

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

**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(卷终)

京津冀区域 PM<sub>2.5</sub> 污染相互输送特征 ..... 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)

顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应 ..... 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)

基于多源数据的 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空分布预测与制图 ..... 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)

华东区域 PM<sub>2.5</sub> 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 ..... 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)

南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 ..... 张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)

菏泽市 PM<sub>2.5</sub> 碳组分季节变化特征 ..... 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)

辽宁典型城市道路扬尘 PM<sub>10</sub> 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 ..... 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)

天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 ..... 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)

高原城市昆明公路隧道大气中 PM<sub>2.5</sub> 理化特征分析 ..... 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)

2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 ..... 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)

不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 ..... 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远 (4983)

ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 ..... 董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)

我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 ..... 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)

新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 ..... 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)

三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 ..... 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)

三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 ..... 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)

太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 ..... 李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)

典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例 ..... 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)

缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 ..... 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)

基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 ..... 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)

北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险 ..... 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)

深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 ..... 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)

供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 ..... 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)

低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 ..... 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)

臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 ..... 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)

碱化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 ..... 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)

MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 ..... 王九妹, 关泽宇, 王金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)

常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 ..... 徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)

载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 ..... 成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)

不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 ..... 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)

ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 ..... 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)

海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 ..... 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)

游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验 ..... 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)

西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 ..... 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)

厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 ..... 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)

SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 ..... 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)

活性污泥中硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的富集及其动力学参数 ..... 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)

pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 ..... 张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)

接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 ..... 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)

活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 ..... 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)

长期暴露下纳米 TiO<sub>2</sub> 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 ..... 李慧婷, 崔福义 (5229)

长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 ..... 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)

不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 ..... 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)

有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 ..... 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)

上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 ..... 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)

大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 ..... 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)

工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 ..... 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)

上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 ..... 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)

基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 ..... 高子翔, 周航, 杨文毅, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)

水稻对气态单质汞的吸收与挥发 ..... 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)

麦田 O<sub>3</sub> 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 ..... 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)

缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 ..... 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)

生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)

成都平原不同类型沟渠 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量特征及其影响因素 ..... 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)

河流 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 排放研究进展 ..... 王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)

《环境科学》第 38 卷(2017 年) 总目录 ..... (5367)

《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

# 三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价

卓海华<sup>1</sup>, 邱光胜<sup>2</sup>, 翟婉盈<sup>1</sup>, 刘云兵<sup>1</sup>, 兰静<sup>1\*</sup>

(1. 长江流域水环境监测中心, 武汉 430010; 2. 长江流域水资源保护局, 武汉 430010)

**摘要:** 三峡工程开建以来, 三峡水库长江干支流水文形势发生了重大变化, 水体流态及悬浮物沉降条件的改变可能导致库区表层沉积物性状的变化. 对 2000~2015 年三峡水库长江干流江津至坝址段和嘉陵江、御临河、乌江、小江、大宁河、香溪河等主要入库支流河口表层沉积物中营养盐含量水平、时空变化及污染状况分析和评价. 结果表明: 干流表层沉积物中总磷各断面含量平均值在 678.2~928.6 mg·kg<sup>-1</sup> 之间, 总氮质量分数平均值在 0.203%~0.362%, 钾元素质量分数平均值在 1.74%~2.37% 之间, 有机质质量分数平均值在 0.94%~1.54% 之间; 支流河口表层沉积物中总磷各断面含量平均值在 490.1~832.3 mg·kg<sup>-1</sup> 之间, 总氮质量分数平均值在 0.257%~0.495%, 钾元素质量分数平均值在 1.69%~2.32% 之间, 有机质质量分数平均值在 1.21%~2.27% 之间. 干支流绝大部分断面表层沉积物中总磷、钾均值与背景值基本相当, 但总氮均值明显高于背景值、有机质均值则显著低于背景值. 干支流各断面沉积物中营养盐含量未表现出明显的岸别差异; 不同的营养盐在沉积物中含量沿程变化趋势呈现出较明显的差异. 不同水期干支流沉积物中营养盐含量存在一定程度的波动; 蓄水对表层沉积物中营养盐含量影响有限, 未出现明显地随蓄水进程而进一步富集现象. 有机指数和有机氮污染评价结果表明, 三峡库区表层沉积物环境状况以较清洁为主, 仅个别支流和局部时段会呈现较明显的有机污染现象, 但均存在较明显的有机氮污染. 三峡库区表层沉积物中营养物质存在一定的生态风险, 营养物质生态风险主要来自 TP 和 TN.

**关键词:** 三峡水库; 表层沉积物; 营养盐; 时空变化; 评价

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5020-12 DOI: 10.13227/j.hjcx.201705127

## Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area

ZHUO Hai-hua<sup>1</sup>, QIU Guang-sheng<sup>2</sup>, ZHAI Wan-ying<sup>1</sup>, LIU Yun-bing<sup>1</sup>, LAN Jing<sup>1\*</sup>

(1. Yangtze Valley Water Environment Monitoring Center, Wuhan 430010, China; 2. Water Resources Protection Bureau of the Yangtze River Basin, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** With the construction of the Three Gorges Dam, the river flow pattern and sediment dynamics are expected to be affected. As a consequence, the sediment traits could be impacted by these changes. The temporal and spatial variation characteristics of the nutrient content from 2000 to 2015 in surface sediment were analyzed in the main stream from Jiangjin to the dam site section of the Yangtze River and in the estuaries of the representative input tributaries of the Three Gorges Reservoir, such as the Jialing River, Yulin River, Wujiang River, Xiaojiang River, Daning River, and Xiangxi River. Then, the state of the pollution was assessed. Results revealed that the average concentrations of total phosphorus (TP) in the surface sediments of the main stream ranged from 678.2 to 928.6 mg·kg<sup>-1</sup>, the average contents of total nitrogen (TN) ranged from 0.203% to 0.362%, the average contents of potassium ranged from 1.74% to 2.37%, and the average contents of organic matter ranged from 0.94% to 1.54%. The average concentrations of TP in the estuaries of the representative input tributaries ranged from 490.1 to 832.3 mg·kg<sup>-1</sup>, the average contents of TN ranged from 0.257% to 0.495%, the average contents of potassium ranged from 1.69% to 2.32%, and the average contents of organic matter ranged from 1.21% to 2.27%. The concentrations of TP and potassium in the study sections were generally within background concentration ranges, while the concentrations of TN were obviously above background levels, and the concentrations of organic matter were obviously below background levels. The nutrient contents in the surface sediment did not display significant differences among the study sites; however, the distributions of different nutrient contents along the river varied widely. Although the nutrient contents in the surface sediments fluctuated somewhat during different flow periods, they were seemingly unaffected by the impoundment, since no obvious enrichment was observed throughout the impoundment. The evaluation of organic index indicated a clean state for the surface sediments in the majority of the study area, while there was a moderately polluted state in some local sections. The evaluation of nitrogen pollution indicated a polluted state for most sections. Overall, the nutrients in the surface sediments of the Three Gorges Reservoir showed moderate ecological risks, possibly caused by TP and TN.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; surface sediments; nutrients; temporal and spatial variation; evaluation

收稿日期: 2017-05-13; 修订日期: 2017-06-16

基金项目: 国务院三峡工程建设委员会办公室三峡水库运行维护管理资金项目 (JJ2015-008); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0402207)

作者简介: 卓海华 (1978~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为流域水环境监测评价, E-mail: harderjoe@sina.com

\* 通信作者, E-mail: 89073107@qq.com

沉积物是湖库生态系统的重要组成部分,是营养盐及其他污染物在水体中的重要归宿和主要储存场所,也是潜在的污染受体和污染源<sup>[1]</sup>. 通常情况下,营养盐会通过泥沙和悬浮物质的沉降、吸附等作用进入沉积物;当超过其负荷时,累积在其中的营养物质则在一定条件下释放到上覆水中,影响湖库上覆水体的质量<sup>[2~13]</sup>. 三峡工程自 1994 年正式动工兴建至 2009 年全线竣工,期间水库经历了 135 m 高程蓄水、156 m 高程蓄水、172 m 高程试验性蓄水,至 2010 年成功蓄水至 175 m 高程. 从天然状态到蓄水运行,三峡水库库区水文情势发生了重大变化,已越来越多地显现出湖泊特性,局部水域已出现富营养化现象<sup>[14~19]</sup>.

