

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

姜伟^{1,2}, 周川^{1,2}, 纪道斌³, 刘德富³, 任豫霜^{1,2}, Douglas Haffner^{1,2,4}, 谢德体^{1,2}, 张磊^{1,2,4*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 三峡库区水环境监测与模拟国际科技合作基地, 重庆 400716; 3. 三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443000; 4. 加拿大温莎大学大湖环境研究中心, 加拿大安大略省温莎市, N9B 3P4)

摘要: 三峡库区北岸最大一级支流自三峡大坝 2003 年蓄水以来, 频繁暴发水华, 而毗邻的一级支流磨刀溪却少有水华暴发。本文以澎溪河和磨刀溪作为研究对象, 于 2014 年春季和夏季三峡库区水华高发期对两条河流同时采样, 对比分析两条河流水体水质以及叶绿素 a (Chl-a) 含量的时空变化, 探索澎溪河水华暴发机理。结果表明: 澎溪河 Chl-a 含量较磨刀溪高, 澎溪河春季 Chl-a 最大值为 $60.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 夏季 Chl-a 最大值仅 $7.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 磨刀溪 Chl-a 变化趋势与澎溪河相反, 磨刀溪春季 Chl-a 含量为 $2.92 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 夏季 Chl-a 达到 $7.48 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。澎溪河与磨刀溪春季和夏季节水体温度分层, 为温跃层 + 滞温层模式, 而没有混合层; 两条河流 Chl-a 含量均位于水深 10 m 温跃层。澎溪河春季总氮 (TN)、总磷 (TP) 平均值为 $2.305 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.053 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 夏季为 $1.673 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.097 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 磨刀溪春季为 $1.875 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.075 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 夏季为 $1.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.054 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。TN、TP 水平均超过了国际公认发生富营养化的阈值; 水体氮磷含量与 Chl-a 浓度并无显著相关性, 营养盐并不是藻类生物量的限制性因素。然而在水体电导率的规律方面, 两条河却存在很大的差异: 春季, 磨刀溪上游上层水体 (0~10 m) 电导率只有下游和长江干流的 75%, 来自长江干流的回水可覆盖至磨刀溪中游 (断面 MD03), 与 Chl-a 在此处密集保持一致; 夏季电导率和回水区分布与春季相似。与磨刀溪不同, 澎溪河春季上游电导率为下游和干流的 150%, 长江干流回水可到 PX04 与 PX05 之间, 上游高电导率对应着高 Chl-a 含量; 澎溪河电导率与藻类生长分布表现出显著正相关关系, 水体中除 N、P 营养盐外的其它离子对澎溪河水华暴发起重要作用。

关键词: 澎溪河; 磨刀溪; 水华; 水温分层; 电导率; Chl-a

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2326-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201610183

Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir

JIANG Wei^{1,2}, ZHOU Chuan^{1,2}, JI Dao-bin³, LIU De-fu³, REN Yu-shuang^{1,2}, Douglas Haffner^{1,2,4}, XIE De-ti^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2,4*}

(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Innovative Monitoring and Prediction of Non-point Sources Pollution and Water Quality in the Three Gorges Reservoir Catchment, Chongqing 400716, China; 3. Engineering Research Centre of Eco-Environment in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Three Gorges University, Yichang 443000, China; 4. Great Lakes Environmental Research Center, University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada, N9B 3P4)

Abstract: Pengxi River is the largest tributary in the northern bank of Yangtze River in the Three Gorges Reservoir (TGR) region, and serious algal bloom has been reported since 2003 when the TGR dam started impounding water. On the other hand, Modao River, a tributary in TGR locating in the same county with Pengxi River, was rarely reported with algal bloom in the same time period. In this study, water samples were collected on the same day in both rivers in spring and summer, the most likely blooming seasons in TGR, to compare the water quality parameters and Chlorophyll-a (Chl-a) concentration dynamics in order to understand the mechanism of algal bloom in TGR. The results showed that the maximum value of Chl-a in Pengxi river reached $60.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ in spring, and was only $7.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ in summer, while in Modao river the Chl-a content was $2.92 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ in spring and $7.48 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ in summer. Both rivers stratified during samplings, but having layers of thermocline and hypolimnion with the lack of epilimnion, and most of Chl-a content was located in thermocline. Also in both rivers, TN and TP exceeded the international threshold for eutrophication, with the average TN and TP values of $2.305 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.053 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in Pengxi River in spring, and $1.673 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.097 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in summer, respectively, while in Modao River the values were $1.875 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.075 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in spring, and $1.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.054 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in summer respectively. Nutrients concentrations showed no significant correlation with Chl-a. On the other hand, conductivity

