

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

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

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝	(3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕	(3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章	(3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳	(3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟	(3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国	(3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军	(3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜	(3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙	(3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的实验研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊	(3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲	(3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴	(3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶	(3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力	(3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰	(3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园	(3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤	(3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥	(3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅	(3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅	(3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐	(3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮	(3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春	(3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅	(3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴	(3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程	(3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌	(3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡	(3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟	(3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶	(3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良	(3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩	(3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑	(3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅	(3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博	(3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君	(3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学	(3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿	(3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂	(3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净	(3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚	(3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳	(3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集	(3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青	(3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈	(3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平	(3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强	(3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl	(3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂	(3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹	(3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉	(3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁	(3632)
《环境科学》征稿简则(3279)	《环境科学》征订启事(3545)	信息(3364,3486,3552,3563)

基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究

刘波^{1,2}, 盛明¹, 朱强¹, 杨霜¹, 檀炳超¹, 范冉¹, 南旭军¹, 何茂阳¹, 王国祥^{2*}

(1. 南通大学地理科学学院, 南通 226007; 2. 江苏省环境演变与生态修复重点实验室, 南京 210046)

摘要: 研究平原河网区城市河道在水资源调度过程中的水文特征和理化特征, 探讨基于水资源调度的城市河道氮素形态与组成; 在实验模拟条件下, 研究基于水资源调度的城市河道沉积物 NH_4^+ -N释放过程. 结果表明, 研究河段在水资源调度作用下水深日变化过程明显; 以农历月为单位, 水资源调度可以分为轻度置换阶段和深度置换阶段; 沿调水路径河道上覆水 DO 有下降趋势, 高锰酸盐指数则呈现升高趋势; 沿调水路径上覆水 NO_3^- -N浓度逐渐减少, NH_4^+ -N浓度显著升高; DO 与高锰酸盐指数是影响上覆水 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N浓度的主要因素; 沉积物内源 NH_4^+ -N释放是上覆水 NH_4^+ -N的一个重要来源; 水资源调度显著影响($P < 0.05$)上覆水 NH_4^+ -N浓度, 对沉积物内源 NH_4^+ -N的释放影响不显著($P > 0.05$).

关键词: 水资源调度; 城市河道; 无机氮; 氨氮释放; 南通市

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3373-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.018

Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation

LIU Bo^{1,2}, SHENG Ming¹, ZHU Qiang¹, YANG Shuang¹, TAN Bing-chao¹, FAN Ran¹, NAN Xu-jun¹, HE Mao-yang¹, WANG Guo-xiang²

(1. School of Geography Science, Nantong University, Nantong 226007, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change & Ecological Construction, Nanjing 210046, China)

Abstract: To study hydrological features and physical and chemical characteristics of urban stream located in the plain river network area in the process of water resources regulation, and to discuss the forming and composition of nitrogen in urban stream based on water resources regulation. Effects of water regulation on the ammonium release from sediments in urban stream were studied under the condition of experimental simulation. The results showed that diurnal variation of water depth under the action of water resources regulation was significant. The value of DO in the overlying water along the water resources regulation path tended to decrease, while the concentration of permanganate index tended to increase. The concentration of nitrate in overlying water along the water resources regulation path gradually decreased, while the concentration of ammonium significantly increased. DO and permanganate index were the main factors influencing the concentrations of nitrate and ammonium in overlying water. Ammonium released from the sediments was an important source of ammonium in overlying water. Water resources regulation had a significant influence ($P < 0.05$) on the concentration of ammonium in overlying water, but had no significant influence on the amount of cumulative ammonium released from sediments ($P > 0.05$).

Key words: water resources regulation; urban stream; inorganic nitrogen; release of ammonium; Nantong City

水资源调度,即利用水利工程来实现水资源时空的重新分配,从而满足供水保障、防洪抗旱和生态改善的要求^[1]. 水资源调度包括供水调度、防洪调度、水库调度、水沙调度和环境调度^[2]. 长江三角洲东部平原河网区为典型感潮河网地区,区域内河道纵横、水系发达,过境水量充沛且水质较好,再加之潮汐自然涨落水动力优势为开展水资源调度工作提供了有利条件^[3]. 水资源调度已经成为该区域保障生活生产和生态用水,改善水体环境质量,不可缺少且长期有效的水资源利用和水环境保护重要措施^[4].

城市河道氮素超标已经成为城市水环境面临的一个突出问题. 沉积物作为排入河道中各类污染物主要的归宿场所之一,累积了大量的污染物质. 富

集于沉积物中的污染物质在一定条件下重新释放,成为二次污染源^[5,6]. 研究表明,内源氮已成为河道氮素污染的重要贡献者^[7]. 氮作为水生生态系统中一种重要的生源要素,其迁移转化受到许多环境因子的影响^[8,9]. 水资源调度过程中随着水量的调换,会改变上覆水的基本组成和理化性质,水位在短期内也会出现急剧变动,这些改变对河道氮的迁移转化过程必然会产生深刻影响. 目前关于水资源调

收稿日期: 2014-02-14; 修订日期: 2014-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173078); 江苏省自然科学基金项目(SBK201321353); 南通市自然科学基金项目(BK2013058); 大学生创新训练计划项目(201310304038Z, 201310304069Y)

作者简介: 刘波(1976~),男,博士,副教授,主要研究方向为水环境保护和水生态修复, E-mail: lb@ntu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: wangguoxiang@njnu.edu.cn