随着三峡水库运行和调度方式的变化,水体流态变化及悬浮物沉降条件发生改变,表层沉积物性状也可能发生改变. 因此,研究沉积物中营养盐含量时空变化并进行评价对掌握三峡水库水体富营养化和生态系统状况有重要指导意义. 虽然近年来有机构和学者对三峡库区水质、消落带土壤及局部干支流河段沉积物中营养盐含量进行了相关研究<sup>[20~28]</sup>,但多只针对蓄水过程中的某一时间点,没有对整个三峡工程建设、运行期沉积物中营养物质含量时空变化趋势进行系统分析和评价.

本文首次系统对 2000~2015 年 16 年间(三峡蓄水前至 175 m 蓄水运行后)三峡水库长江干流江津至大坝坝址段和嘉陵江、御临河、乌江、小江、大宁河、香溪河等主要入库支流表层沉积物中总磷、总氮、钾及有机质含量进行分析和评价,以期对三峡水库水环境变迁研究、水污染防治等提供基础数据和科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 监测对象选取

本文选取三峡水库长江干流江津至三峡大坝段的朱沱、铜罐驿、寸滩、清溪场、沱口、官渡口和坝下南津关等 7 个断面及嘉陵江北碛和临江门、御临河河口、乌江武隆、小江河口、大宁河河口、香溪河河口等 6 条主要支流的 7 个断面表层沉积物监测结果进行分析. 朱沱断面位于水库上游,基本不受三峡蓄水回水影响;寸滩断面在三峡水库蓄水至 172 m 高程以上时会受到回水影响;清溪场断面当水库蓄水至 156 m 高程后会受到影响;而沱口和官渡口断面则均会受蓄水影响. 选取以上断面为研究对象,对研究三峡库区表层沉积物中营养物质含量

变化趋势有着较好的代表性.

参照《水环境监测规范》(SL 219)对采样工作的要求,在每个断面设置 2~3 条垂线分别采集表层沉积物. 采样断面布设详见图 1.



图 1 三峡库区研究断面位置示意

Fig. 1 Schematic of the Monitoring Locations in the Three Gorges Reservoir

### 1.2 监测时段及样品检测

在每年 1 月和 7 月分别采集沉积物样品进行监测,其中 1 月为代表枯水期,7 月为丰水期. 三峡水库蓄水前,河道基本保持在自然状态;三峡水库蓄水后,朱沱断面仍处自然状态;下游干支流河段会不同程度受蓄水影响,一般 1 月水库处于高水位运行,水流较缓;7 月处于防洪限制水位运行,水流速度较快.

样品采集后沥去水份,除去砾石、植物残渣等杂物,在室温条件下风干. 风干后的样品用行星式粉碎机进行粉碎,用 100 目的筛子过筛后储存备用. 因水流条件及河床变化等因素,个别采样点采集不到样品或采集上来的样品全部为沙砾,在分析过程中排除了这些因素的影响. 总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法测定,总氮(TN)采用凯式法测定,钾(K)元素采用原子吸收分光光度法测定,有机质(TOM)采用重铬酸钾容量法测定.

### 1.3 评价方法

因当前国内外尚未建立统一的沉积物营养物质污染状况评价标准和方法,本文参考文献[26, 29~33]采用的方法开展污染状况进行评价.

#### 1.3.1 有机指数评价方法和标准

有机指数通常用作评价水域沉积物环境质量状况的指标,评价标准见表 1. 计算方法为:

$$\text{有机指数} = \text{有机碳}(\%) \times \text{有机氮}(\%)$$

式中,有机碳(%) = 有机质(%) / 1.724; 有机氮(%) = 总氮(%) × 0.95.

#### 1.3.2 有机氮评价方法和标准

有机氮是常用来衡量湖泊表层沉积物有否遭受氮污染的重要指标,评价标准见表 2.

表 1 沉积物有机指数评价标准

有机指数	<0.05	≥0.05 ~ <0.20	≥0.2 ~ <0.50	≥0.50
类型	清洁	较清洁	尚清洁	有机污染
等级	I	II	III	IV

表 2 沉积物有机氮评价标准

有机氮/%	<0.0033	0.0033 ~ 0.0066	0.0066 ~ 0.133	>0.133
类型	清洁	较清洁	尚清洁	有机氮污染
等级	I	II	III	IV

### 1.3.3 营养盐污染状况评估

为了评估三峡库区干支流表层沉积物中营养盐受人类活动的影响程度,在研究三峡库区表层沉积物营养盐污染水平和富集特征时采用加拿大安大略省环境和能源部(2002)根据生态毒性效应制定的沉积物质量评价指南<sup>[29]</sup>,按照能够引起水生态环境生态风险效应的营养物(TP、TN和TOM)含量

评价标准及文献[34, 35]中营养盐均值为背景参照值(表3),对沉积物中营养盐的污染水平进行评价并计算富集系数(CF<sub>i</sub>)。富集系数计算公式为:

$$CF_i = c_i/c_{vi}$$

式中,  $c_i$  为第  $i$  种营养盐的实测浓度,  $c_{vi}$  为第  $i$  种营养盐的环境背景参考值。

表 3 沉积物中 TP、TN 和 TOM 评价标准和环境背景值<sup>1)</sup>

项目	级别	TP/mg·kg <sup>-1</sup>	TN/%	TOM/%
加拿大标准	安全级	<600	<0.055	<1.724
	最低级	600 ~ 2000	0.055 ~ 0.480	1.724 ~ 17.240
	严重级	≥2000	≥0.480	≥17.240
背景值 <sup>[34, 35]</sup>		670	0.146	3.100

1) 参照文献[34]中元素含量表述方式,总磷含量单位为 mg·kg<sup>-1</sup>,总氮、有机质及钾元素均采用质量分数表示,下同;安全级指此时水生生物中未发现中毒反应;最低级指沉积物已经受到污染,但是多数底栖生物可以承受;严重级指此时底栖生物群落已遭受明显损害

### 1.4 数据处理

数据经过检查、采用 Grubbs 法剔除异常值等处理后,采用 Microsoft Office Excel 2010 和 IBM SPSS 22 进行处理、统计和分析。

均值在 1.69% ~ 2.32% 之间,有机质平均值在 1.21% ~ 2.27% 之间。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物中营养盐含量特征

#### 2.1.1 营养盐含量分析

将各断面 2000 ~ 2015 年表层沉积物中总磷、总氮、钾、有机质监测成果进行统计分析,结果见表 4,其中给出了上述污染物在沉积物中含量范围、均值、中位值和变异系数。从中可知,干流沉积物中总磷在各断面含量平均值在 678.2 ~ 928.6 mg·kg<sup>-1</sup> 之间,总氮平均值在 0.203% ~ 0.362%,钾元素平均值在 1.74% ~ 2.37% 之间,有机质平均值在 0.94% ~ 1.54% 之间;支流沉积物中总磷在各断面含量平均值在 490.1 ~ 832.3 mg·kg<sup>-1</sup> 之间,总氮平均值在 0.257% ~ 0.495%,钾元素平