收稿日期: 2016-10-25; 修订日期: 2017-01-04

基金项目: 国家科技合作基地经费项目

作者简介: 姜伟 (1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤修复与水生生态学, E-mail: 327160184@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhanglei5401@163.com

value and trend were totally different between the two rivers: in Modao River in spring, the conductivity in upstream was only 75% of that in the main stream of the Yangtze River, and the backwater from the main stream reached to the middle in Modao river, where the highest Chl-a among all the river sampling sites was detected; summer conductivity distribution was similar with that in spring. Different from Modao River, the conductivity in upstream of Pengxi River in spring was 150% of that in the main stream of Yangtze, the backwater from the main stream reached area between sampling sites of PX04 and PX05 (upper than the middle reach); its upstream had significantly high content of Chl-a and conductivity, and these two factors were significantly positively correlated. The study showed that other than N and P, other ions in the Pengxi River played an important role in bursting "bloom", and need to be considered regarding bloom control.

Key words: Pengxi River; Modao River; algal blooms; stratification; conductivity; chlorophyll-a

三峡库区蓄水后,长江干流由于水量和流速大,仍保持河道型,而支流库湾则由原来的河流型变为河流湖泊型,水动力条件、营养的输移和分布模式都发生了显著变化^[1-2]。支流回水区水深增加,流速减缓,近岸水域纳污能力减小,部分支流库湾受回水顶托,营养物质大量富集,成为富营养化的敏感水域,出现严重的富营养化状态,藻类大量生长,暴发不同程度的水华现象^[3-5]。在众多有关三峡库区支流富营养化和水华暴发机理的研究中,春季水体温度分层被认为与春季水华高发有直接联系^[6],回水区水热分层对水华形成有重要作用^[7];水体稳定,水层间物质不易传输,会加速藻类的生长,并促进底泥营养盐的释放,形成支流库湾水体富营养^[8-9]。

本文将库区北岸最大支流澎溪河(又名小江)和库区南岸一级支流磨刀溪为研究对象,通过比较分析库区水华发生的机理。有学者研究证明澎溪河回水区处于中-富营养化状态^[10];并且对澎溪河高阳平湖的长期、高频定点水质检测表明水体分层为每年春季浮游植物在澎溪河中游高阳平湖斜温层大量繁殖提供了稳定的水流条件^[11]。同时,磨刀溪位于三峡库区南岸的一级支流,与澎溪河毗邻,其气候、地貌等条件与澎溪河相似,但目前鲜有见到过对磨刀溪有水华暴发的报道。比较澎溪河和磨刀溪的水质特征和Chl-a含量,将有助于解释澎溪河水华暴发的成因。本研究分别于2014年春、夏两季水华高发期在澎溪河和磨刀溪调查采样,在相似气候以及地理条件下,比较两河的水质、水体分层及Chl-a等因素,分析水华暴发的内在原因,以期库区水体污染治理和水华暴发提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

澎溪河介于北纬 $30^{\circ}49' \sim 31^{\circ}42'$,东经 $107^{\circ}56' \sim 108^{\circ}54'$ 之间,发源于重庆开县白泉乡钟鼓村,年平均径流量达 34.1 亿 m^3 ,干流全长 182 km ,流域面积 5276 km^2 ,是三峡库区中段、北岸流域面积最大

的次级河流^[12]。流域气候条件受太平洋、印度洋季风及西风环流和青藏高原气旋的影响,气候类型属亚热带湿润季风气候。流域内的山地多为石灰岩结构,岩溶发育,山脊呈锯齿或长垣状,山岭间河谷深切,临江最高相对高差达 1000 m 左右。平行谷岭间河谷较开阔,有较宽的河谷平坝。位于澎溪河中游的高阳平湖为库区直接与干流相接的最大湖面,该处水面变宽,水体流速降低,是近年库区水华暴发最为频繁的区域之一。沿澎溪河流域设置8个采样断面(见图1)。

磨刀溪是三峡库区长江南岸一级支流,其地理位置介于北纬 $30^{\circ}11' \sim 30^{\circ}56'$ 、东经 $180^{\circ}14' \sim 109^{\circ}01'$ 之间,发源于重庆市大风堡市级自然保护区,年总径流量 26.94 亿 m^3 ,干流全长 183 km ,流域面积 3170 km^2 。流域属于亚热带季风气候,受东南季风影响^[13],与澎溪河同属一个气候类型。流域内地势为东南高、西北低,山岭海拔高程在 1000 m 左右,南部最高山峰大风包海拔 1934 m ,河流切割高程约 500 m ,相对高差 200 m ,属低山、中低山地貌区。沿磨刀溪流域共设置6个采样断面(见图1)。

