一现象与间隙水中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度在试验第 8 d 均

出现降低相对应. 在试验后期, 2 个处理组上覆水中  $\text{NH}_4^+$ -N 缓慢增加, 一方面是沉积物的释放作用对上覆水中  $\text{NH}_4^+$ -N 进行补充; 另一方面与沉水植物生长状况有关, 在试验后期, 沉积物表面均发现金鱼藻和苦草的腐叶, 腐叶的分解可能会导致上覆水中

$\text{NH}_4^+$ -N 的增加<sup>[22]</sup>. 3 组间隙水中  $\text{NO}_3^-$ -N 的浓度相差不大, 这与沉水植物的吸收和氮素间转化有关, 本试验无外源氮进入, 沉积物的释放是上覆水和间隙水中氮的主要来源, 在 7、8 月环境温度较高, 沉积物中有较强的矿化作用<sup>[23]</sup>, 从而导致沉积物向间隙水释放  $\text{NH}_4^+$ -N, 进而发生硝化反应转化成  $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N, 对间隙水中 DIN 进行补充, 导致间隙水中  $\text{NO}_3^-$ -N 的浓度降低不明显. 在试验过程中, 对照组上覆水中  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度均高于间隙水中浓度, 这是由于硝化-反硝化作用主要是发生在水-沉积物界面<sup>[24]</sup>, 会产生大量作为中间产物的  $\text{NO}_2^-$ -N 导致的.

对比金鱼藻和苦草对上覆水、间隙水中 DIN 的平均去除率(表 2)可发现, 金鱼藻和苦草对  $\text{NH}_4^+$ -N

的平均去除率均高于  $\text{NO}_3^-$ -N, 说明金鱼藻和苦草对  $\text{NH}_4^+$ -N 的去除作用更明显. 金鱼藻和苦草对上覆水中  $\text{NO}_2^-$ -N 平均去除率均高于  $\text{NH}_4^+$ -N, 但对间隙水中  $\text{NO}_2^-$ -N 的平均去除率均却低于  $\text{NH}_4^+$ -N, 这可能是间隙水中  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度(小于  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 一直保持在较低水平的原因. 沉水植物的光合作用会增加水体中溶解氧(dissolved oxygen, DO)浓度, 好氧的条件有利于  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 进行硝化作用转化为  $\text{NO}_3^-$ -N, 加快  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 的消耗, 补充间隙水向上覆水扩散和被沉水植物吸收消耗的  $\text{NO}_3^-$ -N, 因此沉水植物对  $\text{NO}_3^-$ -N 去除效果不明显, 而对  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 的去除率更高. 综合  $\text{NO}_2^-$ -N 作为中间产物极易被氧化的性质, 笔者认为, 沉水植物对 DIN 的去除效果  $\text{NO}_2^-$ -N >  $\text{NH}_4^+$ -N >  $\text{NO}_3^-$ -N.

表 2 沉水植物对上覆水和间隙水中 DIN 的平均去除率/%

Table 2 Average removal rate of DIN in the overlying water and the interstitial water by two submerged macrophytes/%

项目	上覆水			间隙水		
	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N	$\text{NO}_2^-$ -N	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NH}_4^+$ -N	$\text{NO}_2^-$ -N
金鱼藻	27.6	67.3	82.3	5.8	37.7	19.7
苦草	21.7	54.7	81.2	7.8	42.7	25.9

由表 2 可知, 金鱼藻和苦草对上覆水中 DIN 的平均去除率均高于间隙水, 说明两者对上覆水中 DIN 的去除效果均强于间隙水. 金鱼藻对上覆水中 DIN 的平均去除率高于苦草组, 但对间隙水中 DIN 的平均去除率却低于苦草组. 可能的原因, 一方面是由于金鱼藻无根, 主要利用茎叶吸收上覆水中营养物质. 苦草的根系发达, 除了依靠叶吸收营养物质外, 也能通过根系从间隙水中吸收营养物质满足自身的需求, 从而减少对上覆水中营养物质的吸收<sup>[25]</sup>; 另一方面, 可能是苦草根系周围形成了根系网络, 根系的泌氧作用使沉积物中氧化还原电位升高, 硝化作用更易进行, 导致苦草组间隙水中  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度低于对照组; 最后, 苦草根系会为不同种类的微生物附着和繁殖提供了场所和条件, 促进了苦草根际硝化-反硝化作用的进行<sup>[26,27]</sup>, 加强了对 DIN 的去除效果<sup>[13]</sup>.