均值在 1.69% ~ 2.32% 之间,有机质平均值在 1.21% ~ 2.27% 之间。总体上,三峡水库长江干支流表层沉积物中营养物质含量分布各有特点。干流表层沉积物中总磷含量除官渡口断面外平均值差异不显著,官渡口断面显著高于干流其它断面;支流中除香溪河外总磷含量均值差异也不显著,香溪河河口断面总磷含量均值明显高于支流其它断面;干流各断面总磷含量平均值明显高于除香溪河河口外的其它支流河口断面。嘉陵江临江门和乌江武隆断面表层沉积物中总氮、香溪河钾元素、御临河有机质均值高于干支流其它断面;除此之外,干支流断面总氮、钾元素、有机质均值差异不显著。总氮含量变异系数明显较其他参数大,普遍接近 1 或大于 1。

以文献[34, 35]的研究成果作为背景参照值,2000 ~ 2015 年间三峡库区干流除官渡口外其它各断面表层沉积物中总磷含量均值与背景值基本相

当, 官渡口显著高于背景值; 支流中嘉陵江北碛断面显著低于背景值, 香溪河口正好相反, 其它各断面与背景值基本相当. 钾元素含量均值干支流均与

背景值基本相当. 与背景值相比较, 总氮和有机质含量水平相反, 总氮明显高于背景值, 有机质则显著低于背景值.

表 4 三峡库区表层沉积物营养盐含量统计<sup>1)</sup>

Table 4 Nutrients concentrations in surface sediments of the Three Gorges Reservoir

断面	磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				全氮/%				全钾/%				有机质/%			
	范围	平均值	中位值	CV/%	范围	平均值	中位值	CV/%	范围	平均值	中位值	CV/%	范围	平均值	中位值	CV/%
朱沱	274.0~1050.0	765.3	766.8	17.6	0.023~1.540	0.301	0.139	121	0.978~5.54	1.83	1.64	38.5	0.090~2.68	0.94	0.87	71.2
铜罐驿	421.7~1071.8	743.8	735.1	18.1	0.039~0.918	0.263	0.132	96.5	0.944~4.27	1.82	1.70	36.1	0.019~5.04	1.15	1.17	87.8
寸滩	498.2~1349.0	744.2	709.2	21.5	0.070~1.140	0.288	0.122	110	0.934~3.82	1.74	1.62	33.6	0.072~3.24	1.28	1.34	59.9
清溪场	116.0~1155.0	696.5	702.9	31.7	0.050~1.752	0.362	0.173	116	0.853~4.16	2.00	1.84	33.4	0.091~4.11	1.11	1.11	63.2
沱口	177.9~1015.2	678.2	694.8	25.5	0.060~0.994	0.271	0.140	106	1.077~4.92	1.98	1.93	32.9	0.023~5.00	1.42	1.18	71.6
官渡口	430.9~1611.8	928.6	854.8	26.6	0.039~0.994	0.241	0.127	112	1.017~4.68	2.37	2.19	33.1	0.060~4.43	1.54	1.48	64.6
南津关	316.5~2644.2	745.3	730.9	36.8	0.033~1.270	0.203	0.115	134	0.402~4.13	1.88	1.80	32.2	0.070~3.39	1.30	1.19	57.4
北碛	248.7~1167.6	490.1	466.8	33.9	0.036~0.963	0.298	0.121	105	0.852~3.05	1.69	1.62	28.2	0.111~3.30	1.44	1.27	57.1
临江门	250.6~913.32	604.6	585.3	26.3	0.067~5.330	0.261	0.119	239	0.755~4.31	1.93	1.84	35.5	0.232~4.04	1.53	1.59	50.4
御临河	305.0~971.01	640.6	636.0	21.4	0.081~1.483	0.476	0.127	114	0.819~4.23	2.06	2.05	31.4	0.090~4.52	2.27	2.18	43.1
武隆	286.0~1009.7	648.6	671.5	22.2	0.014~4.550	0.352	0.142	197	0.544~3.06	1.72	1.63	29.3	0.090~3.08	1.21	1.18	56.3
小江	237.0~1057.3	639.0	593.2	26.0	0.028~1.140	0.495	0.138	104	0.814~4.38	2.11	2.08	37.0	0.190~5.59	1.50	1.34	64.9
大宁河	256.7~2115.5	588.2	516.2	55.0	0.022~1.140	0.324	0.135	118	0.745~3.18	1.75	1.67	32.4	0.041~4.91	1.37	1.29	68.3
香溪河	410.1~1189.6	832.3	824.2	19.7	0.070~0.994	0.257	0.132	114	1.246~5.57	2.32	2.17	34.5	0.247~4.36	1.50	1.54	54.2
背景值 <sup>[34,35]</sup>		690				0.146			0.03~4.87	1.86	1.88		0.01~91.5	3.1	2.0	

1) CV: 变异系数, 无量纲

## 2.1.2 营养盐含量空间变化

### (1) 断面不均衡性分析

为研究三峡水库长江干支流相同断面不同测点沉积物中营养盐含量是否存在差异, 以同期左、右两条垂线对应的表层沉积物中营养盐含量的比值为对象进行分析. 图 2 为不同断面左右垂线营养盐含量比值统计结果分布. 从中可见, 干支流各断面营养盐含量比值中位值基本均在 1 附近波动, 并未表现出明显的岸别差异, 这和金属元素在各断面表层沉积物中的表现有所不同<sup>[36]</sup>.

### (2) 沿程不均衡性分析

为简化分析, 以长江干支流各断面营养盐在沉积物中含量多年均值作图(图 3), 从中可见, 不同的营养盐在沉积物中含量沿程变化趋势呈现出较明显的差异.

干流总磷含量自朱沱至沱口段呈下降趋势, 之后先升后降, 官渡口断面达到最高值. 总氮含量在朱沱至清溪场总体呈上升趋势, 至清溪场达到最高值, 之后呈小幅下降趋势. 朱沱、铜罐驿、寸滩、南津关钾盐含量基本相当, 清溪场、沱口和官渡口也基本相当, 但后者要高于前者. 有机质含量除清溪场外, 整体呈现先升高后降低的趋势, 从朱沱的 0.94% 升高到沱口的 1.41%, 然后下降并稳定在 1.30% 左右; 清溪场断面有机质均值为

1.10%.

支流河口断面中, 大宁河河口总磷含量均值最低, 为  $588 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 香溪河口最高, 为  $832 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 其余支流河口断面基本相当, 含量在  $640 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  上下波动; 嘉陵江上游北碛断面总磷含量均值则仅为  $490 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 总氮含量差异较大, 含量最高的乌江武隆断面较最低的大宁河口断面高出约一倍, 其余断面则在这两者之间波动. 钾元素含量香溪河口含量最高, 小江河口次之, 嘉陵江北碛断面最低. 有机质均值御临河河口最高, 达到 2.27%; 嘉陵江、小江、香溪河口基本相当, 均在 1.5% 上下; 大宁河口为 1.36%, 乌江武隆仅为 1.21%.

另外, 干流各断面总磷含量高于绝大部分支流河口断面; 香溪河口断面总磷含量均高于其它干支流断面, 这可能与香溪河上游磷化工生产有关. 干流总氮含量总体低于支流河口, 特别是支流河口断面与其入口附近的干流断面相比较, 如寸滩断面与临江门断面、清溪场与武隆断面、官渡口与香溪河口断面. 钾及有机质含量, 干支流断面则无显著差异.

