

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例	李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较:以夏玉米季为例	范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例	
吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例	项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例	王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛烷磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)
甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖晋翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)
不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)
《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)	

库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例

王晓彤¹, 罗光富¹, 操满², 王雨春³, 汪福顺², 邓兵^{1*}

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; 3. 中国水利水电科学研究院水环境研究所, 北京 100038)

摘要: 三峡水库蓄水后, 库区众多支流下游形成库湾回水区, 这些库湾回水区是库区水环境调整最为活跃的地区。为了探究支流库湾对于库区生源要素循环及物质通量的作用和意义, 于 2012 年 8 月 ~ 2013 年 7 月对草堂河库湾、相邻干流、支流上游水体中溶解态无机氮 (DIN)、溶解态无机磷 (DIP)、溶解态硅酸盐 (DSi) 的时空分布进行逐月现场观测。结果表明, 草堂河库湾回水区营养盐的浓度与库区干流相近, 二者的月变化趋势也高度一致。干流输入是库湾 DIN、DIP、DSi 的主要来源。草堂河库湾与干流连通性很好, 干流水体交换迅速且充分, 其影响可到达库湾回水区的末端。春、夏季, 干流输入的营养盐通过表层生产力在库湾截留, 秋、冬季库湾中的营养盐释放并输送到干流。营养盐在库湾的这种循环过程, 在一定程度上改变了库区干流不同季节营养盐输送的节律。库区支流库湾众多, 其对干流物质通量的季节调配作用不容忽视。

关键词: 三峡库区; 草堂河; 营养盐; 分布特征; 来源

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2957-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.017

Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River

WANG Xiao-tong¹, LUO Guang-fu¹, CAO Man², WANG Yu-chun³, WANG Fu-shun², DENG Bing^{1*}

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Backwater regions have been formed in the downstream of tributaries since the Three Gorge Reservoir (TGR) was impounded, as the most influential area to the aquatic environment within the reservoir. In order to study the effects and significance of the backwater regions on the nutrient cycling and substance fluxes, dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP), dissolved silicon (DSi) were monitored in situ in Caotang tributary backwater region, the adjacent mainstream and Caotang tributaries' upstream every month from August 2012 to July 2013. The results showed that the concentrations of DIN, DIP and DSi in Caotang tributary backwater region were similar to those in the mainstream, and the monthly variation tendency was very consistent with the mainstream Changjiang. DIN, DIP and DSi in the Caotang tributary were mainly originated from the mainstream. The influence of the mainstream water could extend to the upmost of the backwater region due to the good connection and rapid, sufficient water exchange between mainstream and tributary. Nutrients from the mainstream were retained and consumed by primary producers in the tributary during the growing seasons in spring and summer, while released back to the water during late autumn and winter. Nutrient cycling in the tributary could change the seasonal pattern of nutrient transportation. The mainstream nutrient fluxes could receive significant seasonal modification from the large numbers (more than 40) of tributaries within the TGR domain.

Key words: Three Gorge Reservoirs (TGR); Caotang tributary; nutrients; distribution characteristics; source

河流筑坝蓄水使天然河流形成人工水库或人工湖泊, 不仅改变了河流原有的物理、化学以及生物特性, 而且影响了其中生源要素的循环, 改变了河流的物质通量^[1-3]。

三峡工程是世界最大的水利水电工程之一, 在发挥防洪、航运等社会效益的同时, 也导致库区水环境发生改变, 这种改变甚至影响长江下游乃至河口以及近海的物质通量^[4-7]。三峡水库蓄水后, 坝前水体总氮、总磷浓度较蓄水前同期均明显降低^[8], 入库、出库水体之间各项营养盐浓度均存在

一定差异^[9], 表明库区生源要素的循环发生了改变。三峡水库是河道型水库, 蓄水后干流水体河流特征明显, 水质较蓄水前有所改善^[10]。由于受到水库回水顶托, 库区众多支流的下游及河口形成库湾回水区, 其流速缓慢, 水体转变为类湖泊型水体, 近

收稿日期: 2016-01-29; 修订日期: 2016-03-24

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07104-001); 国家自然科学基金项目 (41271519)

作者简介: 王晓彤 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为沉积地球化学, E-mail: wangxiaotong@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dengbing@sklec.ecnu.edu.cn

年来,多条支流回水区曾多次出现水华^[11-14]. 库区干流水环境分异,支流库湾表层生产力的活动性显著高于干流水体,这表明库区生源要素的循环与改变可能主要发生在支流库湾. 因此研究支流库湾营养盐的来源、分布及其季节变化规律,对于揭示三峡库区营养要素循环改变的原因和库区水环境变化趋势具有重要的意义.

