

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筲箕湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物可给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征

王静^{1,2}, 刘洪杰², 雷禹², 徐晶², 宋立岩^{2,3*}, 李勇^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 环境微生物与生态研究中心, 重庆 400714; 3. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 水库水环境重点实验室, 重庆 400714)

摘要: 三峡库区是新形成的生态系统, 沉积物特征较之成库前有显著改变; 研究库区小江支流——南河沉积物的硝化与反硝化过程可以为库区氮素管理提供科学依据, 而反季节蓄水和泄水, 沉积物-水界面硝化与反硝化速率特征鲜见报道. 实验选取库区开县南河沉积物为研究对象, 在 2015 年泄水期(8 月)和蓄水期(11 月)采集上、下游以及南河与小流域菁林溪交汇处沉积物样品, 测定其理化指标; 同时通过实验室模拟沉积物水环境, 以乙炔抑制法测定泄水期与蓄水期沉积物的硝化反硝化速率. 结果表明, 蓄水期沉积物总氮(total nitrogen, TN)、铵态氮(ammonium nitrogen, NH_4^+ -N)、硝态氮(Nitrate nitrogen, NO_3^- -N)及总有机碳(total organic carbon, TOC)等理化指标均显著高于泄水期($P < 0.05$), 这说明蓄水期有外源物质入库; 沉积物硝化速率在蓄水期 [$194.06 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 显著高于泄水期 [$16.52 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 且硝化速率与沉积物理化特征(TN、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TOC)存在显著正相关; 沉积物反硝化速率则与硝化速率相反, 泄水期 [$647.20 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 高于蓄水期 [$24.04 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 其与沉积物理化指标(TN、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N)呈显著负相关.

关键词: 三峡库区; 小江支流; 沉积物; 硝化速率; 泄水期; 蓄水期; 反硝化速率

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-0946-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201606202

Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events

WANG Jing^{1,2}, LIU Hong-jie², LEI Yu², XU Jing², SONG Li-yan^{2,3*}, LI Yong^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Environmental Microbiology and Ecology Research Center, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3. Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract: Three Gorge Dam Reservoir (TGDR) is a new forming ecosystem and its sediments dynamics remains unknown. Investigation on the nitrification and denitrification dynamics of sediments of TGDR during water collection and release events—anti-seasonal actions—is critical for nitrogen management in TGDR. In this study, we sampled sediments in three locations (upstream, center, and downstream along water flow) of South River, located in a typical small tributary, Nanhe, in TGDR during 2015 water collection and release events to characterize its physiochemical property and determine its nitrification and denitrification rates using acetylene inhibition method. The results showed that the concentrations of physiochemical parameters of sediments (total carbon, total nitrogen, nitrate, and ammonia) were significantly higher ($P < 0.05$) in water collection event than those in water release event, suggesting there were external materials (e. g., soil) entering into TGDR. Furthermore, the nitrification rate of sediments in water collection event [$194.06 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] was significantly higher than that in water release event [$16.52 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]. Sediments nitrification rate was positively correlated to the physiochemical parameters. In contract, the denitrification rate of sediments was higher in water release event [$647.20 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] than that in water collection event [$24.04 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]. Accordingly, the denitrification rate of sediments was negatively correlated to the physiochemical parameters.

Key words: Three Gorge Dam Reservoir; small tributary; sediments; water release period; water collection period; nitrification rate; denitrification rate

近年来,三峡库区由于蓄水支流富营养化呈现逐渐加重的趋势:在 2004~2009 年间,库区重庆段就发生了 80 次“水华”,其中主要发生在三峡库区小江支流上^[1].库区蓄水导致水位抬升,水面变宽,水深加大,流速变缓,泥沙沉降加剧,蓄水期高锰酸盐指数高于泄水期,氮负荷不断增加^[2],泄水期上

覆水水温较蓄水期高,不利于溶解氧(dissolved

收稿日期: 2016-06-29; 修订日期: 2016-09-26

基金项目: 中国科学院“西部行动计划”项目(KZCX2-XB3-14); 国家自然科学基金项目(51578528)

作者简介: 王静(1991~),女,硕士,主要研究方向为沉积物微生物多样性, E-mail: ml5123820534@163.com

* 通信作者, E-mail: songliyan@cigit.ac.cn; liyongwf@swu.edu.cn

oxygen, DO) 渗透, 从而对沉积物有机质累积、矿化及其理化性质等造成影响^[3], 进而造成硝化反硝化底物供给的差异, 影响其硝化、反硝化速率。

库区流域沉积物-水界面发生的硝化与反硝化过程是流域生态系统 N 迁移转化的主要过程, 对水生生态系统物质传递和能量循环起着重要作用^[4]。硝化是在好氧硝化细菌作用下将 NH_4^+ -N 转化为 NO_3^- 或 NO_2^- 的过程^[5], 是氮循环的关键限速过程, 也是氮循环的中心环节^[6]。它受到水体温度、DO 以及 NH_4^+ -N 含量等因素的影响。Tanaka 等^[7] 研究表明在适宜温度、充足 DO 条件下, 底泥 NH_4^+ 含量越高, 硝化反应越剧烈。反硝化是指在缺氧或者厌氧条件下反硝化菌将 NO_3^- 还原为 N_2O 或 N_2 的过程, 是水生生态系统中主要的脱氮过程^[8], 有研究表明输入河口、海域 50% 的总氮是由反硝化作用去除^[9,10], 沉积物的反硝化过程对上覆水中 NO_3^- -N 的去除也起着重要作用^[11]。反硝化受到水体温度、DO 以及 NO_3^- -N 含量等因素影响, Pattinson 等^[12] 对河流沉积物硝化反硝化研究表明在足够的 NO_3^- -N 含量下, 反硝化速率随温度的增加而增加。