## 2.1.3 沉积物营养盐含量时间变化

### (1) 不同水期营养盐含量变化

三峡水库是一个河道型巨型水库, 库内水体流

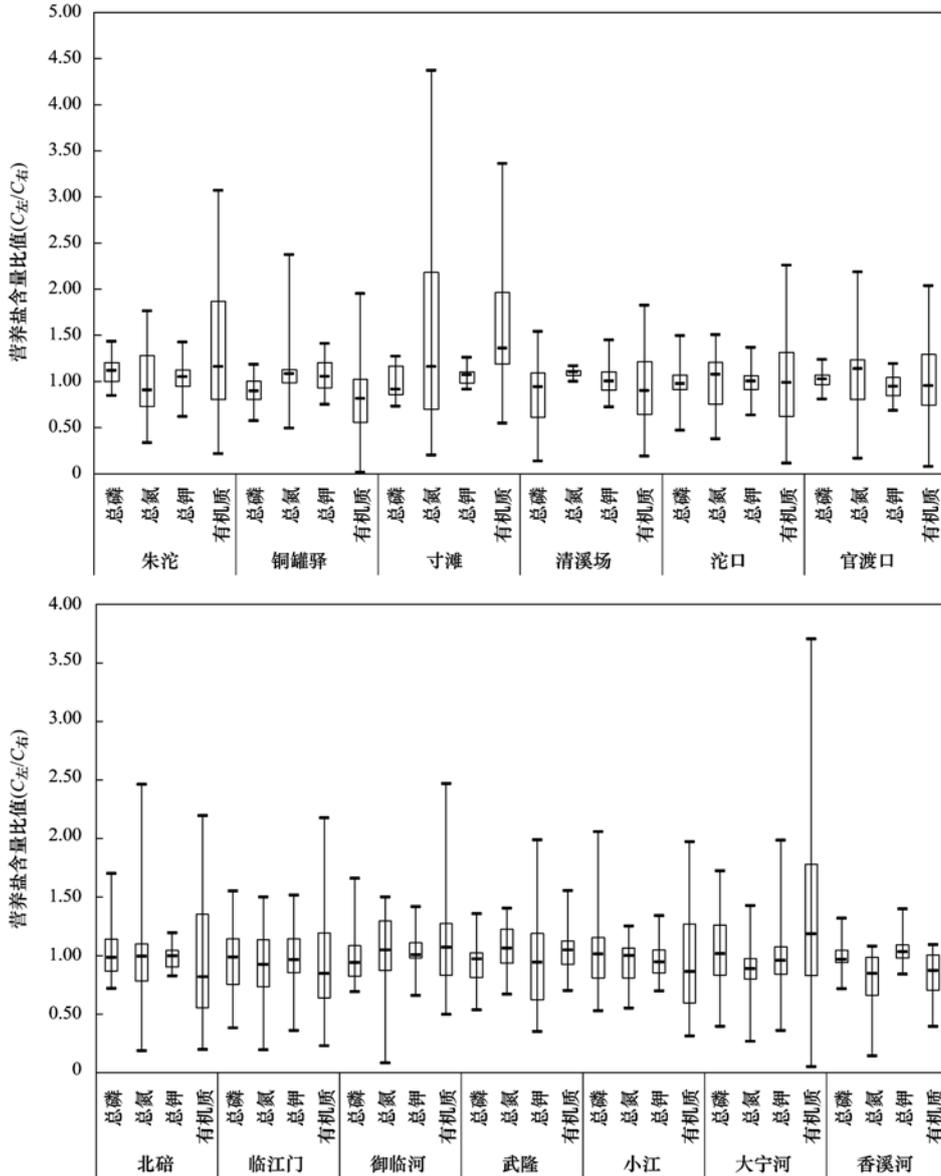


图 2 断面不同测点营养盐含量分布

Fig. 2 Characteristics of the nutrients in the monitoring sections

态受水库调度、水文条件等因素的影响. 自 2003 年开始, 一般情况下水库 1 月处于较高水位运行, 库内流速较缓, 水体中悬浮物沉降条件较好, 蓄清作用明显; 7 月出于防汛需要水库处于较低水位运行, 库内流速较快, 水体中悬浮物沉降条件较差. 流速的变化除会直接影响水体沉积物沉降条件外, 对河床的冲刷程度也会不一样. 为研究三峡库区沉积物中营养盐含量在不同水期是否存在差异, 以 2000 ~ 2015 年 16 年间不同水期监测结果进行对比分析. 为简化分析, 以同年 1 月和 7 月表层沉积物营养盐含量比值进行分析. 图 4 为各断面营养盐在不同水期含量比值统计. 从中可见, 不同水期干支流沉积物中营养盐含量存在一定程度的波动, 有机

质受水期影响最明显, 非汛期表层沉积物中有机质含量明显低于汛期, 即 1 月沉积物中有机质含量大部分年份低于 7 月; 总磷、总氮和钾元素含量在各干支流断面在不同水期存在一定差异, 但差异相对较小.

(2) 不同蓄水期营养盐含量变化

为了便于分析, 以 2000 年作为三峡水库蓄水前代表年, 2004 年作为 135 m 高程蓄水代表年, 2007 年为 156 m 高程蓄水代表年, 2009 年为 172 m 高程实验性蓄水代表年, 2012 年和 2015 年分别为 175 m 高程实验性蓄水代表年和蓄水运行代表年. 不同蓄水时段表层沉积物营养盐含量分布见图 5. 从中可见, 各营养盐在干支流不同断面变化趋势并

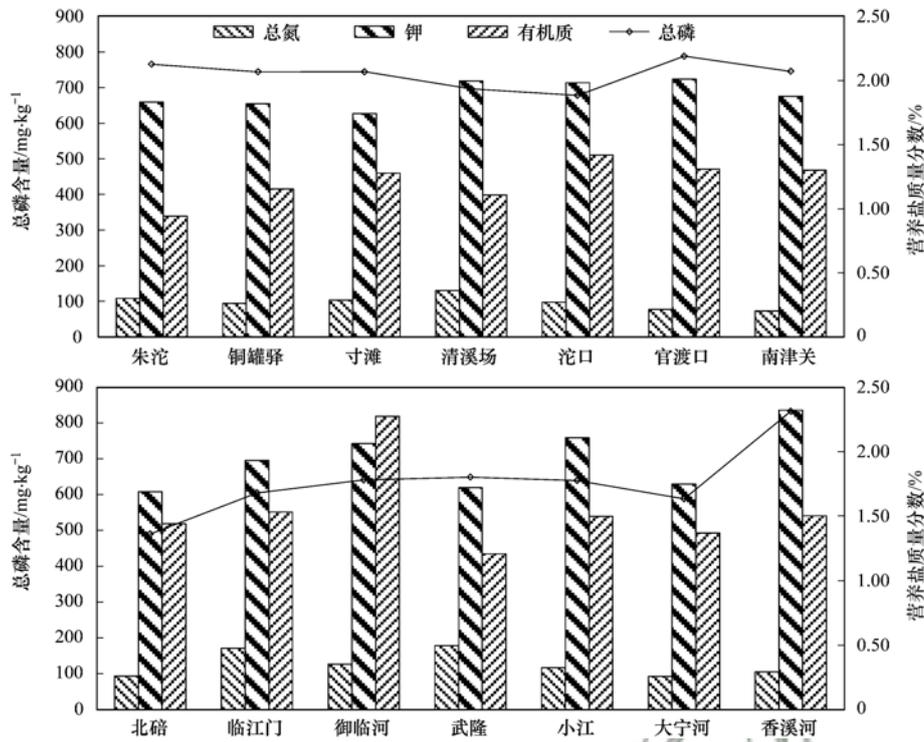


图3 沉积物营养盐含量沿程分布

Fig. 3 Spatial variation of nutrients concentrations in surface sediments

不完全一致,但均无明显趋势.结合蓄水影响范围和各营养盐在表层沉积物中浓度变化趋势综合分析,表明蓄水对表层沉积物中营养盐含量的影响有限,未出现明显的随蓄水而进一步富集的现象.

