

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

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

2010~2015年我国水泥工业NO_x排放清单及排放特征 蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)

兰州市煨炕污染物排放清单及其对PM_{2.5}浓度贡献 郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)

北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征 杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)

郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)

菏泽市冬季PM_{2.5}中二元羧酸类SOA的昼夜变化特征 孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)

我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征 温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)

嘉兴市2015年人为源VOCs排放清单 郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)

上海某石化园区周边区域VOCs污染特征及健康风险 盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)

SBR工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征 杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)

太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应 石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)

巢湖2016年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析 胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)

蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响 彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)

三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响 陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)

纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响 白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)

澜沧江流域水体悬浮颗粒物¹⁵N空间差异及成因分析 唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)

潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律 耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)

蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素 张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)

典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算 熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)

农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响 李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)

城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征 刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)

不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响 葛德, 张守红 (5015)

四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用 王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)

厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用 卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)

光助-二茂铁/H₂O₂非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶 张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)

基于同位素技术的短程硝化过程N₂O产生途径 杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)

基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响 安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)

厌氧/好氧SPNDPR系统实现低C/N城市污水同步脱氮除磷的优化运行 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)

污水处理厂SNAD工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)

盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学 唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)

中试ANAMMOX-ASBR处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性 张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)

碳氮比对颗粒污泥CANON反应器脱氮性能和N₂O释放的冲击影响 付昆明, 姜姍, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)

污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析 房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)

重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析 伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)

韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布 刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)

有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源 杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)

纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α -HCH 姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)

株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征 申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)

生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响 王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)

生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响 俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)

颗粒有机质对水稻稻吸收及转运的影响 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)

施肥对向日葵吸收积累Cd的影响 林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄久如 (5198)

不同水稻品种对重金属的积累特性 曹鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)

芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤 罗佳宸, 李思悦 (5217)

三峡库区典型河流水-气界面CO₂通量日变化观测及其影响因素分析 商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)

富营养化湖区CH₄排放特征及其影响因素 申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)

短期放牧对半干旱草地生态系统CO₂和N₂O排放的影响 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)

覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响 冯兆忠, 袁相洋 (5257)

臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物(BVOCs)影响的研究进展 杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)

地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展 张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)

污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素 《环境科学》征订启事(4848) 《环境科学》征稿简则(4990) 信息(5188, 5216, 5236)

三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响

陈紫娟^{1,2}, 宋献方^{1,3*}, 张应华¹, 魏潇^{1,2}, 唐瑜^{1,2}, 秦文婧^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学中丹学院, 北京 100190; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 三峡水库干流回水对支流水环境的影响研究对水库支流富营养化防治及保障水库水质安全具有重要意义。通过 2016 年 8 月 7~12 日三峡水库低水位运行时对库区长江干流和主要支流进行采样和室内分析, 初步揭示了三峡库区低水位运行时水库水体的水化学特征和研究了干流回水对主要支流水化学特征的影响。结果表明, 对于 EC 值变化范围, 干流为 291~336 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 支流不受干流回水影响水体为 183.7~518 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 受干流回水影响水体为 267~330 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 接近干流。对于氢氧同位素特征 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布范围, 干流为 -81.60‰~-75.16‰和 -11.57‰~-10.26‰, 支流不受干流回水影响水体为 -59.94‰~-43.67‰和 -9.00‰~-6.04‰, 受干流回水影响水体为 -77.85‰~-50.75‰和 -11.06‰~-7.33‰, 接近干流, 与 EC 值和主要阴阳离子质量浓度值表现规律一致, 表明干流通过回水影响支流水体组成进而影响支流水化学特征, 且支流受干流回水影响程度与支流河口距三峡大坝距离和支流自身流量大小呈负相关。支流不受干流回水影响的水体水化学特征与支流流域属性有关, 人口密度大、耕地比例高的支流流域其水质较差。干流回水对水质较优的支流起污染作用, 对水质较差的支流起稀释优化作用。

关键词: 三峡水库; 主要支流; 干流回水; 水化学特征; 氢氧同位素特征; 土地利用

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-4946-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201803061

Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level

CHEN Zi-juan^{1,2}, SONG Xian-fang^{1,3*}, ZHANG Ying-hua¹, WEI Xiao^{1,2}, TANG Yu^{1,2}, QIN Wen-jing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and the Surface Process, Institute of Geographical Science and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. School of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To prevent the eutrophication of tributaries and guarantee water quality and safety in the Three Gorges Reservoir, research on the impact of mainstream backwater on tributary water environments is of great significance. The investigation and sampling of the Yangtze mainstream and its major tributaries in the reservoir region were performed from August 7 to August 12, 2016, through which the overall hydrochemical environment of the Three Gorges Reservoir has been revealed, and the impact of mainstream backwater on the hydrochemical characteristics of main tributaries has been determined during the low water level operation period. The results showed the following: ① The electrical conductivity of the mainstream varied from 291 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ to 336 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, whereas that of the mainstream backwater unaffected zone of the tributary varied from 183.7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ to 518 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. The electrical conductivity of the mainstream backwater affected zone of the tributary varied from 267 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ to 330 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, which was close to the mainstream variation range. ② The variation range of the δD and $\delta^{18}\text{O}$ values of the mainstream were -81.60‰~-75.16‰ and -11.57‰~-10.26‰, whereas that of the mainstream backwater unaffected zone of tributaries were -59.94‰~-43.67‰ and -9.00‰~-6.04‰; those of the mainstream backwater affected zone of tributary were -77.85‰~-50.75‰ and -11.06‰~-7.33‰, which showed the same pattern as those of electrical conductivity and mass concentration of main anions and cations. This means that the mainstream affected the waterbody composition of tributaries through backwater as well as the chemical characterization of tributary water. The extent of mainstream backwater influence on tributaries was negatively correlated to the distance between the tributary estuary and Three Gorges Dam as well as tributary discharge. The hydrochemical characteristics of the mainstream backwater unaffected zone of the tributary were related to the tributary catchment properties. Tributaries with denser populations and higher proportions of cultivated land have poorer water quality. Mainstream backwater can pollute tributaries of better water quality and optimize those with poor water quality.