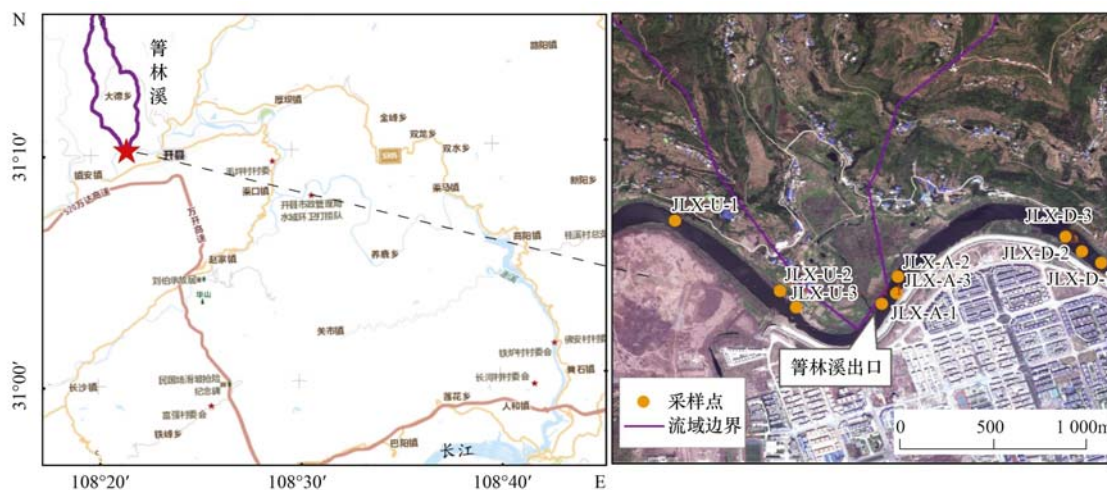
沉积物-水界面硝化与反硝化过程得到越来越多的关注, 但是多数研究集中在海岸潮滩口^[13]、湿地^[14,15] 以及河流河口^[16,17] 等生态系统。而对库区

认识主要集中在河体水-汽界面温室气体排放通量^[18]、河岸消落区部分水-气、土-气 N_2O 通量及反硝化方面^[19], 但是对于河底沉积物与水界面通量研究较少。因此研究库区小江支流沉积物的硝化与反硝化过程可以为库区氮素管理提供科学依据, 也为库区流域水质安全保障以及水环境修复提供理论基础。本研究以实地采样模拟库区流域沉积物硝化反硝化速率, 表征库区沉积物硝化与反硝化过程在库区蓄水期和泄水期的特征。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本实验选取三峡库区开县段——小江支流南河 (JLX) 为实验对象, 在南河上游 (JLX-U)、南河下游 (JLX-D) 以及南河与小流域菁林溪交汇处 (JLX-A) 中游分别各设置 3 个采样点 (图 1), 即 JLX-U-1、JLX-U-2、JLX-U-3、JLX-D-1、JLX-D-2、JLX-D-3、JLX-A-1、JLX-A-2、JLX-A-3, 来代表南河上、中、下游。实验于南河泄水期 (2015 年 8 月) 水深 8 ~ 9 m、蓄水期 (2015 年 11 月) 水深 17 ~ 19 m 用抓斗式采泥器采集表层沉积物, 用不锈钢采水器采集沉积物上覆水, 4℃ 避光分别保存在干净的聚乙烯塑料瓶, 立即运回实验室用于理化指标分析及培养实验。



JLX-A-1: 31°10'5.70"N 108°21'58.70"E; JLX-A-2: 31°10'7.30"N 108°22'0.10"E; JLX-A-3: 31°10'5.60"N 108°22'0.50"E; J-D-1: 31°10'9.50"N 108°22'38.00"E; JLX-D-2: 31°10'12.30"N 108°22'34.50"E; JLX-D-3: 31°10'10.30"N 108°22'36.20"E; JLX-U-1: 31°10'8.90"N 108°21'34.70"E; JLX-U-2: 31°10'5.30"N 108°21'39.20"E; JLX-U-3: 31°10'2.90"N 108°21'40.30"E

图 1 采样位点示意

Fig. 1 Sketch map showing sampling sites

1.2 实验原理及设计

本实验采用乙炔抑制法测定沉积物硝化反硝化速率, 其原理是 >1% 浓度的乙炔可以抑制氨单加氧酶 (AMO), 即抑制 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- , 通过 NH_4^+ -N

浓度计算硝化速率, 并能抑制氧化亚氮还原酶 (NOS) 的活性使反硝化过程停留在 N_2O 阶段, 从而根据 N_2O 浓度估算反硝化速率。乙炔抑制法具有培养时间短、灵敏度高、成本低、重现性好的优

点^[20],可批量进行实验,并且在实验过程中对沉积物的扰动较小^[21].

每个采样点设计一组乙炔抑制实验组(加入上覆水制成的饱和乙炔水,使上覆水中乙炔体积分数为 10%)和一组对照实验组(不加饱和乙炔水).将沉积物转移到直径为 5 cm、高为 30 cm 的有机玻璃培养管内,并将沉积物高度调整到培养管 10 cm 位置处,同时在沉积物上面充入上覆水,再用橡胶塞密封防止漏气.在培养实验开始前抽取上覆水保存在棕色试剂瓶中用于测定上覆水中初始 N_2O ,同时加饱和 $HgCl_2$,4℃ 低温保存.无扰动培养 4 h 后迅速抽取沉积物上方的水样,一份直接注入棕色玻璃瓶中,加饱和 $HgCl_2$ 避光保存,用于测定 N_2O ;另一份用 0.45 μm 滤膜进行过滤,注入干净的样品瓶内 4℃ 低温保存,测定其 NH_4^+-N 浓度.