2.2 三峡库区沉积物营养盐污染评价

2.2.1 有机指数和有机氮污染评价

采用有机指数和有机氮污染评价,三峡库区各监测断面表层沉积物污染状况评价结果统计见表5.从中可见,各监测断面沉积物有机指数评价

结果在 I ~ IV 级均有分布,且总体以符合 II 级标准为主,即水体沉积物环境状况属于较清洁.除御临河外,干支流大部分断面评价结果达到 IV 级标准的比例较低,即呈现有机污染的程度较低;御临河评价结果达到 III ~ IV 级标准的比例分别为 20% 和 40%,已经呈现出较明显的有机污染,值得引起关注.

三峡库区各监测断面表层沉积物有机氮评价结果均达到 III ~ IV 级标准,且大部分断面以 IV 级为

表5 有机指数和有机氮污染评价结果统计/%

Table 5 Assessment of organic index and organic nitrogen pollution in surface sediments/%

断面	有机指数评价				有机氮评价	
	I	II	III	IV	III	IV
朱沱	80.0		20.0		40.0	60.0
铜罐驿	20.0	60.0	20.0		40.0	60.0
寸滩	33.3	50.0		16.7	50.0	50.0
清溪场	16.7	50.0	16.7	16.7	33.3	66.7
沱口		83.3		16.7	50.0	50.0
官渡口	16.7	50.0	16.7	16.7	66.7	33.3
南津关	16.7	66.7	16.7		50.0	50.0
北碚		80.0	20.0		40.0	60.0
临江门		66.7	16.7	16.7	50.0	50.0
御临河		40.0	20.0	40.0	40.0	60.0
武隆	16.7	33.3	33.3	16.7	50.0	50.0
小江	20.0	40.0	40.0		40.0	60.0
大宁河	40.0	60.0			40.0	60.0
香溪河		60.0	20.0	20.0	60.0	40.0

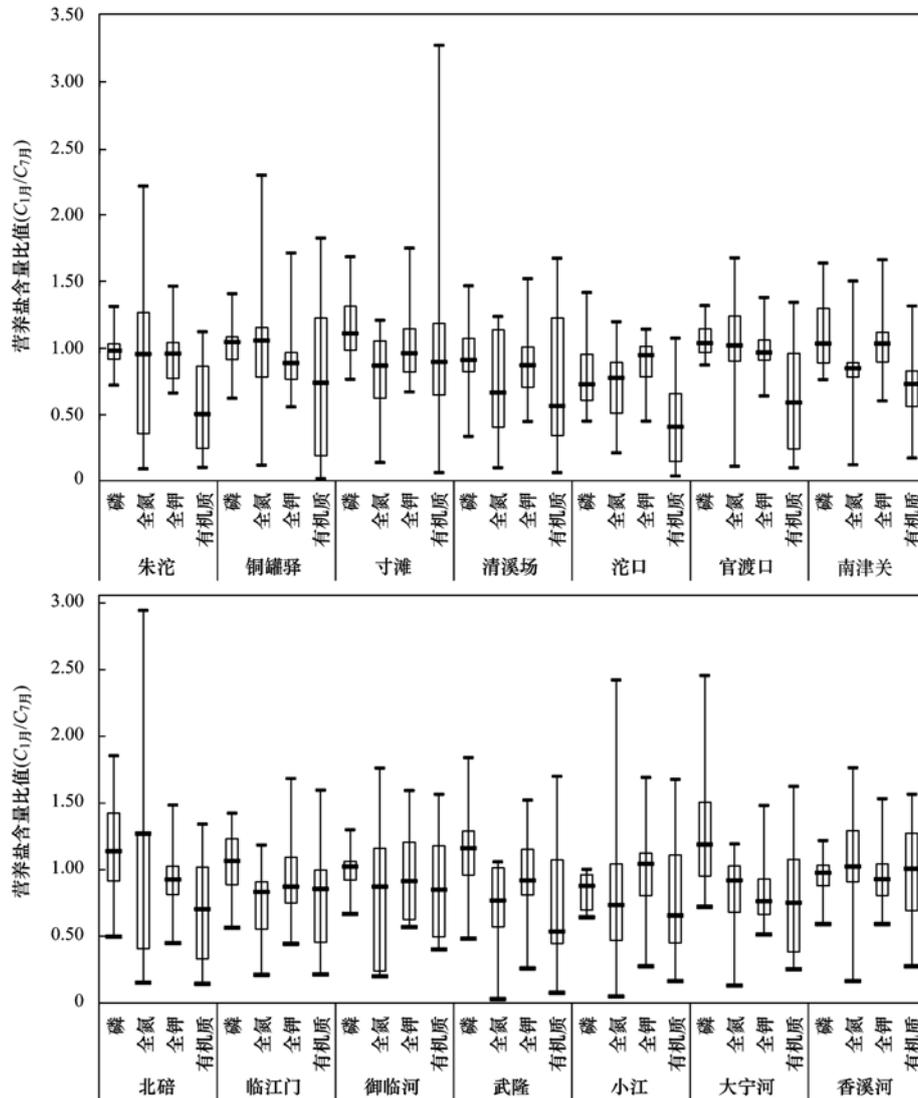


图 4 不同水期表层沉积物营养盐含量分布

Fig. 4 Characteristics of nutrients in surface sediments during different flow periods

主,属于尚清洁~有机氮污染,干支流断面没有明显差异.这说明三峡库区长江干支流表层沉积物有机氮污染程度差异较小,无显著差异.结合三峡库区表层沉积物中营养盐含量时空变化趋势分析成果可知,三峡库区相关水域水体沉积物营养盐污染水平变化与蓄水进程并无显著联系.

沉积物中 C/N 是用来判断沉积物中有机质来源的一个依据,可被用来指示沉积物中有机质是来自藻类还是来自陆生高等植物.内源有机质的 C/N 一般在 4~10,而外源维管束植物一般 14~30<sup>[37, 38]</sup>.统计结果表明(见表 6),近年来三峡库区各监测断面表层沉积物的 C/N 均值为 2.0~6.9,且大部分监测断面表层沉积物的 C/N 值最大值仅略高于 10、且小于 14,干支流无显著差异.这表明三峡库区表层沉积物有机质主要来源于内源有机物

的积累.

沉积物中 C/P 在一定程度上能反映沉积物中有机碳和磷化合物的分解速率,一般表层沉积物中 P 比 C 分解速度快<sup>[39]</sup>.三峡库区长江干流各监测断面表层沉积物的 C/P 均值为 7.2~12.3,支流为 10.6~17.3,支流 C/P 均值总体略大于干流.沉积物中 N、P 含量及比值通常为水中 N、P 聚积、沉积及沉积物溶出、释放两种动态过程的综合反映,在某种程度上反映了水体中营养化状态, N/P 比值的高低与水体富营养化状态有着密切关系.据统计,三峡库区干支流各断面表层沉积物 N/P 平均值范围为 2.5~6.4,支流河口略高于干流断面.与相关报道相比<sup>[26]</sup>,本研究中三峡水库支流河口断面 C/P 均值略偏低,而 N/P 值较高.

