

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

**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

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序 ..... 郝郑平(477)

我国机动车排放VOCs及其大气环境影响 ..... 陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)

基于PMF量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例 ..... 胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)

南京工业区挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估 ..... 张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)

某工业园区VOCs臭氧生成潜势及优控物种 ..... 武蕾丹,王秀艳,杨文,郭凤艳,刘锦(511)

某石油化工园区秋季VOCs污染特征及来源解析 ..... 胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)

某典型石油化工园区冬季大气中VOCs污染特征 ..... 毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)

杭州市工业源VOCs排放清单及排放特征 ..... 卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)

秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征 ..... 虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)

浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数 ..... 杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)

汽车制造企业恶臭来源及影响分析 ..... 石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)

典型酿造业厂界无组织排放VOCs污染特征与风险评价 ..... 高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)

成都市大气环境VOCs污染特征及其健康风险评价 ..... 李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)

上海地区住宅儿童卧室室内甲醛和苯系物浓度的现场检测分析 ..... 蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)

江苏省人为源VOCs排放清单及其对臭氧生成贡献 ..... 夏思佳,刘倩,赵秋月(592)

江门市人为源挥发性有机物排放清单 ..... 陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)

长江三角洲2014年天然源BVOCs排放、组成及时空分布 ..... 刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)

北京城市副中心(通州区)加油站VOCs排放清单 ..... 黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)

公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及VOCs成分谱 ..... 胡志远,林骠骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)

生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究 ..... 褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)

低温等离子体-生物耦合系统对复合CVOCs的降解 ..... 郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)

水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价 ..... 陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)

城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征 ..... 许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)

不同通勤模式暴露于VOCs的健康风险评价 ..... 佟瑞鹏,张磊(663)

家具制造过程中VOCs的来源分析及环境健康风险评价 ..... 佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)

研究报告

北京市PM<sub>2.5</sub>时空分布特征及其与PM<sub>10</sub>关系的时空变异特征 ..... 杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)

小型池塘水-气界面CH<sub>4</sub>冒泡通量的观测 ..... 张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)

中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险 ..... 王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)

铁岭市河流氮素时空分布及源解析 ..... 杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)

基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体CDOM特征 ..... 刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)

宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价 ..... 徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)

巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价 ..... 吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)

广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性 ..... 蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)

内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制 ..... 郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周徽(758)

河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程 ..... 徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)

降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析 ..... 刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)

城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系 ..... 梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)

三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征 ..... 张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)

基于污染评价的地下水中优控污染物筛选 ..... 赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)

硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响 ..... 陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)

活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和Cu(II)的去除性能 ..... 孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)

三维网状HZO@SGH对水中氟离子的吸附作用和机制 ..... 马福臻,周少奇,刘泽璐,支亮亮,周璇(828)

MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制 ..... 许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)

污水厂二级出水中难降解有机物的臭氧化特性 ..... 侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)

染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测 ..... 孟晓荣,王隽,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)

污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试 ..... 李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏伟,张杰(859)

间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响 ..... 刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)

好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响 ..... 李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)

处理垃圾渗滤液的SBR中微生物种群与污泥比阻 ..... 蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)

基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价 ..... 姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁垠涛,于晓华(889)

西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价 ..... 刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)

开封城市土壤磷素组成特征及流失风险 ..... 白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)

电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价 ..... 尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)

上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价 ..... 孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)

四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征 ..... 迟菽琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)

硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤As-Cd生物有效性及稻米累积阻控 ..... 李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)

电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例 ..... 严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

《环境科学》征稿简则(584) 《环境科学》征订启事(683) 信息(799,908,934)

## 河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程

徐雅倩, 徐飘, 杨正健\*, 刘德富, 马骏

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 河湖生态修复及藻类利用湖北省重点实验室, 武汉 430068)

**摘要:** 河道型水库支流库湾营养盐季节变化直接决定支流藻类群落结构的演替及初级生产力变化过程. 为分析三峡水库支流香溪河库湾主要营养盐来源对营养盐季节性变化的影响, 基于 2010~2011 年香溪河库湾野外监测数据, 选取干、支流差异显著 ( $P < 0.01$ ) 的常量离子  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  作为水团混合示踪离子, 采用二元线性混合模型计算不同时期营养盐各来源的贡献率. 结果表明, 在枯水运行期(11 月~次年 2 月)和汛后蓄水期(9~10 月)时, 长江干流对支流库湾营养盐贡献率超过 75%, 干流倒灌为库湾营养盐主要来源; 在汛前泄水期(3~5 月)和汛期(6~8 月)时, 干流倒灌和上游来水的贡献率差异缩小, 库湾营养盐来源需考虑两者共同的影响, 但干流倒灌仍占据优势. 上游来水磷营养浓度相对较高, 而长江干流氮、硅营养盐浓度较高, 不同时期香溪河库湾分层异重流模式不同, 库湾营养盐各来源的贡献率也随之改变, 因此库湾营养盐在水库不同运行时期呈现出规律性变化.

**关键词:** 营养盐; 常量离子; 补给量; 贡献率; 来源估算

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0765-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201708174

## Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir

XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian\*, LIU De-fu, MA Jun

(Hubei Key Laboratory of Ecological Restoration of River-lakes and Algal Utilization, School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** The process of phytoplankton succession and change in primary productivity are directly determined by the seasonal variations in nutrients in tributary bays of channel reservoirs. This study aimed at analyzing the effects of the main nutrient sources on seasonal distribution of nutrients in Xiangxi Bay based on the field data collected in 2010 and 2011. The tracing inorganic ions were  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  that showed significant differences ( $P < 0.01$ ) between the mainstream and the tributary. The nutrient contribution rates of different sources were calculated by the binary linear model. The results showed that the nutrient contribution rate of the mainstream was more than 75% during the dry season and the impoundment period. The intrusion of the mainstream was the main source of nutrients in Xiangxi Bay. The difference in the contribution rates between the mainstream and the upstream decreased during the pre-flood drawdown period and the flood season. The concentration of total phosphorus was higher in the upstream, while the concentration of total nitrogen was higher in the mainstream. The patterns of density currents were different and the nutrient contribution rates of different sources changed accordingly. Therefore, the nutrients of Xiangxi Bay changed regularly in different operation periods of the Three Gorges Reservoir.

**Key words:** nutrients; inorganic ions; supply amount; contribution ratio; sources estimate

三峡水库自 2003 年蓄水以来, 部分支流多次出现不同程度的水华现象<sup>[1]</sup>, 已成为三峡水库当前主要的水环境问题<sup>[2]</sup>, 引起社会各界的极大关注<sup>[3-5]</sup>. 以香溪河库湾为例, 蓄水后由原来的河流水体转变为“湖泊(缓流)水体”, 每年均暴发了不同程度的水华<sup>[6]</sup>, 优势藻种总体上呈现由河流型(硅藻、甲藻)向湖泊型(绿藻、隐藻、蓝藻等)演变的趋势. 水华问题又进一步加剧了水体污染, 包括造成水体缺氧引起水生生物窒息、产生藻毒素(蓝藻)等<sup>[7]</sup>问题严重影响了库区人民的正常生活. 如何准确认识水库水华生消机制并进行有效防控是三峡水库目前迫切需要解决的问题.