Key words: Three Gorges Reservoir; main tributaries; mainstream backwater; water chemical characteristics; hydrogen and oxygen isotopic characteristics; land use

收稿日期: 2018-03-21; 修订日期: 2018-04-20

基金项目: 中国科学院 STS 计划项目 (KFJ-EW-ST5-007)

作者简介: 陈紫娟 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水循环与水环境, E-mail: 1099586137@qq.com

* 通信作者, E-mail: songxf@igsnr.ac.cn

三峡工程是世界上最大的水利枢纽工程, 正常蓄水位 175 m, 总库容 393 亿 m^3 , 在防洪、发电、航运等方面发挥巨大综合效益的同时对其流域水环境也产生了深远的影响^[1]. 三峡水库蓄水前, 水库支流呈自然河流状态, 无水华发生, 支流水环境主要由支流所在的流域特征决定. 自 2003 年三峡水库蓄水运行后, 干流水位抬升并向支流河口进行回水, 回水顶托使支流流速变缓, 库区支流由河流态河道变成了回水库湾, 呈现出内陆湖泊水文状况, 支流库湾水环境容量降低的同时, 干流回水输入的大量营养物质使得支流水环境状况进一步恶化, 水华频发^[2,3]. 在水库运行至 175 m 时, 位于库首、库中及库尾的支流受到了不同程度干流回水的影响^[4-7]. 监测结果表明, 2016 年 1~12 月三峡库区 38 条主要支流水体处于中度富营养化状态的断面比例为 53.2%~93.5%^[1]. 三峡库区次级河流的水质状况将直接影响三峡水库的水质安全, 因而干流回水对支流库湾水环境的影响研究对三峡水库富营养化防治及保障水库供水安全具有重要意义, 已成为近年来三峡生态环境问题的热点.

前人在库区水质评价, 库湾营养盐来源及迁移转化, 库湾水流流态和水华消长机制, 水库生态调度方式等方面已做了大量研究并取得了显著成果, 主要有: ①针对三峡水库不同蓄水阶段和蓄水时期对库区水体进行调查和水质评价, 认为蓄水前后干流水质较为稳定且略有好转但支流库湾水质恶化, 水华频发^[2,8]; ②利用常量离子或同位素示

踪、水温或流速监测等方法针对一条或多条支流开展了库湾水动力特性研究, 认为三峡水库蓄水后支流库湾普遍存在分层异重流现象^[9-12]; ③在对库湾营养盐分布特征研究的基础上, 认为支流库湾营养盐主要来自干流倒灌输入且是支流藻类生长的重要物质基础^[13-19]; ④在对库湾藻类生长调查研究的基础上, 结合库湾水力学特性分析, 认为分层异重流驱动下的混合层的关系变化才是决定水华生消的关键并由此提出防治支流水华的水库生态调度方式^[20-24]. 这些研究多聚焦在三峡水库高水位运行时期和库区一条或多条支流(主要是库首支流)的调查分析. 为揭示完整的水库运行周期内干流回水对支流的最低影响, 本研究在三峡水库低水位运行时对库首至库尾的 11 条支流开展了现场调查和采样, 通过水样主要阴阳离子分析和氢氧同位素组成分析, 讨论了三峡水库低水位运行时干流回水和人类活动对主要支流水环境的影响, 有助于更全面地认识和掌握三峡水库运行对支流水环境的影响规律.

1 研究区概况

三峡水库位于东经 $106^{\circ}0' \sim 111^{\circ}50'$, 北纬 $28^{\circ}30' \sim 31^{\circ}50'$ (图 1), 东起湖北省宜昌, 西迄重庆巴县, 总长达 660 km, 水库干流水面宽 700~1700 m, 平均宽度 1100 m, 是一个典型的河道型水库, 涉及了重庆市和湖北的 21 个县市, 水库面积约为 1084 km^2 , 库区面积 5.4 万 km^2 . 库区属于湿润亚

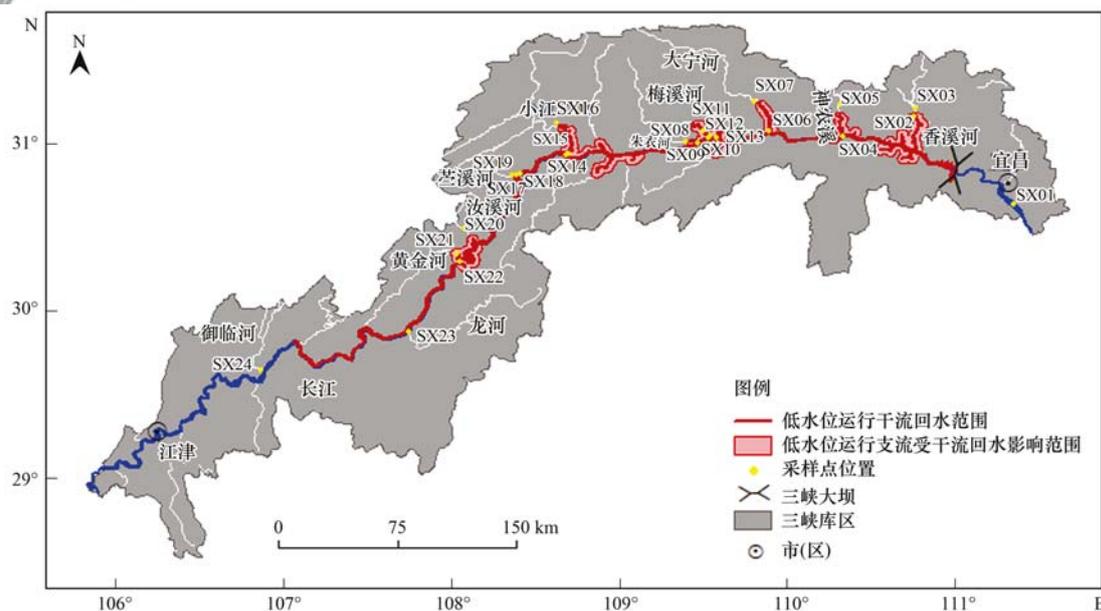


图 1 三峡水库低水位运行时干流回水影响范围及采样点位置示意

Fig. 1 Mainstream backwater affected zone of the Three Gorges Reservoir in low water level operation period and location of sample sites

热带季风气候,年平均气温 17~19℃,1月平均温度 3.6~7.3℃.

水库入库多年平均径流量 2 692 亿 m^3 , 出库多年平均径流量 4 292 亿 m^3 , 总库容、防洪库容和兴利库容分别为 393、221.2 和 165 亿 m^3 , 79% 的径流量集中在汛期 6~10 月. 2003 年 6 月前, 三峡大坝未运行前水位通常在 65~78 m 范围变动, 2008 年 11 月后, 三峡水库开始 175 m 试验性蓄水, 之后水库每年调度均经历蓄水期(9~10 月)、高水位运行期(11 月~次年 2 月, 175 m)、泄水期(3~6 月)和低水位运行期(7~8 月, 145 m)四个阶段. 三峡水库高水位(175 m)运行时, 干流回水末端在重庆江津市花红堡; 低水位(145 m)运行时, 干流回水末端在重庆长寿区朱家镇附近.

