

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 PM_{2.5} 中 OC、EC 污染特征 康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)

南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用 于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)

常州夏冬季 PM_{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)

天津市春季道路降尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的元素特征 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)

北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许骜鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)

山西省武乡县城大气 PM_{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析 郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)

隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征 李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)

河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征 王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)

城市道路行道树池裸地扬尘排放特征 李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)

DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响 楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)

南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律 黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)

广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险 樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)

西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源 张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)

太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)

海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)

天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)

太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)

春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)

不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素 周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)

水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)

深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)

太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素 薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)

分层型水源水库沉积物需氧量特性 苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)

污水氮浓度和 NH₄⁺/NO₃⁻ 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)

水体氮营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响 周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)

化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除 菅之舆, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)

铜铁氧体法处理模拟染料废水 韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)

草酸根对 α-FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验 苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚烟 (1202)

生物基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性 邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)

铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性 郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)

PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能 刘泽瑛, 周少奇, 马福臻 (1233)

二氧化钛对地下水中砷硅的吸附及再生回用 马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)

一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制 李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)

中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)

硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)

纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)

DO/NH₄⁺-N 实现短程硝化过程中生物膜特性 赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)

AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响 成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)

有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)

中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性 周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)

硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响 吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)

磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响 宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)

好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分 杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)

环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响 戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)

CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析 邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)

磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响 王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)

甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征 薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)

城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律 徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀璐, 郭明月 (1365)

氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落 严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)

近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素 江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 郭熙 (1386)

中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性 王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)

滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)

青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价 周雯雯, 李军, 胡健, 朱兆洲 (1413)

基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析 卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)

铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用 费琦, 阎秀兰, 李永华 (1430)

我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征 王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)

《环境科学》征订启事(979) 《环境科学》征稿简则(996) 信息(1022, 1064, 1293)

春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性

李欣¹, 宋林旭^{1*}, 纪道斌^{1*}, 刘德富², 苏青青¹, 吕林鹏¹, 王雄¹, 黄亚男¹, 吴庆¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 湖北工业大学, 河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068)

摘要: 为研究春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性, 于 2016 年 4 月采集香溪河库湾上覆水和沉积物样品, 分析香溪河库湾沉积物-水系统不同氮形态营养盐浓度的分布特征, 计算沉积物-水界面不同氮形态的扩散通量并与环境因子进行相关性分析. 结果表明, 香溪河库湾上覆水和沉积物间隙水中 $\rho(\text{TN})$ 的变化范围分别为 $1.10 \sim 6.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.19 \sim 32.57 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 上覆水和沉积物间隙水中氮质量浓度在沿程和垂向上有一定的变化规律; 各采样点上覆水中氮质量浓度在沿程和垂向上没有明显的变化趋势, 上游区域的沉积物间隙水中氮质量浓度明显大于下游区域, 沉积物间隙水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 明显大于上覆水, 沉积物间隙水 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 略小于上覆水; 香溪河沉积物总体上表现为 NH_4^+-N 的“源”, NO_3^--N 的“汇”; NH_4^+-N 的扩散通量范围为 $2.70 \sim 4.72 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; NO_3^--N 的释放通量范围为 $-1.61 \sim -0.62 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; 香溪河库湾沉积物氮主要以铵态氮的形态存在; 沉积物中 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 范围为 $69.97 \sim 1185.97 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 范围为 $2.78 \sim 38.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 沉积物 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 与沉积物间隙水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 在表层 $0 \sim 8 \text{ cm}$ 的变化趋势一致.

关键词: 三峡水库; 香溪河; 氮; 沉积物-水界面; 扩散通量

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1113-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201707139

Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring

LI Xin¹, SONG Lin-xu^{1*}, JI Dao-bin^{1*}, LIU De-fu², SU Qing-qing¹, LÜ Lin-peng¹, WANG Xiong¹, HUANG Ya-nan¹, WU Qing¹

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Overlying water and sediment interstitial water samples were acquired to study the nitrogen release between sediments and water interfaces in Xiangxi Bay in April 2016 during the Sensitive Period in spring. The spatial distribution of different forms of nitrogen in the sediment was analyzed, the diffusion fluxes of different forms of nitrogen in the sediments and water systems were also measured, and a correlation analysis with environmental factors was conducted. The results show that overlying water and sediment interstitial water $\rho(\text{TN})$ ranges from 1.10 to $6.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 6.19 to $32.57 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively; indicating the nitrogen concentrations in the overlying and interstitial water of sediments have a certain variation along the process and vertically. The interstitial water nitrogen concentrations in the upstream area are higher than those in the downstream area. The interstitial water $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ in the sediment is significantly larger than that in the overlying water, but the interstitial water $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ in the sediment is slightly smaller than that in the overlying water. Xiangxi Bay sediment acts as a source of NH_4^+-N ; however, for NO_3^--N it is a sink. The diffusive fluxes of NH_4^+-N range from 2.70 to $4.72 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; and the diffusive fluxes of NO_3^--N range from -1.61 to $-0.62 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. Nitrogen is mainly present in the form of ammonium nitrogen in the sediment of Xiangxi Bay. The $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ in the sediment ranges from 69.97 to $1185.97 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ ranges from 2.78 to $38.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ in sediments in the surface at 0 to 8 cm changes with the same trend.

Key words: Three Gorges Reservoir; Xiangxi Bay; nitrogen; sediment-water interface; diffusive flux

收稿日期: 2017-07-17; 修订日期: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(91647207); 国家自然科学基金项目(51779128); 国际科技合作与交流专项(2014DFE70070); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51509086); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07104-005-02)

作者简介: 李欣(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为沉积物迁移转化过程, E-mail: 463659591@qq.com