## 2.2 两种沉水植物对水-沉积物界面 DIN 扩散通量的影响

水土界面氮扩散通量的计算采用 Fick 第一扩散定律<sup>[28]</sup>:

$$F_x = \varphi D_s dc/dz \quad (1)$$

式中,  $F_x$  为扩散通量, 正值表示由沉积物向上覆水扩散, 负值相反;  $\varphi$  为沉积物样品的孔隙率;  $D_s$  为无机氮离子在沉积物中的扩散系数;  $dc/dz$  为沉积

物水界面的浓度梯度, 是间隙水样品与上覆水样品之间的浓度差, 在本试验中, 采用表层 0~2 cm 沉积物间隙水与底层上覆水之间的浓度差来计算 ( $dz = 1 \text{ cm}$ ). 沉积物的扩散系数 ( $D_s, \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 可以用下式来计算<sup>[29]</sup>:

$$D_s = D_0/\theta^2 \quad (2)$$

式中,  $D_0$  为水中的扩散系数,  $\theta$  为沉积物弯曲度. 25℃时  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  无限稀释溶液中溶质的扩散系数分别为  $19.8 \times 10^{-6}$ 、 $19 \times 10^{-6}$ 、 $19.1 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[30]</sup>. 沉积物的弯曲度可以通过下式来计算<sup>[31]</sup>:

$$\theta^2 = 1 - \ln(\varphi^2) \quad (3)$$

孔隙率的计算公式如下<sup>[32]</sup>:

$$\varphi = \frac{(W_w - W_d) \times 100\%}{W_w - W_d + W_d/2.5} \quad (4)$$

式中,  $W_w$  是沉积物的湿重,  $W_d$  是沉积物的干重, 2.5 是湿沉积物密度与水浓度比值的平均值.

如图 2 所示, 在对照组和 2 个处理组中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的扩散通量均为正值, 均由沉积物向上覆水扩散, 说明  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 主要是从沉积物向上覆水中迁移. 对照组中  $\text{NO}_2^-$ -N 的扩散通量为负值, 由上覆水向沉积物中扩散. 对比  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的扩散通量发现, 对照组  $\text{NH}_4^+$ -N 的扩散通量均大于

$\text{NO}_3^-$ -N的扩散通量,而2个处理组情况相反(试验第1 d除外),可能是金鱼藻和苦草吸收、泌氧作用致使 $\text{NO}_3^-$ -N取代 $\text{NH}_4^+$ -N成为间隙水向上覆水中扩散的主要 DIN 形态。

就 $\text{NH}_4^+$ -N而言,在8~16 d,金鱼藻组和苦草组中 $\text{NH}_4^+$ -N的扩散通量与对照组均有显著差异( $P < 0.05$ ),且苦草对 $\text{NH}_4^+$ -N扩散通量的减少作用强于金鱼藻,在32 d后,金鱼藻和苦草对 $\text{NH}_4^+$ -N扩散通量的减少作用开始变弱并趋于平缓,在第48 d,苦草

组和对照组中 $\text{NH}_4^+$ -N扩散通量之间存在显著差异( $P < 0.05$ )(图2);就 $\text{NO}_3^-$ -N而言,在1~16 d,金鱼藻组和苦草组中 $\text{NO}_3^-$ -N扩散通量均无明显减少,在24 d后,金鱼藻组和苦草组中 $\text{NO}_3^-$ -N扩散通量均高于对照组中通量,说明金鱼藻和苦草促进了 $\text{NO}_3^-$ -N向上覆水释放,且金鱼藻组和苦草组中 $\text{NO}_3^-$ -N扩散通量之间差异不显著( $P > 0.05$ );就 $\text{NO}_2^-$ -N而言,金鱼藻和苦草均能明显地减少 $\text{NO}_2^-$ -N扩散通量,且3组之间差异性显著( $P < 0.05$ ),在16 d后,金鱼藻组中 $\text{NO}_2^-$ -N由间隙水向上覆水扩散,苦草组由上覆水向间隙水扩散。由图1可知,金鱼藻组上覆水中 $\text{NO}_2^-$ -N浓度低于间隙水,使金鱼藻组 $\text{NO}_2^-$ -N的扩散通量呈向上方向;2个处理组水体中 $\text{NO}_2^-$ -N浓度较低,界面浓度梯度较小, $\text{NO}_2^-$ -N的扩散通量保持在较低水平。