以往对于库区营养盐循环的研究,在进、出库区物质通量的改变^[8]、库区干流沿程营养盐浓度变化^[9]等方面作了系统工作. 此外,对于不同水位调控时期干流输入对支流库湾营养盐的补充^[15-17]、回水区营养盐变化特征^[18,19]、营养盐与浮游生物的关系^[20]等方面做了大量研究,这些工作对于认识三峡库区生态效应以及库区水环境变化有重要意义. 从干支流相互作用方面对库湾开展连续观测也是认识库区营养盐循环的过程与机制的关键. 目前在此方面开展的观测多集中在香溪河^[18-20]、大宁河^[21,22]等支流,三峡库区支流众多,不同的支流与干流的互相作用可能存在一定的差异性. 本研究以草堂河为例,通过对 2012、2013 年逐月现场采样,分析其溶解态营养盐 DIN、DIP、DSi 的分布特征及其季节变化规律,讨论支流库湾营养盐的来源及其在库湾中的变化,进而探讨支流库湾对于库区生源要素循环及物质通量的作用和意义.

1 材料与方法

1.1 研究区域及样点设置

草堂河位于三峡库区中部的重庆市奉节县境内,是长江北岸的一级库区支流,介于东经 108°14'~109°25',北纬 30°35'~31°26'之间,距离三峡大坝约 165 km,其全长 33.3 km,流域面积为 395 km²,平均流量约 7 m³·s⁻¹,年径流量 2.37 亿 m³. 库区蓄水后,在距河口 8 km 范围内形成常年回水区. 本次研究在长江干流设置一个断面(CJ),草堂河常年回水区设置 3 个断面(河口、回水区中部、回水区顶部),采样编号依次为 CT01、CT02、CT03,支流上游采样点设置在汾河镇,编号为 CT04. 具体站位分布见图 1.

1.2 分析方法

于 2012 年 8 月至 2013 年 7 月期间对草堂河及干流各断面逐月进行现场调查,用 Hydrolab DS5 多参仪测得水温、叶绿素 a 等参数. 用 5L Niskin 采水器分别在 CT01、CT02、CT03、CT04 断面处 0、5、10、20 m 直至底层(距离底部 5 m)处采水,由于干

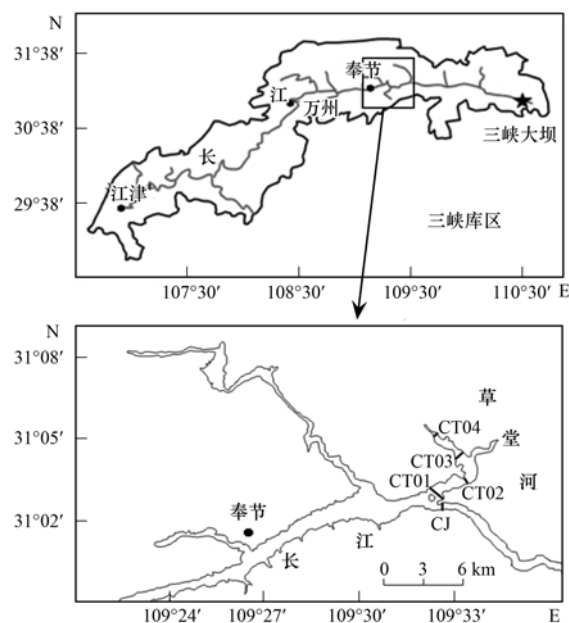


图 1 草堂河采样站位示意

Fig. 1 Map of sampling sites in Caotang Tributary

流水体垂向交换程度较强,水体垂向混合均匀^[18],因此在长江干流 CJ 断面处只采取表层水. 水样用于溶解态营养盐浓度的测定.

水样采集后用预处理过的 0.45 μm 的醋酸纤维素滤膜过滤(使用前在 pH≈2 的 HCl 中浸泡,之后用去离子水冲洗至中性,烘干备用),将滤液装入洁净的 100 mL 聚乙烯瓶中(用 1:5 的 HCl 浸泡数日后依次用去离子水、Milli-Q 水冲洗干净,干燥备用),加入饱和 HgCl₂ 固定后常温避光保存,回到实验室后尽快测定.