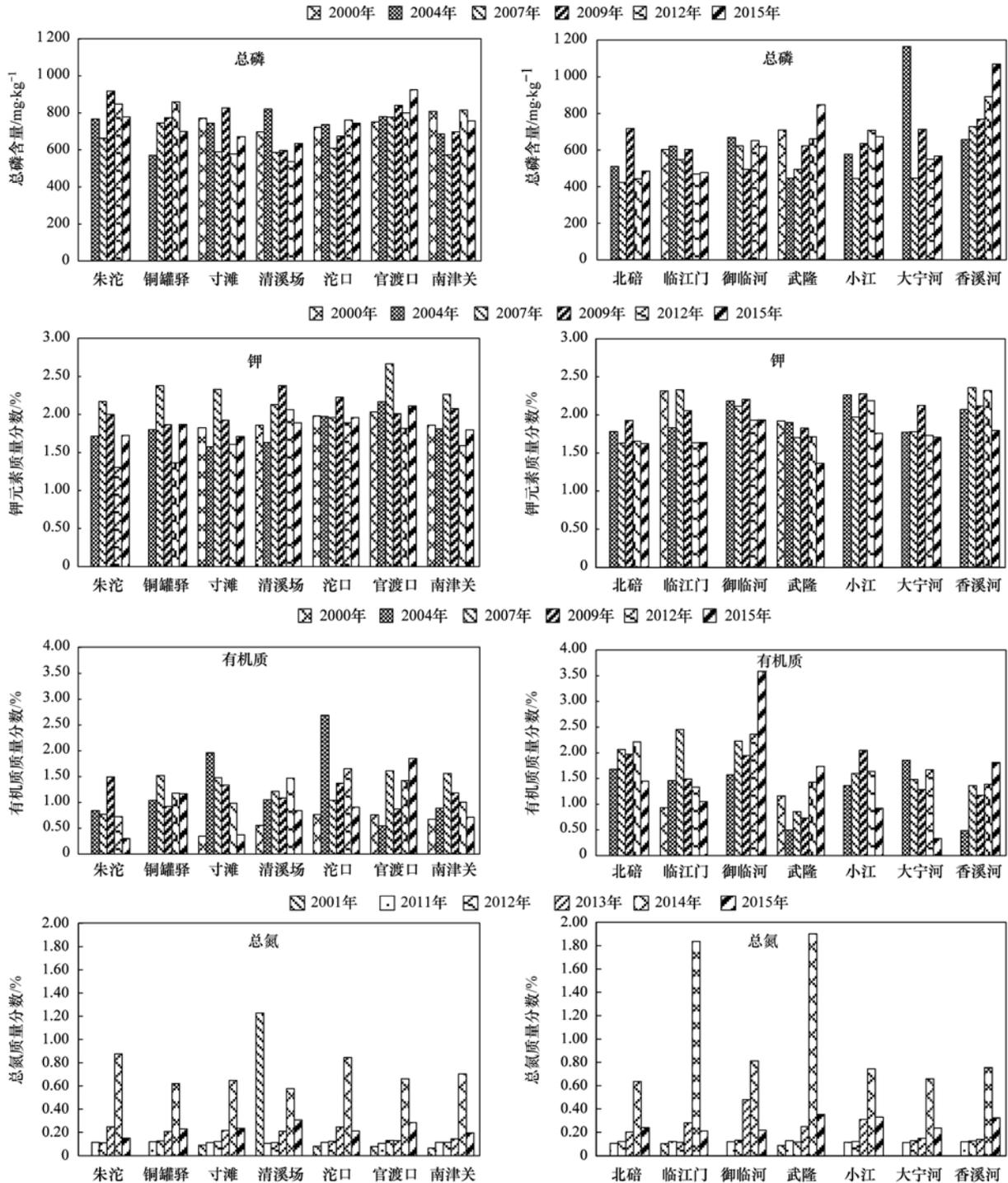


图5 不同蓄水时段表层沉积物营养盐含量分布

Fig. 5 Characteristics of nutrients in surface sediments during different impoundment stages

2.2.2 营养盐污染状况评价

以各断面表层沉积物营养盐污染系数分布情况进行统计分析,2000年以来,三峡库区干支流表层沉积物总磷和 TOM 污染程度较低,基本处于安全级至最低级;总氮污染程度相对较重,绝大部分处于最低级至严重级,且以最低级为主.这表明,三峡库区表层沉积物营养盐含量

虽然局部超过了加拿大安大略省环境和能源部发布的沉积物中能引起水环境生态风险效应的营养物含量评价标准,表层沉积物已受到污染,但总体上仍属于多数底栖生物可以承受的污染水平.以《中国土壤元素背景值》中营养盐背景参照值评价,三峡库区干支流表层沉积物中总磷、总氮均存在较严重的富集现象,且总磷在干

流断面的富集总体大于支流,总氮在干支流断面的富集程度差异不大;TOM 绝大部分干支流断面存在轻度富集现象.可见,三峡库区表层沉积

物中营养物质存在一定的生态风险,但风险总体较低,营养物质生态风险主要来自 TP 和 TN. 营养盐污染状况评价结果统计见表 7.

表 6 表层沉积物营养盐相互关系

Table 6 Relationship of nitrogen and phosphate in surface sediments

断面名称	C/N		C/P		N/P	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
朱沱	0.6~3.9	2.0	2.2~15.2	7.2	1.2~10.9	3.5
铜罐驿	1.2~5.7	2.9	1.8~37.0	10.2	1.3~6.9	3.0
寸滩	0.6~8.0	3.4	1.0~18.0	9.8	1.2~6.1	2.7
清溪场	0.6~7.9	2.9	3.6~17.4	9.6	1.1~17.1	5.6
沱口	0.9~13.0	5.7	3.7~21.1	12.3	1.1~11.2	3.8
官渡口	1.7~11.6	5.2	2.4~18.6	9.8	1.0~7.2	2.5
南津关	0.7~10.5	4.7	4.8~19.3	10.0	0.4~9.9	2.8
北碚	1.1~11.2	4.9	7.3~29.0	17.3	1.7~11.3	4.7
临江门	0.3~7.1	4.5	8.9~25.9	15.0	1.4~31.5	7.6
御临河	2.0~10.8	6.9	11.5~33.6	21.1	1.3~15.1	5.5
武隆	0.4~11.6	4.8	5.3~15.2	10.6	1.2~26.7	6.4
小江	0.7~8.3	3.4	5.2~28.0	14.0	1.5~10.0	4.3
大宁河	0.2~8.0	3.9	3.3~25.3	14.4	1.6~13.0	4.6
香溪河	1.3~8.1	4.5	3.7~19.3	10.6	1.2~8.2	3.0

表 7 营养盐污染状况评价结果统计/%

Table 7 Assessment of the nutrients pollution in surface sediments/%

监测断面	TP				TN				TOM					
	污染水平			CF <sub>i</sub>	污染水平			CF <sub>i</sub>	污染水平			CF <sub>i</sub>		
	安全级	最低级	严重级		安全级	最低级	严重级		安全级	最低级	严重级			
				<1.0	≥1.0			<1.0	≥1.0			<1.0	≥1.0	
朱沱	5.4	94.6		19.6	80.4	10.0	70.0	20.0	60.0	40.0	83.9	16.1	100.0	
铜罐驿	8.0	92.0		26.0	74.0	5.3	73.7	21.0	52.6	47.4	78.0	22.0	96.0	4.0
寸滩	10.0	90.0		32.5	67.5		75.0	25.0	62.5	37.5	65.0	35.0	97.5	2.5
清溪场	28.3	71.7		43.4	56.6	4.8	66.7	28.5	42.9	57.1	86.8	13.2	98.1	1.9
沱口	31.3	68.8		39.1	60.9		79.2	20.8	50.0	50.0	67.2	32.8	93.8	6.2
官渡口	2.4	97.6		6.0	94.0	6.3	78.1	15.6	62.5	37.5	63.1	36.9	92.9	7.1
南津关	20.0	78.6	1.4	37.1	62.9	8.7	82.6	8.7	69.6	30.4	77.1	22.9	95.7	4.3
北碚	78.7	21.3		89.4	10.6	5.0	75.0	20.0	60.0	40.0	66.0	34.0	97.9	2.1
临江门	56.4	43.6		72.7	27.3		85.7	14.3	57.1	42.9	65.5	34.5	96.4	3.6
御临河	41.7	58.3		62.5	37.5		75.0	25.0	55.0	45.0	31.2	68.8	79.2	20.8
武隆	29.5	70.5		49.2	50.8	4.5	77.3	18.2	54.5	45.5	73.8	26.2	100.0	
小江	53.2	46.8		68.1	31.9	10.0	60.0	30.0	55.0	45.0	70.8	29.2	93.8	6.2
大宁河	60.4	37.5	2.1	70.8	29.2	5.0	80.0	15.0	60.0	40.0	66.7	33.3	95.8	4.2
香溪河	8.3	91.7		14.6	85.4		80.0	20.0	65.0	35.0	66.7	33.3	95.8	4.2