度对河道氮素迁移转化的影响研究,还只是包含在水资源调度对水环境总体质量研究之中^[10~12],还未见基于水资源调度的城市河道水体氮素迁移转化相对系统研究. 因此,研究污染河道水体环境特征在水资源调度下的变化过程,深入揭示水资源调度过程中氮形态迁移转化过程,探讨沉积物内源氮释放行为对水资源调度的响应机制,对于有效解决平原河网区污染河道氮污染问题具有十分重要的现实意义. 本文以南通市主城区东部水洗为研究对象,通过野外实地观测,分析水资源调度过程中沿调水路径城市河道水文特征变化,探讨水资源调度的基本过程;通过分析上覆水理化指标,探讨基于水资源调度的平原河网区城市河道氮素形态与组成;在实验模拟条件下,不考虑外源污染,研究基于水资源调度的城市河道沉积物 NH_4^+-N 释放过程,探讨基于水资源调度的平原河网区城市河道氮素迁移转化机制,以期为平原河网区城市污染河道氮污染治理提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南通市位于江苏省东南部,滨江临海,分属长江

和淮河两大流域,水系较独立,为典型感潮平原河网区,具有得天独厚的水资源开发利用优势. 南通市每年要从长江引调大量的水满足工农业生产及防汛抗旱的需要. 随着南通市经济社会的快速发展,城市内河的水环境质量日趋突出,迫切需要通过水利设施,加大引江调水力度,增加供水能力,以增强河道自净和调蓄能力有效改善河道水质,维持河流的健康生态. 2009 年开始,南通市针对生态换水制定专门的引江调水方案,通过引江调水改善境内河道水质已成为南通市水环境保护的常态化工作.

南通市主城区东片水系水资源调度主要通过通吕运河的节制闸自长江引水,经通吕运河 3 个闸泵站(图 1 中①、②、③)向南部城区的城市内河输水,即共有 3 条引江调水路径,见图 1. 本研究选择该区域其中一条引江调水路径作为研究河段,即由郭里头河闸及泵站自引或抽引通吕运河水,通过郭里头河、濠东河、通甲河到海港引河,经小姚港涵闸入江. 郭里头河闸平水时关,关闸后提水泵站全力运行向内河引水. 沿调水路径,从通吕运河沿引水的水流方向至海港引河设置不同的采样断面,见图 1.

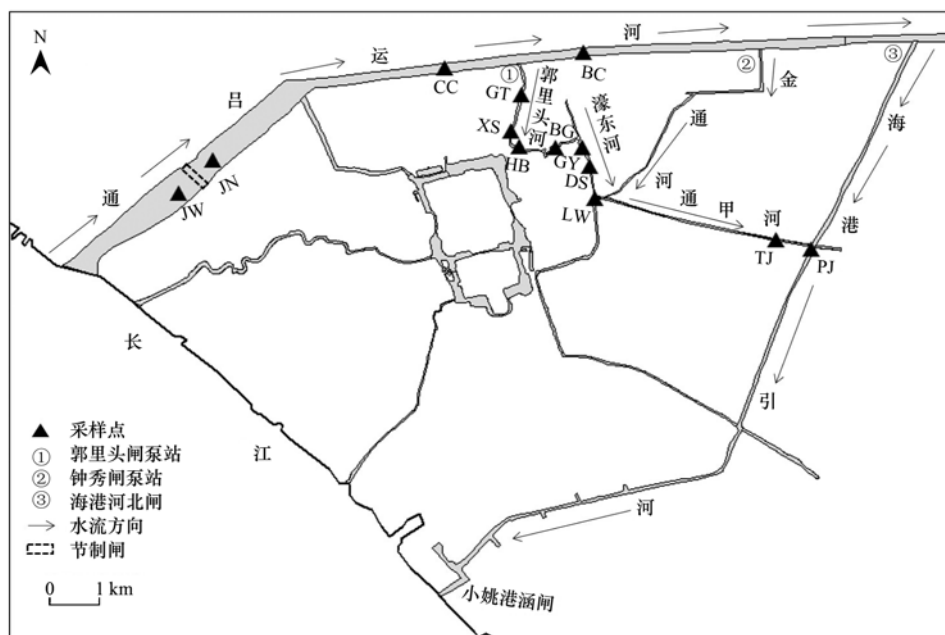


图1 采样点示意

Fig. 1 Map of Nantong City showing sampling stations

1.2 采样与观测

选择龙王桥(LW)断面和通京大道(TJ)断面进行为期一个月的水深观测(2013 年 7 月 7 日~8 月 7 日),现场同时测定 DO(YSI 550,美国)、pH(YSI

100,美国)温度和水温.

7 月 18 日(农历十一)、7 月 24 日(农历十七)和 8 月 5 日(农历二十九),沿引江调水的水流方向分别在设置断面现场测定 DO、pH 和温度、水温,

另采集水样 1 000 mL, 送回实验室测定水样高锰酸盐指数、DTN(可溶性总氮)、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N。