采用连续流动分析仪(荷兰 SKALAR 分析仪器公司)进行溶解态营养盐浓度的测定,其中 NO₃⁻-N 采用 Cd-Cu 还原重氮偶氮比色法,NO₂⁻-N 采用重氮偶氮比色法,NH₄⁺-N 采用靛酚蓝法,DIP 采用磷钼蓝法,DSi 采用硅钼蓝法,DIN 指 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N 三者的加和;实验用水均为 Milli-Q 水,实验过程均实施质量控制,每天选取一定的样品进行重复测定,偏差均小于 3%.

2 结果与分析

2.1 库湾溶解态营养盐浓度时间分布特征

长江干流、草堂河库湾中部及支流上游的溶解态营养盐 DIN、DIP、DSi 浓度逐月变化见图 2. 总体来看,库湾中部 DIN、DIP、DSi 浓度均呈现季节性变化,其变化规律与长江干流相似,这种相似性以库湾底层最为显著. 库湾底层 DIN 表现为春夏季

高、秋冬季低, 在 7 月和 9 月分别出现最高值 $180.60 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和最低值 $87.31 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 2(a)]; DIP 表现为春季明显高于其他季节, 最高值出现在 2 月为 $6.39 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 2(b)]; DSI 表现为夏秋季高、春季和冬季较低, 最高值 $146.60 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和最低值 $92.10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 分别出现在 10 月和 3 月 [图 2(c)]. 在全年范围内库湾底层水和长江干流水 DIN、DIP、DSi 浓度接近, 差异大都在 10% 以内. DSI 与干流差异最小, 其与干流最为接近的月份(8、12、6 月)差异均小于 1%, 即使是差异最显著的月份(3 月)也仅比干流低约 9% [图 2(c)]. DIN 与干流差异最小的月份(1 月)仅低于干流 0.54%, 在 8~10 月与干流差异略大但也在 20% 以内 [图 2(a)]. 虽然 DIP 与干流的差异相对 DSI、DIN 较大, 但除 8、9、11 月之外, 其与干流差异大都在 5% 以内, 差异最小的月份(5 月)仅高于干流 0.94% [图 2(b)]. 在全年范围内, 库湾各月份底层水的营养盐浓度的升降趋势与干流相同. 对草堂河库湾底层水与干流的 DIN、DIP、DSi 浓度进行相关性分析, 其相关系数分别为 0.91 ($P < 0.001$)、0.96 ($P < 0.001$)、0.96 ($P < 0.001$), 表明库湾与干流的营养盐浓度具有极显著正相关性. 综上, 库湾底层水中 DIN、DIP、DSi 浓度与长江干流相差甚微, 且

与长江干流具有一致的月际变化趋势.

库湾表层水的 DIN、DIP、DSi 浓度在秋季与冬季(9 月~次年 2 月)与底层水较为一致, 差异均在 20% 以内, 二者月际变化趋势也相似(图 2). 库湾表层水与底层水中营养盐浓度在春、夏季(3~8 月)出现差异, 表层浓度明显低于底层, 尤其以 3 月最为显著, DIN、DIP、DSi 分别比底层低约 37%、88%、87%. 这些季节库湾内叶绿素 a 的浓度显著高于干流 [图 2(d)], 推测库湾营养盐的这种表底层分异与表层生产力有关. 尽管表层水中 DIN、DIP、DSi 的浓度在春、夏季节与底层水有差异, 但其月际变化趋势与干流具有较高的相似性, 其继承了干流的月际变化趋势, 浓度升降均与干流同步.

草堂河上游 DIN、DIP、DSi 的浓度分布和月变化趋势与库湾回水区及长江干流水体均有显著的差异. DIN 与 DSI 月际变化幅度大多在 30%~100% 之间, 具有山区短源河流物质浓度变化幅度大的特点^[23].