由公式(1)可知,DIN在水-沉积物界面的扩散通量与沉积物的孔隙度和界面浓度梯度呈正相关。在试验初期,3组中沉积物孔隙度相似,随着试验的进行,金鱼藻组和苦草组中表层沉积物的孔隙率较对照组有所增加,对照组、金鱼藻组和苦草组中表层沉积物的孔隙率均值分别为70%、72%和76%。苦草对沉积物孔隙率的影响较金鱼藻明显,这可能是苦草根孔的存在使沉积物含水率增加,并且与苦草根系环境中微生物活动有关<sup>[33]</sup>。古小治等<sup>[34]</sup>研究也证明了水生植物能明显提高沉积物的孔隙率。金鱼藻组和苦草组中对应的 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N扩散通量均差异不显著( $P > 0.05$ ),可能是表层沉积物孔隙率和浓度梯度共同作用的结果。

### 2.3 两种沉水植物对上覆水和间隙水中 DIN 含量比例的影响

由图3(a)、3(c)和3(e)可知,在试验初期,2个处理组上覆水中 $\text{NO}_3^-$ -N含量比例明显增加,在8~48 d,金鱼藻组中 $\text{NO}_3^-$ -N含量比例基本保持不变,而苦草组中有减少的趋势,这可能是苦草的腐叶分解释放 $\text{NH}_4^+$ -N增加,相应减少了 $\text{NO}_3^-$ -N含量比例<sup>[22]</sup>。初始上覆水中3种形态氮在DIN中含量比例为: $\text{NO}_3^-$ -N 58.8%, $\text{NH}_4^+$ -N 31.5%, $\text{NO}_2^-$ -N 10.7%, $\text{NO}_3^-$ -N是上覆水中DIN的主要赋存形态。在第48 d后,对照组、金鱼藻组和苦草组上覆水中 $\text{NO}_3^-$ -N占DIN的含量比例比较原位上覆水(58.8%)分别增加了12.4%、19.7%和13.5%, $\text{NH}_4^+$ -N分别降低了11.4%、11%和8.3%。金鱼藻对上覆水中 $\text{NO}_3^-$ -N和 $\text{NH}_4^+$ -N影响更明显,但金鱼藻