有研究表明, 营养盐对水华优势种演替具有重要影响<sup>[8-10]</sup>. 目前三峡水库支流库湾营养盐来源还

不够明确, 部分文献着力于非点源对支流库湾营养盐的贡献研究<sup>[11-13]</sup>, 李重荣等<sup>[14]</sup>指出影响香溪河水质的主要流域点、面源污染. 李凤清等<sup>[15]</sup>也表明香溪河流域氮、磷营养盐主要以点、面源污染的方式进入河道. 胡征宇等<sup>[16]</sup>认为香溪河库湾营养盐主要来源于其上游古夫河和南阳河, 且磷负荷超过 95%. 但吉小盼等<sup>[17]</sup>、罗专溪等<sup>[18]</sup>指出在三峡水库泄水期, 香溪河库湾的营养状态受干流逆向影

收稿日期: 2017-08-21; 修订日期: 2017-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(91647207, 51509086, 51709096); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402204); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX071104-005-02)

作者简介: 徐雅倩(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水利, E-mail: artryxu@163.com

\* 通信作者, E-mail: 656637841@qq.com

响,张宇等<sup>[19]</sup>通过计算库湾过流断面总磷、总氮的瞬时通量得出干流倒灌对支流库湾营养盐的补给作用更大<sup>[20]</sup>,陈媛媛等<sup>[21]</sup>通过常量离子示踪表明香溪河库湾中游至河口营养盐以中层倒灌补给为主,而上游段受来流影响更大。

近期研究发现,三峡水库支流库湾分层异重流季节变化非常显著<sup>[22~24]</sup>,其与支流上游来水共同作用对支流营养盐季节性变化具有决定性影响,特别是每年3月上游来水从库湾表层流向长江干流<sup>[25]</sup>,这一过程对真光层内的营养盐补给可能对藻类水华产生较大影响,而目前已有的研究尚未阐明清楚.本文通过分析2010~2011年香溪河库湾跟踪监测数据,利用常量离子示踪技术,估算了不同水库运行期内长江干流及库湾上游来水分别对支流库湾营养盐的补给量及贡献率,并讨论了支流营养盐动态补给过程对水华的影响,以期深入研究河道型水库支流水华生消机制提供支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 监测方案

根据香溪河的地形地貌及水华暴发特点,从河口至回水末端昭君镇,沿河道中泓线约每间隔3 km 布设1个共11个监测点,依次记为XX00、XX01、XX02、XX03、XX04、XX05、XX06、XX07、XX08、XX09、XX10,如图1;在长江干流郭家坝水域布设1个监测点作为干流对照点,记为GJB;在香溪河库湾上游自然河道内设置1个监测点,记为YT(高水位时取古夫河和南阳河的均值,低水位时取两河交汇处监测值).采表层水样并带回实验室,根据文献<sup>[26]</sup>测定水中总氮(TN)、氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、硝氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )、总磷(TP)、正磷酸盐( $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$ )、叶绿素a(Chl-a)等浓度,用硅钼黄分光光度法<sup>[27]</sup>测定溶解性硅酸盐(D-SiO<sub>2</sub>)浓度,采用ICS3000离子色谱仪(美国戴安公司)测定常量离子( $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ )浓度,采用鲁哥沉降法浓缩藻种标本,在奥林巴斯CX31生物显微镜(10×40倍)下,根据文献<sup>[28]</sup>进行藻种的人工鉴定和细胞计数.调查采样期为2010年1月至2011年12月,常规监测频率为每周1次(常量离子监测频率为水库不同运行时期各1次);选取香溪河中游峡口镇水域的XX06采样点作为固定加密监测点,监测指标同上,监测频率一般为1~2 d一次。

### 1.2 保守常量离子示踪方法

有研究表明,香溪河库湾当前最大的两大污

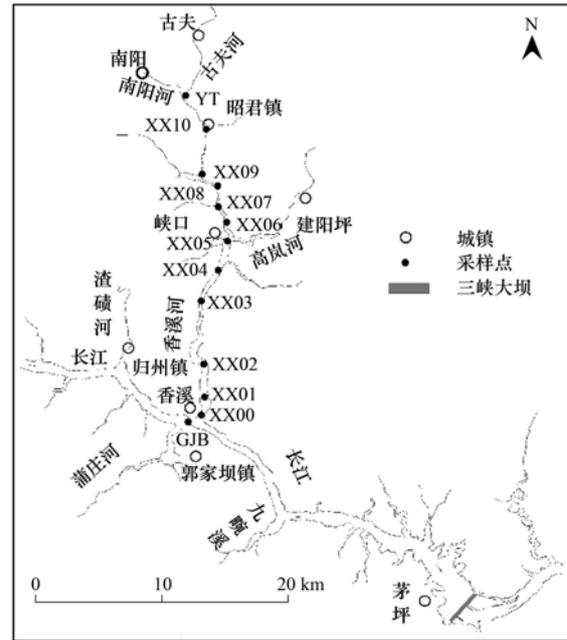


图1 香溪河库湾采样点布设位置示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Xiangxi Bay

染源主要是上游来水和长江倒灌<sup>[29]</sup>.假设在不同水位运行期内长江干流和香溪河上游来水水体中常量离子浓度基本稳定,忽略因水位变化导致的香溪河库湾水体的常量离子浓度变化,根据二源线性混合模型<sup>[30]</sup>计算在特定水位运行期内长江干流和上游来水对香溪河库湾水体的贡献率可得:

$$\begin{cases} x_{\text{CJ}} + x_{\text{Up}} = 1 \\ x_{\text{CJ}}c_{\text{CJ}} + x_{\text{Up}}c_{\text{Up}} = \bar{c}_{\text{XX}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x_{\text{CJ}}$ 和 $x_{\text{Up}}$ 分别为长江倒灌和香溪河上游来水对香溪河水体的贡献率,% , $c_{\text{CJ}}$ 、 $c_{\text{Up}}$ 和 $\bar{c}_{\text{XX}}$ 分别为长江水体、香溪河上游来水及香溪河库湾的示踪离子浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

根据库容曲线及实际水位情况可以得到香溪河库湾的库容 $V_{\text{XX}}$ , $\text{m}^3$ ,即可得到长江干流倒灌及香溪河上游来水对香溪湾输入的水团量分别为 $V_{\text{XX}}x_{\text{CJ}}$ 和 $V_{\text{XX}}x_{\text{Up}}$ , $\text{m}^3$ ;如果已知长江水体的营养盐浓度 $M_{\text{CJ}}$ 和上游来水营养盐浓度 $M_{\text{Up}}$ , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,可得长江干流倒灌及香溪河上游来水对香溪河库湾营养盐的贡献量 $T_{\text{CJ}}$ 、 $T_{\text{Up}}$ ,g,及贡献率 $\mu_{\text{CJ}}$ 、 $\mu_{\text{Up}}$ ,%;如表达式(2)所示,

$$\begin{cases} T_{\text{CJ}} = V_{\text{XX}}x_{\text{CJ}}M_{\text{CJ}} \\ T_{\text{Up}} = V_{\text{XX}}x_{\text{Up}}M_{\text{Up}} \\ \mu_{\text{CJ}} = x_{\text{CJ}}M_{\text{CJ}}/(x_{\text{CJ}}M_{\text{CJ}} + x_{\text{Up}}M_{\text{Up}}) \\ \mu_{\text{Up}} = 1 - \mu_{\text{CJ}} \end{cases} \quad (2)$$