* 通信作者, E-mail: 280825327@qq.com; dbjctgu@hotmail.com

三峡水库蓄水后,香溪河下游河段水位随之升高,水流减缓,水环境由典型的河流水体转变为类似湖泊的缓流水体.每年春季香溪河库湾均暴发不同程度的水华现象^[1],而其来源主要分为:上游来流与次级支流汇入、点源、面源污染与内源污染等^[2].沉积物是各种污染物质及其相互作用的载体,可作为污染物的“汇”富集水体中的污染物;同时在一定的环境条件下,可通过扩散、再悬浮等作用向上覆水体中释放污染物,成为污染物的“源”,即内源污染.在外源输入负荷得到控制的情况下,沉积物向上覆水中释放氮营养盐是水体富营养化的重要原因^[3].沉积物与污染物之间、沉积物各组分之间、不同形态污染物之间以及沉积物-水界面之间始终处于一个动态过程^[4].氮素是水生生物生长和繁殖的关键生源要素,同时也是引发水体富营养化的关键元素之一^[5,6],而氮在湖泊沉积物的地球化学循环是一个极为复杂同时极为重要的过程^[7,8],不同形态的氮和沉积物的物理化学结合能力不同,在氮循环中所起的作用也不同^[9].蓄积在沉积物中的营养物质在一定条件下通过形态变化、改变界面特性和释放等途径影响上覆水的质量^[10],不同形态的氮在沉积物中形态并不是固定的,各种环境因素如温度、盐度、生物扰动、微生物等都会对其相互转化产生影响^[11].Reddy等^[12]模拟沉积物水界面的持续扰动实验,表明水体扰动促进沉积物颗粒物的再悬浮,从而促进无机氮向上覆水体中释放.林贤彪^[13]的研究表明:无机氮界面的交换作用还同沉积物性质、上覆水无机氮浓度和季节有关.卓海华等^[14]对三峡库区主要入库支流表层沉积物营养盐含量水平、时空变化及污染状况分析和评价,但对于三峡库区典型支流沉积物-水界面氮扩散通量的研究鲜有.本文以三峡水库典型支流香溪河库湾为研究对象,分析春季敏感时期香溪河库湾沉积物-水界面不同氮形态营养盐浓度的分布特征,并利用一维孔隙水扩散模型(Fick定律)估算香溪河库湾内源氮扩散通量,分析香溪河沉积物氮释放特性,以期对沉积物内源氮负荷的计算及控制提供理论基础,并为三峡库区的富营养化风险防治提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 香溪河概况

香溪河又名昭君溪,系长江三峡水库湖北省库区内第一大支流,发源于湖北省西北部神农架林

区,河口距三峡大坝34.5 km,河流由北向南,在秭归香溪汇入水库干流.香溪河干流长94 km,流域范围为110°25′~111°06′E、30°57′~31°34′N,流域总面积为3 099 km²^[15].香溪河流域属亚热带大陆性季风气候,多年平均气温16.6℃,年均降雨量为1 015.6 mm^[16].据昭君镇以下2 km处水文站(控制流域面积1 900 km²)记载,香溪河流域河口断面多年平均流量40.18 m³·s⁻¹^[17].

1.2 采样点布设

在香溪河从河口至156 m回水末端昭君镇沿河道中泓线每间隔约6 km布设1个采样点,共4个,采样点编号依次为1、2、3、4,另外在水库干支流交汇处设置一个采样点,具体见表1和图1.

表1 采样点坐标及距河口的距离

Table 1 Sampling site coordinates and the distance to the mouth of the estuary

采样点	距河口的距离/km	纬度	经度
1	2.80	30°59′24.0″	110°45′46.7″
2	12.70	31°04′55.6″	110°46′03.9″
3	19.20	31°08′02.7″	110°46′42.2″
4	27.60	31°11′57.6″	110°45′10.8″
CJ	/	30°53′34.8″	110°45′28.4″

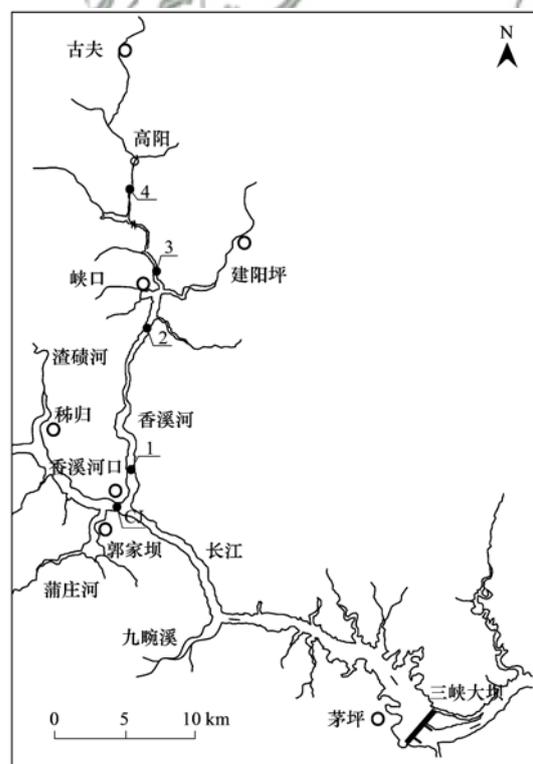


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Site locations

1.3 样品采集与处理

利用中国水利水电科学研究院水环境研究所研

制的柱状采样器($\Phi 60 \times 1000$ mm)采集 5 个采样点的上覆水和沉积物样品($0 \text{ cm} \pm 20 \text{ cm}$), 先将采样器沉积物-水界面向上 20 cm 以外的水吸出, 然后分别以 2 cm 的间隔用上覆水取样装置采集上覆水并倒入 300 mL 聚乙烯水样瓶中, 将上覆水抽完之后, 从沉积物-水界面向下开始以 2 cm 的间隔切取沉积物样品并分装入聚乙烯离心管中. 每个采样点的水样和沉积物样品均采集 3 次, 将 3 次样品混合作为该采样点样品, 水样和沉积物样品均放入冷藏箱中保存, 带回实验室后立即分析(由于 4 号点水位较浅, 沉积物颗粒小, 采集沉积物样品难度大, 故只取到 12 cm 厚度的沉积物样品).

1.4 分析方法

水温、pH 值、溶解氧(DO)利用美国 Hydrolab DS5 多参仪测定; 沉积物间隙水的获取: 在室温条件下, 采用 DL-5M 型低速冷冻离心机在 $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 30 min, 将离心出的上清液倒入 50 mL 离心管中, 放入冰箱冷藏; 上覆水和沉积物间隙水样品需经孔径为 $0.45 \mu\text{m}$ 的玻璃纤维滤膜过滤, 并在 24 h 之内按文献[18]完成总氮(TN)、硝氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)的测定; 沉积物 TN 含量采用凯氏定氮法[19]测定, 沉积物 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量按文献[20]测定. 数据采用 Origin 8.5 和 SPSS 20.0 进行统计分析和插图制作.