2.2 库湾溶解态营养盐及水环境参数的空间分布特征

水体中叶绿素 a 的质量浓度可以指示水域初级生产力的活动性强弱, 初级生产力与水体中营养盐的循环密切相关^[24,25]. 观测期间, 草堂河库湾叶绿

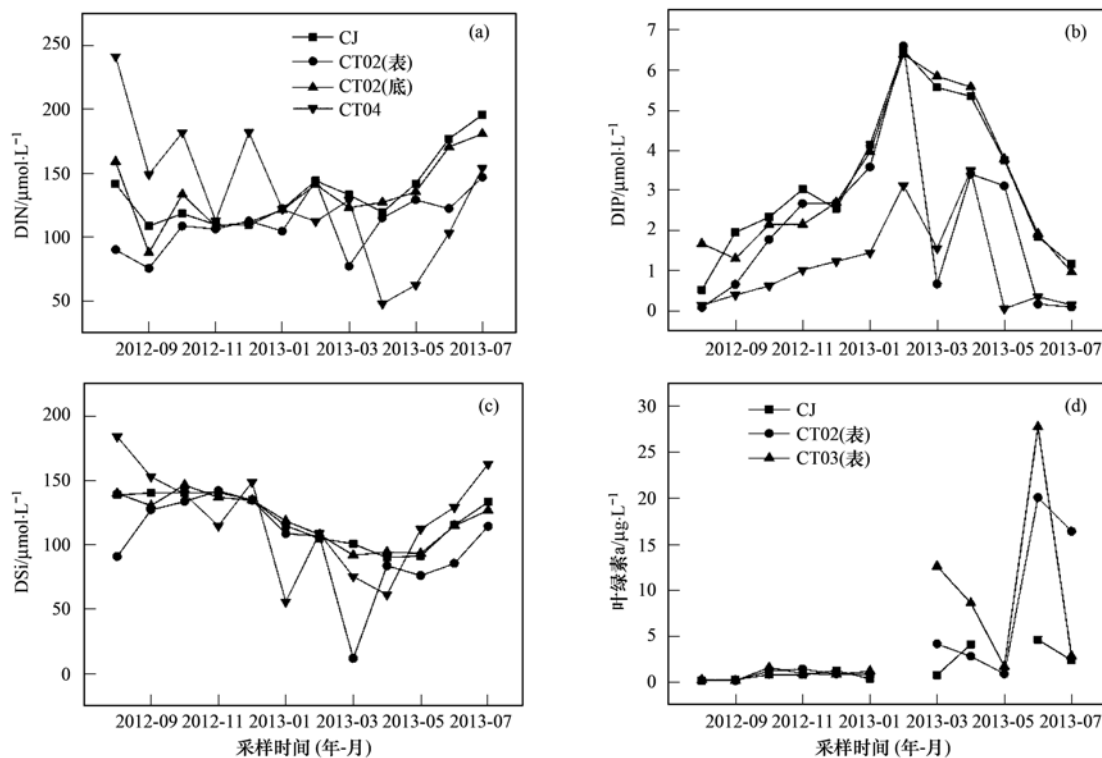


图 2 长江干流和草堂河库湾回水区溶解态营养盐逐月变化

Fig. 2 Monthly variations of dissolved nutrient concentration of the Yangtze River and the Caotang tributary

素 a 的质量浓度在春夏季较高,该时期水温适宜、光照充足,库湾初级生产力活跃.尤其在 6 月,叶绿素 a 的质量浓度达到全年最高值 $27.80 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,此时库湾初级生产力达到观测期间的全年最高水平[图 2(d)].图 3、图 4 分别为库湾表层生产力活动性最强月份(2013 年 6 月)和较弱月份(2012 年 12 月)的营养盐浓度及营养盐比值的空间分布.

2013 年 6 月,库湾水体温度出现分层,表层温度略高[图 3(g)],库湾浊度从河口至上游逐渐降低[图 3(h)].适宜的温度,较为清澈的水体,为表层生产力的活跃提供了合适的水文条件.库湾水体营养盐浓度出现明显的表层低、底层高的分层现象,表层水 DIN、DIP、DSi 浓度分别为 121.93 、 0.18 、 $85.69 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,与底层差异均大于 25%,尤其是 DIP,约比底层低 91%,表底浓度差异显著.库湾底层水体营养盐浓度与干流相似,差异均在 5% 以内[图 3(a)~3(c)].库湾 DIN/DIP、DSi/DIP 表现为表层远高于底层,表层 DIN/DIP、DSi/DIP 分别为 680、478,底层分别仅为 88、59,DSi/DIN 表底一致[图 3(d)~3(f)].此时干流水体 DIN/DSi/DIP

的摩尔比为 95:62:1,远远偏离 Redfield 比值^[26],而库湾表层生产力对营养盐的消耗使 DIN/DSi/DIP 更加偏离 Redfield 比值,造成库湾表层 DIN/DIP、DSi/DIP 远高于底层.以上表明该时期库湾回水区叶绿素 a 所反映的高表层生产力导致表层水体营养盐浓度的显著降低以及营养盐比值发生改变.这种表层营养盐浓度降低与营养盐比值改变的现象同样出现在春夏季节表层生产力活跃的其它月份[图 2(d)].