### 3 结论

(1) 干流表层沉积物中总磷在各断面含量平均值在 678.2~928.6 mg·kg<sup>-1</sup> 之间,总氮质量分数平均值在 0.203%~0.362%,钾元素平均值在 1.74%~2.37% 之间,有机质均值在 0.94%~1.54% 之间;支流沉积物中总磷在各断面含量平均值在 490.1~832.3 mg·kg<sup>-1</sup> 之间,总氮质量分数平均值在 0.257%~0.495%,钾元素平均值在 1.69%~2.32% 之间,有机质均值在 1.21%~

2.27% 之间.干流表层沉积物中总磷含量除官渡口断面外平均值差异不显著,官渡口断面显著高于干流其余断面;支流中除香溪河外总磷含量均值也差异不明显,香溪河河口断面总磷含量均值明显高于其余断面.干流各断面表层沉积物中总磷含量均值除官渡口外与背景值基本相当,官渡口显著高于背景值;支流中嘉陵江北碚断面显著低于背景值,香溪河河口正好相反,其余各断面与背景值基本相当.钾元素质量分数均值干支流均与背景值基本相当;与背景值相比较,总氮和有机质质量分数水平

正好相反, 总氮明显高于背景值, 有机质均值则显著低于背景值。

(2) 干支流各断面营养盐含量未表现出明显的岸别差异; 不同的营养盐在沉积物中含量沿程变化趋势呈现出较明显的差异, 干流各断面总磷含量高于绝大部分支流河口断面, 香溪河口断面总磷含量均高于其他干支流断面; 干流中总氮含量总体上低于支流断面, 特别是在支流河口断面与其入口附近的干流断面相比; 钾及有机质含量, 干支流断面则无显著的特定分布差异。

(3) 不同水期干支流沉积物中营养盐含量存在一定程度的波动, 有机质受水期影响最明显, 非汛期表层沉积物中有机质含量明显低于汛期, 即 1 月沉积物中有机质含量大部分年份低于 7 月; 总磷、总氮和钾元素含量在干支流各断面水期变化相对较小。不同营养盐在干支流不同断面沿程变化趋势并不完全一致, 但均无明显趋势。结合蓄水影响区域和各营养盐在表层沉积物中浓度变化趋势进行分析, 说明蓄水对表层沉积物中营养盐含量的影响有限, 也未出现随着蓄水进程而进一步富集的现象。

(4) 有机指数评价结果表明三峡库区干支流各监测断面沉积物环境状况以较清洁为主, 但个别河流和局部时段会呈现较明显的有机污染。有机氮评价结果表明, 三峡库区各监测断面表层沉积物环境状况处于尚清洁至有机氮污染, 干支流断面没有明显差异。三峡库区监测断面表层沉积物有机质主要来源于内源有机物的积累。三峡库区表层沉积物中营养物质存在一定的生态风险, 但风险总体较低, 营养物质生态风险主要来自 TP 和 TN。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张晓晶, 李畅游, 贾克力, 等. 乌梁素海表层沉积物重金属与营养元素含量的统计分析[J]. 环境工程学报, 2011, 5(9): 1955-1960.  
Zhang X J, Li C Y, Jia K L, *et al.* Statistical analysis between heavy metals and nutrient elements in surface sediments of Wuliangsu Lake [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(9): 1955-1960.
- [ 2 ] Hu W F, Lo W, Chua H, *et al.* Nutrient release and sediment oxygen demand in a eutrophic land-locked embayment in Hong Kong[J]. Environment International, 2001, 26(5-6): 369-375.
- [ 3 ] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Phosphorus release characteristics of different trophic lake sediments under simulative disturbing conditions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(2-3): 1551-1559.
- [ 4 ] Gomez E, Durillon C, Rofes G, *et al.* Phosphate adsorption and release from sediments of brackish lagoons: pH, O<sub>2</sub> and loading influence[J]. Water Research, 1999, 33(10): 2437-2447.
- [ 5 ] Furumai H, Ohgaki S. Adsorption-desorption of phosphorus by lake sediments under anaerobic conditions[J]. Water Research, 1989, 23(6): 677-683.
- [ 6 ] Varjo E, Liikanen A, Salonen V P, *et al.* A new gypsum-based technique to reduce methane and phosphorus release from sediments of eutrophied lakes: (gypsum treatment to reduce internal loading)[J]. Water Research, 2003, 37(1): 1-10.
- [ 7 ] 叶华香, 臧淑英, 肖海丰, 等. 扎龙湿地表层沉积物营养盐空间分布特征及评价[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11): 1966-1976.  
Ye H X, Zang S Y, Xiao H F, *et al.* Spatial distribution and evaluation of nutrients in surface sediments of Zhalong Wetland [J]. Journal of Natural Resource, 2013, 28(11): 1966-1976.
- [ 8 ] 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 等. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 393-398.  
Lu S Y, Xu M S, Jin X C, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China [J]. Environmental Science, 2012, 33(2): 393-398.
- [ 9 ] Ting D S, Appan A. General characteristics and fractions of phosphorus in aquatic sediments of two tropical reservoirs [J]. Water Science and Technology, 1996, 34(7-8): 53-59.
- [ 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 ] Søndergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark[J]. Hydrobiologia, 1992, 228(1): 91-99.
- [ 12 ] Bates M H, Neafus N J E. Phosphorus release from sediments from Lake Carl Blackwell, Oklahoma [J]. Water Research, 1980, 14(10): 1477-1481.
- [ 13 ] Boström B, Petterson K. Different patterns of phosphorus release from lake sediments in laboratory experiments [J]. Hydrobiologia, 1982, 91: 415-429.
- [ 14 ] 向迎春, 张丽莹, 刘贵强, 等. 三峡水库万州段支流回水区富营养化时空分布研究[J]. 重庆三峡学院学报, 2014, 30(3): 4-9.  
Xiang Y C, Zhang L Y, Liu G Q, *et al.* A spatial and temporal distribution of eutrophication in Wanzhou section tributary backwater area in Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Chongqing Three Gorges University, 2014, 30(3): 4-9.
- [ 15 ] 熊超军, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库汛末 175 m 试验蓄水过程对香溪河库湾水环境的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(5): 648-656.  
Xiong C J, Liu D F, Ji D B, *et al.* Influence of the 175 m trial impoundment of the Three Gorges Reservoir on water environment in the Xiangxi Bay [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(5): 648-656.
- [ 16 ] 刘玉洁, 尹真真. 三峡水库支流回水区富营养化时空分布特征[J]. 环境保护科学, 2014, 40(2): 30-34.  
Liu Y J, Yin Z Z. Space-time distribution of eutrophication in backwater zones of branch rivers in the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Protection Science, 2014, 40(2): 30-34.
- [ 17 ] 邹家祥, 翟红娟. 三峡工程对水环境与水生态的影响及保护对策[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 136-140.  
Zou J X, Zhai H J. Impacts of Three Gorges Project on water