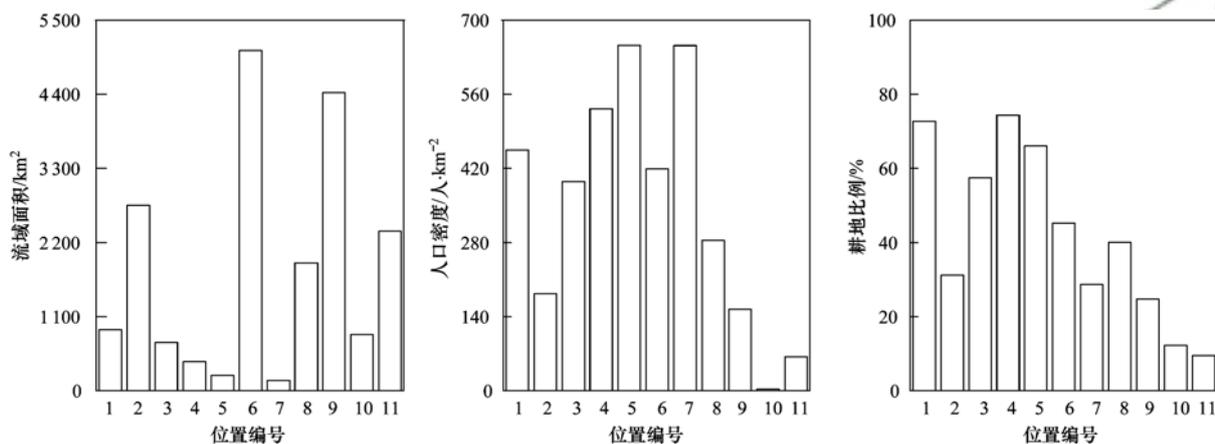
三峡水库低水位(145 m)运行时干流回水影响

范围即三峡水库最低影响范围如图 1 所示.

在库区长江 38 条主要支流中选取目前监测和研究相对较多的 11 条支流进行采样调查, 采样涉及的支流为从库首到库尾位于干流左岸 10 条一级支流和 1 条位于右岸库尾的一级支流, 分别为香溪河、神农溪、大宁河、梅溪河、朱衣河、小江、芑溪河、汝溪河、黄金河、御临河和龙河. 这些支流在三峡水库低水位(145 m)运行时回水末端距河口距离为: 香溪河 29.0 km、神农溪 18.3 km、大宁河 27.5 km、梅溪河 16.9 km、朱衣河 4.9 km、小江 27.5 km、芑溪河 1.0 km、汝溪河 5.6 km、黄金河 5.1 km、龙河 0 km、御临河 0 km.

本研究中涉及的支流流域概况如图 2 所示.

采样点所在河流与受干流回水影响情况如表 1 所示.



位置编号: 1. 御临河, 2. 龙河, 3. 黄金河, 4. 汝溪河, 5. 芑溪河, 6. 小江, 7. 朱衣河, 8. 梅溪河, 9. 大宁河, 10. 神农溪, 11. 香溪河

图 2 主要支流流域概况

Fig. 2 General properties of main tributary basins

表 1 采样点所在河流及受干流回水影响情况¹⁾

Table 1 Locations of water samples and affected status

采样点编号	所在河流	干流回水影响	采样点编号	所在河流	干流回水影响
SX01	干流	—	SX13	干流	—
SX02	香溪河	√	SX14	干流	—
SX03	香溪河	×	SX15	小江	√
SX04	干流	—	SX16	小江	×
SX05	神农溪	×	SX17	芑溪河	√
SX06	大宁河	√	SX18	干流	—
SX07	大宁河	×	SX19	芑溪河	×
SX08	朱衣河	×	SX20	汝溪河	×
SX09	朱衣河	√	SX21	黄金河	√
SX10	干流	—	SX22	干流	—
SX11	梅溪河	√	SX23	龙河	×
SX12	梅溪河	√	SX24	御临河	×

1) √表示受干流回水影响; ×表示不受干流回水影响; —表示干流

2 材料与方法

2.1 现场采样与测试

本研究在 2016 年三峡水库低水位运行期间 8 月 7 ~ 12 日按照左岸库首-左岸库尾-右岸库尾支流顺序, 分支流受干流回水影响、支流不受干流回水影响和干流沿程三种点的类型对三峡库区 11 条一级支流和干流沿程进行了地表水采样, 采样期间三峡水库水位在 147.04 ~ 148.53 m 范围内波动(中国长江三峡集团公司水情信息: <http://www.ctg.com.cn/sxjt/sqqk/index.html>). 三峡水库水位采样点位置图如图 1 所示. 共采取干支流表层水水样 24 个. 现场测试水温、pH 值、电导率(EC)等指标, 并采用酸滴定法于采样 12 h 内分析碱度, 分光光度计法分析氨氮浓度.

2.2 室内分析

所有水样根据取样量用 50 和 100 mL 标准塑料瓶装好带回室内分析. 主要阳离子的室内分析由电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Perkin-Elmer Optima 5300DV)测定, 检测限为 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 主要阴离子的测定由离子色谱仪(ICS-2100, Dionex, America)测定, 检测限为 $1 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 测定精度为 1%, 阴阳离子分析均在中国科学院地理科学与资源研究所理化分析中心进行. 水样的氢氧同位素组成在中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室进行测定, 测定仪器为液态水同位素分析仪(DLT-100, Los Gatos Research Inc., USA), 测定结果以相对维也纳标准平均海水(vienna standard mean ocean water, VSMOW)的千分偏差表示, 测定精度分别为 $\pm 1\text{‰}$ (δD)和 $\pm 0.2\text{‰}$ ($\delta^{18}\text{O}$).

2.3 土地利用和人口空间分布数据获取

本研究中的土地利用和人口空间分布数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>). 在 ArcGIS 软件中, 基于 DEM 数据, 划分了 62 个子流域, 将流域土地利用和人口空间分布数据与子流域边界叠加分析, 获取采样点所在子流域土地利用数据和人口空间分布数据.