1.3 样品分析

采用静态顶空-气相色谱法^[22]测定水样中 N_2O 浓度,首先用注射器向装有 10 mL 水样的瓶(25 mL 体积)内充入 15.0 mL 高纯 N_2 (>99.999%),使样品瓶内形成顶空,再剧烈振荡样品玻璃瓶 5 min,使瓶内气-液两相达到平衡,然后用注射器抽取样品瓶中气体注入气相色谱仪进行测定 N_2O 浓度.所用气相色谱(Agilent 7890A, USA)检测方法为^[23]:柱温 60℃,进样口温度为 100℃,检测器温度为 300℃,载气为高纯 N_2 ,流量为 40 mL·min⁻¹,检测器基电流为 1.0 nA.样品检测前,用进样针抽取 1 mL 的 3 种不同浓度的标准气体,得出峰面积与 N_2O 浓度的标准曲线.同时记录实验大气压及温度,通过标准曲线以及待测样品峰面积计算出样品顶空气中 N_2O 浓度.然后再根据平衡温度、水样盐度及 Weiss 等^[24]提供的 N_2O 溶解度计算出上覆水样品中溶解的 N_2O 浓度.同时采用流动注射分析仪(FIAstar 5000, Sweden)测定样品瓶中 NH_4^+-N 浓度.

1.4 数据计算

计算公式如下^[25]:

$$c = c_g (K_0 + \beta/22.4) \quad (1)$$

$$\ln K_0 = A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100) + S[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2] \quad (2)$$

式中, c 为水样中 N_2O 浓度($\mu mol \cdot L^{-1}$); c_g 为顶空中 N_2O 浓度($\mu L \cdot L^{-1}$); K_0 为 N_2O 溶解度($mol \cdot L^{-1}$); β 为样品瓶中气相与液相体积比; A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 、 B_3 为常数; S 为水样盐度; T 为水样绝对温度(K).

$$R_D = \frac{(c_1 - c_0) \times H}{t} \times 2 \quad (3)$$

$$R_N = \frac{(c_2 - c_K) \times H}{t} \times 2 \quad (4)$$

式中, R_D 为反硝化速率 [$\mu mol \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$]; R_N 为硝化速率 [$\mu mol \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$]; c_0 为初始水柱中 N_2O 浓度 ($\mu mol \cdot L^{-1}$); c_1 为乙炔抑制柱中 N_2O 浓度 ($\mu mol \cdot L^{-1}$); c_K 为对照柱中 NH_4^+-N 浓度 ($\mu mol \cdot L^{-1}$); c_2 为乙炔抑制柱中 NH_4^+-N 浓度 ($\mu mol \cdot L^{-1}$); H 为培养管中水柱的高度(m); t 为培养时间(h),本实验培养了 4 h.

1.5 理化指标分析

上覆水运回实验室后用雷磁电导率仪(DDSJ-308A)测其盐度为 0.02%,泄水期上覆水温度为: $(27.0 \pm 1.52)^\circ C$,蓄水期上覆水温度为: $(17.5 \pm 0.87)^\circ C$.

用于理化指标分析的沉积物在自然条件下风干,研磨过 1 mm 筛、0.25 mm 筛,分别保存在自封袋中备用.称取过 1 mm 筛的土样 10 g,加入 25 mL 水,在磁力搅拌器搅拌 2 min,静置 30 min,用 pH 计(FE20K)测其 pH 值,南河泄水期(蓄水期) pH 值为 8.22 ± 0.11 (8.28 ± 0.19). NH_4^+-N 及 NO_3^--N 用 2 mol·L⁻¹ 的 KCl 浸提后通过流动注射分析仪(FIAstar 5000, Sweden)测定其土样中含量.土样 TOC、TN 含量采用总有机碳/总氮分析仪(Vario TOC, Germany)测定.

2 结果与分析

2.1 泄水期与蓄水期沉积物理化指标变化

本实验数据在分析之前,先对数据进行了正态分布检验(Kolmogorov-Smirnov 检验)和方差齐性检验(Levene 检验).符合正态分布且方差齐性的数据直接进行单因素方差分析(one-way ANOVA),不符合正态分布的数据需先将数据进行对数转换,再分析.数据符合正态分布但方差不齐时采用 Brown-Forsythe 和 Welch 方法进行单因素方差分析.同时采用皮尔逊相关系数(Pearson's correlation coefficient)两两分析数据之间的相关性.

从表 1 可以看出沉积物 pH 在泄水期与蓄水期水量季节间差异不显著外,其他理化指标均随泄水期与蓄水期水量季节变化存在显著差异.从表 2 数据两两之间的相关性表明,沉积物 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 和 TOC 均与沉积物 pH 值、TN 显著正相关($P < 0.01$, $n = 18$),沉积物 NH_4^+-N 、TOC 均与沉积物 NO_3^--N 显著正相关($P < 0.01$, $n = 18$),沉积物 NH_4^+-N 与 TOC 显著正相关($P < 0.01$, $n = 18$).