这一时期库湾营养盐在水平方向上没有明显的浓度梯度.库湾中部与顶部底层 DIN、DIP、DSi 浓度差异很小[图 3(a)~3(c)],尤其是 DSi,两个断面底层的差异仅为 2% 左右,其 DIN/DIP、DSi/DIP、DSi/DIN 也相近[图 3(d)~3(f)],二者营养盐浓度与比值均与干流一致.由于库湾中部和顶部生产力活动性强弱不同,二者表层 DIN、DIP、DSi 浓度及营养盐比值的差异相对于底层较大,尽管如此,其与支流上游仍然差异显著.库湾浊度虽然表现为从河口至库湾顶部逐渐降低,但是即使在库湾顶部其仍与干流相近,远远高于上游.

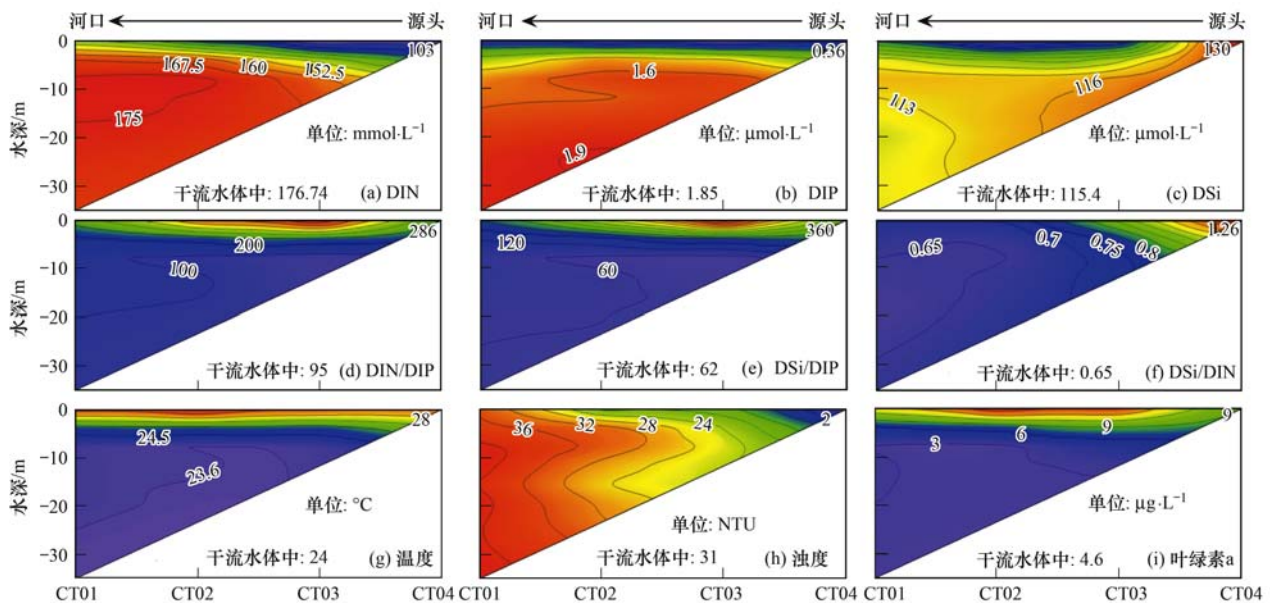


图 3 2013 年 6 月草堂河库湾营养盐 (DIN、DIP、DSi)、营养盐比值及水环境参数(温度、浊度)分布

Fig. 3 Distribution of DIN, DIP, DSi, turbidity, temperature and the ratio of nutrient in the Caotang tributary in June, 2013

2012 年 12 月,库湾水体温度、浊度表底分布均匀[图 4(g)~4(i)].库湾表层叶绿素 a 浓度仅为 6 月的约 4%,生产力活动性较弱.库湾中部表、底层 DIN、DIP、DSi 的浓度差异均小于 1%,库湾顶部水体营养盐浓度表底分布与中部一致[图 4(a)~4(c)].营养盐比值也相似,整个库湾 DIN/DIP、DSi/DIP、DSi/DIN 表底分布均匀[图 4(d)~4

(f)].库湾中部 DIN、DIP、DSi 浓度分别为 111.35 、 2.71 、 $134.84 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,除 DSi 外均高于长江干流,尤其是 DIP,高出干流 6% 左右[图 4(a)~4(c)].库湾营养盐比值也均与干流略有差异, DIN/DIP、DSi/DIP 略低于干流,DSi/DIN 与干流差异不大[图 4(d)~4(f)].这种干支流营养盐浓度与比值上的差异可能是库湾底泥中的营养盐在微生