- environment and aquatic ecosystem and protective measures[J]. *Water Resources Protection*, 2016, **32**(5): 136-140.
- [18] 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 等. 三峡水库蓄水过程中神农溪库湾营养盐的动态分布[J]. *中国农村水利水电*, 2017, (3): 103-111.
- Li X, Song L X, Ji D B, *et al.* The dynamic distribution of nutrients in Shennong Bay in the impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017, (3): 103-111.
- [19] 王丹. 三峡库区氮、磷面源污染负荷模拟及水质评价[D]. 重庆: 西南大学, 2016. 15-16.
- Wang D. The load simulation of nitrogen and phosphorus non-point source pollution and water quality assessment in the Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Southwest University, 2016. 15-16.
- [20] 张永生, 李海英, 任家盈, 等. 三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4021-4031.
- Zhang Y S, Li H Y, Ren J Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of nutrients in Daning River sediments and their correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4021-4031.
- [21] 程瑞梅, 刘泽彬, 肖文发, 等. 三峡库区典型消落带土壤化学性质变化[J]. *林业科学*, 2017, **53**(2): 19-25.
- Cheng R M, Liu Z B, Xiao W F, *et al.* Changes of soil chemical properties in typical hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, **53**(2): 19-25.
- [22] 李楚娴, 张金洋, 王定勇, 等. 三峡库区典型消落带土壤氮磷的动态变化特征[J]. *环境化学*, 2014, **33**(12): 2169-2175.
- Li C X, Zhang J Y, Wang D Y, *et al.* Dynamic variations of nitrogen and phosphorus of the soil in hydro-fluctuation of Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(12): 2169-2175.
- [23] 何立平, 刘丹, 于志国, 等. 三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 950-954.
- He L P, Liu D, Yu Z G, *et al.* Distribution and content of transferable nitrogen in the soil of water level fluctuating zones of mainstream and Its tributary of Three Gorges Reservoir Areas during the dry period [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 950-954.
- [24] 何立平, 付川, 谢昆, 等. 三峡库区万州段不同类型消落带土壤磷形态贮存特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(4): 534-541.
- He L P, Fu C, Xie K, *et al.* Soil phosphorus species and storage characteristics of different types in water fluctuation zone of the Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(4): 534-541.
- [25] 石艳. 三峡库区消落带土壤磷素形态转化及水环境释放风险研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015. 1-6.
- Shi Y. Research on characteristics of exogenous phosphorus transformation and release risk of environmental in soils of the water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir areas [D]. Chongqing: Southwest University, 2015. 1-6.
- [26] 封丽, 李崇明, 张韵, 等. 三峡水库运行期支流沉积物营养盐污染评价[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(12): 151-157.
- Feng L, Li C M, Zhang Y, *et al.* Nutrients distribution and pollution evaluation for top-layer sediments in tributaries of Three Gorges Reservoir during water storage period [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(12): 151-157.
- [27] 冉小萌. 三峡库区消落带土壤磷素释放性能及影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016. 1-10.
- Ran X M. Study on the release property and influencing factors of soil phosphorus in the fluctuating zone of Three Gorge Reservoir [D]. Chongqing: Southwest University, 2016. 1-10.
- [28] 娄保锋, 臧小平, 吴炳方. 三峡水库蓄水运用期化学需氧量和氨氮污染负荷研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(10): 1268-1273.
- Lou B F, Zang X P, Wu B F. Study on pollution loads of COD<sub>Cr</sub> and ammonia-N into the Three Gorges Reservoir during operation period from first impoundment to completion [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(10): 1268-1273.
- [29] CCME. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life; summary tables. Updated[R]. Winnipeg, Canada: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2002.
- [30] 张光贵. 洞庭湖表层沉积物营养盐和重金属污染特征及生态风险评价[J]. *水生态学杂志*, 2015, **36**(2): 25-31.
- Zhang G G. Characterization and ecological risk assessment of nutrients and heavy metal pollution in the surface sediments of Dongting Lake [J]. *Journal of Hydroecology*, 2015, **36**(2): 25-31.
- [31] 程先, 孙然好, 孔佩儒, 等. 海河流域水体沉积物碳、氮、磷分布与污染评价[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(8): 2679-2686.
- Cheng X, Sun R H, Kong P R, *et al.* Spatial distribution characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus and pollution status evaluation of sediments in the Haihe River Basin, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(8): 2679-2686.
- [32] 隋桂荣. 太湖表层沉积物中OM、TN、TP的现状与评价[J]. *湖泊科学*, 1996, **8**(4): 319-324.
- Sui G R. Statement and evaluation of organic matter, total nitrogen and total phosphate in surface layer sediments in Taihu Lake [J]. *Journal of Lake Science*, 1996, **8**(4): 319-324.
- [33] Chhatre S, Purohit H, Shanker R, *et al.* Bacterial consortia for crude oil spill remediation [J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(10): 187-193.
- [34] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [35] 重庆市土壤普查办公室. 重庆土壤[R]. 重庆: 重庆市土壤普查办公室, 2003.
- [36] 卓海华, 孙志伟, 谭凌智, 等. 三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4633-4643.
- Zhuo H H, Sun Z W, Tan L Z, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of the heavy metals content in the surface sediment and the potential ecological risk trends in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4633-4643.
- [37] Dean W E. The carbon cycle and biogeochemical dynamics in lake sediments [J]. *Journal of Paleolimnology*, 1999, **21**(4): 375-393.

- [38] 张晓晶, 李畅游, 张生, 等. 乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1770-1776.  
Zhang X J, Li C Y, Zhang S, *et al.* Distribution analysis of nutrient salt in the sediment of Lake Wuliangsu Hai with respect to its effects on the environment[J]. Journal of Agro-environment Science, 2010, 29(9): 1770-1776.
- [39] 何桐, 杨文丰, 谢健, 等. 大亚湾柱状沉积物中 C、N、P 的分布特征及其环境意义[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(4): 524-529.  
He T, Yang W F, Xie J, *et al.* Distribution characteristics and environmental significance of carbon, nitrogen and phosphorus in core sediments of Daya Bay[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(4): 524-529.

## 欢迎订阅 2018 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2018 年为 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

## CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM <sub>2.5</sub> in Jingjinji Region, 2015 .....	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks .....	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM <sub>2.5</sub> Fine Particulates Based on Multi-source Data .....	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM <sub>2.5</sub> in East China .....	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing .....	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM <sub>2.5</sub> in Heze .....	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM <sub>2.5</sub> in Selected Cities in Liaoning Province .....	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin .....	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM <sub>2.5</sub> in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming .....	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015 .....	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus .....	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ( $\delta^2\text{H}$ ) and Oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai .....	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China .....	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO <sub>2</sub> Emissions from the Xin'anjiang Reservoir .....	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area .....	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir .....	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin .....	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin .....	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain .....	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model .....	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing .....	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen .....	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems .....	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter .....	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent .....	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water .....	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate .....	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature .....	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite .....	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes .....	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater .....	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater .....	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process .....	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an .....	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX .....	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms .....	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization .....	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate .....	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor .....	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR .....	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO <sub>2</sub> Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor .....	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta .....	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers .....	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir .....	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai .....	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City .....	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area .....	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai .....	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants .....	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice .....	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield .....	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields .....	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N <sub>2</sub> O Emission in the North China Plain .....	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , and N <sub>2</sub> O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain .....	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions from Rivers .....	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)