3 结果与讨论

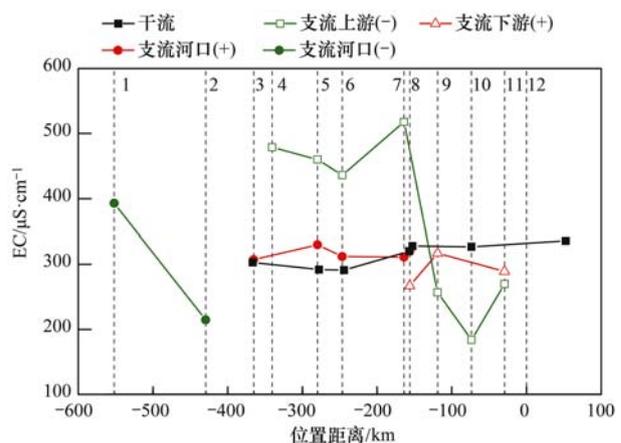
3.1 库区河水 EC 值空间分布特征

流域内地表水水化学组成反映了水体在运移过程中经历的物理化学过程^[25], EC 值描述了水体中阴阳离子的浓度, 一定程度上能说明水质情况^[26].

三峡库区长江干流水体 EC 值沿程变化较支流 EC 值变化范围小(图 3), 为 $291 \sim 336 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 沿程变化不大. 郭胜等^[27]对长江干流三峡区段水质研究结果显示, 2008 年三峡水库低水位运行期干流沿程 EC 值变化范围为 $241 \sim 458 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 其变化范围较本文研究所得范围大, 可能是因为采样时期和采样频率的不同, 但研究中同样指出沿程随流量增加电导率无明显变化趋势.

不受干流回水影响的采样点 EC 值变化范围较大, 为 $183.7 \sim 518 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 图 3 显示其分布与干流 EC 值相差较大; 而受干流回水影响的采样点 EC 值变化范围为 $267 \sim 330 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 与干流 EC 值较为接近(图 3). 姜伟等^[26]对库区支流澎溪河和磨刀溪不同断面电导率-深度图谱和温度-深度图谱研究结果表明, 依据 EC 值可判断出三峡库区长江干流到达支流的回水长度, 水体 EC 值的变化对三峡库区支流回水区域具有指示作用. Holbach 等^[15]的研究中利用 EC 值区分回水区的干流水体和支流水体. 在本研究中, 在不受干流回水影响和受干流回水影响水体的 EC 值特征分析中也同样得出了 EC 值对干流回水的指示作用.

众多关于长江的研究中均指出干流由于接受了长江上游流域大面积的污染入库负荷, 因而水质较差, 污染物浓度背景值较高^[28]. EC 值反映了水中电解质的含量, 是衡量水质的重要指标. 因此, 仅从 EC 指标来看, 一些 EC 值较干流高的支流水质



图例: “+”表示受回水影响, “-”表示不受回水影响; 横坐标为支流河口相对三峡大坝位置, 负值表示上游, 正值表示下游; 图内数值: 1. 御临河, 2. 龙河, 3. 黄金河, 4. 汝溪河, 5. 茨溪河, 6. 小江, 7. 朱衣河, 8. 梅溪河, 9. 大宁河, 10. 神农溪, 11. 香溪河, 12. 三峡大坝, 下同

图 3 三峡库区采样点水体 EC 值分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of EC values of water samples in the Three Gorges Reservoir region

较干流更差.

3.2 库区河水主要阴阳离子质量浓度空间分布特征

结合图 4、图 5 和表 2 可以看出,对 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 质量浓度而言,干流水体较为均一,沿程变化不大;不同支流上游来水(不受干流回水影响)由于支流流域之间不同的地理环境和人类活动等因素影响而离子质量浓度相差

较大,在图表中分别表现曲线波动范围大和浓度变化范围大;支流受干流回水影响部分的水体在图表中曲线波动范围和质量浓度值变化范围相对而言较小,且与干流水体接近.对于 HCO_3^- 和 NO_3^- 而言,其没有表现出与其他离子同样的规律性指示水团混合的干流回水影响,因此判断这两种离子质量浓度受采样点周围的人类活动或其他因素影响更大.