物等作用下释放造成的^[29]。库湾内 DIN、DIP、DSi 浓度在水平方向上有浓度梯度, 库湾顶部虽与中部略有差异, 但差异均在 2% 以内。营养盐比值在水平

方向上略有差异但不显著。库湾顶部与支流上游的营养盐浓度有明显的差异, 以 DIP 为例, 高达上游的 2 倍之多, 且营养盐比值也相差甚远。

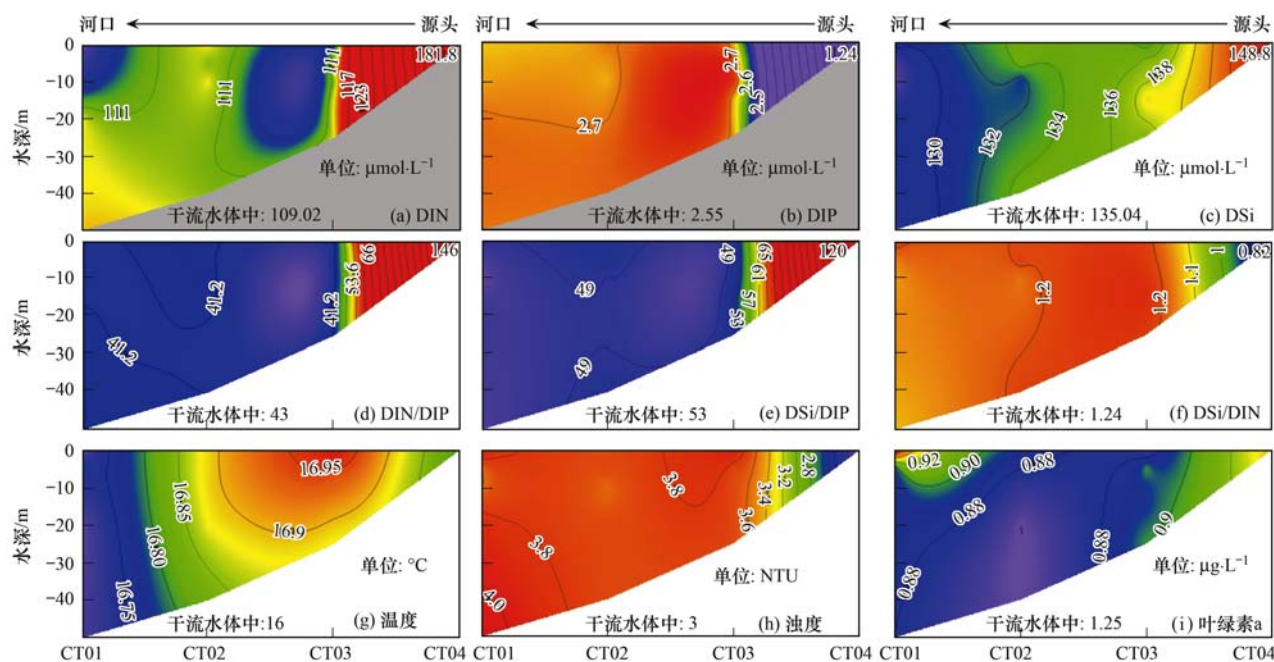


图4 2012年12月草堂河库湾营养盐(DIN、DIP、DSi)、营养盐比值及水环境参数(温度、浊度)分布

Fig. 4 Distribution of DIN, DIP, DSi, turbidity, temperature and the ratio of nutrient in the Caotang tributary in December, 2012

3 讨论

3.1 库湾营养盐的来源

溶解态营养盐的时间与空间分布特征可以在一定程度上反映营养盐的来源与消耗^[17]。在观测期间, 草堂河库湾底层营养盐浓度与干流差异大都在 10% 以内, 且各营养盐组分的月变化趋势与长江干流一致, 并不存在明显的相位差, 其浓度与上游差异显著, 多数月份差异在 30% 以上, 个别月份差异高达 98%。虽然库湾表层水的营养盐浓度在春夏季由于初级生产力的活跃有所降低, 致使其与干流水有一定的差异, 但其总体变化趋势仍与长江干流相近而与支流上游差异显著。库湾水体营养盐与支流上游的显著差异表明上游来水对库湾营养盐的分布影响较小, 其浓度和变化趋势与长江干流的一致性表明支流库湾回水区的营养盐主要是来源于长江干流的输送。此外, 在空间分布上, 无论在夏季还是冬季, 草堂河库湾顶部底层营养盐浓度及其比值均与长江干流相近, 与支流上游差异较大, 且库湾浊度继承了长江干流, 远高于支流上游, 表明干流对库湾的影响可以到达回水区末端, 干支流进行了充分的水交换。草堂河库湾与长江干流营养盐的同步变化趋