1.3 沉积物 NH_4^+ -N 释放模拟

在 JW 断面采集上覆水, 水样经 0.45 μm 滤膜过滤作为实验用水, 过滤水样放入冰箱, 4℃ 蔽光保存。在龙王桥(LW)断面, 用自制柱状采样器(有机玻璃, $\varphi 50 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$)采集河道表层沉积物约 15 cm 的柱状样若干。采集样品迅速送至实验室。任意取出 3 根柱状样进行沉积物及间隙水理化性质分析。其余柱状样保留表层沉积物 10 cm, 用虹吸法排出原有上覆水后加入经抽滤的实验用水(加至约 30 cm 高, 相当于 LW 断面平均水深, 即 1.30 m, 见 2.1 节)。将处理后柱状样分为 2 组, 每组 3 根。其中 1 组水深保持不变, 作为对照组(C 组); 另外 1 组(S 组), 根据 LW 断面观测的水深(7 月 23 ~ 30 日)变化, 按照容器 30 cm 高相当于野外 1.30 m 水深的比例加减实验系统的水量以模拟野外观测到水深变化过程。记录每次加入或抽取水量。C 组中, 每日早晚从各柱状样设置的采样口采集水样 20 mL, 后补充实验用水 20 mL。S 组中, 根据水深变化, 在保证 20 mL 水质分析水样的基础上进行水量调整。采集(抽取)水样和加入水样同时进行 DTN(可溶性总氮)、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 分析。实验期间通过水浴使实验系统温度为 28 ~ 29℃, 与野外相似。

沉积物 NH_4^+ -N 释放量计算见式(1)。

$$R_i = M_i - \text{Mr}_{i-1} - \text{Ma}_{i-1} \quad (1)$$

式中, R_i 为第 i 次 NH_4^+ -N 释放量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; M_i 为采样前第 i 次容器内 NH_4^+ -N 含量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; Mr_{i-1} 为第 $i-1$ 次采样后容器内剩余 NH_4^+ -N 含量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; Ma_{i-1} 为第 $i-1$ 次加入 NH_4^+ -N 含量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; 根据每次采集水样、加入或取出水样的体积和 NH_4^+ -N 浓度计算 M_i 、 Mr_{i-1} 和 Ma_{i-1} 。沉积物 NH_4^+ -N 累积释放量等于每次释放量累加之和。

1.4 样品采集与分析

将采集的柱状样排干上覆水后用上顶法分层研究沉积物, 用离心法(4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 20 min)获得间隙水。把取得的上覆水和间隙水用 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤, 过滤后的水样采用标准方法进行 DTN(可溶性总氮)、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 分析^[13], TIN(总无机氮)为 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 之和。每天分时段监测 DO 和 pH。水中的高锰酸盐指数采用标准方法测定^[13]。

沉积物有机质含量采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定^[14]。沉积物 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 浓度测定: 称取相当于 10 g 干样的新鲜沉积物, 用 2 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液浸提(液: 土 = 5: 1), 振荡 30 min, 过滤后比色法(波长为 210 nm)测定浸提液中 NO_3^- -N 浓度; 纳氏比色法(波长为 420 nm)测定浸提液中 NH_4^+ -N 浓度^[15]。TN 的测定为碱性过硫酸钾消解后在波长 210 nm 比色测定^[14]。

2 结果与讨论

2.1 内河水深变化过程

监测到的水深变化如图 2 所示。两个观测点位于通甲河的上下游, LW 和 TJ 断面的水深变化显著相关($P < 0.01$, t -test)。LW 和 TJ 断面最大及最小水深分别为 1.75 m、0.81 m 和 2.00 m、0.45 m, 平均水深分别为 1.30 m(以 LW 断面的平均水深作为室内释放模拟参考水深单位)和 1.47 m。在水资源调度的作用下, 内河水深存在明显的日变化过程, LW 和 TJ 断面每 12 h 水深变化平均为 0.18 m 和 0.23 m, 每 12 h 最大水深变化分别为 0.55 m 和 0.85 m。

内河水深主要由引水和排水两个环节决定, 当地水利部门根据每月长江潮汛变化、长江来水量、内河水质和当地降水状况及防旱、防汛需要适时调整引水和排水过程, 调控内河水体置换过程, 保证内河水环境质量^[16]。引水分为自流引水和动力提水两种类型, 自流引水基本是依靠长江潮汐动力, 在高潮时引水, 低潮时排水, 水体置换效果往往受到时间和长江潮位的限制; 为了保持内河良好水环境水平, 在自流换水基础上必须采用动力提水实现调水引流。研究河段郭里头泵站, 在平水时全力运行即是按此原则设置。在引入源水能得到保障的基础上适时开闸排水以达到换水目的。观测发现, 研究区内河水体置换分两种方式。一是“轻度置换”, 在长江非大潮汛阶段, 利用长江不规则半日潮规律在每天涨潮时全力开闸引水, 平水时通过泵站引水, 通过汇入河道(海港引河)的水位来控制引水路径中河道水深, 水深日变化幅度不大, 水量置换力度较小, 能保证内河水体缓慢流动, 水力停留时间长; 农历初六(7 月 13 日)到农历十四(7 月 21 日)、农历十八(7 月 25 日)到农历二十一(7 月 28 日)以及农历二十三(7 月 30 日)到农历二十八(8 月 4 日)阶段的水深变化反映了上述过程, 见图 2。二是“深度置换”, 在长江大潮汛(农历初一、十五)到来之前 1