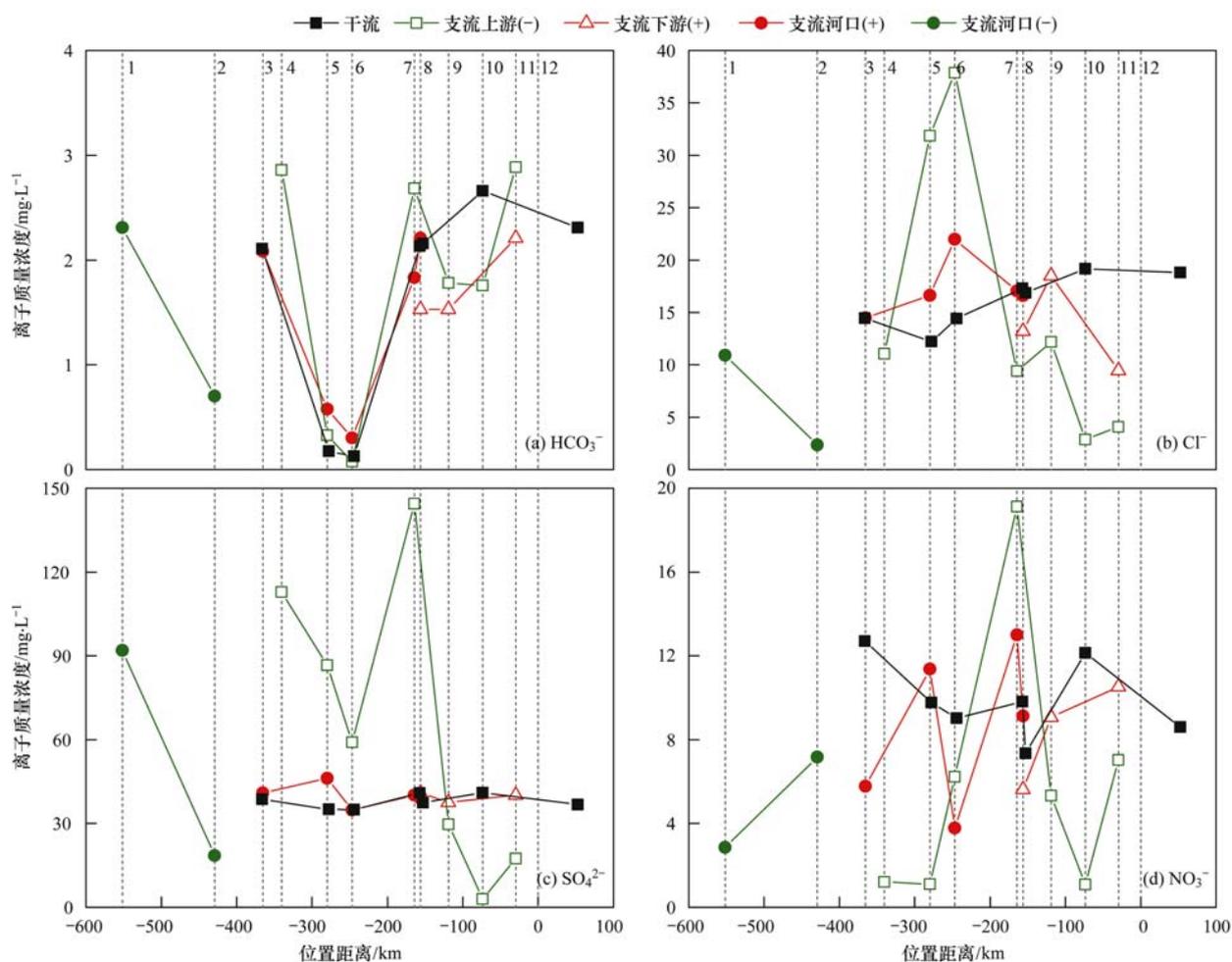


图 4 三峡库区采样点水体主要阴离子 (HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^-) 质量浓度值分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of main anions (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , and NO_3^-) of water samples in the Three Gorges Reservoir region

表 2 库区水体主要阴阳离子 (Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+}) 质量浓度值分布范围/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Distribution range of the concentration values of main anions and cations (Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , and Mg^{2+}) in the waterbody of the Three Gorges Reservoir/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

离子类型	支流质量浓度范围 (不受干流回水影响)	支流质量浓度范围 (受干流回水影响)	干流质量浓度范围
Cl^-	2.36 ~ 37.89	9.47 ~ 21.98	12.21 ~ 19.17
SO_4^{2-}	2.95 ~ 144.50	34.75 ~ 46.11	34.97 ~ 41.05
K^+	0.59 ~ 7.50	2.33 ~ 3.09	2.25 ~ 2.68
Ca^{2+}	23.09 ~ 59.68	27.46 ~ 39.84	33.84 ~ 37.97
Na^+	2.54 ~ 27.94	8.46 ~ 16.04	10.34 ~ 14.67
Mg^{2+}	3.64 ~ 18.24	6.86 ~ 9.53	7.91 ~ 9.32

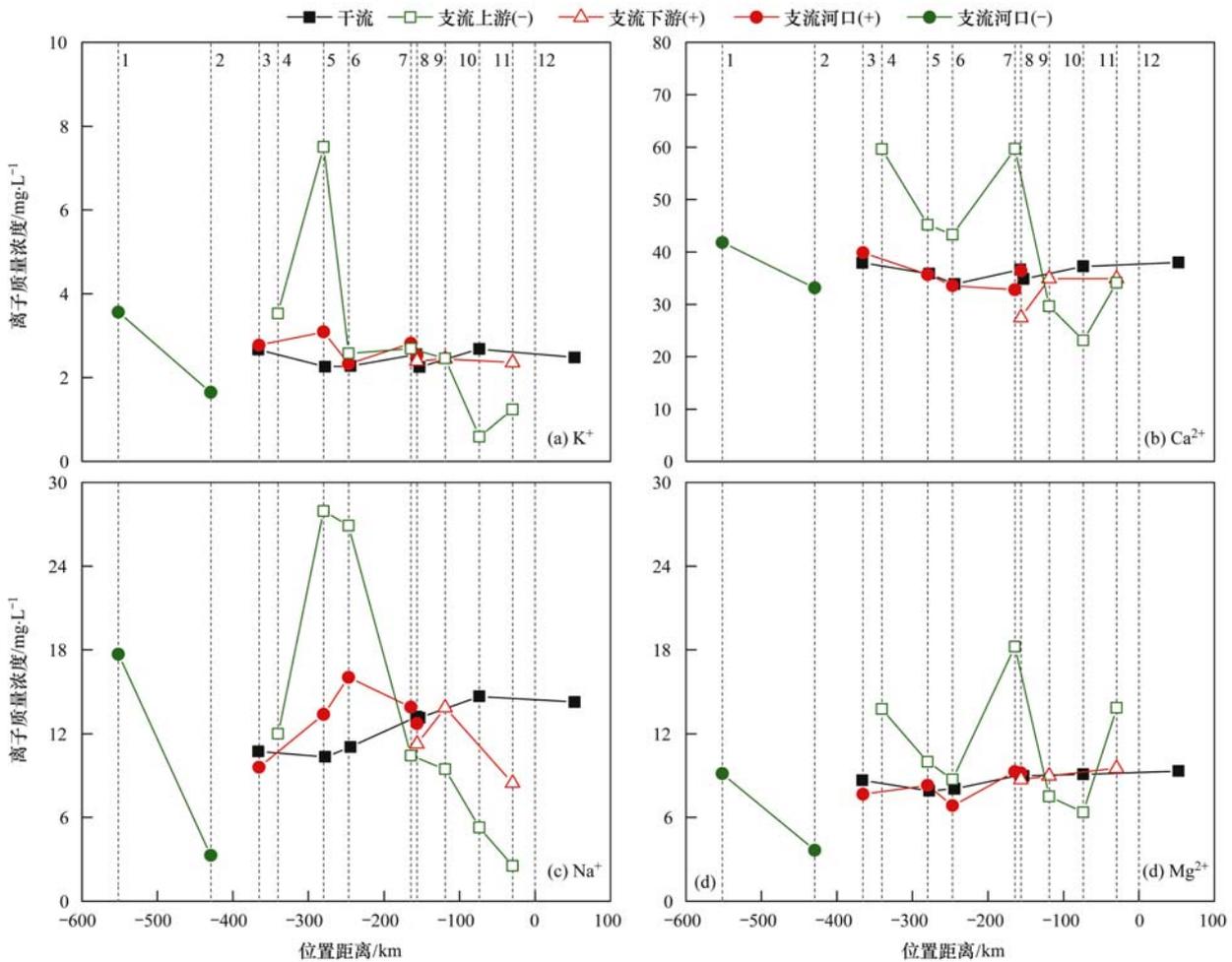


图5 三峡库区采样点水体主要阳离子(K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺)质量浓度值分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of main cations (K⁺, Ca²⁺, Na⁺, and Mg²⁺) of water samples in Three Gorges Reservoir region