### 1.3 示踪保守常量离子的选择

始终保持有化学保守特性的离子才能作为示踪离子，即在某一时期内与参照离子具有很好的线性关系<sup>[18,31]</sup>。2011 年香溪河库湾常规离子相关性矩阵排列见图 2。从中可知，若以  $\text{Cl}^-$  作为参照离子， $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  与之始终保持较好的线性关系（相关系数  $R$  依次为 0.94、0.87、0.85）；而且只有这 4 种离子呈显著相关性、并具有良好的线性特征，说明适合香溪河库湾的示踪离子应该在这 4 种离子中选取。

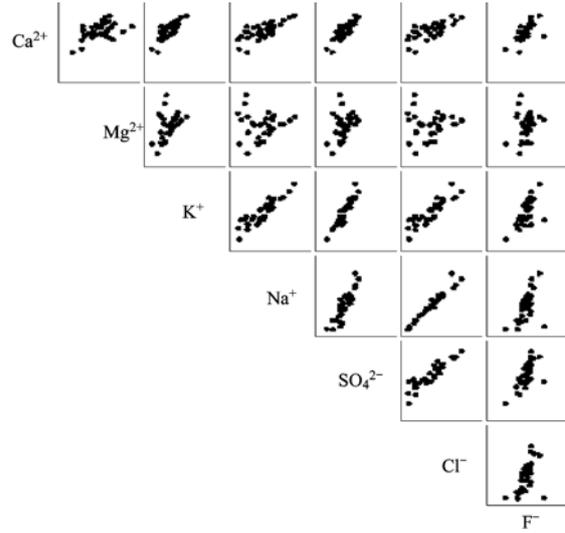


图 2 香溪河库湾常量离子矩阵排列  
Fig. 2 Matrix plots of conservative ions in Xiangxi Bay

## 2 结果与分析

### 2.1 营养盐(氮、磷、硅)季节性变化规律

图 3 是 2010~2011 年是监测点 XX06 表层氮、磷、硅营养盐浓度随时间变化规律。其中氮营养盐

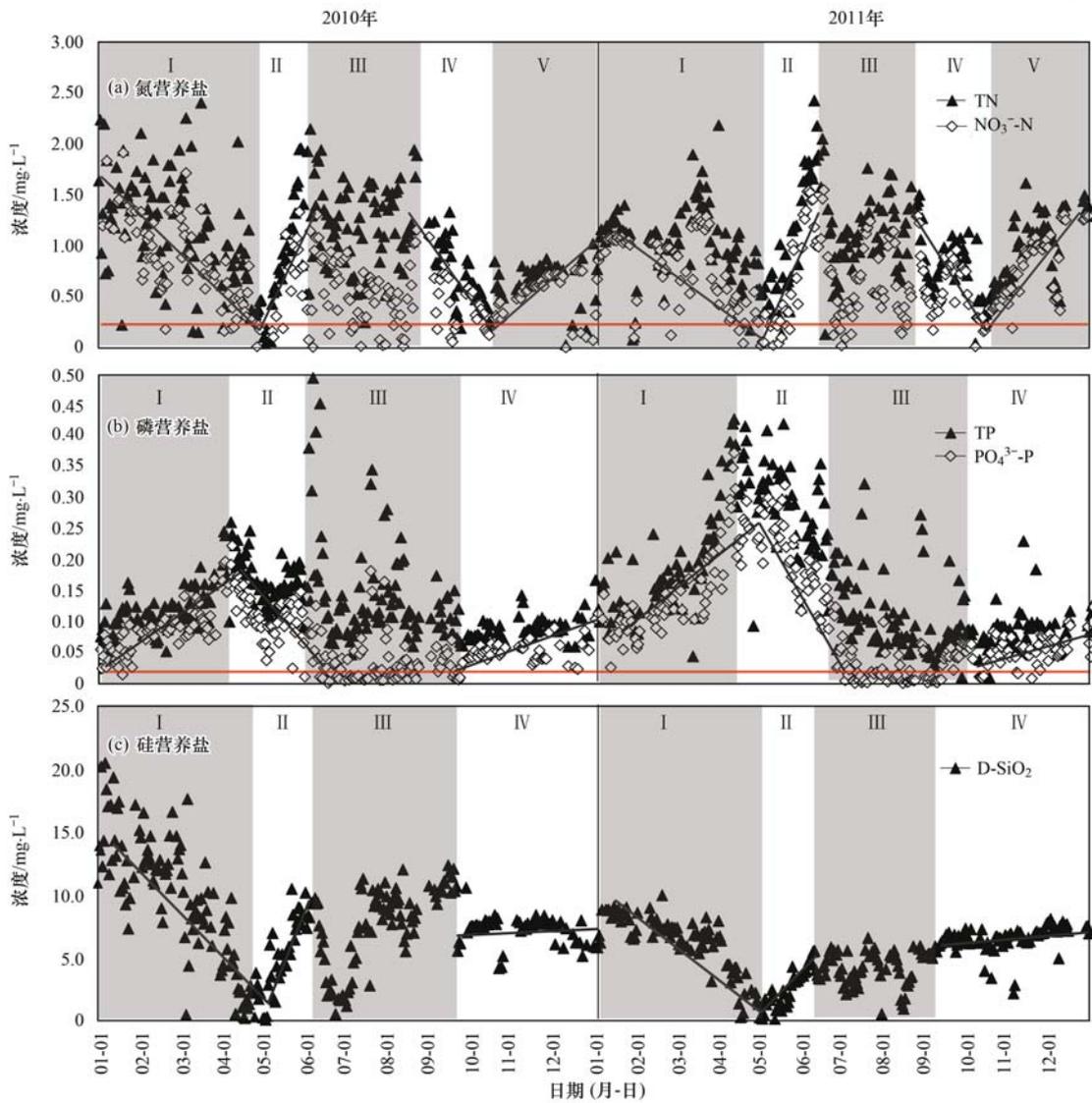


图 3 XX06 监测点表层营养盐随时间变化过程

Fig. 3 Nutrient variations in the surface layer with time at Site-XX06

以总氮(TN)和硝酸盐氮( $\text{NO}_3^-$ -N)表征,磷营养盐以总磷(TP)和磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ -P)表征,硅营养盐以溶解性二氧化硅( $\text{D-SiO}_2$ )表征.从图3(a)中可以看出,香溪河库湾总氮浓度略大于硝酸盐氮浓度,且二者变化趋势基本一致,说明硝酸盐氮是香溪河氮营养盐的主要组成部分.总体来看,年内氮营养盐浓度变化过程包含下降、明显升高、波动、下降、缓慢上升这5个阶段.香溪河库湾氮营养盐浓度绝大多数时间均超过 $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图中红线值),处于富营养状态.磷营养盐年内整体变化趋势[图3(b)]与氮营养盐[图3(a)]有较大差异,其变化过程基本可划分为4个阶段:升高、下降、波动、平稳中略有升高.硅酸盐年内整体变化趋势[图3(c)]与氮营养盐[图3(a)]相似,但其过程只分为4个阶段:下降、上升、波动、相对稳定(维持在 $6.00 \sim 8.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间).