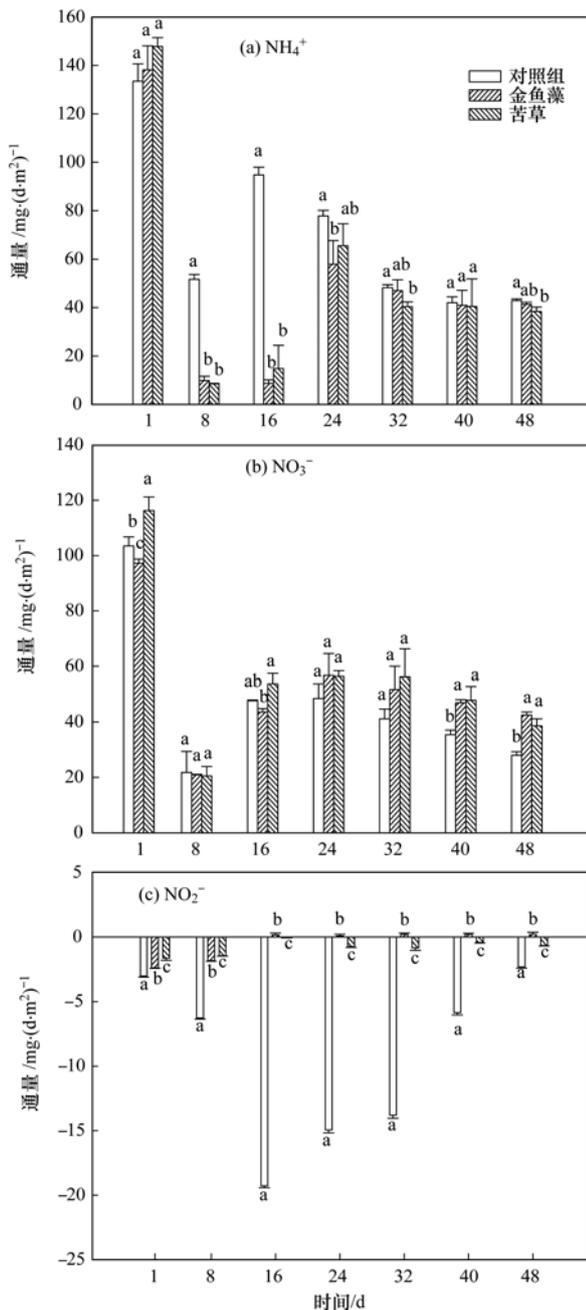


图2 水-沉积物界面 DIN 扩散通量的变化(平均值±标准误)

Fig. 2 Diffusion fluxes of DIN between water and sediment (Mean ± SE)

和苦草均没有改变上覆水 DIN 中氮的分配格局,  $\text{NO}_3^-$ -N 始终是上覆水中 DIN 的主要形态.

由图 3(b)、3(d)和 3(f)可知,在第 24 d,较对照组发现,金鱼藻组和苦草组间隙水中  $\text{NH}_4^+$ -N 含氮比例均快速增加,  $\text{NO}_3^-$ -N 含量比例均快速减少,这与  $\text{NO}_3^-$ -N 向上的扩散通量增加密切相关(图 2). 初始间隙水中 3 种形态氮在 DIN 中含量比例为:  $\text{NH}_4^+$ -N 54.8%,  $\text{NO}_3^-$ -N 45%,  $\text{NO}_2^-$ -N 0.2%,  $\text{NH}_4^+$ -N 是间隙

水中 DIN 的主要赋存形态. 在第 48 d 后,对照组、金鱼藻组和苦草组间隙水中  $\text{NO}_3^-$ -N 所占 DIN 的含量比例分别为 50.6%、54.7% 和 55.4%,相较于初始状态,间隙水中  $\text{NO}_3^-$ -N 在 DIN 含量比例分别增加了 5.6%、9.7% 和 10.4%,  $\text{NH}_4^+$ -N 分别降低了 6%、9.8% 和 10.6%,苦草对间隙水中  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 影响较金鱼藻明显,并且  $\text{NO}_3^-$ -N 取代  $\text{NH}_4^+$ -N 成为间隙水中 DIN 的主要赋存形态,此时,间隙水