表 1 沉积物理化指标 ANOVA 分析

Table 1 ANOVA analysis on physiochemical parameters of sediments					
指标	pH	TN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TOC
<i>F</i> 值	0.710	16.557	8.230	18.161	12.769
<i>P</i> 值	0.412	0.003	0.011	0.002	0.006

1) $P < 0.05$, 表示该指标表层和底层差异显著; $P < 0.01$, 表示该指标表层和底层差异极显著

表 2 沉积物理化性质 Pearson 相关性分析

Table 2 Person correlation on physiochemical parameters of sediments					
	pH	TN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TOC
pH	1	0.288	0.618 **	0.559 **	0.478 **
TN		1	0.771 **	0.887 **	0.920 **
NO ₃ ⁻ -N			1	0.920 **	0.833 **
NH ₄ ⁺ -N				1	0.858 **
TOC					1

1) 实验地点为南河; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

南河泄水期和蓄水期沉积物 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 及 TOC 含量变化见图 2。蓄水期的沉积物理化指标含量均显著高于泄水期理化指标含量。TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 及 TOC 含量最高(最低)分别达到 (550.13 ± 404.59) (121.73 ± 56.00) mg·kg⁻¹、(9.20 ± 2.34) (4.23 ± 0.67) mg·kg⁻¹、(10.50 ± 3.12) (4.70 ± 0.82) mg·kg⁻¹ 以及 (11.64 ± 6.50) (3.87 ± 0.99) g·kg⁻¹, 且最高(最低)值出现在南河流域的不同位置。

2.2 泄水期与蓄水期沉积硝化反硝化速率

硝化速率变化见图 3, 泄水期和蓄水期硝化速率(平均值) 分别为 (16.52 ± 20.09) ~ (48.26 ± 50.87) μmol·(m²·h)⁻¹、(121.94 ± 82.20) ~ (194.06 ± 151.90) μmol·(m²·h)⁻¹, 最高出现在南河下游(JLX-D)的蓄水期, 最高达到 (194.06 ± 151.90) μmol·(m²·h)⁻¹; 最低出现在南河与菁林溪流域交汇处(JLX-A)的泄水期, 且最低达到了 (16.52 ± 20.09) μmol·(m²·h)⁻¹。南河沉积物硝化

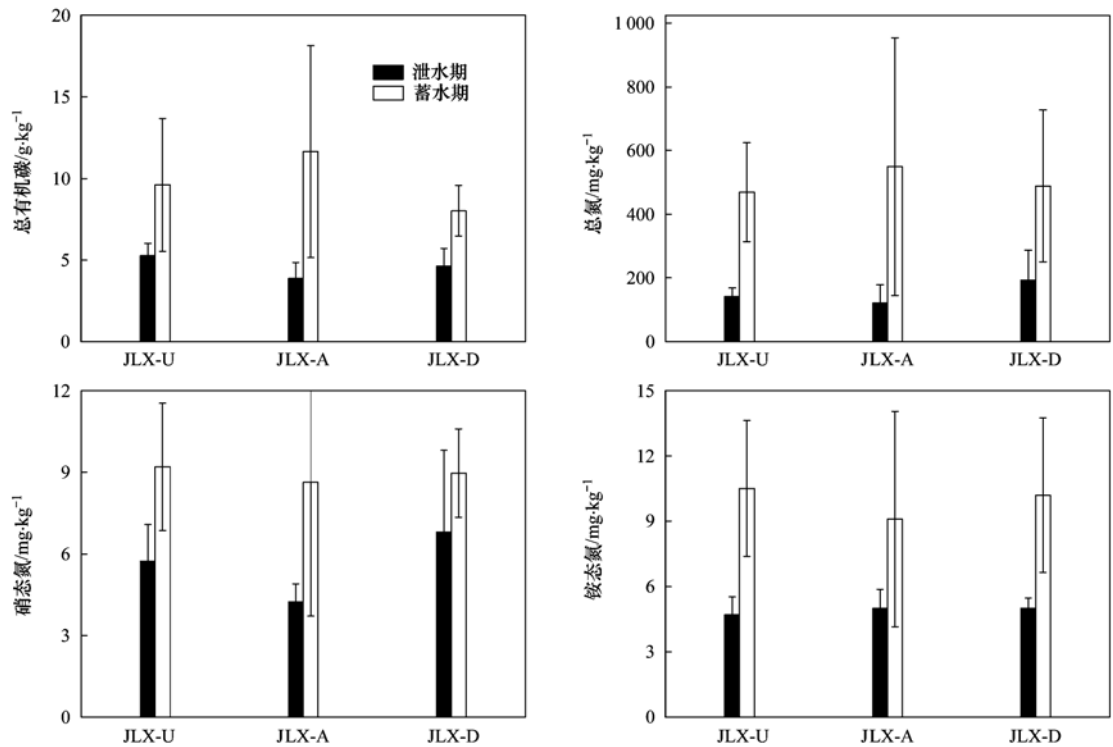


图 2 2015 年沉积物泄水期(8 月)与蓄水期(11 月)理化指标含量

Fig. 2 Physiochemical parameters of sediment during 2015 water release and collection events of TGDR

速率有 $JLX-D > JLX-U > JLX-A$, 且蓄水期(11 月)硝化速率显著普遍高于泄水期(8 月)。

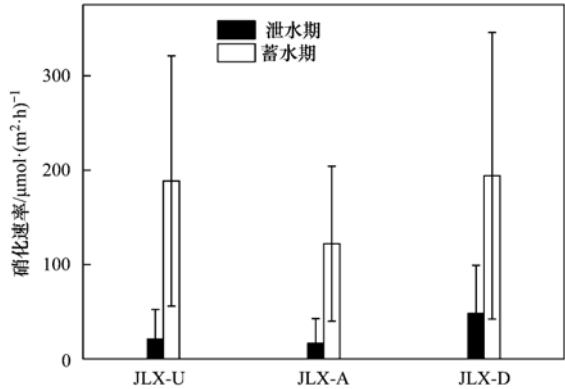


图 3 2015 年沉积物泄水期与蓄水期硝化速率

Fig. 3 Nitrification rate of sediment during 2015 water release and collection events of TGDR