2 结果与分析

2.1 上覆水环境因子的空间分布特征

香溪河上覆水中的 $\rho(\text{DO})$ 、pH 和温度的空间分布如图 2 所示. 从中可知, 从沿程分布来看, 自上游到河口下游 $\rho(\text{DO})$ 呈现两头低中间高的分布特征, $\rho(\text{DO})$ 变化范围为 $9.10 \sim 10.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $9.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; pH 从上游到河口下游总体上缓慢降低, 上覆水 pH 变化范围为 $8.37 \sim 8.79$, 平均值为 8.48, 呈弱碱性; 温度的空间变化趋势从上游到下游呈逐渐升高的趋势, 变化范围为 $12.24 \sim 12.70^\circ\text{C}$, CJ 采样点的温度值最高, 为 12.70°C .

对于水库支流库湾, 不少学者认为其属于典型的湖泊型水体[21]. 但 YANG 等[22]对香溪河进行常年现场监测后发现, 长江干流水体在冬季、春夏季、秋季分别通过底层、中层和表层倒灌入香溪河库湾, 上游来流大多时间主要从库湾底层流向水库干流, 因此库湾底部的水体长期处于非静止状态. 各采样点上覆水中 $\rho(\text{DO})$ 均大于 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明没有出现底层缺氧的现象, 且河口中游区域底层水

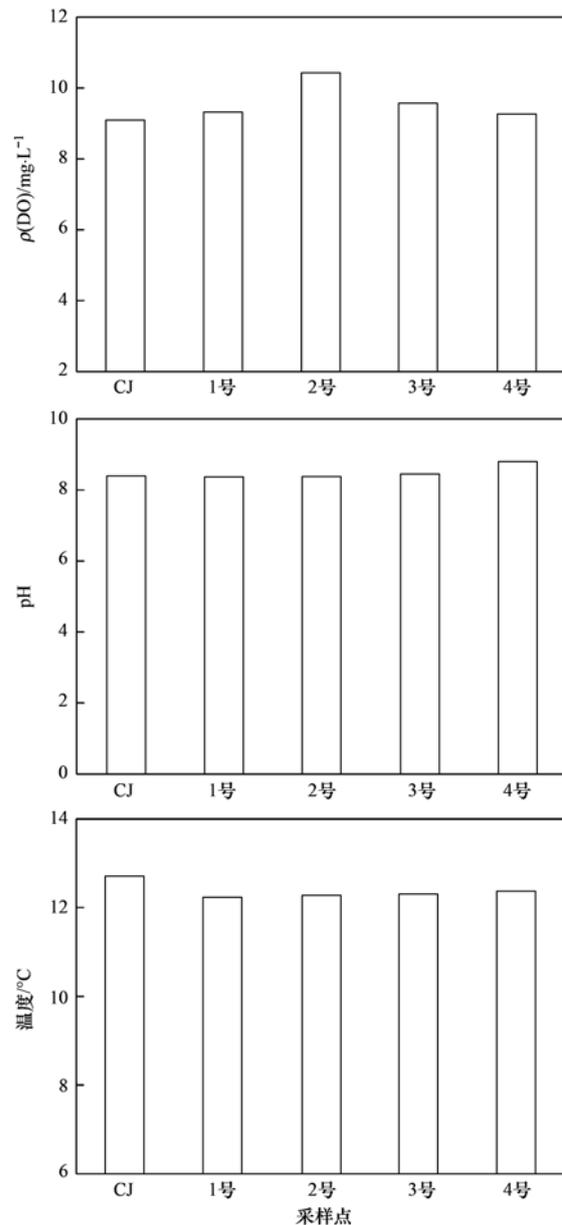


图2 上覆水中 $\rho(\text{DO})$ 、pH 和温度的空间变化

Fig. 2 Spatial distribution of DO, pH, and temperature in overlying water

体环境的氧化能力高于上下游区域.

2.2 沉积物氮形态的空间分布特征

图 3 表示的是香溪河沉积物不同氮形态的空间变化, 从中可知, 香溪河沉积物中 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 范围为 $69.97 \sim 1185.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值 $665.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, CJ、1~4 采样点沉积物中 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 的平均含量分别为 628.87、615.33、759.44、693.33 和 $631.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 香溪河沉积物中 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 范围为 $2.78 \sim 38.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值 $9.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, CJ、1~4 采样点沉积物中 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 的平均含量分别为 6.65、6.31、4.94、10.06 和 $20.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

香溪河沉积物 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 较 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 高出一个数量级,表明香溪河沉积物氮主要以铵态氮的形态存在.

从沿程上看,从干支流交汇处到上游沉积物 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 表现为中间高两头低的分布特征,在2号采样点存在最大值 $759.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但沉积物 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 表现为中间低两头高的分布特征,在2

号采样点存在最小值 $4.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. CJ 采样点沉积物 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 的平均值均低于香溪河沉积物 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 的平均值.从垂向上看,CJ、1、3和4号采样点 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 随深度的增加先升高后降低,在8 cm左右取得最大值,2号采样点 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 随深度的增加呈逐渐升高的趋势.各采样点 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 沿垂向差异不大.