1.2 样品采集

样品采集及测定方法参照文献[14~20]进行,采样时间为库区春夏水华高发期,分别于2014年4月17~18日和7月27~28日对两条支流采样,各断面采样点均位于河道深泓线处,采样均在1d内完成。具体方法为:①环境因子指标:RBR-80220型水质自动分析仪现场测定水温(T)、浊度(Tur)、氧化还原电位(ORP)、水深($Depth$)、电导率($Cond$)、叶绿素a($Chl-a$);②各采样点分层(水下 0.5 m)、中层(位于温跃层中部,温跃层具体深度范围根据多参数水质仪现场读取的深度-温度剖面确定)、底层(湖底上 0.5 m)3层。③过硫酸钾氧化-消解-紫外分光光度法测定总氮(TN)、过硫酸钾氧化-消解-钼锑抗分光光度法测定总磷(TP) $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤-过硫酸钾氧化-消解-紫外分光光度法测定溶解性氮(DTN) $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤-过硫酸钾氧化-消解-

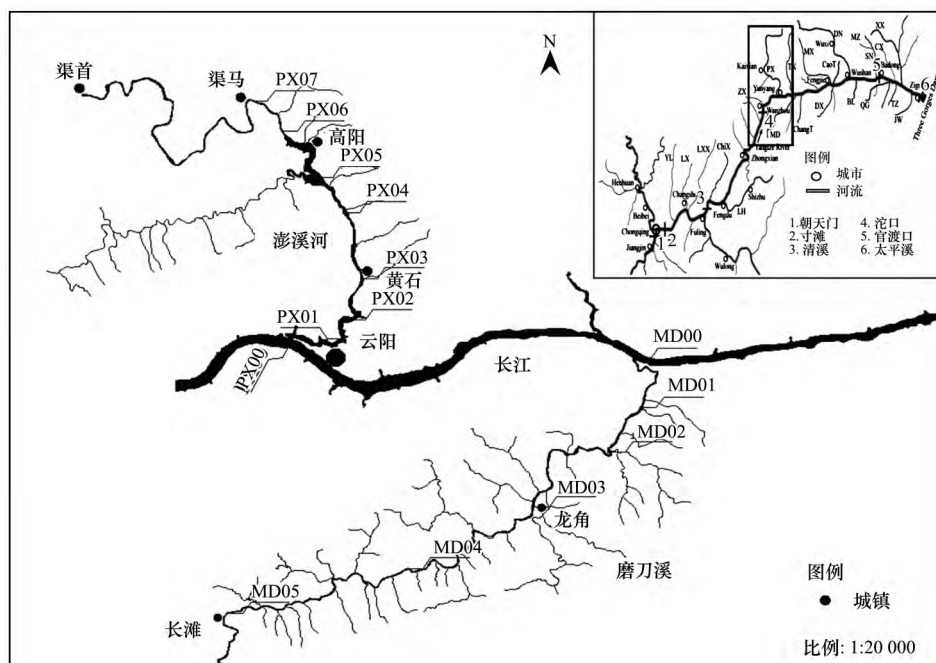


图1 三峡库区支流澎溪河及磨刀溪采样分布点示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Pengxi River and Modao River in TGR

钼锑抗分光光度法测定溶解性磷(DTP); 水体水质富营养化的等级评价参考《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) [21]。

1.3 数据处理及分析方法

用SPSS 17.0和Excel 2013对环境因子指标进行相关统计分析。

2 结果与分析

2.1 磨刀溪与澎溪河营养盐分布状况比较分析

图2、3显示, 两条河流各断面水体N、P水平均高于国际公认发生富营养化阈值, 即氮 $< 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 磷 $< 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [22]。其中, 磨刀溪春季TN含量水平为 $1.038 \sim 2.508 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP范围在 $0.037 \sim 0.126 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的Ⅲ类与Ⅳ类水质; 夏季TN、TP平均水平为 $1.875 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.075 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 仍为Ⅲ类水质。澎溪河春季TN为 $1.584 \sim 3.545 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP范围 $0.04 \sim 0.109 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 达到了Ⅴ类水质; 夏季水体TN、TP平均含量为 $1.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.054 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 营养较春季降低, 属于Ⅳ水质。两条河流的溶解性总氮(DTN)含量均较高, 占TN含量的80%以上, 水体中主要还是以溶解性氮为主; 水体中磷的形态分布相似, 溶解性总磷(DTP)占有TP的50%以上。从时间角度, 澎溪河与磨刀溪N、P含量变化趋势相似, 春季稍高于夏季, 澎溪河N、P含