## 2.2 保守离子( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ )时空分布规律

水库不同运行时期(枯水运用期 11月至次年 2

月、汛前泄水期 3~5月、汛期 6~8月、汛后蓄水期 9~10月)香溪河库湾 $\text{Cl}^-$ 与 $\text{Na}^+$ 关系分布特征见图4所示.从中可以看出, $\text{Cl}^-$ 与 $\text{Na}^+$ 具有较高的线性关系,在库湾的分布基本满足稀释线定律<sup>[32]</sup>,并且离子浓度分布规律均为干流>香溪河库湾>支流来水.但在水库不同运行期内,香溪河库湾的离子浓度分别与干流、支流来水的差异性有所变化:在枯水运用期的1月,如图4(a),库湾离子浓度更靠近长江干流;到汛前泄水期,如图4(b),库湾离子浓度已逐渐均匀分布在干流与支流之间,且略向支流来水倾斜;到8月汛期,如图4(c),香溪河库湾水体离子浓度基本均匀分布在两者之间;在汛后蓄水期的10月,如图4(d),此时香溪河库湾离子浓度明显更靠近长江干流而远离上游来水.干、支流 $\text{Cl}^-$ 与 $\text{Na}^+$ 的浓度存在显著差异( $P < 0.01$ ),并且这种分布差异在三峡水库不同的运行期的变化趋势也十分明显.也说明了通过离子示踪方法来分析香溪河库湾水团混合是可行且可靠的.

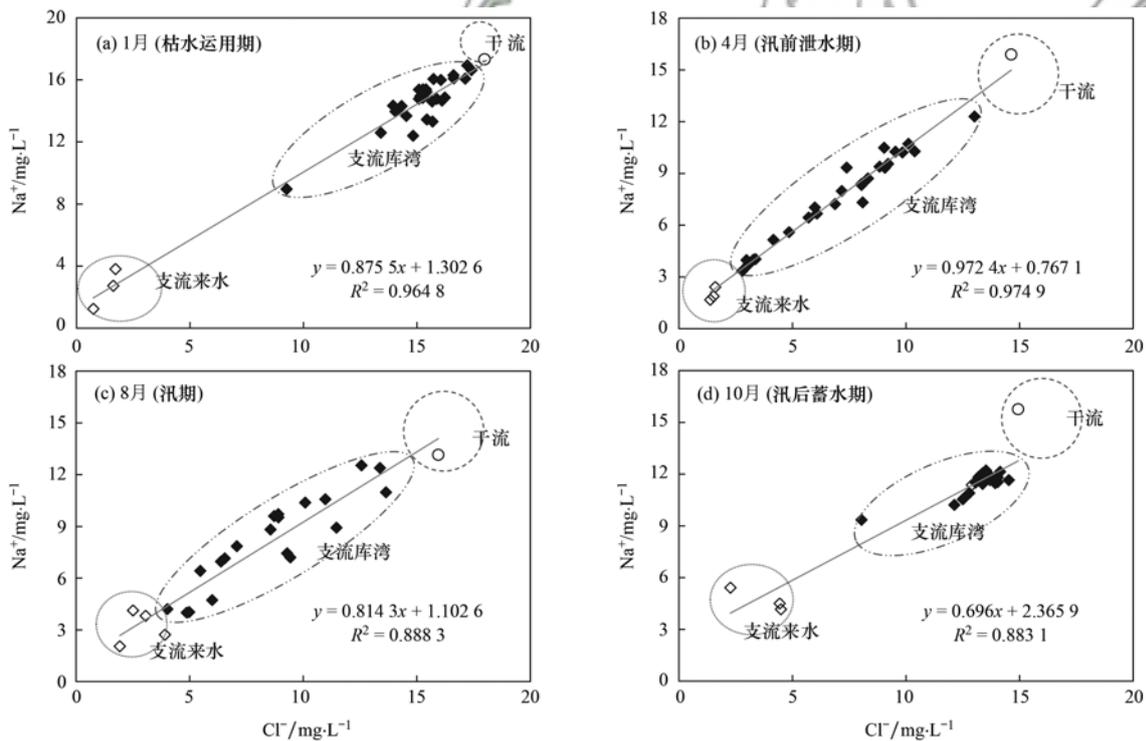


图4  $\text{Cl}^-$ 与 $\text{Na}^+$ 对应关系在三峡水库干支流分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of the relation between  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$

## 2.3 香溪河库湾营养盐来源估算

根据水体示踪模型[式(1)],计算出不同时期的香溪河库湾水体主要来源贡献率见表1.以 $\text{Cl}^-$ 作为示踪离子,各时期长江干流对支流库湾水体的贡献大小顺序为:汛后蓄水期>枯水运用期>汛前泄水期>汛期,分别为85.87%、84.98%、

66.82%、54.99%. $\text{Na}^+$ 作为示踪离子的计算结果与 $\text{Cl}^-$ 的计算结果整体上类似,说明香溪河库湾水体主要来源于长江干流,但支流上游来水对库湾水体的贡献亦不可忽略,尤其在汛前泄水期和汛期.

以 $\text{Cl}^-$ 为示踪剂,根据营养盐示踪模型[式

(2)], 计算出不同时期的香溪河库湾主要营养盐的来源贡献率如表 2. 在枯水运用期, 长江干流对香溪河库湾总氮贡献率达到 87.67%, 总磷贡献率达到 86.75%, 其它营养盐贡献率均超过了 80%. 到汛前泄水期的 4 月, 长江干流对支流氮和硅营养

盐的贡献率仍然占主导作用, 超过 70%, 但对磷营养盐的贡献明显降低, 基本与上游来水的贡献持平; 到汛期, 长江倒灌与上游来水对支流库湾营养盐的贡献相对持平; 到汛后蓄水期, 长江干流对支流营养盐的贡献又超过 80%.

表 1 不同水团对香溪河库湾水体的贡献率(保守离子示踪)

Table 1 Contribution rate of different water masses to water in Xiangxi Bay (conservative ion tracing)

时间	地点	Cl <sup>-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	水体贡献率(Cl <sup>-</sup> ) /%	Na <sup>+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	水体贡献率(Na <sup>+</sup> ) /%
1 月 枯水运用期	长江干流	17.978	84.98	17.331	83.38
	上游来水	1.182	15.02	1.989	16.62
	香溪河库湾	15.454		14.781	
4 月 汛前泄水期	长江干流	13.624	66.82	15.896	57.03
	上游来水	1.453	33.18	1.775	42.97
	香溪河库湾	8.586		8.828	
8 月 汛期	长江干流	15.942	54.99	13.150	60.11
	上游来水	1.925	45.01	2.051	38.89
	香溪河库湾	8.633		8.723	
10 月 汛后蓄水期	长江干流	14.930	85.87	15.764	70.69
	上游来水	3.379	14.13	4.789	28.31
	香溪河库湾	13.297		12.547	

表 2 不同水团对香溪河库湾营养盐的贡献率(Cl<sup>-</sup>)/%

Table 2 Contribution Rate of Different Water Masses to Nutrients in Xiangxi Bay (Cl<sup>-</sup>)/%