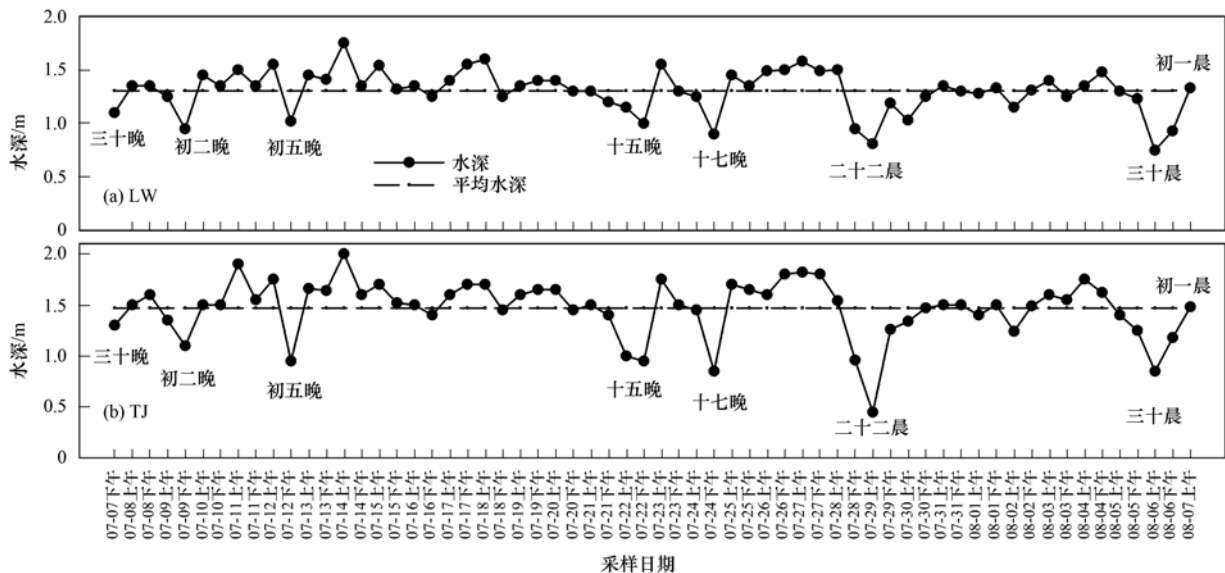


图2 水深变化过程

Fig. 2 Variation of water depth

~2 d 内于每天退潮阶段尽可能开闸(小姚港涵闸)排水,排出水质较差的内河水,农历十五前(7月22日)和农历初一(7月8日)前水深变化反映了这一过程;接着在大潮汛期间(2~3 d 内)尽可能利用潮汐动力加速换水过程,水量置换力度大,水体流速快,水力停留时间短,见农历初二(7月9日)到农历初五(7月12日)以及农历十五(7月22日)到农历十八(7月25日)的水深变化过程。另外,在非潮汛时段,在引入源水得到保障的基础上可以利用深度置换方式满足内河水质和防汛需要,如农历二十二(7月29日)前后的水深变化。

2.2 沿调水路径水中 DO 与高锰酸盐指数变化

沿调水路径水流方向,各监测断面 DO 变化如图3所示。不难发现,沿水流方向 DO 存在明显的空间差异,即在 HB 断面以下,水体 DO 迅速降低,这一现象在流速较缓、水力停留时间长的轻度置换阶段更为明显。沿程各监测断面高锰酸盐指数变化见图4。通过高锰酸盐指数与 DO 相关性分析发现,在轻度置换阶段二者呈极显著负相关(见表1),表明沿程 DO 下降与高锰酸盐指数增高有关。实地考察发现,从 HB 断面到 TJ 断面河流经的主要是居民生活区。造成监测断面高锰酸盐指数增高的原因一是由于“雨污分流”还未能完全实施,周围可能有部分生活污水排入,导致水中耗氧污染物增多;另外一个原因是该河段的沉积物富集了大量耗氧污染物,内源污染严重(见表2),加剧了水中 DO 的消耗。

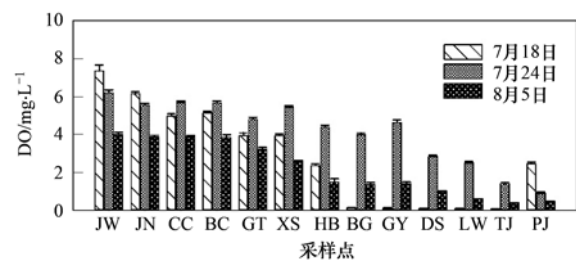


图3 各采样点 DO 值

Fig. 3 Variation of DO concentration in sampling stations

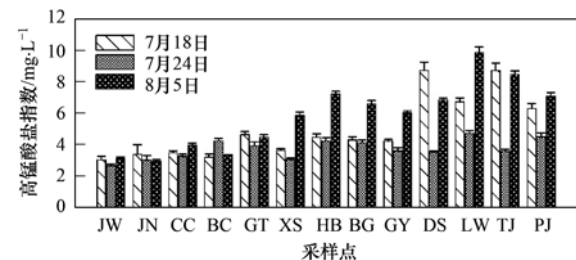


图4 各采样点高锰酸盐指数

Fig. 4 Variation of permanganate index concentration in sampling stations

2.3 沿调水路径水中氮形态变化

沿引江调水路径,河道无机氮(IN)组成与浓度变化见图5。从3次调查数据来看,引入内河的源水(JW断面)氮素浓度及组成变化不大。引入内河的源水中 TIN 浓度为 $2.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中以 $\text{NO}_3^- \cdot \text{N}$ 为主,占总 TIN 的 77.6% 以上,其次是 $\text{NH}_4^+ \cdot \text{N}$,而 $\text{NO}_2^- \cdot \text{N}$ 浓度均很低,这与长江河口和相关地区的 IN 组成相似^[17, 18]。沿调水路径,内河水