3.3 库区河水 δD 和 δ¹⁸O 值空间分布特征

干流回水可通过影响支流水体组成从而影响其主要阴阳离子组成。因库区干支流水体来源不同，氢氧同位素特征差异较大(图6)，氢氧同位素作为一种应用广泛效果良好的水源混合指示剂^[29]，在此不仅可以用于判断不同支流受干流的回水影响程度，也可以用于解释支流水化学特征如 EC 值和主要阴阳离子浓度在本次研究中如此表现的原因。

从图6可看出，长江干流 δD 和 δ¹⁸O 值沿程变化不大，分布范围分别为 -81.60‰ ~ -75.16‰ 和 -11.57‰ ~ -10.26‰。丁梯平等^[30]的研究结果表明，2003、2005 和 2007 年低水位运行期(7 月)长江干流三峡区段 δD 和 δ¹⁸O 值分布范围为 -81‰ ~ -55‰ 和 -12.3‰ ~ -8‰。因不同的干湿年份和不同的采样点干流沿程 δD 和 δ¹⁸O 值的分布范围与本研究所得有所差异，且注意到三峡水库自 2008 年以后才开始 175m 蓄水。但整体来看，本文所得 δD 和 δ¹⁸O 值分布范围落在丁梯平等人研究同期的

长江干流三峡区段 δD 和 δ¹⁸O 值分布范围。

支流不受干流回水影响水体较干流富重同位素，δD 和 δ¹⁸O 值分布范围分别为 -59.94‰ ~ -43.67‰ 和 -9.00‰ ~ -6.04‰，周毅等^[31]的研究也指出，长江上游地区支流河水同位素明显富集于干流水。支流受干流回水影响水体 δD 和 δ¹⁸O 值分布范围分别为 -77.85‰ ~ -50.75‰ 和 -11.06‰ ~ -7.33‰，介于干流水体和支流不受干流回水影响水体分布范围之间，这与库区水体 EC 值和主要阴阳离子浓度值规律表现一致。注意到回水影响区水体位于非回水影响区下游，通常情况下，河水中 δD 和 δ¹⁸O 值与流程存在正相关关系，河流沿程水体经受蒸发而更富重同位素^[32]，而此处位于下游的回水影响区水体因受贫重同位素的长江干流回水影响，下游水体表现为较上游水体贫重同位素。Yang 等^[33]在对库首支流香溪河的研究中也指出受回水影响的支流河口较支流上游贫重同位素。

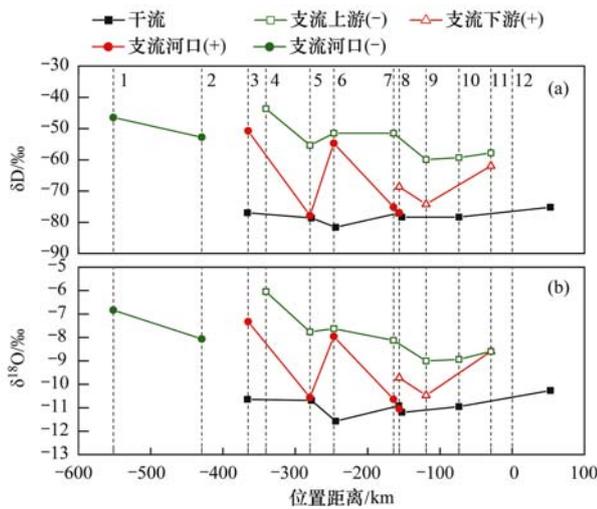


图6 三峡库区采样点水体 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of δD and $\delta^{18}O$ values of water samples in the Three Gorges Reservoir region

不同支流受干流回水影响程度不同,以库腹支流为例,梅溪河、朱衣河、芘溪河表现为支流河口 δD 和 $\delta^{18}O$ 值接近干流 δD 和 $\delta^{18}O$ 值,小江表现为支流河口比支流上游更贫重同位素但不接近干流 δD 和 $\delta^{18}O$ 值. 前面讨论已知,支流河口水体作为支流上游来水和长江干流回水混合的结果,且在支流上游来水与长江干流回水氢氧同位素组成差异较大的情况下,适用于二元线性混合模型^[34]. 二元线性混合模型如式(1)所示:

$$\delta_{\text{混合}} = f \times \delta_A + (1 - f) \times \delta_B \quad (1)$$

式中, $\delta_{\text{混合}}$ 为水源 A 和水源 B 混合水体中的同位素千分偏差值(‰); δ_A 和 δ_B 分别为水源 A 和水源 B 的同位素千分偏差值(‰); $f = A/(A + B)$ 为水源 A 在 $\delta_{\text{混合}}$ 中的组分; $(1 - f)$ 则为水源 B 在 $\delta_{\text{混合}}$ 中的组分.

应用到本研究范围此式可变为:

$$\delta_{\text{支流河口水体}} = f \times \delta_{\text{干流回水}} + (1 - f) \times \delta_{\text{支流上游来水}}$$

利用上式和水体 $\delta^{18}O$ 值计算了朱衣河、小江和芘溪河支流河口水体由支流上游来水和干流回水的混合比例. 计算结果显示,朱衣河河口水体干流回水占 89.96%,小江为 8.61%,芘溪河为 95.56%,为芘溪河 > 朱衣河 > 小江. 三条支流离三峡大坝距离为:芘溪河 > 小江 > 朱衣河,三条支流自身流量为:小江 ($150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) > 芘溪河 ($10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) \approx 朱衣河 ($10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)^[35-37]. 在叶振亚等^[10]的研究中指出,库腹支流朱衣河干流水量补给率较库首支流香溪河和大宁河要大,得出朱衣河等短小型支流受干流倒灌影响较其它支流大的结论. 三峡大坝位于库

首,干流水体在此处被拦截且向上游回水,相同流量情况下,自库尾至坝前流速逐渐减缓,位于库首的支流对干流水文条件变化的响应会更加敏感. 若排除支流河口地形、支流流量等其它因素的影响,离库首越近的支流受干流倒灌的影响会更大. 因此虽小江较芘溪河更靠近三峡大坝,但因自身流量为芘溪河流量的 10 倍以上,河口受干流回水影响程度低于芘溪河. 由此可见,支流河口受干流回水影响程度与河口距三峡大坝距离和支流自身流量大小呈负相关. 注意到本研究所取水样均为表层水,由于三峡库区支流受干流回水影响普遍存在分层异重流的情况,若要更精确地计算干流对支流水体的整体贡献比例应进一步采取支流回水区断面不同深度的水样再应用端元混合模型进行计算. 本研究在此利用端元混合模型对干流回水比例的计算仅为说明支流自身流量在“抵御”干流回水影响的重要性.