南河沉积物反硝化速率见图 4, 综合南河上游、中游以及下游沉积物反硝化速率有较大差异, 泄水期与蓄水期反硝化速率最高值均出现在南河与菁林溪交汇处 (JLX-A), 最低值均出现南河下游 (JLX-D)。且南河反硝化速率存在明显的水量季节变化, 泄水期(8 月)普遍高于蓄水期(11 月)。泄水期反硝化速率(平均值)为 $(92.25 \pm 31.48) \sim (647.20 \pm 127.37) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 蓄水期反硝化速率(平均值)为 $(24.04 \pm 364.12) \sim (69.15 \pm 527.18)$

$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。反硝化速率最高值达到了 $(647.20 \pm 127.37) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 最低值低至 $(24.04 \pm 364.12) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。

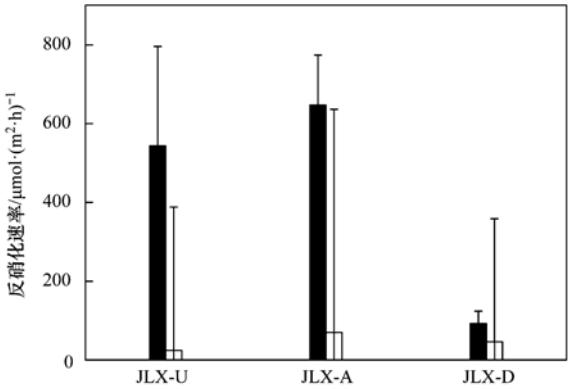


图 4 2015 年沉积物泄水期与蓄水期反硝化速率

Fig. 4 Denitrification rate of sediment during 2015 water release and collection events of TGDR

2.3 理化指标性质对硝化反硝化速率的影响

见表 3 硝化、反硝化速率与沉积物 Pearson 相关性分析可知, 无论是在泄水期还是蓄水期沉积物理化指标与硝化、反硝化速率存在显著相关性。硝化速率与 TN 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及 TOC 存在显著正相关关系; 而反硝化速率与 TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 存在显著负相关关系。

表 3 沉积物理化性质与硝化、反硝化速率 Pearson 相关性分析

Table 3 Person correlation on physiochemical parameters, nitrification rate, and denitrification rate of sediments						
实验地点	指标	pH	TN	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TOC
南河	硝化速率	0.086	0.529 **	0.413 *	0.501 **	0.439 *
	反硝化速率	-0.070	-0.438 *	-0.318 *	-0.423 *	-0.344

3 讨论

3.1 水量季节性理化指标变化

通过监测泄水期(8 月)与蓄水期(11 月)沉积物理化指标发现, TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 TOC 随水量季节的变化而变化, 泄水期沉积物理化指标含量均低于蓄水期。导致这一现象的原因可能是: ①蓄水期有外源入库, 张晟等^[26]和郭劲松等^[27]对三峡库区小江支流水质状况研究得出不同营养盐季节变化表现为蓄水期 > 泄水期, 蓄水期属于中-富营养类型, 处于中污染状态, 蓄水期水体营养盐含量增加与沉积物物质交换亦增加, 从而沉积物理化指标蓄水期含量高。同时蓄水期南河周围大面积土地被淹没, 带入大量污染物质, 水体自净能力下降, 水质中污染物积累得不到排泄, 不断下沉汇入沉积物^[28];

②蓄水期间水位抬升, 水深增加, 水流变缓, 同时带入大量的泥沙进入水体, 泥沙不断沉积, 水体中泥沙吸附的有机污染物质也随着泥沙沉降进入底泥; ③沉积物样品本身性质, 蓄水期悬浮物及高锰酸盐指数高于泄水期^[29], 沉积物以污泥为主, 泄水期沉积物主要以沙含量居多, 则生物量蓄水期明显高于泄水期, TOC 含量蓄水期显著高于泄水期; ④硝化反应过程是整个氮循环过程的限速步骤, 而蓄水期硝化速率经实验测定远比泄水期快, 则沉积物表面与上覆水之间物质的迁移转化在蓄水期加剧, 最终导致蓄水期与泄水期沉积物理化指标存在显著差异。

3.2 水量季节性硝化速率变化

蓄水期(11 月)硝化速率普遍显著高于泄水期(8 月)。这主要是由于库区泄水期(8 月)在夏季, 夏季上覆水温度 $(27.0 \pm 1.52)^\circ\text{C}$ 较高不利于 O_2 渗

透,导致水中 DO 含量较低,黄祺等^[30]对南河小江支流监测得出 DO ($2.52 \sim 9.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 泄水期 < 蓄水期也证明这一点. 同时泄水期在高水温、低 DO 含量且水深 $> 8\text{m}$ 的情况下导致上覆水水体出现层化现象^[31],从而消耗的 DO 无法及时补充,沉积物处于缺氧状态,而硝化反应是一个需氧过程. 硝化速率也受沉积物中 NH_4^+ 含量的影响^[32],从泄水期到蓄水期上覆水 NH_4^+ -N 含量 ($0.05 \sim 0.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[30]、沉积物中 NH_4^+ -N 含量 ($4.70 \sim 11.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 日益充足,上覆水温度的降低,DO 含量的增加等各种适宜硝化反应的条件在蓄水期形成,最终蓄水期硝化速率显著高于泄水期.