中 TIN 浓度及组成变化与内河水资源调度阶段有关. 由图 2 可知,7 月 18 日和 8 月 5 日处于轻度置换阶段. 引入的源水在经郭里头泵站引入内河后,沿水流方向各监测断面氮素组成发生了明显的变化,主要表现为随着水流流向 TIN 浓度增加, NO_3^- -N 浓度明显下降, NH_4^+ -N 浓度显著升高. 监测断面中 TIN 最大浓度分别出现在 DS 断面和 TJ 断面,均为引入内河源水(JW 断面)的 1.94 倍; NH_4^+ -N 的最大浓度分别为 $4.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (DS 断面)和 $4.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (TJ 断面),分别为引入内河源水(JW 断面)的 9.93 倍和 8.78 倍; NO_3^- -N 最小浓度分别为引入内河源水(JW 断面)的 11.7% (TJ 断面)和 10.1% (TJ 断面). 根据图 2,7 月 24 日为深度置换阶段,沿调水路径各监测断面的 TIN 浓度变化不大, NO_3^- -N 浓度有所下降, NO_3^- -N 最小浓度为 $1.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (TJ 断面),为 JW 断面的 50%;沿程 NH_4^+ -N 浓度有所上升, NH_4^+ -N 浓度最大浓度 $1.77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (TJ 断面),为 JW 断面的 2.78 倍.

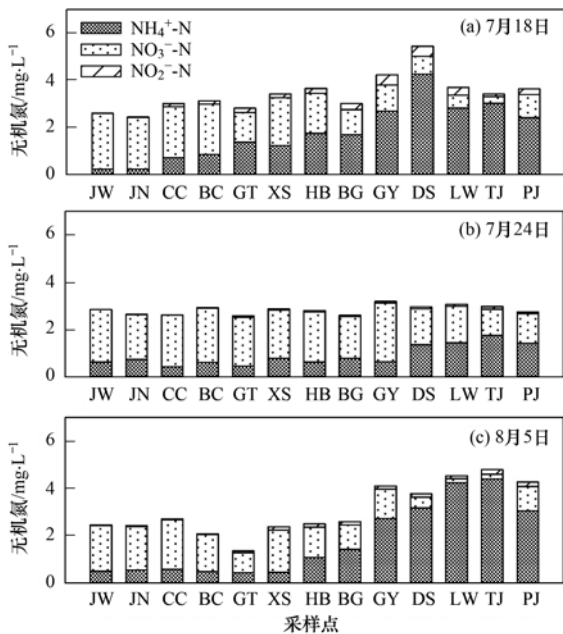


图 5 各采样点无机氮浓度
Fig. 5 Variation of inorganic nitrogen concentration in sampling stations

水生生态系统中 NO_3^- -N 可被生物吸收或经反硝化作用去除^[19],DO 是控制水生生态系统反硝化过程的一个关键因素^[20, 21]. 自然条件下河流为动态流动水流,虽然存在反硝化细菌,但一般溶解氧较高,多处于氧化环境,因此氮在河流中的反硝化作用可能并不明显^[22]. 可是在水流较为稳定的时期,在一定条件下会发生明显的反硝化过程^[23]. 在 HB 断面以下,在深度置换阶段由于水流较快,水力停留时间短,各断面 NO_3^- -N 浓度下降趋势不明显;在轻度置换阶段各断面 NO_3^- -N 浓度有下降趋势显著. 可见,在轻度置换阶段反硝化作用可以削减源水中部分的 NO_3^- -N,但是由于 NH_4^+ -N 浓度显著升高抵消了对总氮去除的效果. 研究河段沿水流方向 DO 存在明显的空间差异,在轻度置换阶段,HB 断面以下水体 DO 迅速降低(见图 3). 随着 DO 降低,各断面 NO_3^- -N 浓度有明显下降的过程. 通过对 DO 与各形态无机氮的相关性分析(见表 1),结果发现 DO 和 NO_3^- -N 呈极显著相关关系($P < 0.01$),表明 DO 控制的反硝化过程是影响沿程 NO_3^- -N 浓度的一个重要因素.

HB 断面以下水中 NH_4^+ -N 浓度明显升高,主要是由于有新的 NH_4^+ -N 输入. 研究河段水中 NH_4^+ -N 一方面有可能来源于外源输入,即生活污水注入,生活污水中 NH_4^+ -N 含量一般较高^[24]. 由表 1 发现在轻度置换阶段,高锰酸盐指数与 NH_4^+ -N 极显著正相关关系,表明生活污水中耗氧污染物增加可能伴有 NH_4^+ -N 的注入. 另一方面,水中的 NH_4^+ -N 可能来自于沉积物的内源 NH_4^+ -N 释放. 研究河段间隙水中含有很高浓度的 NH_4^+ -N(见表 2). 在水力停留时间较长、DO 水平较低^[6]、水温较高的条件下^[25, 26]会快速向上覆水释放. 较低 DO 水平同时会抑制水中氮的硝化作用^[19, 27, 28],使 NH_4^+ -N 在上覆水中累积,导致上覆水中 NH_4^+ -N 浓度增高. DO 与 NH_4^+ -N 呈极显著负相关关系(见表 1),说明 DO 是影响水中 NH_4^+ -N 浓度的一个重要因素. 在流速缓慢,水力停留时间长的轻度置换阶段,在内、外源的作用下,沿程水体中高锰酸盐指数增高及 DO 下降,控制着河

表 1 DO、高锰酸盐指数与无机氮 Pearson 相关关系¹⁾ ($n = 13$)