势表明二者有很好的连通性, 干支流水体交换迅速, 且库湾内的水体滞留时间远远低于 30 天的采样间隔。

已有水动力观测结果表明, 草堂河口与长江干流界面常年存在干支流水体交换^[27], 其水交换通量范围为 $345 \sim 1113 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 平均流量达 $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 而上游来水平均流量仅为约 $7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 远远小于干流来水量。因此, 从物质通量上看, 支流上游来水对库湾营养盐的贡献可以忽略, 这与干流水体倒灌输入是库湾营养盐的主要来源的结论一致。此外, 草堂河干支流营养盐的时空分布特征进一步表明, 干支流界面的这种高强度水交换其影响范围可到达回水区末端。张佳磊等^[21]研究了大宁河干支流水体混合过程中营养盐的行为, 观测到在泄水期干流营养盐对支流的贡献率为 70% 左右。陈媛媛等^[20]分析香溪河营养盐主要来源时, 发现长江干流对香溪河库湾的 TN、TP、DSi 的贡献率均高达 90% 以上。这种现象在澎溪河^[25]、神农溪^[17]、磨刀溪^[16]等支流的回水区也存在, 表明库湾回水区营养盐主要来源于长江干流水体输入的现象普遍存在于库区支流回水区。

3.2 库湾营养盐的循环及其对干流物质通量的改变

草堂河库湾水体流速缓慢, 营养盐浓度全年高

于浮游植物生长的营养盐浓度阈值^[28],在温度、光照适宜的春夏季(3~8月),表层生产力的活动达全年最高水平.该时期库湾表层营养盐浓度显著低于底层,尤其是3月,表底差异更为显著.表层营养盐比值也与底层大有不同,其中 DIN/DIP、DSi/DIP 高于底层.这些时期库湾表层生产力的活跃造成库湾表层 DIN、DIP、DSi 大量消耗,实现了库湾表层营养盐的清除.库湾水体与湖泊水体类似,通常湖泊水体底层沉积物中的营养盐会在微生物等的作用下被释放重新回到水体,会导致底层营养盐浓度显著升高^[29],但是库湾底层营养盐浓度与干流相比并无明显上升,这表明库湾与干流有较好的连通性,水体交换较为迅速.由于干支流良好的连通性,频繁的水交换将干流营养盐补充到库湾,从而维持库湾表层生产力在春夏季的活跃.干支流的这种相互作用实现了营养盐的截留,降低了干流的营养盐通量.这种通过库湾表层生产力对营养盐进行截留的现象在大宁河^[22]、梅溪河^[30]等回水区也存在,表明支流库湾初级生产力对干流营养盐的清除作用不容忽视.

草堂河库湾在秋末到冬季期间水体温度相对较低,表层生产力活动性较弱,且营养盐浓度及比值皆表底均匀分布,此时库湾内部水体混合均匀.虽然草堂河库湾与长江干流水体有良好的连通性,但是库湾与干流的营养盐仍有浓度梯度,库湾 DIN、DIP、DSi 浓度均略高于干流,表明库湾存在营养盐的释放.通过干支流的水交换,将营养盐输送到干流,从而在一定程度上提高干流在秋、冬季节的营养盐通量.

以草堂河为代表的众多库区支流库湾回水区在春夏季叶绿素 a 浓度显著高于干流^[30],这些库湾表层生产力水平远高于干流,库区营养盐的循环主要发生在支流库湾而非干流.在三峡库区类似规模的支流多达 40 条,其回水区总面积占库区总水面的 30% 以上^[31],这些库湾春夏季对于营养盐的截留总量及秋冬季对营养盐的输出总量不容忽视,其在多大程度上影响库区干流物质通量的季节调配仍需要深入评估.

4 结论

(1)干流输入是库湾 DIN、DIP、DSi 的主要来源.草堂河库湾回水区底层营养盐的浓度全年与库区干流相近,表层营养盐浓度除受表层生产力影响较大的月份外也与干流相近,且库湾的月变化趋势

与干流高度一致,均与支流上游相差甚远.

(2)干流水体对草堂河库湾的影响可达库湾顶端,库湾与干流连通性很好,干流水体交换迅速且充分.草堂河库湾顶部全年营养盐浓度与干流相近,与草堂河上游差异显著,且其月变化趋势也与干流一致,并无明显滞后.