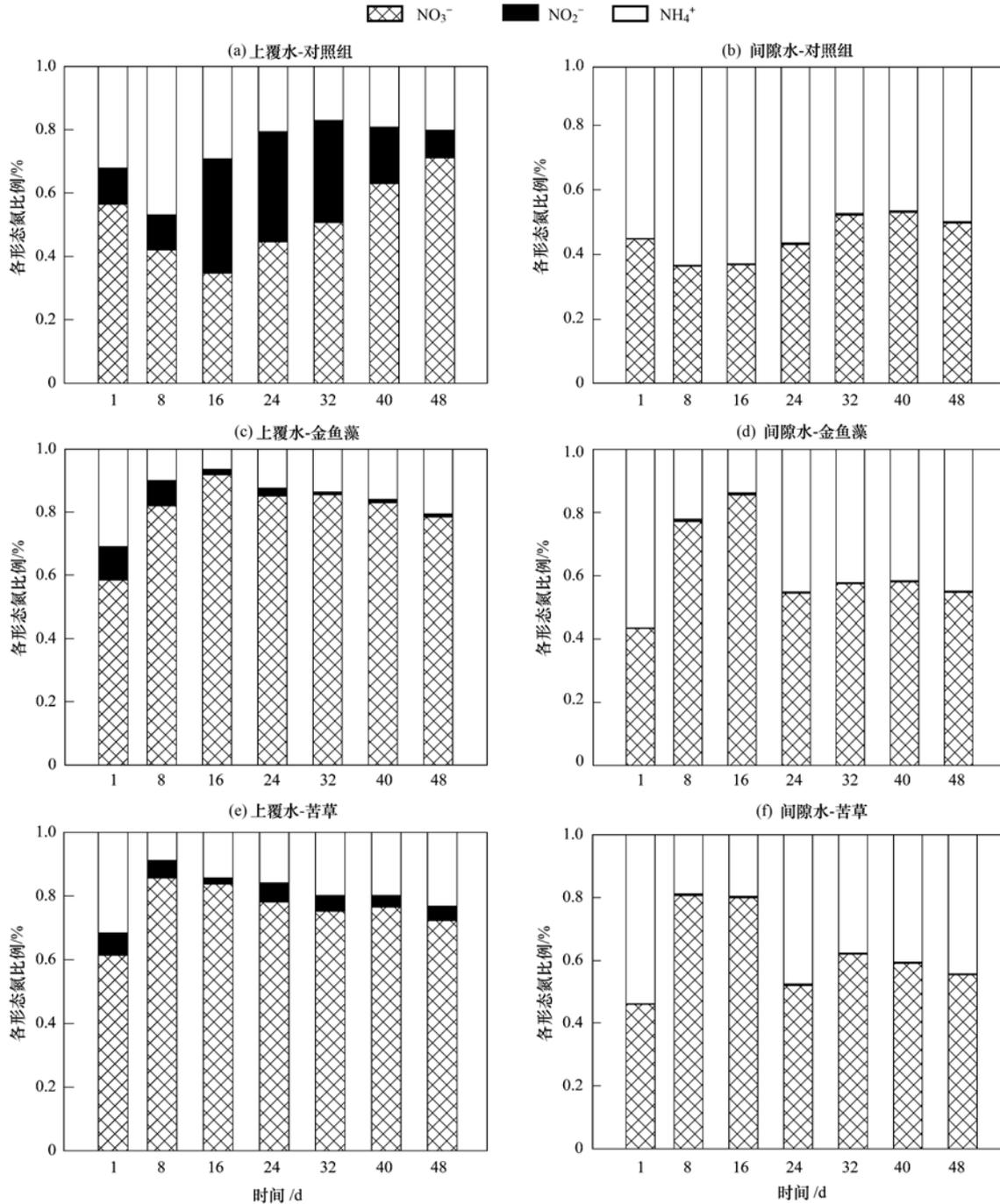


图 3 上覆水和间隙水中 DIN 形态转变规律

Fig. 3 DIN conformation transform principles in the overlying water and the interstitial water

中 DIN 的各赋存形态氮的含量比例大小为  $\text{NO}_3^- - \text{N} > \text{NH}_4^+ - \text{N} > \text{NO}_2^- - \text{N}$ .

在第 48 d, 相较于起始状态, 上覆水和间隙水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的含量比例均有所增加,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量比例均有所降低,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  含量比例基本不变化. 在对照组、金鱼藻组和苦草组上覆水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  占 DIN 的含量比例均值分别为 51.8%、80.7% 和 76.1%, 而在对照组、金鱼藻组和苦草组间隙水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  占 DIN 的含量比例均值分别为 46%、61.8% 和 62.1%, 对照组上覆水和间隙水中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  占 DIN 的含量比例均值明显低于 2 个处理组中均值, 相比于初始  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量比例, 沉水植物增大了上覆水和间隙水中 DIN 的含量比例变化幅度. 沉水植物对 DIN 含量比例变化的影响是综合作用的结果, 原因可能为以下 4 个方面: ①沉水植物对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的选择性吸收<sup>[13]</sup>, 造成了  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  消耗加快, 有研究认为, 植物优先吸收  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和其他还原态氮, 当  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度极低时才会吸收  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ <sup>[35]</sup>; ②沉水植物的光合作用会增加 DO 浓度, 加快  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  通过硝化作用转化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ; ③沉水植物减少了  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的扩散通量, 促进了  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  扩散, 影响了 DIN 在水-沉积物界面迁移; ④沉水植物的根系可能改变了根际微环境中的 DO 和氧化还原电位, 从而改变沉积物的矿化速率<sup>[23]</sup>, 影响间隙水中 DIN 浓度, 进而对 DIN 含量比例产生影响. 在试验结束时,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  均为上覆水和间隙水中 DIN 的主要赋存形态, 该结果与王圣瑞等<sup>[36]</sup>对黑藻的研究认为  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  是上覆水中主要的氮形态的结果不同, 导致这种不同结果的原因可能是初始上覆水水质、沉积物基质和其他试验条件存在差异.