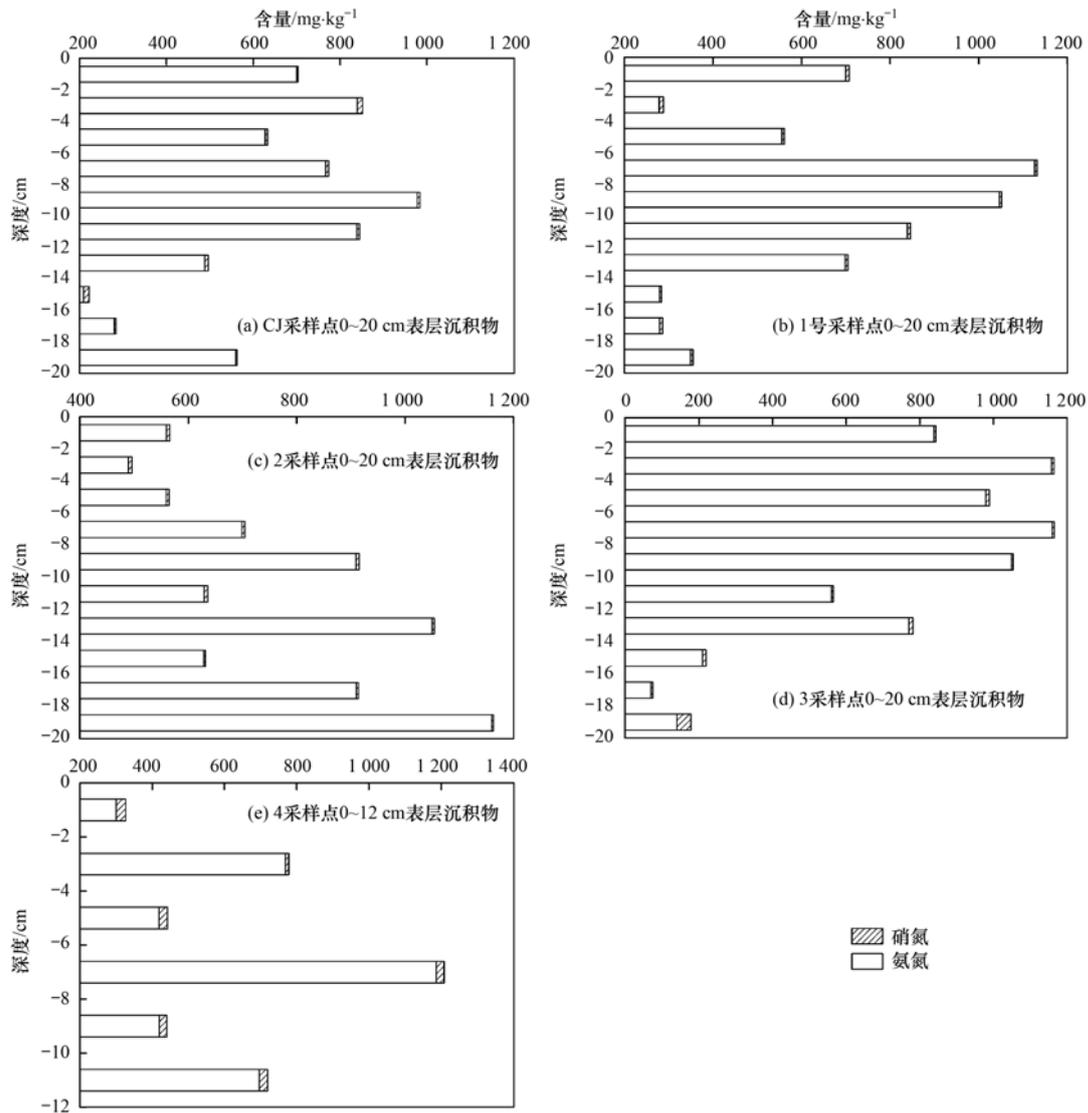


图3 香溪河沉积物不同氮形态的空间变化

Fig. 3 Spatial distribution of different nitrogen forms in the sediment of Xiangxi Bay

2.3 沉积物-水系统氮营养盐空间分布特征

2.3.1 $\rho(\text{TN})$ 分布特征

由图4可见,各采样点上覆水中 $\rho(\text{TN})$ 在垂向上无明显的变化趋势, $\rho(\text{TN})$ 在 $1.10 \sim 6.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动.从沉积物-水界面垂直向下,3号和4号采样点的 $\rho(\text{TN})$ 呈逐渐升高的趋势,其余采样点的 $\rho(\text{TN})$ 呈先增加后减少的趋势.香溪河库湾

沉积物间隙水中 $\rho(\text{TN})$ 的变化范围为 $6.19 \sim 32.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,干流CJ采样点的 $\rho(\text{TN})$ 平均值最高,平均值为 $21.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,2号采样点的 $\rho(\text{TN})$ 平均值最低,平均值为 $10.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.香溪河库湾各采样点沉积物间隙水中 $\rho(\text{TN})$ 至少是上覆水的2倍,因此,上覆水中较低的 $\rho(\text{TN})$ 有利于沉积物中N的释放.

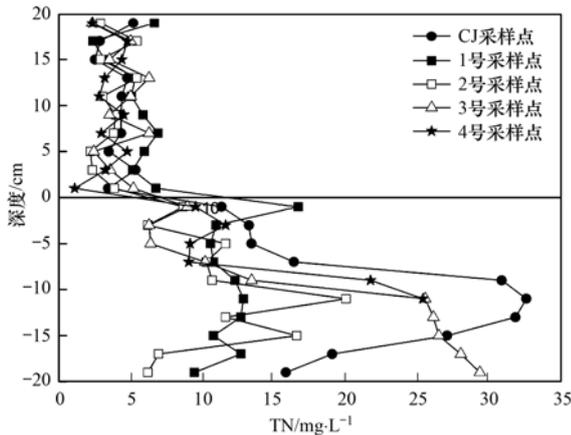


图4 香溪河上覆水、沉积物间隙水中 $\rho(\text{TN})$ 的空间变化

Fig. 4 Spatial distribution of TN in the overlying water and the sediment pore water in Xiangxi Bay

2.3.2 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 分布特征

由图5可见, 上覆水 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 在垂向上的变化与 $\rho(\text{TN})$ 的变化趋势一致. 各采样点沉积物间隙水中 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 随深度增加呈逐渐升高的趋势, 干流CJ采样点间隙水中 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 平均值最大, 平均值为 $9.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大值为 $14.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 从沉积物-水界面向下, 随深度的增加沉积物含氧量降低, 还原环境有利于有机氮氨化作用进行, 相应地消耗氨的硝化作用减弱, 致使 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在沉积物中发生累积^[23], 故表现为随深度增加 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度逐渐升高.