御临河和龙河河口水体 δD 和 $\delta^{18}O$ 值与干流水体 δD 和 $\delta^{18}O$ 值相差较大,因此推测三峡库区低水位运行时,库尾支流受干流回水影响不大. 图 1 中,御临河和龙河位于利用 ArcGIS 等值线功能所画三峡水库 145 m 水位运行时干流回水影响范围外,这与氢氧同位素特征讨论结果相互佐证,也印证了两河河口 EC 值与主要离子质量浓度值特征与干流水体相差较大的原因.

3.4 库区支流 EC 值与支流流域土地利用关系探讨

图 3 显示,在不受干流回水影响的采样点中,库首支流(香溪河、神农溪、大宁河)EC 值范围为 $183.7 \sim 287 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,低于干流水体和其他支流. 香溪河、神农溪、大宁河支流流域人口密度和耕地所占土地利用类型比例均为所有 11 条调查的支流流域中最小(图 2),分别为 63.9 、 3.21 、 $154.4 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$ 和 9.5% 、 12.2% 、 24.8% . 所有 11 条支流流域人口密度均值为 $344.8 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$,耕地比例均值为 42.0% ;龙河 EC 值也较低,为 $214.5 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,龙河的人口密度和耕地比例也较低,分别为 $183.8 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$ 和 31.2% ;然而库腹支流(朱衣河、小江、芘溪河、汝溪河)EC 值范围为 $436 \sim 518 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. 这 4 个支流流域人口密度和耕地所占土地利用类型比例在 11 条支流流域中较高(图 2),人口密度分别为 651.9 、 418.3 、 652.2 和 $531.8 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$,耕地比例分别为 28.7% 、 45.1% 、 65.9% 和 74.3% ,大于 11 条流域均值 ($344.8 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$ 和 42.0% ,朱衣河耕地比例除外). 朱衣河虽然耕地所占土地利用类型比例不高,但其人口密

度约为 11 条支流流域人口密度均值的两倍(651.9 人·km⁻²和 344.8 人·km⁻²)。

由此可见,在本研究范围内,支流的 EC 值与其支流流域人类活动存在一定正相关,耕地占土地利用类型比例高的和人口密度高的支流流域其支流水体的 EC 值较高。

若仅从 EC 指标来看水质,不受干流回水影响的支流水体水质有优于干流水质者(如香溪河、神农溪、大宁河和龙河),也有劣于干流水质者(如朱衣河、小江、芑溪河和汝溪河),这些支流河口均在干流回水影响范围区内,由此推论干流回水对水质较优的支流起污染作用,对水质较差的支流河口起稀释优化作用。

4 结论

(1)干流沿程水质较稳定,EC 值变化范围为 291 ~ 336 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, Cl⁻ 质量浓度变化范围为 12.21 ~ 19.17 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(2)不同支流不受干流回水影响水体之间水质相差较大,EC 值变化范围为 183.7 ~ 518 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, Cl⁻ 质量浓度变化范围为 2.36 ~ 37.89 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;不同支流受干流回水影响水体之间水质相差相对较不受干流回水影响的小,且与干流水质接近,其 EC 值变化范围为 267 ~ 330 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, Cl⁻ 质量浓度变化范围为 9.47 ~ 21.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(3)干流 δD 值分布范围为 -81.60‰ ~ -75.16‰, $\delta^{18}\text{O}$ 值分布范围为 -11.57‰ ~ -10.26‰;支流不受干流回水影响水体 δD 值分布范围为 -59.94‰ ~ -43.67‰, $\delta^{18}\text{O}$ 值分布范围为 -9.00‰ ~ -6.04‰,支流较干流富重同位素且 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异较大;受干流回水影响的支流水体 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值与干流接近,分别为 -77.85‰ ~ -50.75‰和 -11.06‰ ~ -7.33‰。

(4)利用二元线性混合模型计算的干流回水对朱衣河,小江和芑溪河河口水体贡献比例分别为 89.96%, 8.61%, 95.56%。支流河口受干流回水影响程度与河口距三峡大坝距离和支流自身流量大小呈负相关。

(5)库首支流香溪河、神农溪和大宁河水质优于干流,库腹支流汝溪河、芑溪河、小江和朱衣河水质劣于干流,库尾支流龙河和御临河在三峡水库低水位运行时表现为不受干流回水影响,龙河水质优于干流而御临河水质劣于干流。支流自身的水质与支流流域的人口密度与土地利用方式有关。干流

回水对水质较优的支流河口起污染作用,对水质较差的支流河口起稀释优化作用。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2016.
- [2] 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.
- [3] 胡念三, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库干流倒灌对支流库湾营养盐分布的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(10): 6-11.
Hu N S, Liu D F, Ji D B, et al. Effect of backward flow from mainstream on nutrients distribution of tributaries in Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(10): 6-11.
- [4] 刘步云. 基于 EFDC 模型的御临河回水区水动力数值模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
Liu B Y. Simulation of hydrodynamics of Yulin River in the backwater area based on EFDC [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [5] Zhao Y Y, Zheng B H, Wang L J, et al. Characterization of mixing processes in the confluence zone between the Three Gorges Reservoir mainstream and the Daning River using stable isotope analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(18): 9907-9914.
- [6] Holbach A, Wang L J, Chen H, et al. Water mass interaction in the confluence zone of the Daning River and the Yangtze River—a driving force for algal growth in the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(10): 7027-7037.
- [7] 张晟, 李崇明, 郑丙辉, 等. 三峡库区次级河流营养状态及营养盐输出影响[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 500-505.
Zhang S, Li C M, Zheng B H, et al. Trophic states and nutrient output of tributaries in Three Gorges Reservoir area [J]. Environmental Science, 2007, 28(3): 500-505.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 叶振亚, 王雨春, 胡明明, 等. 三峡水库干-支流作用下生态水文过程的氢氧同位素示踪[J]. 生态学杂志, 2017, 36(8): 2358-2366.
Ye Z Y, Wang Y C, Hu M M, et al. Hydrogen and oxygen stable isotope tracing of eco-hydrological processes in water bodies mixing the mainstream and a tributary of the Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(8): 2358-2366.
- [11] 谢涛, 纪道斌, 刘德富, 等. 三峡水库库首水温监测及初步分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(9): 1201-1206.