3.3 水量季节性反硝化速率变化

泄水期(8月)反硝化速率普遍显著高于蓄水期(11月),主要是由于反硝化过程是在缺氧或者厌氧条件下将 NO_3^- 还原为 N_2O 和 N_2 的过程. 上覆水中 DO 的水量季节性变化与水温的变化呈显著负相关^[33],而随着泄水期到蓄水期温度的降低,DO 含量逐渐增加,沉积物氧化层深度加大,从最初的缺氧环境逐步向富氧环境转化^[34],泄水期到蓄水期反硝化速率势必削弱. 同时大量研究表明^[35,36],反硝化速率与温度成正比关系,温度高的地方,反硝化速率也高,随着温度的降低,反硝化速率也明显减小,而泄水期上覆水温度明显高于蓄水期. 反硝化反应还需要 NO_3^- -N,覃超梅等^[37]和 Luo 等^[38]研究珠江口洪澳岛海岸带反硝化作用发现反硝化作用实际是受到 NO_3^- -N 利用率高低的限制,而不是 NO_3^- -N 的绝对浓度, NO_3^- 的利用率高,反硝化速率也高. 同时上覆水中高 NO_3^- -N 含量和高 DO 浓度的体系会抑制沉积物中反硝化^[39,40],过高的有机碳含量促进 NO_3^- 异化还原为 NH_4^+ 与反硝化作用竞争 NO_3^- ^[41],而蓄水期上覆水^[35]和沉积物 NO_3^- -N、DO 以及有机质含量显著高于泄水期,最终在一系列因素共同作用下导致泄水期反硝化速率显著高于蓄水期.

3.4 沉积物理化性质与硝化及反硝化速率的关系

在蓄水期与泄水期,沉积物理化性质均与硝化及反硝化速率存在相关性,这表明沉积物理化性质直接影响硝化及反硝化速率. 本实验结果表明沉积物理化性质与硝化速率正相关,而与反硝化速率负相关. 这一研究结果与其他学者研究结果有共同之处,也有不同之处. 如郭永坚等^[42]研究草鱼不同混养模式下底泥硝化、反硝化速率得出,硝化速率与 NH_4^+ -N 浓度显著正相关,反硝化速率与水体 TN 显

著正相关. Herbert^[43]研究认为在一定温度范围内 NO_3^- 浓度是决定氨化作用为主还是反硝化作用为主的关键因素,其浓度高时以反硝化为主,浓度低时以氨化为主. 这与实验泄水期 NO_3^- -N 含量低,反硝化速率远大于硝化速率结果恰好相反,出现这种现象的原因可能是由于耦合硝化和反硝化过程. 耦合硝化-反硝化受沉积物中生物量影响十分明显,生物量越丰富耦合硝化-反硝化反应越明显^[44,45],而蓄水期沉积物主要以污泥为主,泄水期沉积物主要以泥沙为主,且从样品中测得的 TOC 含量(蓄水期: $9.61 \sim 11.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ > 泄水期: $3.87 \sim 5.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)可以看出蓄水期沉积物生物量明显大于泄水期,则耦合硝化-反硝化存在的可能性就比较大. Law 等^[46]研究表明过高的有机碳含量则会降低耦合硝化-反硝化作用. 要具体证明耦合硝化-反硝化反应程度还需后续实验,实验结果与其他学者矛盾之处除了耦合硝化-反硝化这一重要原因,造成这一结果的其他因素还需进一步实验才能予以说明.

综上本实验与其他学者有相似研究结果如: Kim 等^[31]对日本广岛湾研究显示,夏季(8月)硝化速率出现最低值,反硝化速率出现最高值. 但环境因子(温度、DO、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TOC 等)对沉积物硝化、反硝化作用的影响,并不是单一的对硝化、反硝化作用,而是通过复杂的反应机制影响其反应进程^[47,48],本实验并未对环境因子影响泄水期与蓄水期硝化和反硝化反应机制进行实验研究,应在后续实验中加强对环境因子影响其机制研究,弄清环境因子如何影响泄水期与蓄水期硝化、反硝化的机制,以及环境因子对其影响程度.

4 结论

(1) 三峡库区南河小江支流沉积物理化指标存在明显的蓄水期和泄水期差异: 蓄水期外源汇入对其理化性质有一定影响,除 pH 外其余理化指标呈现蓄水期显著高于泄水期的特征,沉积物理化指标相关性显著.

(2) 三峡库区南河小江支流沉积物硝化速率存在明显的蓄水期和泄水期特征,最高值出现在蓄水期(11月),最低值出现在泄水期(8月). 硝化速率与沉积物性质(TN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 及 TOC)呈现显著正相关关系.

(3) 三峡库区南河小江支流沉积物反硝化速率存在明显的蓄水期和泄水期特征,最高值出现在泄水期(8月),最低值出现在蓄水期(11月),外源影

响下导致沉积物反硝化速率与沉积物理化性质(TN、 NO_3^- -N及 NH_4^+ -N)呈现显著负相关关系。

参考文献:

- [1] 王丽婧, 郑丙辉, 李子成. 三峡库区及上游流域面源污染特征与防治策略[J]. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(8): 783-788.
Wang L J, Zheng B H, Li Z C. Characteristics and administrative strategy of non-point source pollution in three gorges reservoir and its upstream watershed[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, **18**(8): 783-788.
- [2] 印士勇, 娄保锋, 刘辉, 等. 三峡工程蓄水运用期库区干流水质分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(3): 305-310.
Yin S Y, Lou B F, Liu H, *et al.* Analysis of water quality of the Yangtze river with in the three gorges reservoir area during construction period [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, **20**(3): 305-310.
- [3] 王娟, 胡正峰, 张磊, 等. 三峡库区支流澎溪河回水区水质调查与评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, **33**(7): 67-74.
Wang J, Hu Z F, Zhang L, *et al.* Water quality survey and evaluation in the backwater area of the Pengxi river in the three gorges reservoir[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2011, **33**(7): 67-74.
- [4] 张立通, 孙耀, 陈爱玲, 等. 对虾养殖中后期虾塘沉积物的硝化与反硝化作用[J]. 渔业科学进展, 2011, **32**(1): 67-74.
Zhang L T, Sun Y, Chen A L, *et al.* Nitrification and denitrification in sediment of shrimp ponds in the late culture period[J]. Progress in Fishery Sciences, 2011, **32**(1): 67-74.
- [5] 曹文卿, 刘素美. 海洋沉积物中硝化和反硝化过程研究进展[J]. 海洋科学进展, 2006, **24**(2): 259-265.
Cao W Q, Liu S Y. Advances in the study on nitrification and denitrification in marine sediments [J]. Advances in Marine Science, 2006, **24**(2): 259-265.
- [6] 贺纪正, 张丽梅. 氨氧化微生物生态学与氮循环研究进展[J]. 生态学报, 2009, **29**(1): 406-415.
He J Z, Zhang L M. Advances in ammonia-oxidizing microorganisms and global nitrogen cycle [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, **29**(1): 406-415.
- [7] Tanaka T, Guo L D, Deal C, *et al.* N deficiency in a well-oxygenated cold bottom water over the Bering sea shelf: influence of sedimentary denitrification [J]. Continental Shelf Research, 2004, **24**(12): 1271-1283.
- [8] Zhu G B, Wang S Y, Wang Y, *et al.* Anaerobic ammonia oxidation in a fertilized paddy soil [J]. The ISME Journal, 2011, **5**(12): 1905-1912.
- [9] Howarth R W, Billen G, Swaney D, *et al.* Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the north Atlantic ocean: natural and human influences [J]. Biogeochemistry, 1996, **35**(1): 75-139.
- [10] Berelson W M, Heggie D, Longmore A, *et al.* Benthic nutrient recycling in port Phillip bay, Australia [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, **46**(6): 917-934.
- [11] Livingstone M W, Smith R V, Laughlin R J. A Spatial study of denitrification potential of sediments in Belfast and strangford loughs and its significance [J]. Science of the Total Environment, 2000, **251-252**: 369-380.
- [12] Pattinson S N, Garcia-Ruiz R, Whitton B A. Spatial and seasonal variation in denitrification in the Swale-Ouse system, a river continuum [J]. Science of the Total Environment, 1998, **210-211**: 289-305.
- [13] Pinardi M, Bartoli M, Longhi D, *et al.* Benthic metabolism and denitrification in a river reach: a comparison between vegetated and bare sediments [J]. Journal of Limnology, 2009, **68**(1): 133-145.
- [14] 唐陈杰, 张路, 杜应旸, 等. 鄱阳湖湿地沉积物反硝化空间差异及其影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(1): 202-209.
Tang C J, Zhang L, Du Y Y, *et al.* Spatial variations of denitrification in wetland sediments in Poyang Lake and the influencing factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(1): 202-209.
- [15] 杨琼, 李刚, 谭凤仪, 等. 红树林人工湿地硝化和反硝化作用研究[J]. 海洋技术, 2009, **28**(3): 62-66.
Yang Q, Li G, Tan F Y, *et al.* Study on nitrification and denitrification in mangrove constructed wetlands [J]. Ocean Technology, 2009, **28**(3): 62-66.
- [16] 朱先征, 何岩, 黄民生, 等. 城市内河沉积物中反硝化作用的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(6): 64-70.
Zhu X Z, He Y, Huang M S, *et al.* Research progress of denitrification in urban river sediment [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(6): 64-70.
- [17] 李佳霖, 白洁, 高会旺, 等. 长江口海域夏季沉积物反硝化细菌数量及反硝化作用[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(7): 756-751.
Li J L, Bai J, Gao H W, *et al.* Quantification of denitrifying bacteria and denitrification process in surface sediment at adjacent sea area of the Yangtze River estuary in summer [J]. China Environmental Science, 2009, **29**(7): 756-751.
- [18] 赵炎, 曾源, 吴炳方, 等. 三峡水库香溪河支流水域温室气体排放通量观测[J]. 水科学进展, 2011, **22**(4): 546-553.
Zhao Y, Zeng Y, Wu B F, *et al.* Observation on greenhouse gas emissions from Xiangxi River in three gorges region [J]. Advances in Water Science, 2011, **22**(4): 546-553.
- [19] 方芳, 孙志伟, 高红涛, 等. 三峡库区消落带土壤 N_2O 排放及反硝化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(2): 287-293.
Fang F, Sun Z W, Gao H T, *et al.* N_2O emission and denitrification in the soils of water-level-fluctuation zone in the three gorges reservoir area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, **23**(2): 287-293.
- [20] 王巧稚, 曹文志, 黄一山. 等. 沉积物及水界面硝化与反硝化作用研究[J]. 环境与可持续发展, 2008, (4): 578-60.
- [21] Knowles R, Revsbech N P, Sorensen J, *et al.* Acetylene inhibition technique: development, advantages, and potential problems [A]. In: Revsbech N P, Sørensen J (Eds.). Denitrification in Soil and Sediment [M]. New York: Springer, 1990. 151-166.
- [22] 徐继荣, 王友绍, 殷建平, 等. 静态顶空气相色谱法测定海水中溶解的 N_2O [J]. 海洋环境科学, 2005, **24**(4): 59-62.
Xu J R, Wang Y S, Yin J P, *et al.* Determination of nitrous oxide dissolved in seawater by static headspace gas chromatographer [J]. Marine Environmental Science, 2005, **24**(4): 59-62.
- [23] 杨晶, 张桂玲, 赵玉川, 等. 胶州湾河口潮滩沉积物中 N_2O