量略高于磨刀溪; 从空间水平维度上看, 两条河流情况相似, 上游水体营养盐, 包括TN、TP、DTP、DTN等含量均小于下游水体; 从空间垂直维度看, 无论春、夏季, 磨刀溪与澎溪河中、底层水体TN、TP含量高于表层。

2.2 磨刀溪与澎溪河水体温度分层分析

磨刀溪与澎溪河水体温度及深度断面变化见图4与图5。在4月17~18日和7月27~28日两次采样期, 两条河流上游表层水体温度高于河口和长江干流水体, 下层水体温度则与干流相差无几。其中, 春季长江干流水体混合均匀, 整个水体水温为 16°C , 而磨刀溪与澎溪河上游表层水体温度均高于 20°C (图4); 夏季水体温度较春季高 9°C (图5); 水体温度由上游向下游呈下降趋势, 河口温度较上游降低 $5 \sim 8^\circ\text{C}$ 。两条河流上游均出现分层现象, 各断面温度总体呈现半个倒“U”字型, 分层水体均没有明显混合层, 而只有温跃层+滞温层两个层次, 下游至河口处几乎无分层现象。磨刀溪春季上游水体温表层($0 \sim 5 \text{ m}$)内温度随深度明显降低(河口温度不随深度增加而变化), 水深 $7 \sim 10 \text{ m}$ 处水温有明显转折且低于河口; 夏季于 5 m 处温跃层与滞温层分开。澎溪河温度变化与磨刀溪类似, 表层($0 \sim 10 \text{ m}$)温度降低剧烈, 在 10 m 处为温跃层与滞温层的转折点。