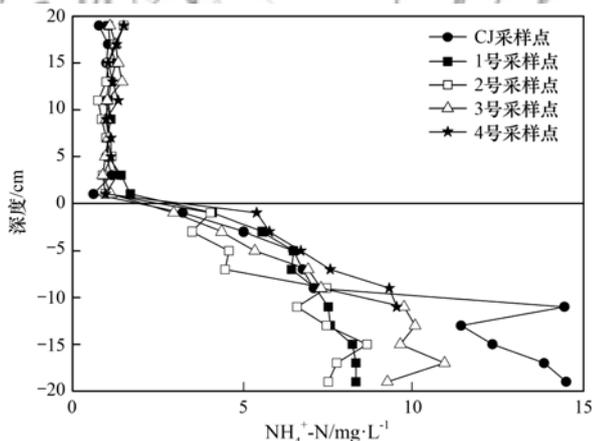


图5 香溪河上覆水、沉积物间隙水中 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 的空间变化

Fig. 5 Spatial distribution of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the overlying water and the sediment pore water in Xiangxi Bay

2.3.3 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 分布特征

由图6可见, 各采样点上覆水中 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 没有明显的变化趋势, 呈上下波动的趋势, 上游4号采样点上覆水中 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 在各层中都最低. 干流CJ采样点沉积物间隙水中 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 从沉积物-水

界面向下逐渐升高, 香溪河库湾沉积物间隙水中 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 从沉积物-水界面向下呈先升后降的趋势, 且上覆水中 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 略高于间隙水, 浓度梯度差较小. 这可能是因为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 进入还原性较强的深层沉积物($>10 \text{ cm}$)中, 由于反硝化作用参与有机分解、矿化等所致, $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 较沉积物含氧层明显降低, 这与WANG等^[24]在研究滇池沉积物氮内源负荷得出的结论一致.

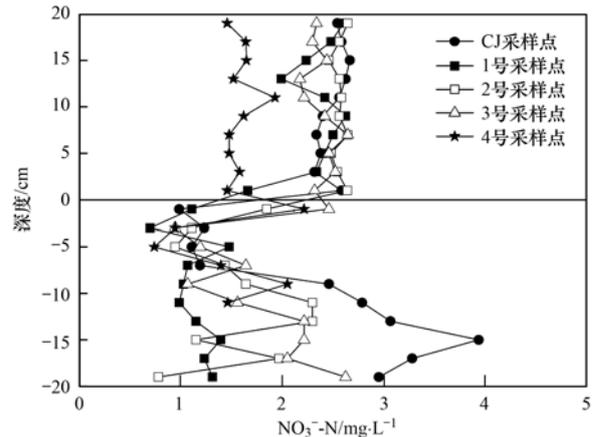


图6 香溪河上覆水、沉积物间隙水中 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 的空间变化

Fig. 6 Spatial distribution of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in the overlying water and the sediment pore water in Xiangxi Bay

2.4 沉积物-水界面氮营养盐的交换特征

沉积物中营养物质对水体的影响与沉积物-水界面的营养物质交换密切相关^[25]. 由于上覆水和沉积物间隙水中营养盐存在浓度差异, 必然存在一个由高浓度向低浓度进行的分子扩散作用, 因此, 研究沉积物-水界面营养物质的扩散通量具有重要的环境意义^[26]. 根据二者之间的浓度梯度及其物理化学性质可以估算沉积物-水界面营养盐的扩散通量. 根据Fick第一扩散定律^[27]及文献^[28, 29], 其改进公式:

$$J_s = -\varphi \cdot D_s \cdot (\partial c / \partial x)_{x=0}$$

式中, J_s 为分子扩散通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; φ 为表层沉积物的孔隙度, %; D_s 为表层沉积物中物质的扩散系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $\partial c / \partial x$ 为沉积物-水界面的营养盐浓度梯度, $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{cm})^{-1}$. 当 $\varphi \leq 0.7$ 时, $D_s = \varphi \cdot D_0$; 当 $\varphi > 0.7$ 时, $D_s = \varphi^2 \cdot D_0$. 其中, 孔隙度 φ 根据称量沉积物样品的湿质量和干质量, 按上述公式进行计算^[30]; D_0 为无限稀释溶液中溶质的扩散系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $(\partial c / \partial x)_{x=0}$ 为沉积物-上覆水界面的营养盐浓度梯度. 有国外学者通过实验得出稀溶液中溶质的扩散系数(D_0)和温度(T , 上覆水)的

经验公式,进一步校准温度和孔隙度的差异造成的误差.该研究取样在4月进行,库湾平均水温约为12.5℃, NH_4^+ 、 NO_3^- 无限稀释溶液中溶质的扩散系数分别为 $14.74 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $14.29 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [31].用表层沉积物(0~4 cm)间隙水与界面向上覆水4 cm左右处的营养盐浓度对深度进行指数拟合,根据拟合所得表达式对深度(x)求导,进而求出沉积物-水界面 $\partial c/\partial x$ 的值,并运用 Fick 第一定律计算出相应点位 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 的扩散通量 J_s .

2.4.1 NH_4^+ -N 的扩散通量

由表2可以看出,各采样点的相关系数 $R^2 >$

0.75,指数拟合效果较理想.香溪河 NH_4^+ -N 是由沉积物间隙水向上覆水体扩散,香溪河库湾的沉积物总体上表现为 NH_4^+ -N 的“源”.扩散通量范围为 $2.70 \sim 4.72 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$.这一方面可能与水生植物、浮游植物在利用氮素时优先吸收利用 NH_4^+ -N 有关[32],另一方面与间隙水 NH_4^+ -N 很大一部分来自有机质的分解作用使 NH_4^+ -N 得以再生有关[33].上游4号采样点沉积物 NH_4^+ -N 扩散通量明显高于其余各采样点,有学者通过对香溪河流域内非点源氮、磷负荷的研究中发现[34],香溪河上游支流面源污染严重,为香溪河库湾上游区域贡献了丰富的氮营养盐.