时间	地点	TN	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TP	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	D-SiO <sub>2</sub>
1 月 枯水运用期	长江干流	87.67	86.34	91.08	86.75	85.91	88.61
	上游来水	12.33	13.66	8.92	13.25	14.09	10.39
4 月 汛前泄水期	长江干流	83.48	76.28	73.63	50.42	51.25	73.03
	上游来水	16.52	23.72	26.37	48.58	48.75	26.97
8 月 汛期	长江干流	60.73	56.97	26.29	53.25	74.62	68.32
	上游来水	38.27	43.03	73.71	46.75	25.38	31.68
10 月 汛后蓄水期	长江干流	86.86	88.01	86.14	82.98	85.87	86.11
	上游来水	13.14	11.99	13.86	17.02	14.13	13.89

### 3 讨论

#### 3.1 不同时期支流库湾真光层营养盐来源的成因分析

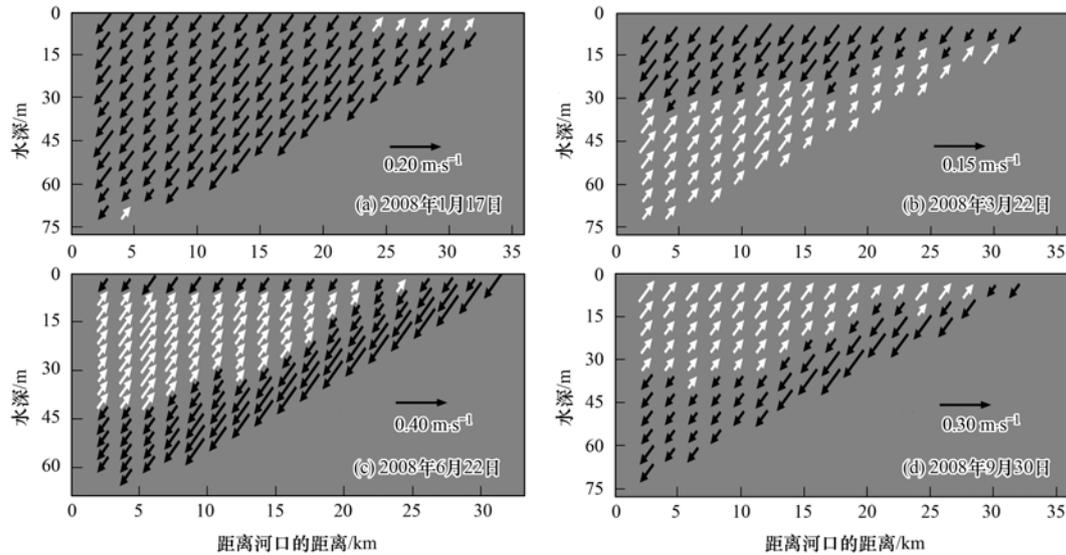
有研究表明, 不同时期长江干流以不同的倒灌形式与库湾水体进行物质交换, 不同时期的分层异重流典型分布<sup>[22,33]</sup>, 如图 5 所示: 底部倒灌楔[图 5(a)](为底部倒灌的初始阶段)、底部倒灌[图 5(b)]、中层倒灌[图 5(c)]、表层倒灌[图 5(d)], 这些过程必然导致干、支流间营养盐的交换.

在枯水运用期[图 4(a)], 库湾离子浓度更靠近长江干流, 这说明此时香溪河库湾水体化学特征与长江干流更为相似, 而 1 月无显著的倒灌异重流, 而香溪河上游来水几乎为零, 此时香溪河库湾水体主要是前一年三峡水库蓄水时倒灌进入的长江干流水体. 从 2 月~4 月, 香溪河库湾分层异重流

开始出现, 并逐步演化为底部倒灌[图 5(b)], 即长江干流水体自底部倒灌入香溪河, 香溪河上游来水逐渐增大, 且以表层水流形式流向干流, 因而导致香溪河库湾离子浓度特征逐渐向香溪河上游来水倾斜[图 4(b)].

到 8 月汛期[图 4(c)], 香溪河库湾水体离子浓度基本均匀分布在两者之间, 这说明干流倒灌及上游来水在此时对香溪河库湾均具有较强的影响, 这与汛期的不稳定水文事件正好对应. 在汛后蓄水期的 10 月, 如图 4(d), 此时香溪河库湾离子浓度明显更靠近长江干流而远离上游来水, 这说明在蓄水期库湾水体化学特征与长江干流极为相似、受上游来水影响很小, 这一分布特征与该期间发生的表层倒灌异重流事件正好吻合.

一般湖泊及普通水库水体真光层营养盐来源主要包括点源、面源、内源等, 其补给过程主要是水



白色矢量表示流入库湾, 黑色矢量表示流出库湾, 矢量长度表示流速大小

图5 香溪河库湾分层异重流的典型分布<sup>[33]</sup>

Fig. 5 Typical distribution of density-stratified flow in Xiangxi Bay<sup>[33]</sup>

流输移、对流与扩散、内源悬浮以及冬季水体垂向混合 (overtum) 等, 其中湖泊水体不同水体垂向循环过程对表层营养盐的补给具有重要作用<sup>[34]</sup>. 但三峡水库支流库湾与此有显著区别, 分层异重流背景使得库湾真光层营养盐更多受长江干流倒灌和支流上游来水的影响, 尤其是香溪河这样典型的支流, 其上游来水富磷 [上游 TP ( $0.24 \pm 0.41$ )  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ] > 干流 TP ( $0.15 \pm 0.11$ )  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ], 而长江干流含氮 [上游 TN ( $0.66 \pm 0.57$ )  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ] < 干流 TN ( $1.11 \pm 0.55$ )  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ], 硅 [上游 D-SiO<sub>2</sub> ( $7.56 \pm 3.23$ )  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ] < 干流 D-SiO<sub>2</sub> ( $10.36 \pm 2.94$ )  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ] 较高, 二者对库湾真光层营养盐的贡献非常显著. 以2010年为例, 香溪河库湾满库容时总氮含量约为1052 t, 总磷含量约为131.53 t. 然而, 根据李凤清<sup>[15]</sup>的计算结果, 上游来水中每年有1623.49 t总氮和331.85 t总磷汇入香溪河库湾, 大于香溪河实际容量, 这说明上游来水的营养盐进入香溪河库湾后并未完全停留在库湾内, 而常量离子示踪也表明, 每年的长江倒灌导致的三峡水库干支流营养盐交换量比上游来水的还要大. 这说明, 香溪河库湾干支流交换过程和上游来水入库交换过程对支流营养盐影响要远远超过香溪河库湾其它交换过程. 根据常量离子示踪结构来看, 并参照 Yang 等<sup>[35]</sup>的氢氧同位素示踪、胡雪<sup>[36]</sup>的氮同位素示踪的结果, 以年度作为评价时段, 长江干流倒灌贡献要比上游来水贡献更大, 因此, 香溪河库湾水体营养盐主要源于长江干流.