项目	7 月 18 日				7 月 24 日				8 月 5 日			
	DO	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	NO_2^- -N	DO	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	NO_2^- -N	DO	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	NO_2^- -N
高锰酸盐指数	-0.72 **	0.90 **	-0.87 **	0.46	-0.35	0.10	0.01	0.45	-0.94 **	0.84 **	-0.82 **	0.81 **
DO	1	-0.87 **	0.90 **	-0.80 **	1	-0.90 **	0.88 **	-0.82 **	1	-0.87 **	0.80 **	-0.90 **

1) * 表示显著相关($P < 0.05$); ** 表示极显著相关($P < 0.01$)

表 2 表层沉积物及间隙水主要理化指标¹⁾

Table 2 Physico-chemical characteristics of sediment and porewater in study sites

深度 /cm	沉积物/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				间隙水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			
	OM/%	TN	NH_4^+-N	NO_3^--N / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	高锰酸盐指数	TDN	NH_4^+-N	$\text{NO}_3^--\text{N} + \text{NO}_2^--\text{N}$
0~2	5.69 ± 0.21	$3\,294.50 \pm 137.70$	548.00 ± 82.02	60.00 ± 1.41	21.25 ± 0.01	28.97 ± 5.96	25.99 ± 4.57	0.42 ± 0.04
2~4	6.13 ± 0.04	$3\,035.50 \pm 20.41$	645.00 ± 36.77	60.50 ± 2.12	27.81 ± 1.44	37.73 ± 3.34	35.18 ± 4.40	0.41 ± 0.03
4~6	6.15 ± 0.06	$2\,976.00 \pm 108.89$	736.00 ± 36.45	59.50 ± 3.54	73.13 ± 1.77	53.01 ± 4.89	50.21 ± 5.86	0.49 ± 0.07
6~8	5.98 ± 0.11	$3\,027.50 \pm 41.72$	794.00 ± 45.25	59.50 ± 9.19	95.00 ± 0.88	67.29 ± 1.03	61.74 ± 4.57	0.48 ± 0.07
8~10	6.38 ± 0.04	$3\,082.50 \pm 101.12$	868.50 ± 116.63	57.00 ± 5.66	85.00 ± 1.05	79.93 ± 5.53	70.16 ± 3.92	0.49 ± 0.03

1) 均值 $\pm$ SD

道的硝化和反硝化过程及沉积物-水界面氮迁移转化过程,进而影响水体氮素组成和浓度.

2.4 基于水资源调度的沉积物 NH_4^+-N 释放

2.4.1 沉积物与间隙水理化性质

在野外采样分析的基础上,发现 HB 至 TJ 断面的沉积物及间隙水理化组成具有相似性(数据未给出). 基于此并根据调水路径中各断面的氮形态组成,选择 LW 断面为沉积物氨氮释放的研究断面. 该断面沉积物及间隙水的理化特征见表 2. 从中不难发现,该河段沉积物富含有机质(OM),表层沉积物(0~10 cm) OM 含量平均达到 $6.06\% \pm 0.09\%$,大致是太湖表沉积物 OM 含量的 1.41~4.02 倍^[29, 30]. 间隙水中的耗氧物质含量较高,高锰酸盐指数的平均值达到 $60.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 由此可见,表层沉积物及间隙水具有很大的耗氧潜力. 这可能是导致上覆水 DO 下降和高锰酸盐指数升高的一个主要原因. 表层沉积物的间隙水中氮素组成以 NH_4^+-N 为主,平均占 TDN 的 91.44%,平均浓度达到 $48.65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 4.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 由于长期处于低 DO 环境,表层沉积物及间隙水中 NO_3^--N 含量(浓度)很低.

2.4.2 沉积物 NH_4^+-N 释放过程

在不考虑到外源污染的基础上,使用引江调水的源头水(JW 断面采集并经抽滤)作为实验用水,进行沉积物 NH_4^+-N 释放模拟实验. 在实验室条件下,上覆水 NO_3^--N 和 NO_2^--N 浓度很低(数据未给出),表明实验系统中硝化过程不明显. 进行模拟实验阶段各组上覆水 NH_4^+-N 浓度和水深变化见图 6. 从 2 组上覆水 NH_4^+-N 浓度上升过程,不难发现沉积物 NH_4^+-N 释放过程很明显. 对照组(C 组)上覆水中 NH_4^+-N 最大浓度为 $11.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,为初始 NH_4^+-N 浓度的 46.21 倍. 模拟水位变化组(S 组)上覆水中 NH_4^+-N 最大浓度为 $8.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在实验过程,C 组 NH_4^+-N 浓度始终高

于 S 组,2 组的 NH_4^+-N 浓度存在极显著差异($P < 0.01$, t -test). S 组上覆水中 NH_4^+-N 浓度与水深存在显著负相关性($P < 0.05$).

实验系统中上覆水 NH_4^+-N 的浓度变化过程,证明了沉积物内源 NH_4^+-N 释放是造成 HB 断面以下 NH_4^+-N 浓度逐渐升高一个主要原因. 间隙水中 NH_4^+-N 通过扩散作用进入上覆水是内源 NH_4^+-N 释放的主要途径^[31]. 研究河段间隙水中 NH_4^+-N 浓度高(表 1),与上覆水 NH_4^+-N 存在很大的浓度差,表明研究河段沉积物具有很高的 NH_4^+-N 释放潜力^[25]. 相关研究表明,在缺氧环境中,沉积物及间隙水中无机氮以 NH_4^+-N 形式向上覆水中释放^[6],并会在水中累积^[32, 33]. 实验过程中 C 组 DO 平均值 $0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最大值为 $0.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; S 组 DO 平均值 $0.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最大值为 $0.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,2 组均处在缺氧环境. 可见,由于沉积物富含耗氧物质形成的缺氧环境则是实验系统沉积物内源 NH_4^+-N 加速释放并在上覆水累积的一个重要因素.