2.3 磨刀溪与澎溪河叶绿素a与深度分布

从河流横向断面看, 磨刀溪春季水体的Chl-a含

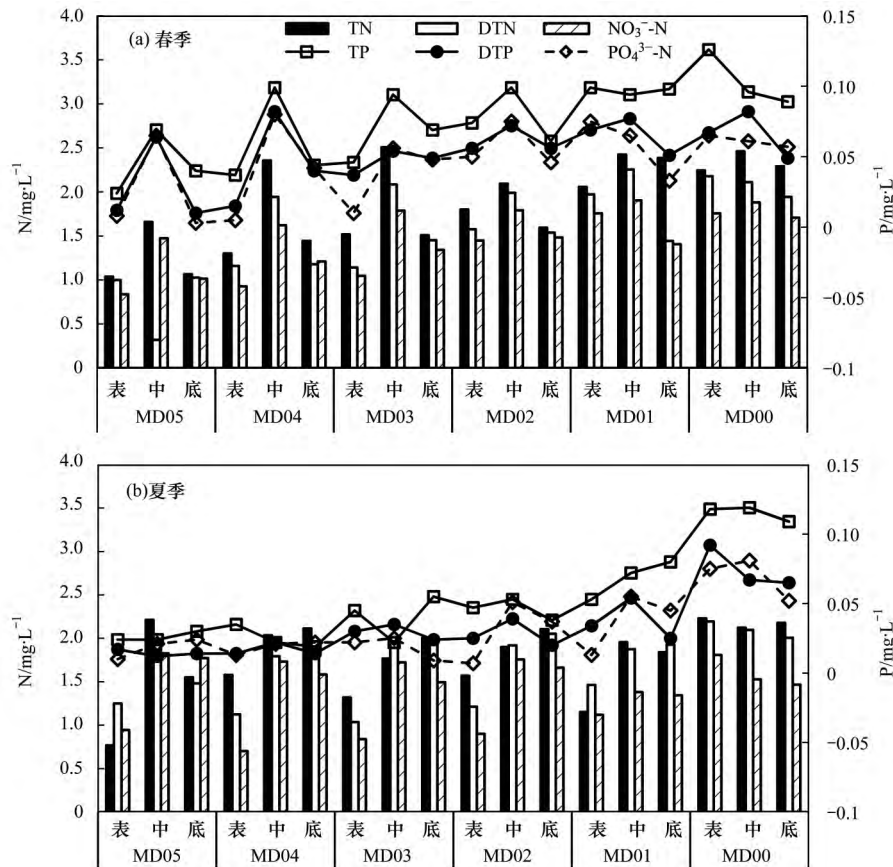


图2 磨刀溪 2014 年春季和夏季营养盐变化

Fig. 2 Changes of nutrients in Modao River in spring and summer, 2014

量水平较低. 磨刀溪河口(即长江干流, MD00) Chl-a 含量低于 $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 断面 MD03 处的 Chl-a 达到最高值的 $2.9 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, Chl-a 含量主要集中于上游. 澎溪河河口(长江干流)春季 Chl-a 浓度低于 $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 但在上游断面 PX06 处达到最大值 $60.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 澎溪河春季上游 PX07 断面上层水体 Chl-a 含量较磨刀溪上游 MD05 同层次水体高 59 倍, 整个断面 Chl-a 含量高出磨刀溪 3.3 倍, 夏季两条河流差异不明显. 两条河流 Chl-a 富集的时间呈现相反的趋势. 磨刀溪夏季 Chl-a 含量高于春季, 夏季 Chl-a 含量在断面 MD03 处达到最高 $7.48 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 水平; 澎溪河夏季于 PX03 断面出现最大值, 为 $7.8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 仅为春季同层次 Chl-a 含量的 15%.

从河流纵向断面看, 长江干流断面(PX00 与 MD00) Chl-a 浓度低且不随深度变化, 水体底层(滞温层)趋近于 $0.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 水平. 磨刀溪 Chl-a 含量在温跃层富集(图 6) 在 $0 \sim 10 \text{ m}$ 水深的 Chl-a 含量明显高于其它水体层次; 同样, 澎溪河 Chl-a 含量水平也集中水体温跃层(图 7), 春季 $0 \sim 5 \text{ m}$ 水深是 Chl-a 集中的主要区域, 夏季则在 $0 \sim 8 \text{ m}$ 层次富集, 滞温层 Chl-a 含量与长江干流 Chl-a 含量(春季 0.68

$\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、夏季 $0.25 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 保持一致. 对比温度-深度变化图谱(图 4 和图 5), 温跃层在两条河流中均是藻类活动的主要区域, 水体分层对于藻类的分布与繁殖起重要的作用.

2.4 磨刀溪与澎溪河 Chl-a 断面差异性分布

如图 8 所示, 春季磨刀溪上游水体 Chl-a 含量明显低于澎溪河, 如 PX06、PX07 断面温跃层 Chl-a 平均值分别达到 $10.3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10.2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 而同期 MD04、MD05 仅为 $1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $0.9 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 澎溪河春季上游 PX06、07 断面上层水体 Chl-a 含量为较磨刀溪上游 MD05 上层水体的 60 倍. 春季是澎溪河水华暴发高峰期; 两河下游 Chl-a 含量无显著差异性且逐步趋向于河口含量. 结合 2.1 和 2.2 节可知, 下游水体浮游生物量低的主要原因是受长江干流影响水体未分层导致的, 而与水体 N、P 营养盐的分布关系不大. 夏季两条河流 Chl-a 浓度相近, 峰值出现在上游, 绝对值低于 $4.3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 仍然为上游高于下游; 磨刀溪 Chl-a 的高浓度则主要集中于夏季, 并出现在 MD03 断面.