- Xie T, Ji D B, Liu D F, *et al.* Water temperature monitoring of the head of the Three Gorges Reservoir and preliminary analysis [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, **22**(9): 1201-1206.
- [12] Holbach A, Bi Y, Yuan Y, *et al.* Environmental water body characteristics in a major tributary backwater of the unique and strongly seasonal Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2015, **17**(9): 1641-1653.
- [13] 张宇, 刘德富, 纪道斌, 等. 干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2621-2627.
Zhang Y, Liu D F, Ji D B, *et al.* Effects of intrusions from Three Gorges Reservoir on nutrient supply to Xiangxi Bay [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(8): 2621-2627.
- [14] 陈媛媛, 刘德富, 杨正健, 等. 分层异重流对香溪河库湾主要营养盐补给作用分析[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(3): 762-770.
Chen Y Y, Liu D F, Yang Z J, *et al.* The impacts of the stratified density currents on supply pattern of main nutrients in Xiangxi River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(3): 762-770.
- [15] Holbach A, Norra S, Wang L J, *et al.* Three Gorges Reservoir: density pump amplification of pollutant transport into tributaries [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(14): 7798-7806.
- [16] Huang Y L, Zhang P, Liu D F, *et al.* Nutrient spatial pattern of the upstream, mainstream and tributaries of the Three Gorges Reservoir in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(10): 6833-6847.
- [17] 李凤清, 叶麟, 刘瑞秋, 等. 三峡水库香溪河库湾主要营养盐的入库动态[J]. *生态学报*, 2008, **28**(5): 2073-2079.
Li F Q, Ye L, Liu R Q, *et al.* Dynamics of main nutrient input to Xiangxi Bay of the Three-Gorges Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(5): 2073-2079.
- [18] Zheng B H, Zhao Y Y, Qin Y W, *et al.* Input characteristics and sources identification of nitrogen in the three main tributaries of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(17): 1219.
- [19] Ji D B, Wells S A, Yang Z J, *et al.* Impacts of water level rise on algal bloom prevention in the tributary of Three Gorges Reservoir, China [J]. *Ecological Engineering*, 2017, **98**: 70-81.
- [20] 邹曦, 潘晓洁, 郑志伟, 等. 三峡水库小江回水区叶绿素 a 与环境因子的时空变化[J]. *水生态学杂志*, 2017, **38**(4): 48-56.
ZOU X, Pan X J, Zheng Z W, *et al.* Temporal-spatial variation of chlorophyll a and environmental factors in the Xiaojiang River backwater of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, **38**(4): 48-56.
- [21] 张磊, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2061-2069.
Zhang L, Wei J J, Fu L, *et al.* Temporal and spatial variation of nutrients and chlorophyll a, and their relationship in Pengxi River backwater Area, Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2061-2069.
- [22] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展[J]. *水利学报*, 2016, **47**(3): 443-454.
Liu D F, Yang Z J, Ji D B, *et al.* A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. *Shuili Xuebao*, 2016, **47**(3): 443-454.
- [23] 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 等. 防控支流库湾水华的三峡水库潮汐式生态调度可行性研究[J]. *水电能源科学*, 2015, **33**(12): 48-50, 109.
Yang Z J, Liu D F, Ji D B, *et al.* Feasibility study on tide-type ecological operation method to control algal bloom in tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. *Water Resources and Power*, 2015, **33**(12): 48-50, 109.
- [24] Tang Q, Bao Y H, He X B, *et al.* Flow regulation manipulates contemporary seasonal sedimentary dynamics in the reservoir fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **548-549**: 410-420.
- [25] Liu X C, Zu B, Song X F, *et al.* Water chemistry and nitrate pollution in the Liangtan River basin in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Geographical Research*, 2010, **29**(4): 629-639.
- [26] 姜伟, 周川, 纪道斌, 等. 三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2326-2335.
Jiang W, Zhou C, Ji D B, *et al.* Comparison of relationship between conduction and algal bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2326-2335.
- [27] 郭胜, 李崇明, 郭劲松, 等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1266-1272.
Guo S, Li C M, Guo J S, *et al.* Spatio-temporal variation of nitrogen, phosphorus in different period in Three Gorges Reservoir after its impoundment [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(5): 1266-1272.
- [28] 郑丙辉, 王丽娟, 龚斌. 三峡水库上游河流入库面源污染负荷研究[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(2): 125-131.
Zheng B H, Wang L J, Gong B. Load of non-point source pollutants from upstream rivers into Three Gorges Reservoir [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(2): 125-131.
- [29] 宋献方, 刘相超, 夏军, 等. 基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, **37**(1): 102-110.
Song X F, Liu X C, Xia J, *et al.* A study of interaction between surface water and groundwater using environmental isotope in Huaisha River basin [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, **49**(12): 1299-1310.
- [30] 丁梯平, 高建飞, 石国钰, 等. 长江水氢、氧同位素组成的时空变化及其环境意义[J]. *地质学报*, 2013, **87**(5): 661-676.
Ding T P, Gao J F, Shi G Y, *et al.* Spacial and temporal variations of H and O isotope compositions of the Yangtze River water and their environmental implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, **87**(5): 661-676.
- [31] 周毅, 吴华武, 贺斌, 等. 长江水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 时空变化特征及其影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, **26**(5): 678-686.
Zhou Y, Wu H W, He B, *et al.* Study on spatial and temporal

- variations of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in Yangtze River water and its factors [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(5): 678-686.
- [32] Zhang Y H, Song X F, Wu Y Q. Use of oxygen-18 isotope to quantify flows in the upriver and middle reaches of the Heihe River, Northwestern China[J]. *Environmental Geology*, 2009, **58**(3): 645-653.
- [33] Yang L, Liu D F, Huang Y L, *et al.* Isotope analysis of the nutrient supply in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **77**: 65-73.
- [34] White J W C, Cook E R, Lawrence J R, *et al.* The DH ratios of sap in trees: Implications for water sources and tree ring DH ratios[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, **49**(1): 237-246.
- [35] 王晓青, 郭劲松. 三峡水库蓄水后小江水环境容量的变化[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(1): 36-42.
- Wang X Q, Guo J S. Change of water environmental capacity in the Xiaojiang River after impoundment of the Three Gorges reservoir[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(1): 36-42.
- [36] 张可. 三峡水库成库后对典型污染物迁移与时空分布的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- Zhang K. Transference and temporal-spatial distribution of typical contamination after the Three Gorges Reservoir impoundment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [37] 周子然, 邓兵, 王雨春, 等. 三峡库区干支流水体交换特征初步研究——以朱衣河为例[J]. *人民长江*, 2015, **46**(22): 1-6.
- Zhou Z R, Deng B, Wang Y C, *et al.* Preliminary study on characteristics of water exchange between mainstream and tributaries in Three Gorges Reservoir area; case of Zhuyi River [J]. *Yangtze River*, 2015, **46**(22): 1-6.



CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the δ ¹⁵ N of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α-HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshuitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)