### 3.2 香溪河库湾营养盐动态补给过程对水华优势种的影响

香溪河全库湾的总藻密度月均值变化如图6, 库湾藻密度季节性规律表现为: 迅速增长和峰值分别出现在汛前泄水期和汛期, 汛后蓄水期明显降低, 而枯水期藻密度很低. 全年硅藻占优、绿藻次之. 此外, 枯水期末(2月)甲藻占优, 汛期末(8月)蓝藻占优. 水华情势与分层异重流背景下香溪河库湾营养盐的动态补给过程对应关系如图7所示.

当水库处于汛后蓄水期和枯水运行期时, 水库为持续涨水状态或高水位运行. 每年9~10月, 异重流为表层倒灌, 库湾真光层内的营养显然主要由长江干流水平输移补给, 而干流水体总磷浓度较其他时期低, 该种条件下水华暴发风险较小, 优势种以硅、绿藻为主. 在11月~次年2月, 整个三峡水库上游来水减小, 流域补给的营养盐随之减小, 但此时整个水体滞留时间增大, 库湾氮磷硅营养盐浓度相较于其他时期稳定于中间水平, 但此时期冬季水温较低, 不适宜藻类生长, 因此藻密度很低.

当水库处于汛前泄水期(3~5月), 水库水位持续下降, 异重流模式从底部倒灌楔发展为底部倒灌, 到4月之后, 异重流模式逐渐转变为中层倒灌 [图5(c)]. 香溪河上游来水流量开始增大, 表层水体中营养盐以上游来水补给为主. 该时期上游补给磷营养盐比例增加, 使得库湾磷浓度增加, 藻密度迅速增加, 优势种以硅、绿、隐藻为主.

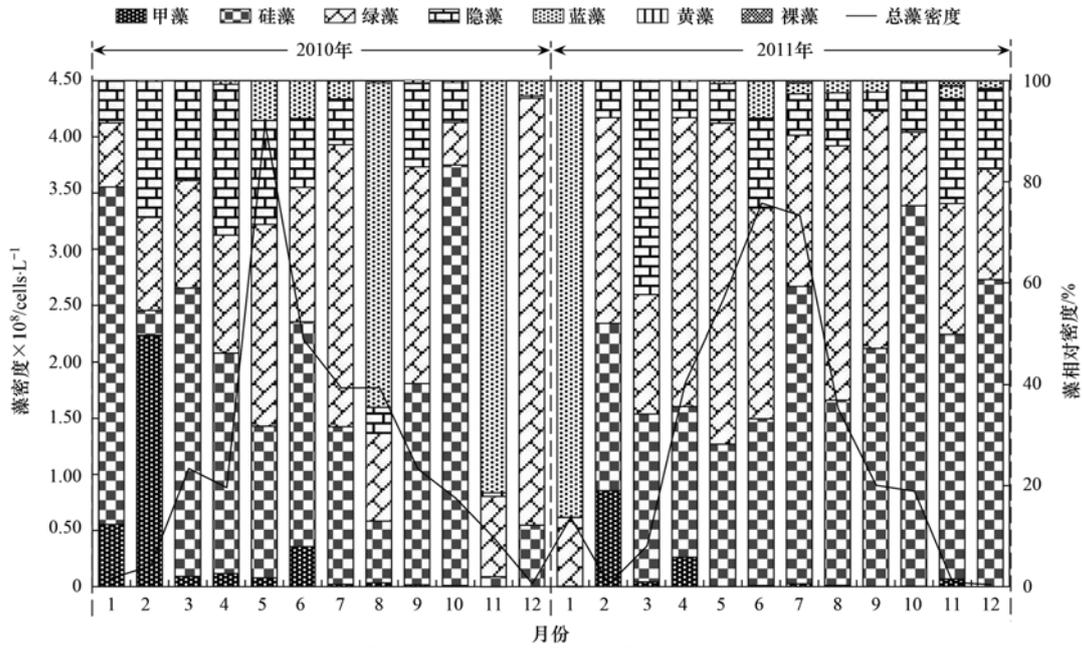


图6 香溪河全库湾藻密度月均值变化

Fig. 6 Monthly average algal cell density in Xiangxi Bay

当水库处于汛期(6~8月)时,异重流模式为中层倒灌,水位波动剧烈并时常突降暴雨,很容易

打破水体层化结构导致真光层营养盐补给模式的不断转换,与图3显示在此阶段3种营养盐均呈现复杂的

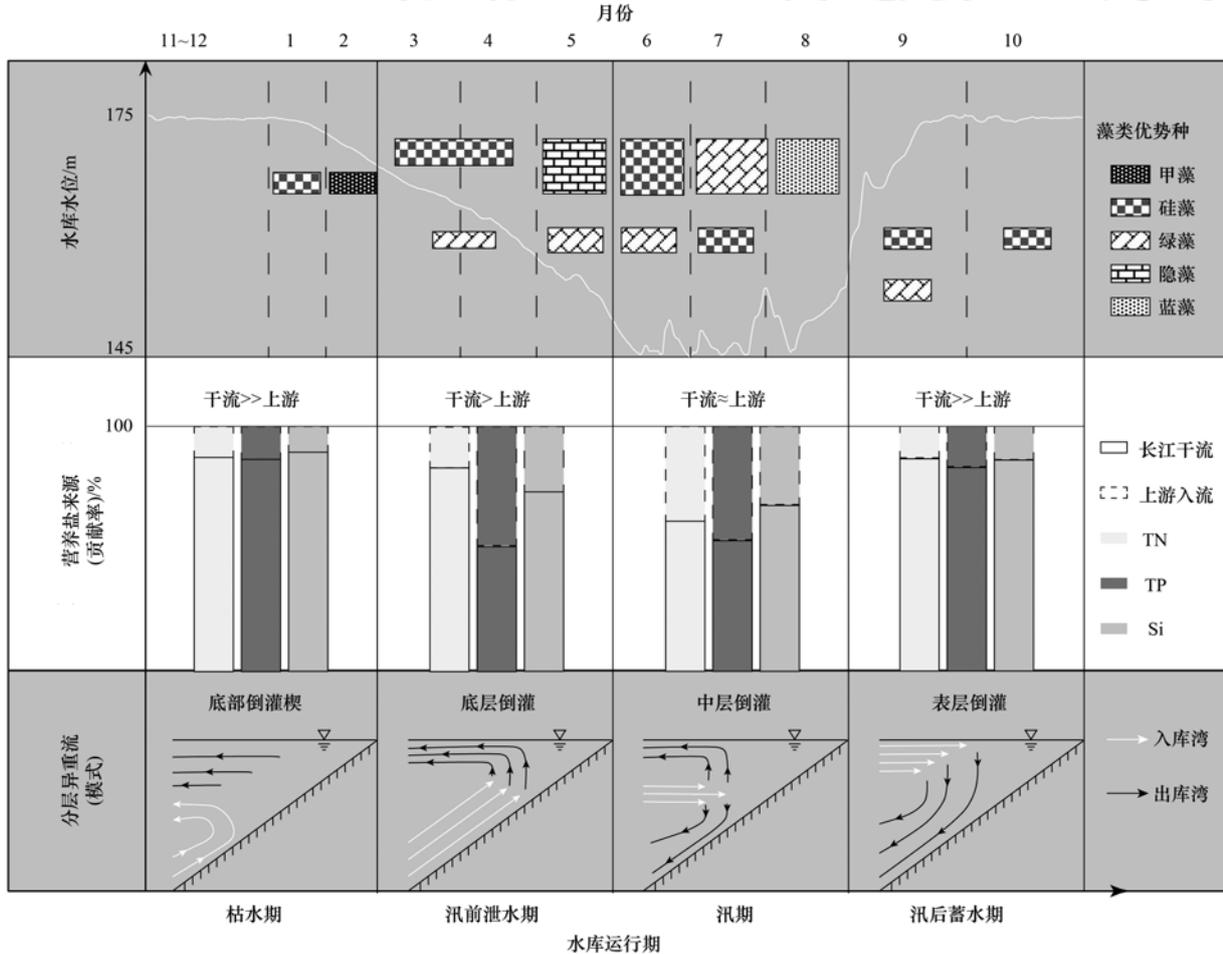


图7 异重流背景下的营养盐补给过程及藻类优势种演替

Fig. 7 Nutrient remediation process and dominant algae species under density currents in Xiangxi Bay