表2 NH_4^+ -N 的扩散通量

Table 2 Fluxes of NH_4^+ -N

点位	拟合曲线	相关系数	$\partial c/\partial x$ / $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{cm})^{-1}$	扩散系数 D_s $\times 10^{-6}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	扩散通量 J_s / $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$
CJ 采样点	$y = 1.8526 \exp(-0.229x)$	0.77	-0.42	8.13	3.02
1号采样点	$y = 2.7329 \exp(-0.18x)$	0.98	-0.49	9.00	4.10
2号采样点	$y = 1.875 \exp(-0.208x)$	0.88	-0.39	8.69	3.10
3号采样点	$y = 1.9053 \exp(-0.207x)$	0.99	-0.39	7.93	2.70
4号采样点	$y = 2.5193 \exp(-0.233x)$	0.84	-0.59	9.95	4.72

1) 表中扩散通量的负值表示沉积物吸收,正值则表示沉积物释放,下同

2.4.2 NO_3^- -N 的扩散通量

由表3可以看出,各采样点的相关系数 $R^2 >$ 0.74,指数拟合效果较理想.由于上覆水和沉积物间隙水 NO_3^- -N 存在浓度差,香溪河沉积物 NO_3^- -N 由上覆水向沉积物间隙水扩散,香溪河库湾的沉积物

总体上表现为 NO_3^- -N 的“汇”.扩散通量范围为 $-1.61 \sim -0.62 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$.这可能是因为界面水动力或底栖生物扰动导致沉积物溶解氧含量增大,而沉积物-水界面处于氧化状态,硝化作用增强, NH_4^+ -N 被硝化细菌氧化,造成 NO_3^- -N 浓度上升.

表3 NO_3^- -N 的扩散通量

Table 3 Fluxes of NO_3^- -N

点位	拟合曲线	相关系数	$\partial c/\partial x$ / $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{cm})^{-1}$	扩散系数 D_s $\times 10^{-6}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	扩散通量 J_s / $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$
CJ 采样点	$y = 1.63987 \exp(0.111x)$	0.74	0.18	7.89	-1.26
1号采样点	$y = 1.3149 \exp(0.1413x)$	0.98	0.19	8.73	-1.54
2号采样点	$y = 1.9234 \exp(0.1011x)$	0.84	0.19	8.43	-1.46
3号采样点	$y = 1.4024 \exp(0.1726x)$	0.94	0.24	7.69	-1.61
4号采样点	$y = 1.2729 \exp(0.0606x)$	0.94	0.08	9.65	-0.62

3 讨论

3.1 香溪河库湾沉积物氮的垂向差异性分析

变异系数(CV)是表征各样本间变异程度的重要尺度.表4显示了春季香溪河各采样点沉积物TN垂向变化的变异系数,从中可以看出:监测期间各采样点沉积物总氮在垂向上的变异系数均 > 30%,为强变异类型;从干支流交汇处到上游,变异系数呈现中间低两头高的分布特征,上游4号采

样点沉积物TN变异系数超过80%,而且4号采样点沉积物TN平均值达到最高;除了2号采样点,其余采样点沉积物不同氮形态的平均值与变异系数整体上呈正相关,这与刘碧波等[35]研究东湖典型区域间隙水中营养盐时空分布的结论相反;2号采样点沉积物TN变异系数最低,但其氮营养水平较高,沉积物 $\rho(\text{NH}_4^+$ -N) 达到最高,这是由于因 NH_4^+ -N 对环境变化敏感,受此地区人为活动干扰大[36],2号采样点附近有集镇和工厂,会对沉积物

表 4 香溪河沉积物 TN 的变异系数

采样点	标准差	平均值	变异系数/%
CJ 采样点	235.59	635.53	37.07
1 号采样点	341.03	641.64	53.15
2 号采样点	237.77	774.38	30.71
3 号采样点	422.08	723.39	58.35
4 号采样点	966.34	1 179.51	81.93

营养水平产生较大影响。

3.2 香溪河库湾沉积物-水系统氮释放特性分析

香溪河沉积物间隙水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 明显大于上覆水, 沉积物间隙水 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 略小于上覆水, 表明 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 在沉积物-水界面间的迁移趋势相反。香溪河库湾沉积物间隙水中 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 随深度增加而升高, 相对于上层, 下层沉积物通常缺氧程度较高, 适宜于高价态氮向低价态氮转化, 并且下层受水动力扰动作用较小, 比上层沉积物更有利于 NH_4^+-N 在沉积层中保存, 因而表层沉积物间隙水中的 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 低于下层^[37]。香溪河库湾沉积物间隙水中 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 在沉积物-水界面向下 0 ~ 10 cm 内随深度增加而升高, 10 cm 以下逐渐降低, 最后趋于稳定, 表明香溪河库湾沉积物矿化、硝化与反硝化作用主要发生在 0 ~ 10 cm 深度范围内。 NO_3^--N 在沉积物-水界面的迁移受到沉积物结构、含氧量、生物扰动等因素的影响^[41], 从表层沉积物向下, 随着沉积物厚度的增加使得含氧量降低, 有机物分解耗氧使沉积物处于低氧状态, 硝化反应受到抑制, 反硝化作用消耗 NO_3^--N , 造成沉积物间隙水 NO_3^--N 浓度低于上覆水, 故沉积物表现为 NO_3^--N 的“汇”。

香溪河库湾沉积物氮主要以铵态氮的形态存在, 陈国元等^[38]在研究中发现, 沉积物总氮的质量分数与可溶性铵态氮质量分数呈正相关, 沉积物中总氮质量分数影响着间隙水的铵态氮质量浓度。沉积物中 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 在 0 ~ 8 cm 之间与沉积物间隙水中 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 的变化趋势一致, 8 cm 以下沉积物 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 呈逐渐降低的趋势, 造成这种现象的原因可能是由于底栖动物通过生物扰动等一系列生理活动影响营养盐在沉积物-水界面之间的迁移、转化, 会促进或抑制微生物的活动, 从而会影响氮的交换过程^[39,40]。

3.3 春季敏感时期环境条件与沉积物氮释放的响应关系

从 2003 年开始, 春季敏感时期三峡库区主要支流每年均暴发不同程度的水华, 严重影响库湾水

环境质量和水体功能。刘流等^[41]研究发现香溪河春季水温分层的发育是发生富营养化的诱因。温度可以通过改变微生物活性而抑制或加速沉积物中不同形式氮的释放速率。微生物在沉积物-水界面之间进行的一系列迁移转化过程中起着关键的作用, 氨化、硝化、反硝化过程都需要微生物的参与。春季温度逐渐升高时, 沉积物中微生物活动加强, 一方面可以加快有机氮的分解或有机质的矿化, 使得沉积物氮的释放速率增加; 另一方面生物大量繁殖, 浮游植物急剧消耗水体中无机氮, 无机氮从沉积物向上覆水扩散速率加快^[42]。当春季存在水温分层现象时, 温度的分层抑制了香溪河库湾水体运动能量的向下传递, 造成上下层水流流速上的差异, 利于垂向上的物质交换, 促进香溪河沉积物氮的释放。