(3)在春、夏季,干流输入的营养盐在表层生产力的作用下在库湾截留;在秋、冬季,库湾营养盐释放并通过干流水体交换输送到干流.营养盐在库湾的这种循环过程,在一定程度上改变了库区干流不同季节营养盐输送的节律.库区支流库湾众多,其对干流物质通量的季节调配作用不容忽视.

参考文献:

- [1] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A, *et al.* Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure [J]. *Nature*, 1997, **386**(6623): 385-388.
- [2] Kelly V J. Influence of reservoirs on solute transport: a regional-scale approach [J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(7): 1227-1249.
- [3] Wahby S D, Bishara N F. The effect of the River Nile on Mediterranean water, before and after the construction of the High Dam at Aswan [A]. In: Matin J M, Burton J D, Eisma D, (Eds.). *Proceedings of A SCOR Workshop River Inputs Ocean Systems* [C]. Paris: UNESCO, 1980. 311-318.
- [4] 张恩仁, 张经. 三峡水库对长江 N、P 营养盐截留效应的模型分析 [J]. *湖泊科学*, 2003, **15**(1): 41-48.
- [5] Chai C, Yu Z M, Shen Z L, *et al.* Nutrient characteristics in the Yangtze River Estuary and the adjacent East China Sea before and after impoundment of the Three Gorges Dam [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(16): 4687-4695.
- [6] 余立华, 李道季, 方涛, 等. 三峡水库蓄水前后长江口水域夏季硅酸盐、溶解无机氮分布及硅氮比值的变化 [J]. *生态学报*, 2006, **26**(9): 2817-2826.
- [7] 李磊, 王云龙, 蒋玫, 等. 三峡工程蓄水后长江口溶解硅酸盐(DSi)、营养盐结构的变化特征及其生态影响分析 [J]. *环境化学*, 2014, **33**(1): 135-141.
- [8] 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.
- [9] 冉祥滨, 姚庆祯, 巩瑶, 等. 蓄水前后三峡水库营养盐收支计算 [J]. *水生态学杂志*, 2009, **2**(2): 1-8.
- [10] 印士勇, 姜保锋, 刘辉, 等. 三峡工程蓄水运用期库区干流水质分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(3): 305-310.
- [11] 邱光胜, 胡圣, 叶丹, 等. 三峡库区支流富营养化及水华现状研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(3): 311-316.
- [12] 朱爱民, 胡菊香, 李嗣新, 等. 三峡水库长江干流及其支流枯水期浮游植物多样性与水质 [J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(3): 378-385.
- [13] 况琪军, 毕永红, 周广杰, 等. 三峡水库蓄水前后浮游植物

- 调查及水环境初步分析[J]. 水生生物学报, 2005, **29**(4): 353-358.
- [14] 叶麟. 三峡水库香溪河库湾富营养化及春季水华研究[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所, 2006. 55-58.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 吕垚, 刘德富, 黄钰铃, 等. 汛前供水期神农溪库湾倒灌异重流特性及其对营养盐分布的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(4): 653-660.
- [18] 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库 172.5 m 蓄水过程对香溪河库湾水体富营养化的影响[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, **40**(4): 358-369.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 等. 三峡库区大宁河库湾水体混合过程中的营养盐行为[J]. 水利水电科技进展, 2013, **33**(6): 66-70, 79.
- [22] 钟成华, 幸治国, 赵文谦, 等. 三峡水库蓄水后大宁河水体富营养化调查及评价[J]. 灌溉排水学报, 2004, **23**(3): 20-23.
- [23] 马赞杰, 黄薇, 霍军军. 山区河流环境流量特征和计算方法研究[J]. 人民长江, 2011, **42**(S2): 7-10.
- [24] 张晟, 刘景红, 黎莉莉, 等. 三峡水库成库初期营养盐与浮游植物分布特征[J]. 环境科学, 2006, **27**(6): 1056-1061.
- [25] 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.
- [26] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. American Scientist, 1958, **46**(3): 205-221.
- [27] 罗光富. 支流河口水动力作用对三峡库区干支流营养盐交换的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2014. 42-46.
- [28] Justić D, Rabalais N N, Turner R E, *et al.* Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, **40**(3): 339-356.
- [29] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 193-202.
- [30] 操满, 傅家楠, 周子然, 等. 三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换: 以梅溪河为例[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1293-1300.
- [31] 李双. 三峡水库库中地区典型干、支流水体 $P(\text{CO}_2)$ 的时空分布及影响因素研究[D]. 上海: 上海大学, 2014. 41-42.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行