### 3 结论

(1) 金鱼藻和苦草对上覆水中 DIN 的去除效果均强于间隙水, 对各形态 DIN 的去除差异:  $\text{NO}_2^- - \text{N} > \text{NH}_4^+ - \text{N} > \text{NO}_3^- - \text{N}$ . 金鱼藻对上覆水中 DIN 的去除效果明显强于苦草, 但对间隙水中 DIN 的去除效果弱于苦草.

(2) 金鱼藻和苦草减少了  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的扩散通量, 显著增加了  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的扩散通量, 使  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  取代  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  成为沉积物向上覆水中扩散 DIN 的主要形态, 但金鱼藻和苦草对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  扩散通量的影响差异不显著.

(3) 金鱼藻和苦草增加了上覆水和间隙水中 3

种形态 DIN 含量比例的变化幅度, 金鱼藻对上覆水中 DIN 含量比例影响强于苦草, 对间隙水中 DIN 含量比例的影响弱于苦草.

### 参考文献:

- [1] Grenz C, Denis L, Pringault O, *et al.* Spatial and seasonal variability of sediment oxygen consumption and nutrient fluxes at the sediment water interface in a sub-tropical lagoon (New Caledonia)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **61**(7-12): 399-412.
- [2] Valdes D S, Real E. Nitrogen and phosphorus in water and sediments at Ria Lagartos coastal lagoon, Yucatan, Gulf of Mexico[J]. *Indian Journal of Marine Sciences*, 2004, **33**(4): 338-345.
- [3] 秦伯强, 朱广伟. 长江中下游地区湖泊水和沉积物中营养盐的赋存、循环及其交换特征[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2005, **35**(增刊II): 1-10.
- [4] 孟凡德, 姜霞, 金相灿. 长江中下游湖泊沉积物理化性质研究[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(Suppl): 24-29.
- [5] 王圣瑞, 焦立新, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态铵的赋存特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(1): 37-43.
- [6] McCarthy M J, Gardner W S, Lavrentyev P J, *et al.* Effects of hydrological flow regime on sediment-water interface and water column nitrogen dynamics in a Great Lakes coastal wetland (Old Woman Creek, Lake Erie) [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2007, **33**(1): 219-231.
- [7] 姜霞, 王秋娟, 王书航, 等. 太湖沉积物氮磷吸附/解吸特征分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1285-1291.
- [8] 金相灿, 王圣瑞, 姜霞. 湖泊水-沉积物界面三相结构模式的初步研究[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(Suppl): 1-5.
- [9] Havens K E, Sharfstein B, Brady M A, *et al.* Recovery of submerged plants from high water stress in a large subtropical lake in Florida, USA[J]. *Aquatic Botany*, 2004, **78**(1): 67-82.
- [10] 郭雪莲, 吕宪国, 郗敏. 植物在湿地养分循环中的作用[J]. *生态学杂志*, 2007, **26**(10): 1628-1633.
- [11] James W F, Barko J W, Butler M G. Shear stress and sediment resuspension in relation to submersed macrophyte biomass[J]. *Hydrobiologia*, 2004, **515**(1-3): 181-191.
- [12] 万晓红, 李旭东, 王雨春, 等. 不同水生植物对湿地无机氮素去除效果的模拟[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(3): 327-333.
- [13] 徐昇, 李欣, 钟萍, 等. 苦草根系对硝氮和氨氮的吸收[J]. *生态科学*, 2012, **31**(3): 312-317.
- [14] 胡章喜, 徐宁, 段舜山. 不同氮源对 4 种海洋微藻生长的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(10): 2452-2457.
- [15] 王珺, 顾宇飞, 朱增银, 等. 不同营养状态下金鱼藻的生理响应[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(2): 337-340.
- [16] Gulati R D, Van Donk E. Lakes in the Netherlands, their origin, eutrophication and restoration: state-of-the-art review [J]. *Hydrobiologia*, 2002, **478**(1-3): 73-106.
- [17] Hilt S, Gross E M, Hupfer M, *et al.* Restoration of submerged vegetation in shallow eutrophic lakes—a guideline and state of the art in Germany [J]. *Limnologia-Ecology and Management of*