4 结论

(1) 香溪河库湾上覆水中 $\rho(\text{DO})$ 均大于 6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 自上游至河口下游沿程底层水体环境的氧化能力表现为中间高两头低的分布特征, 沉积物-水界面处在良好的弱碱性氧化环境中, 从上游到下游底部温度呈逐渐升高的趋势。

(2) 香溪河库湾上覆水和沉积物间隙水中 $\rho(\text{TN})$ 的变化范围分别为 1.10 ~ 6.90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 6.19 ~ 32.57 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 上覆水和沉积物间隙水中氮质量浓度在沿程和垂向上有一定的变化规律: 各采样点上覆水中氮质量浓度在沿程和垂向上没有明显的变化趋势, 呈上下波动的趋势; 上游区域的沉积物间隙水中氮质量浓度明显大于下游区域; 香溪河沉积物间隙水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 明显大于上覆水, 沉积物间隙水 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 略小于上覆水, 表明 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 在沉积物-水界面间的迁移趋势相反。

(3) 香溪河沉积物总体上表现为 NH_4^+-N 的“源”, NO_3^--N 的“汇”; NH_4^+-N 的扩散通量范围为 2.70 ~ 4.72 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; NO_3^--N 的释放通量范围为 -1.61 ~ -0.62 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。

(4) 香溪河库湾沉积物氮主要以铵态氮的形态存在: 香溪河沉积物中 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 范围为 69.97 ~ 1 185.97 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 范围为 2.78 ~ 38.17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。沉积物 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 与沉积物间隙水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 在表层 0 ~ 8cm 的变化趋势一致, NO_3^--N 无明显的变化趋势。

致谢: 肖尚斌教授在文章的修改和润色中给予

了极大帮助,生态水工学课题组的刘心愿、黄佳维等在野外采样及实验分析中给予了大力支持,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 黄亚男, 纪道斌, 龙良红, 等. 三峡库区典型支流春季特征及其水华优势种差异分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(3): 461-470.
Huang Y N, Ji D B, Long L H, *et al.* The variance analysis of characteristics and blooms of the typical tributaries of the three gorges reservoir in spring[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, **26**(3): 461-470.
- [2] Mortimer C H. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes[J]. The Journal of Ecology, 1941, **29**(2): 280-329.
- [3] 李宝, 丁士明, 范成新, 等. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 114-120.
Li B, Ding S M, Fan C X, *et al.* Estimation of releasing fluxes of sediment nitrogen and phosphorus in Fubao bay in Dianchi lake [J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 114-120.
- [4] 陈朱虹, 陈能汪, 吴殷琪, 等. 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[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3325-3335.
Chen Z H, Chen N W, Wu Y Q, *et al.* Sediment-water flux and processes of nutrients and gaseous nitrogen release in a China river reservoir[J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3325-3335.
- [5] Han H J, Lu X X, Burger D F, *et al.* Nitrogen dynamics at the sediment-water interface in a tropical reservoir[J]. Ecological Engineering, 2014, **73**: 146-153.
- [6] Shan L N, He Y F, Chen J, *et al.* Nitrogen surface runoff losses from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin, China [J]. Agricultural Water Management, 2015, **159**: 255-263.
- [7] Kim L H, Choi E, Stenstrom M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments[J]. Chemosphere, 2003, **50**(1): 53-61.
- [8] Busigny V, Lebeau O, Ader M, *et al.* Nitrogen cycle in the late archean ferruginous ocean[J]. Chemical Geology, 2013, **362**: 115-130.
- [9] 潘伟亮, 何强, 艾海男, 等. 重庆典型区域雨水管道沉积物中氮磷污染特征分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(1): 257-261.
Pan W L, He Q, Ai H N, *et al.* Analysis on characteristics of nitrogen and phosphorus in storm sewer sediments in Chongqing City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(1): 257-261.
- [10] Zhou Q X, Gibson C E, Zhu Y M. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK[J]. Chemosphere, 2001, **42**(2): 221-225.
- [11] 王功芹, 朱珠, 张硕. 海州湾表层沉积物中氮的赋存形态及其生态意义[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 450-457.
Wang G Q, Zhu Z, Zhang S. Nitrogen forms in the surface sediment of Haizhou Bay and their ecological significance[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(2): 450-457.
- [12] Reddy K R, Jessup R E, Rao P S C. Nitrogen dynamics in a eutrophic lake sediment [J]. Hydrobiologia, 2004, **159**(2): 177-188.
- [13] 林贤彪, 林啸, 颜燕燕, 等. 闽江口盐淡水湿地沉积物-水界面无机氮交换通量特征[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(5): 260-266.
Lin X B, Lin X, Yan Y Y, *et al.* Inorganic nitrogen exchange fluxes at the sediment-water interface in saline-fresh water wetland of Min river estuary [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(5): 260-266.
- [14] 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 等. 三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价[J]. 环境科学, 2017, **35**(12): 5020-5031.
Zhuo H H, Qiu G S, Zhai W Y, *et al.* Evaluation of temporal and spatial variation characteristics of nutrients in surface sediment of the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2017, **35**(12): 5020-5031.
- [15] 刘德富, 黄钰铃, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华与生态调度[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [16] 唐涛, 黎道丰, 潘文斌, 等. 香溪河河流连续统特征研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(1): 141-144.
Tang T, Li D F, Pan W B, *et al.* River continuum characteristics of Xiangxi River[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, **15**(1): 141-144.
- [17] 雒文生, 谈戈. 三峡水库香溪河库湾水质预测[J]. 水电能源科学, 2000, **18**(4): 46-48.
Luo W S, Tan G. Three Gorges Reservoir Xiangxihe bay water quality prognosis[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2000, **18**(4): 46-48.
- [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] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 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.
- [21] 郑丙辉, 张远, 富国, 等. 三峡水库营养状态评价标准研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(6): 1022-1030.
Zheng B H, Zhang Y, Fu G, *et al.* On the assessment standards for nutrition status in the Three Gorge Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, **26**(6): 1022-1030.
- [22] Yang Z J, Liu D F, Ji D B, *et al.* Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5m on water eutrophication in the Xiangxi Bay [J]. Since China Technological Sciences, 2010, **53**(4): 1114-1125.
- [23] 刘峰, 高云芳, 王立欣, 等. 水域沉积物氮磷赋存形态和分布的研究进展[J]. 水生态学杂志, 2011, **32**(4): 137-144.
Liu F, Gao Y F, Wang L X, *et al.* Review on nitrogen and phosphorus forms and distribution in sediments [J]. Journal of Hydroecology, 2011, **32**(4): 137-144.
- [24] 汪淼, 严红, 焦立新, 等. 滇池沉积物氮内源负荷特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 218-226.
Wang M, Yan H, Jiao L X, *et al.* Characteristics of internal nitrogen loading and influencing factors in Dianchi Lake sediment [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(1): 218-226.
- [25] Serruya C, Edelstein M, Pollinger U, *et al.* Lake Kinneret sediments; nutrient composition of the pore water and mud water exchanges[J]. Limnology and Oceanography, 1974, **19**(3): 489-508.
- [26] 黄小平, 郭芳, 岳维忠. 南海北部沉积物间隙水中营养盐研究[J]. 热带海洋学报, 2006, **25**(5): 43-48.