波动状态相符. 该时期硅营养盐出现最低水平, 因而硅藻优势逐渐消失, 水华优势种以蓝、绿藻为主.

贫营养水体中氮磷比对藻类生长影响较为明显, 氮磷浓度处于较高水平时其比值对藻类生长影响较小<sup>[37]</sup>. 香溪河库湾的氮磷营养盐长期处于富营养化水平, 尤其是氮营养盐整体高于  $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 因此库湾水华优势种主要受到磷和硅营养盐浓度其变化过程的影响. 磷是多数淡水水体中藻类生长的主要限制因子<sup>[38~40]</sup>, 因此库湾磷浓度增加时会引起藻密度剧增, 磷浓度下降时或持续较低时抑制藻类生长. 竞争条件下, 蓝藻更适宜于中等偏低营养水平而绿藻适宜于中等偏高营养水平<sup>[37]</sup>, 因此蓝藻除了在 8 月占优外, 全年其他时期绿藻更具优势.

#### 4 结 论

(1) 长江干流倒灌和上游来水是香溪河库湾营养盐主要来源; 当水库处于汛后蓄水期和枯水运行期时, 长江干流倒灌的营养盐贡献率超过 75%, 远大于上游来水, 为库湾营养盐主要来源; 在汛前泄水期和汛期时, 干流和上游的贡献率差异缩小, 库湾营养盐来源需考虑两者共同的影响, 但干流倒灌仍占据优势; 若以年尺度评价, 库湾营养盐主要来源于长江干流倒灌.

(2) 上游来水磷营养盐浓度较高, 长江干流氮、硅营养盐浓度高; 香溪河库湾营养盐来源贡献率随不同时期异重流模式的变化而变化, 因此库湾营养盐浓度呈现出季节性变化.

(3) 库湾水华优势种季节性变化主要受到磷和硅营养盐动态补给过程影响; 磷浓度上升时藻密度迅速增加, 绿藻比蓝藻更具优势; 磷浓度下降时或持续较低时藻类生长受抑制; 硅浓度降低时硅藻优势逐渐降低.

#### 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 (<http://www.zhb.gov.cn/hjzl/shj/sxgb/>) [ R ]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2004-2011.
- [ 2 ] 吴晓青. 完善环保标准 推进环保工作 (<http://www.gov.cn/zxft/ft108/>) [ R ]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2008.
- [ 3 ] 叶阔, 洪一平, 彭盛华, 等. 三峡水库水体富营养化的潜势分析 [ A ]. 见: 湖北省农村水电发展行业研讨会论文集 [ C ]. 武汉: 湖北省水利学会, 2005. 297-302.
- [ 4 ] 曹明, 蔡庆华, 刘瑞秋, 等. 三峡水库库首初期蓄水前后理化因子的比较研究 [ J ]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 12-19.  
Cao M, Cai Q H, Liu R Q, et al. Comparative research on physicochemical factors in the front of Three Gorges Reservoir before and after the initiate impounding [ J ]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, **30**(1): 12-19.
- [ 5 ] 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.  
Zhang E R, Zhang J. Analysis of the Three-Gorge Reservoir impacts on the retention of N and P in the Yangtze River [ J ]. Journal of Lake Sciences, 2003, **15**(1): 41-48.
- [ 6 ] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究 [ J ]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 7-11.  
Cai Q H, Hu Z Y. Studies on eutrophication problem and control strategy in the Three Gorges Reservoir [ J ]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, **30**(1): 7-11.
- [ 7 ] 周云龙, 于明. 水华的发生、危害和防治 [ J ]. 生物学通报, 2004, **39**(6): 11-14.  
Zhou Y L, Yu M. Occurrence, harm and control of water-flower [ J ]. Bulletin of Biology, 2004, **39**(6): 11-14.
- [ 8 ] 汤宏波, 刘国祥, 胡征宇. 三峡库区高岚河甲藻水华的初步研究 [ J ]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 47-51.  
Tang H B, Liu G X, Hu Z Y. Preliminary research on the algal bloom of *Peridiniopsis* sp. in Gaolan River of the Three Gorges Reservoir [ J ]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, **30**(1): 47-51.
- [ 9 ] 方涛, 付长营, 敖鸿毅, 等. 三峡水库蓄水前后香溪河氮磷污染状况研究 [ J ]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 26-30.  
Fang T, Fu C Y, Ao H Y, et al. The comparison of phosphorus and nitrogen pollution status of the Xiangxi Bay before and after the impoundment of the Three Gorges Reservoir [ J ]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, **30**(1): 26-30.
- [ 10 ] 姚绪姣, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾冬季甲藻水华生消机理初探 [ J ]. 环境科学研究, 2012, **25**(6): 645-651.  
Yao X J, Liu D F, Yang Z J, et al. Preliminary studies on the mechanism of winter dinoflagellate bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [ J ]. Research of Environmental Sciences, 2012, **25**(6): 645-651.
- [ 11 ] 朱联东, 李兆华, 陈红兵, 等. 兴山香溪河流域农业面源污染问题及防治对策研究 [ J ]. 环境研究与监测, 2009, **22**(3): 11-13, 19.
- [ 12 ] 吴磊, 龙天渝, 刘霞. 三峡库区小流域氮磷污染负荷估算 [ J ]. 中国给水排水, 2012, **28**(21): 120-124.  
Wu L, Long T Y, Liu X, et al. Nitrogen and phosphorus pollution load estimation in small watershed in Three Gorges Reservoir area [ J ]. China Water & Wastewater, 2012, **28**(21): 120-124.
- [ 13 ] 贾海燕, 雷阿林, 王孟, 等. 三峡库区农业非点源污染的区域特征及研究进展 [ J ]. 亚热带水土保持, 2011, **23**(1): 26-30.  
Jia H Y, Lei A L, Wang M, et al. Regional characteristics and research progress of agricultural non-point pollution in the reservoir area of Three Gorges [ J ]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2011, **23**(1): 26-30.
- [ 14 ] 李重荣, 王祥三, 黎明. 三峡库区香溪河流域污染负荷研究 [ J ]. 武汉大学学报(工学版), 2003, **36**(2): 29-32.  
Li C R, Wang X S, Dou M. Research of pollution load in Xiangxi River Basin of Three Gorges Reservoir area [ J ]. Engineering Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2003, **36**(2): 29-32.
- [ 15 ] 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 the main nutrients input to Xiangxi Bay of Three Gorge Reservoir [ J ]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(5): 2073-2079.
- [ 16 ] 胡征宇, 蔡庆华. 三峡水库蓄水前后水生态系统动态的初步研究 [ J ]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 1-6.