- Inland Waters, 2006, **36**(3): 155-171.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [19] Graca B, Burska D, Matuszewska K. The impact of dredging deep pits on organic matter decomposition in sediments [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2004, **158**(1): 237-259.
- [20] 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.
- [21] 包先明, 陈开宁, 范成新. 沉水植物生长对沉积物间隙水中的氮磷分布及界面释放的影响[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 515-522.
- [22] 熊秉红, 李伟. 我国苦草属(*Vallisneria* L.)植物的生态学研究[J]. 武汉植物学研究, 2000, **18**(6): 500-508.
- [23] Matheson F E, Sukias J P. Nitrate removal processes in a constructed wetland treating drainage from dairy pasture [J]. Ecological Engineering, 2010, **36**(10): 1260-1265.
- [24] Hou L J, Liu M, Carini S A, *et al.* Transformation and fate of nitrate near the sediment-water interface of Copano Bay [J]. Continental Shelf Research, 2012, **35**: 86-94.
- [25] 王沛芳, 王超, 王晓蓉, 等. 苦草对不同浓度氮净化效果及其形态转化规律[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 890-895.
- [26] 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): 3057-3067.
- [27] 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.
- [28] Chong L S, Prokopenko M G, Berelson W M, *et al.* Nitrogen cycling within suboxic and anoxic sediments from the continental margin of Western North America[J]. Marine Chemistry, 2012, **128-129**: 13-25.
- [29] 钟继承, 刘国锋, 范成新, 等. 湖泊底泥疏浚环境效应: II 内源氮释放控制作用[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 335-344.
- [30] 何桐, 谢健, 余汉生, 等. 大亚湾表层沉积物间隙水与上覆水中营养盐分布特征[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(11): 2361-2368.
- [31] Boudreau B P. The diffusive tortuosity of fine-grained unlithified sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, **60**(16): 3139-3142.
- [32] 许宽, 刘波, 王国祥, 等. 苦草(*Vallisneria spiralis*)对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2642-2649.
- [33] 王蓓, 张旭, 李广贺, 等. 芦苇根系对土壤中石油污染物纵向迁移转化的影响[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(8): 1281-1287.
- [34] 古小治, 张雷, 柏祥, 等. 南四湖湿地沉积物及孔隙水基本特性研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 939-945.
- [35] 王国祥, 濮培民, 张圣照, 等. 冬季水生高等植物对富营养化湖水的净化作用[J]. 中国环境科学, 1999, (2): 106-109.
- [36] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超, 等. 沉水植物黑藻对上覆水中各形态磷浓度的影响[J]. 地球化学, 2006, **35**(2): 179-186.

## CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing .....	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway .....	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region .....	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter .....	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks .....	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups .....	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water .....	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River .....	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment .....	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis .....	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application .....	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil .....	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed .....	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town .....	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water .....	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance .....	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal .....	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment .....	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension .....	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury .....	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon .....	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation .....	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park .....	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres .....	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification .....	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor .....	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride .....	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake .....	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission .....	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory .....	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China .....	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Flex .....	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition .....	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella .....	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake .....	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments .....	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments .....	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP .....	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability .....	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier .....	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato .....	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta .....	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China .....	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes .....	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil .....	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation .....	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province .....	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification .....	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage .....	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest .....	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor .....	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

# 《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6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 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