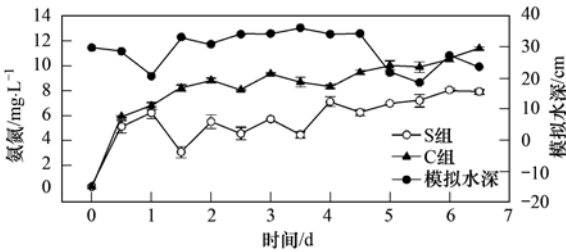


图 6 上覆水 NH_4^+-N 浓度和模拟水深

Fig. 6 Variation of ammonium concentration and water depth in overlying water

各实验组上覆水 NH_4^+-N 累积释放量如图 7 所示. 实验过程中,C 组 NH_4^+-N 累积释放量数值上要大于 S 组. 实验结束时,C 组 NH_4^+-N 总累积释放量为 $4\,195.73 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2} \pm 16.35 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,是 S 组的 1.29 倍. 但是,2 组 NH_4^+-N 累积释放量差异性却并不显

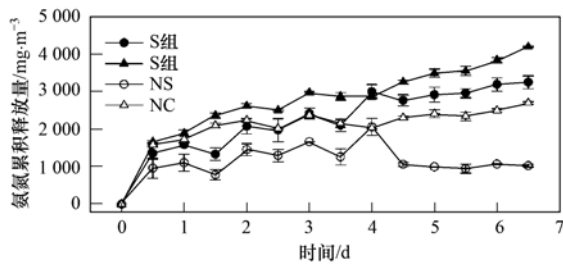
图7 NH_4^+ -N累积释放量

Fig. 7 Amount of cumulative ammonium released from sediments

著($P > 0.05$, t -test). 利用一级动力学方程对2组的 NH_4^+ -N累积释放量进行拟合, 精度较高(r 为0.949和0.941). C组和S组 NH_4^+ -N最大累积释放量分别为 $3\,656.20\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2} \pm 111.05\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $3\,236.88\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2} \pm 155.00\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$. 从拟合趋势上看, 二者 NH_4^+ -N累积释放量的差异也不显著($P > 0.05$, t -test). 表明一定的频率换水并没有显著改变沉积物 NH_4^+ -N释放量.

通过比较2个实验组 NH_4^+ -N净累积释放量(释放的 NH_4^+ -N保留在实验系统内的部分, 用NS和NC表示), 发现NS和NC存在极显著差异($P < 0.01$, t -test), 见图7. 实验结束时S组的 NH_4^+ -N净累积释放量为 $1\,029.00\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2} \pm 31.97\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$, 为 NH_4^+ -N总累积释放量的31.63%. C组 NH_4^+ -N净累积释放量是S组的2.63倍, 占C组 NH_4^+ -N总累积释放量的64.44%. 由此可见, 水量调换虽然对沉积物 NH_4^+ -N总量影响不显著, 但是随着水量调换还是将释放的 NH_4^+ -N脱离了原系统, 降低了原处上覆水中的 NH_4^+ -N污染负荷, 这一过程在水力停留时间段的深度置换阶段则更为明显.

3 结论

(1) 水资源调度深刻影响城市内河的水文特征, 研究河段在引江调水作用下水深日变化过程明显. 按照农历月为单位, 可以将水资源调度分为轻度置换阶段和深度置换阶段. 轻度置换阶段, 水流缓慢, 水力停留时间长; 深度置换阶段, 水流较快, 水力停留时间短. 沿调水路径内河上覆水DO有下降趋势, 高锰酸盐指数则呈现升高趋势.

(2) 沿调水路径内河上覆水中氮素组成变化与水资源调度有关. 在轻度置换阶段, 沿调水路径上覆水的TIN浓度升高, NO_3^- -N浓度逐渐减少, NH_4^+ -N浓度显著升高, 反硝化作用削减了源水中部分的 NO_3^- -N; 在深度置换阶段, 沿调水路径上覆水

的TIN浓度变化不显著, NO_3^- -N浓度有下降趋势, NH_4^+ -N浓度升高. 沿调水路径, 上覆水 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N浓度的变化受DO与高锰酸盐指数影响.

(3) 内河河段沉积物具有很大的耗氧潜力, 间隙水中 NH_4^+ -N浓度较高; 沉积物内源 NH_4^+ -N释放是上覆水 NH_4^+ -N的一个重要来源; 由沉积物富含耗氧物质形成的缺氧环境是沉积物内源 NH_4^+ -N加速释放并在上覆水累积的一个重要因素.

(4) 水资源调度对沉积物内源 NH_4^+ -N的释放影响不显著; 通过水量置换可以带走沉积物释放到上覆水中的部分 NH_4^+ -N, 从而降低上覆水 NH_4^+ -N浓度, 根据实际情况适当增加深度置换频率可以削减河道氮素污染负荷. 从区域氮污染控制来看, 在通过水资源调度减轻上覆水氮污染负荷的同时, 还应加强流经河道的内源污染治理工作.