- 的产生和释放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(12): 2723-2732.
- Yang J, Zhang G L, Zhao Y C, *et al.* Production and emission of nitrous oxide from the estuarine tidal flat around Jiaozhou Bay and their influencing factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(12): 2723-2732.
- [24] Weiss R F, Price B A. Nitrous oxide solubility in water and seawater[J]. *Marine Chemistry*, 1980, **8**(4): 347-359.
- [25] 汪旭明, 任洪昌, 李家兵, 等. 河口区淡水和微咸水潮汐沼泽湿地沉积物反硝化作用[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(12): 3917-3926.
- Wang X M, Ren H C, Li J B, *et al.* Denitrification rates in the sediment of estuarine freshwater and brackish tidal marshes[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 3917-3926.
- [26] 张晟, 李崇明, 郑坚, 等. 三峡水库支流回水区营养状态季节变化[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 64-69.
- Zhang S, Li C M, Zheng J, *et al.* Seasonal variation of trophic states in backwater areas of tributaries in three gorges reservoir [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 64-69.
- [27] 郭劲松, 谢丹, 李哲, 等. 三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1129-1135.
- Guo J S, Xie D, Li Z, *et al.* Algal community structure and water quality assessment on drawdown area of Kaixian waters in three gorges reservoir during winter storage period [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1129-1135.
- [28] 孙阳, 王里奥, 叶闽, 等. 三峡蓄水后开县城区污水排放对小江水质影响[J]. 重庆大学学报, 2004, **27**(5): 115-118.
- Sun Y, Wang L A, Ye M, *et al.* Analysis of the effect to the water quality of Xiao River for Kaixian county sewage discharge after the sluice of the three gorges reservoir [J]. *Journal of Chongqing University*, 2004, **27**(5): 115-118.
- [29] 吕怡兵, 宫正宇, 连军, 等. 长江三峡库区蓄水后水质状况分析[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(1): 1-6.
- Lü Y B, Gong Z Y, Lian J, *et al.* Status of water quality in the three gorges after the water storage period [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(1): 1-6.
- [30] 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 等. 三峡库区汉丰湖水质的时空变化特征分布[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, **38**(3): 136-142.
- Huang Q, He B H, Zhao X L, *et al.* Analysis on spatiotemporal variation characteristics of water quality of Hanfeng lake in three gorges reservoir region of China [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2016, **38**(3): 136-142.
- [31] Kim D H, Matsuda Q, Yamamoto T. Nitrification, denitrification and nitrate reduction rates in the sediment of Hiroshima Bay, Japan[J]. *Journal of Oceanography*, 1997, **53**: 317-324.
- [32] Xia X H, Yang Z F, Zhang X Q. Effect of suspended-sediment concentration on nitrification in river water: importance of suspended sediment-water interface [J]. *American Chemical Society*, 2009, **43**(10): 3681-3687.
- [33] 徐继荣, 王友绍, 殷建平, 等. 大亚湾海域沉积物中的硝化与反硝化作用[J]. 海洋与湖沼, 2007, **38**(3): 206-211.
- Xu J R, Wang Y S, Yin J P, *et al.* Nitrification and denitrification in sediment of the Daya Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, **38**(3): 206-211.
- [34] Ogilvie B, Nedwell D B, Harrison R M, *et al.* High nitrate, muddy estuaries as nitrogen sinks: the nitrogen budget of the river colne estuary (United Kingdom) [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, **150**: 217-228.
- [35] Zimmerman A R, Benner R. Denitrification, nutrient regeneration and carbon mineralization in sediments of Galveston Bay, Texas, USA [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, **114**(3): 275-288.
- [36] Saunders D L, Kalff J. Denitrification rates in the sediments of Lake Memphremagog, Canada-USA [J]. *Water Research*, 2001, **35**(8): 1897-1904.
- [37] 覃超梅, 周怀阳, 吴自军, 等. 珠江口淇澳岛海岸带反硝化作用研究[J]. 海洋科学, 2009, **33**(2): 74-79.
- Qin C M, Zhou H Y, Wu Z J, *et al.* The study of denitrification rate in Qi'ao island coastal zone, Pearl River estuary [J]. *Marine Sciences*, 2009, **33**(2): 74-79.
- [38] Lou J, Tillman R W, Ball P R. Factors regulating denitrification in a soil under pasture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**(6): 913-927.
- [39] 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.
- [40] Rysgaard S, Risgaard-Petersen N, Peter S N, *et al.* Oxygen regulation of nitrification and denitrification in sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, **39**(7): 1643-1652.
- [41] Seitzinger S P. Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: ecological and geochemical significance [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**(4 Pt2): 702-724.
- [42] 郭永坚, 王芳, 董双林, 等. 草鱼不同混养模式下围隔底泥反硝化、硝化和氨化速率[J]. 中国水产科学, 2011, **18**(4): 857-866.
- Guo Y J, Wang F, Dong S L, *et al.* Benthic denitrification, nitrification, and nitrate reduction rates in a range of grass carp polyculture enclosures [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, **18**(4): 857-866.
- [43] Herbert R A. Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 1999, **23**(5): 563-590.
- [44] Pelegri S P, Blackburn T H. Effect of bioturbation by *Nereis* sp., *Mya Arenaria* and *Cerastoderma* sp. on nitrification and denitrification in estuarine sediments [J]. *Ophelia*, 1995, **42**(1): 289-299.
- [45] Gilbert F, Stora G, Bonin P. Influence of bioturbation on denitrification activity in Mediterranean coastal sediments; an *in situ* experimental approach [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1998, **163**: 99-107.
- [46] Law C S, Rees A P, Owens N J P. Temporal variability of denitrification in estuarine sediments [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1991, **33**(1): 37-56.
- [47] Dale A W, Prego R. Physico-biogeochemical controls on benthic pelagic coupling of nutrient fluxes and recycling in a coastal upwelling system [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, **235**: 15-28.
- [48] Lohse L, Malschaert J F P, Slomp C P, *et al.* Sediment-water fluxes of inorganic nitrogen compounds along the transport route of organic matter in the North Sea [J]. *Ophelia*, 1995, **41**(1): 173-179.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₃ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)