- Huang X P, Guo F, Yue W Z. Studies on nutrients in sediment interstitial water in northern South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, **25**(5): 43-48.
- [27] 宋金明. 中国近海沉积物-海水界面化学[M]. 北京: 海洋出版社, 1997.
- [28] McComb A J, Qiu S, Lukatelich R J, *et al.* Spatial and temporal heterogeneity of sediment phosphorus in the Peel-Harvey estuarine system[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, **47**(5): 561-577.
- [29] Ullman W J, Aller R C. Diffusion coefficients in nearshore marine sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1982, **27**(3): 552-556.
- [30] Urban N R, Dinkel C, Wehrli B. Solute transfer across the sediment surface of a eutrophic lake: I. Porewater profiles from dialysis samplers[J]. *Aquatic Sciences*, 1997, **59**(1): 1-25.
- [31] Li Y H, Gregory S. Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1974, **38**(5): 703-714.
- [32] Schneider S, Melzer A. Sediment and water nutrient characteristics in patches of submerged macrophytes in running waters[J]. *Hydrobiologia*, 2004, **527**(1): 195-207.
- [33] 冯峰, 方涛, 刘剑彤. 武汉东湖沉积物氮磷形态垂向分布研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(6): 1078-1082.
Feng F, Fang T, Liu J T. Vertical distribution of species of nitrogen and phosphorus in the sediments of Lake Donghu [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(6): 1078-1082.
- [34] 宋林旭, 刘德富, 肖尚斌, 等. 基于 SWAT 模型的三峡库区香溪河非点源氮磷负荷模拟[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(1): 267-275.
Song L X, Liu D F, Xiao S B, *et al.* Study on non-point nitrogen and phosphorus load from Xiangxi River in the Three Gorges Reservoir area based on SWAT [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(1): 267-275.
- [35] 刘碧波, 丰民义, 刘剑彤. 东湖典型区域间隙水中营养盐的时空分布[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, **21**(8): 979-986.
Liu B B, Feng M Y, Liu J T. Spatial distribution and seasonal variation of nutrients in pore water of typical area of East lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(8): 979-986.
- [36] 曹明, 蔡庆华, 刘瑞秋, 等. 三峡水库库首初期蓄水前后理化因子的比较研究[J]. *水生生物学报*, 2006, **30**(1): 12-19.
Cao M, Cai Q H, Liu R Q, *et al.* Comparative research on physicochemical factors in the front of Three Gorges Reservoir before and after the initiate impounding[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 12-19.
- [37] 范成新, 杨龙元, 张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J]. *湖泊科学*, 2000, **12**(4): 359-366.
Fan C X, Yang L Y, Zhang L. The vertical distributions of nitrogen and phosphorus in the sediment and interstitial water in Taihu Lake and their interrelations [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, **12**(4): 359-366.
- [38] 陈国元, 李建秋, 李清曼, 等. 武汉月湖沉积物不同形态氮含量与转换途径的垂直变化[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(4): 463-469.
Chen G Y, Li J Q, Li Q M, *et al.* Different forms of nitrogen contents and their vertical variations of transformation modes of the sediments of Lake Yuehu, Wuhan [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(4): 463-469.
- [39] Herbert R A. Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 1999, **23**(5): 563-590.
- [40] Yamada H, Kayama M. Liberation of nitrogenous compounds from bottom sediments and effect of bioturbation by small bivalve, *Theora lata* (Hinds) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1987, **24**(4): 539-555.
- [41] 刘流, 刘德富, 肖尚斌, 等. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3046-3050.
Liu L, Liu D F, Xiao S B, *et al.* Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- [42] 于军亭, 张帅, 张志斌, 等. 环境因子对浅水湖泊沉积物中氮释放的影响[J]. *山东建筑大学学报*, 2010, **25**(1): 58-61.
Yu J T, Zhang S, Zhang Z B, *et al.* Effects of environmental factors on release of sediment nitrogen in shallow lake [J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2010, **25**(1): 58-61.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i>	(990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xixiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i>	(997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i>	(1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i>	(1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i>	(1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang	(1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i>	(1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i>	(1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i>	(1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i>	(1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i>	(1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i>	(1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i>	(1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i>	(1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i>	(1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i>	(1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i>	(1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i>	(1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i>	(1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i>	(1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	(1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i>	(1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen	(1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng	(1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i>	(1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i>	(1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i>	(1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i>	(1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LÜ Yu-feng, <i>et al.</i>	(1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i>	(1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i>	(1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i>	(1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i>	(1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i>	(1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i>	(1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i>	(1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i>	(1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i>	(1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i>	(1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i>	(1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i>	(1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i>	(1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i>	(1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua	(1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i>	(1438)