参考文献:

- [1] 刘昌明. 中国水资源调配若干问题的探讨[J]. 科学对社会的影响, 1996, 16(2): 1-11.
- [2] 阮仁良. 平原河网地区水资源调度改善水质的机理和实践研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2003. 1-5.
- [3] 黄锡荃. 上海市水资源调度的水环境效应[A]. 见: 中国地理学会水文专业委员会第七次全国水文学术会议[C]. 1999. 113-118.
- [4] 蔡浚, 王春树, 王卫. 开展水资源引清调度对改善河道水环境的探讨[J]. 中国水利, 2011, 62(7): 39-41.
- [5] Eggleton J, Thomas K V. A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events[J]. Environment International, 2004, 30(7): 973-980.
- [6] 邢雅因, 阮晓红, 赵振华. 城市重污染河道环境因子对底质氮释放影响[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 120-126.
- [7] Lu X M, Huang M S. Nitrogen and phosphorus removal and physiological response in aquatic plants under aeration conditions[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2010, 7(4): 665-674.
- [8] Rabalais N N. Nitrogen in aquatic ecosystems[J]. AMBIO A Journal of the Human Environment, 2002, 31(2): 102-112.
- [9] Trimmer M, Grey J, Heppell C M, et al. River bed carbon and nitrogen cycling: State of play and some new directions[J]. Science of the Total Environment, 2012, 434(1): 143-158.
- [10] 卢士强, 徐祖信, 罗海林, 等. 上海市主要河流调水方案的水质影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 32-36.
- [11] 童朝锋, 岳亮亮, 郝嘉凌, 等. 南京市外秦淮河水质模拟及引调水效果[J]. 水资源保护, 2012, 28(6): 49-54.
- [12] 徐贵泉, 陈长太, 唐迎洲, 等. 上海市水资源调度现状的分析评估[J]. 水资源保护, 2013, 29(1): 51-54.
- [13] 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. 223-284.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技

- 出版社, 2000. 108-110.
- [15] 古小治, 王强, 张雷, 等. 物理改良对湖泊沉积物和间隙水特征的影响[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(2): 256-262.
- [16] 沈建, 陈建标, 肖玉兵. 南通市高水系引江调水水质改善分析与方案优化[J]. 人民长江, 2012, **43**(10): 72-74.
- [17] 侯立军, 刘敏, 许世远, 等. 长江河口近岸硝态氮的削减途径与归宿[A]. 见: 自然地理学与生态安全学术研讨会[C]. 兰州, 2012. 48-49.
- [18] 江涛, 俞志明, 宋秀贤, 等. 长江水体溶解态无机氮和磷现状及长期变化特点[J]. 海洋与湖沼, 2012, **43**(6): 1067-1075.
- [19] Dodds W K, Evans-White M A, Gerlanc N M, *et al.* Quantification of the nitrogen cycle in a prairie stream [J]. *Ecosystems*, 2000, **3**(6): 574-589.
- [20] Holmes R, Jones B Jr, Fisher S G, *et al.* Denitrification in a nitrogen-limited stream ecosystem [J]. *Biogeochemistry*, 1996, **33**(2): 125-146.
- [21] Laursen A E, Seitzinger S P. Diurnal patterns of denitrification, oxygen consumption and nitrous oxide production in rivers measured at the whole-reach scale [J]. *Freshwater Biology*, 2004, **49**(11): 1448-1458.
- [22] Beaulieu J J, Tank J L, Hamilton S K, *et al.* Nitrous oxide emission from denitrification in stream and river networks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(1): 214-219.
- [23] Austin B J, Strauss E A. Nitrification and denitrification response to varying periods of desiccation and inundation in a western Kansas stream [J]. *Hydrobiologia*, 2011, **658**(1): 183-195.
- [24] 田文华, 文湘华, 钱易. 沸石滤料曝气生物滤池去除 COD 和氨氮[J]. 中国给水排水, 2002, **18**(12): 13-15.
- [25] 范成新, 张路, 秦伯强, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化-1. 铵态氮释放速率的空间差异及源-汇通量[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(1): 10-20.
- [26] 刘波, 王国祥, 王凤贺, 等. 不同曝气方式对城市重污染河道水体氮素迁移与转化的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 2971-2978.
- [27] Courchaine R J. Significance of nitrification in stream analysis: Effects on the oxygen balance [J]. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 1968, **40**(5): 835-847.
- [28] Pauer J J, Auer M T. Nitrification in the water column and sediment of a hypereutrophic lake and adjoining river system [J]. *Water Research*, 2000, **34**(4): 1247-1254.
- [29] 王圣瑞, 赵海超, 王娟, 等. 有机质对湖泊沉积物不同形态氮释放动力学影响研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 332-340.
- [30] 赵兴青, 杨柳燕, 于振洋, 等. 太湖沉积物理化性质及营养盐的时空变化[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(6): 698-704.
- [31] Morse J W, Morin J. Ammonium interaction with coastal marine sediments: influence of redox conditions on K^* [J]. *Marine Chemistry*, 2005, **95**(1-2): 107-112.
- [32] Cowan J L W, Boynton W R. Sediment-water oxygen and nutrient exchanges along the longitudinal axis of Chesapeake Bay: Seasonal patterns, controlling factors and ecological significance [J]. *Estuaries*, 1996, **19**(3): 562-580.
- [33] 吴群河, 曾学云, 黄钥. 溶解氧对河流底泥中三氮释放的影响[J]. 环境污染与防治, 2005, **27**(1): 21-24, 52.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(Ⅲ) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《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9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 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

国内外公开发行人