- Hu Z Y, Cai Q H. Preliminary report on aquatic ecosystem dynamics of the Three Gorges Reservoir before and after impoundment[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 1-6.
- [17] 吉小盼, 刘德富, 黄钰铃, 等. 三峡水库泄水期香溪河库湾营养盐动态及干流逆向影响[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(12): 2687-2693.
- Ji X P, Liu D F, Huang Y L, *et al.* Dynamic characteristics of nutrients in Xiangxi Bay and converse impact from mainstream in drainage period of the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, **4**(12): 2687-2693.
- [18] 罗专溪, 朱波, 郑丙辉, 等. 三峡水库支流回水河段氮磷负荷与干流的逆向影响[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(2): 208-212.
- Luo Z X, Zhu B, Zheng B H, *et al.* Nitrogen and phosphorus loadings in branch backwater reaches and the reverse effects in the main stream in Three Gorges Reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2007, **27**(2): 208-212.
- [19] 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.
- [20] Yang Z J, Liu D F, Ji D B, *et al.* Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5 m on water eutrophication in the Xiangxi Bay[J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, **53**(4): 1114-1125.
- [21] 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.
- [22] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2010, **40**(1): 101-112.
- Ji D B, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2010, **40**(1): 101-112.
- [23] Ma J, Liu D F, Wells S A, *et al.* Modeling density currents in a typical tributary of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Ecological Modelling*, 2015, **296**: 113-125.
- [24] 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]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(3): 443-454.
- [25] 张宇. 水库调度对香溪河库湾水流特性的影响[D]. 宜昌: 三峡大学, 2013. 80-86.
- Zhang Y. The influence of reservoir operation on flow characteristics of Xiangxi Bay[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2013. 80-86.
- [26] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 88-284.
- [27] SL 91. 2-1994, 二氧化硅可溶性的测定(硅钼蓝分光光度法)[S].
- [28] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 23-903.
- [29] 牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 等. 三峡库区沉积物秋末冬初的磷释放通量估算[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1308-1314.
- Niu F X, Xiao S B, Wang Y C, *et al.* Estimation of releasing fluxes of sediment phosphorous in the Three Gorges Reservoir during late autumn and early winter[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1308-1314.
- [30] 邓文平, 余新晓, 贾国栋, 等. 利用稳定氢氧同位素定量区分栓皮栎旱季水分来源的方法比较[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, **21**(3): 412-422.
- Deng W P, Yu X X, Jia G D, *et al.* Comparison of the methods using stable hydrogen and oxygen isotope to distinguish the water source of quercus variabilis in dry season[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, **21**(3): 412-422.
- [31] 杨柳, 刘德富, 杨正健, 等. 基于常量离子示踪技术的香溪河库湾分层异重流特性研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(2): 278-285.
- Yang L, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Density-stratified flow of Xiangxi Bay at Three Gorges Reservoir based on the tracer principle of inorganic ion[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(2): 278-285.
- [32] 陈敏. 化学海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2009. 21-32.
- [33] 杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流水华生态机理及其调控[D]. 武汉: 武汉大学, 2014. 31-34.
- Yang Z J. The mechanisms of algal blooms and its operation method through water level fluctuation under the situation of the bidirectional density currents in tributaries of the Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. 31-34.
- [34] Boehrer B, Schultze M. Stratification of lakes[J]. *Reviews of Geophysics*, 2008, **46**(2): RG2005.
- [35] 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.
- [36] 胡雪. 三峡水库香溪河库湾藻类可利用氮盐来源研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2016. 72-94.
- Hu X. Nitrogen supply for the algal growth in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2016. 72-94.
- [37] 万蕾, 朱伟, 赵联芳. 氮磷对微囊藻和栅藻生长及竞争的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(6): 1230-1235.
- Wan L, Zhu W, Zhao L F. Effect of nitrogen and phosphorus on growth and competition of *M. aeruginosa* and *S. quadricauda* [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(6): 1230-1235.
- [38] Hecky R E, P Kilham. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment[J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**(4 part2): 796-822.
- [39] 赵先富, 马沛明, 刘国祥, 等. 不同磷浓度对小球藻铜绿微囊藻生长及生理的影响[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(11): 1-6.
- Zhao X F, Ma P M, Liu G X, *et al.* Status of *Chlorella* sp. and *Microcystis aeruginosa* in different phosphorus concentrations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(11): 1-6.
- [40] 王睿喆, 王沛芳, 任凌霄, 等. 营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1301-1308.
- Wang R Z, Wang P F, Ren L X, *et al.* Effects of nutrient inputs on changes of phosphorus forms and phytoplankton growth in Taihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1301-1308.

## CONTENTS

Preface .....	HAO Zheng-ping ( 477 )
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment .....	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> ( 478 )
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing .....	..... HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> ( 493 )
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone .....	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> ( 502 )
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park .....	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> ( 511 )
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China .....	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> ( 517 )
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park .....	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> ( 525 )
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China .....	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> ( 533 )
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao .....	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> ( 543 )
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province .....	..... YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> ( 551 )
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making .....	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> ( 557 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers .....	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> ( 567 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu .....	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> ( 576 )
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors .....	..... JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> ( 585 )
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province .....	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue ( 592 )
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City .....	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> ( 600 )
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014 .....	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> ( 608 )
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing .....	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> ( 618 )
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel .....	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> ( 626 )
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter .....	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> ( 633 )
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter .....	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> ( 640 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event .....	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> ( 648 )
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems .....	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> ( 655 )
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes .....	TONG Rui-peng, ZHANG Lei ( 663 )
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing .....	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> ( 672 )
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Beijing .....	..... YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> ( 684 )
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method .....	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> ( 691 )
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China .....	..... WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> ( 703 )
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling .....	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> ( 711 )
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis .....	..... LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> ( 720 )
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China .....	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> ( 729 )
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake .....	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> ( 738 )
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China .....	..... LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> ( 748 )
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter .....	..... ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> ( 758 )
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir .....	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> ( 765 )
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis .....	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> ( 774 )
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream .....	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> ( 783 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area .....	..... ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> ( 792 )
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment .....	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> ( 800 )
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors .....	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> ( 811 )
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel .....	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> ( 819 )
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution .....	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> ( 828 )
Mechanism of MgO/GAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds .....	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> ( 838 )
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs .....	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> ( 844 )
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology .....	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> ( 852 )
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant .....	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> ( 859 )
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode .....	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> ( 865 )
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge .....	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> ( 872 )
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate .....	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> ( 880 )
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil .....	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> ( 889 )
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin .....	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> ( 899 )
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss .....	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> ( 909 )
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area .....	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> ( 916 )
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai .....	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> ( 927 )
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables .....	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> ( 935 )
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils .....	..... LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> ( 944 )
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors .....	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> ( 953 )