2.5 磨刀溪与澎溪河电导率-深度图谱比较

如图 9、10 所示, 受来自长江干流水体的影响,

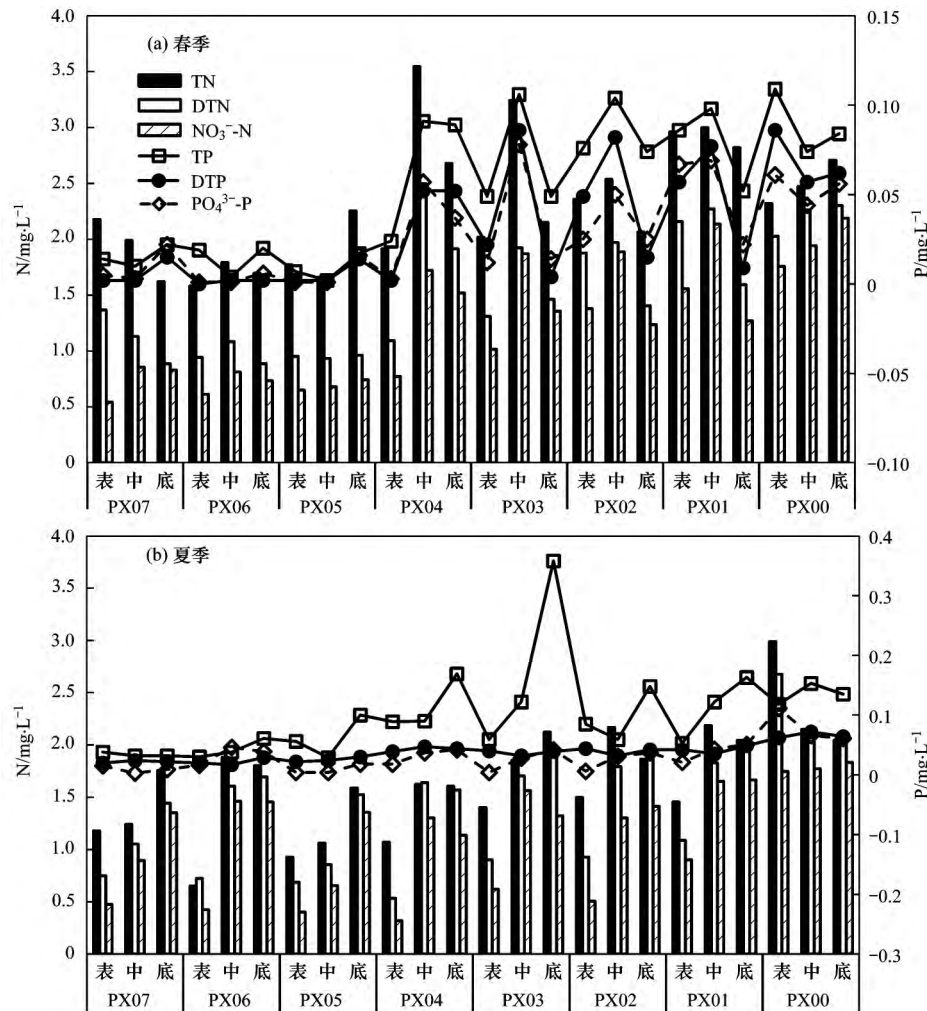


图3 澎溪河 2014 年春季和夏季营养盐变化

Fig. 3 Changes of nutrients in Pengxi River in spring and summer, 2014

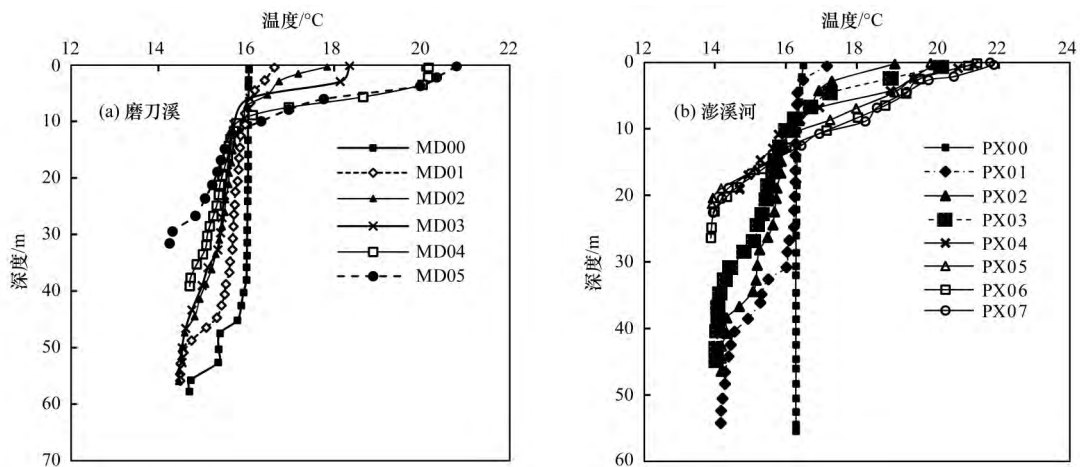


图4 磨刀溪与澎溪河 2014 年春季温度-深度变化

Fig. 4 Temperature-depth profiles of Modao River and Pengxi River in spring, 2014

两河河口电导率在春季和夏季均保持在 $357.17 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 左右的水平; 夏季河口电导率较春季低. 两条河流春夏季电导率表现出相反变化趋势, 春季

澎溪河上游的电导率远高于下游, 如断面 PX07 的最高电导率为下游断面相同层次的 172.48%; 而磨刀溪则相反, 上游最低电导率仅为河口 74.4%. 两

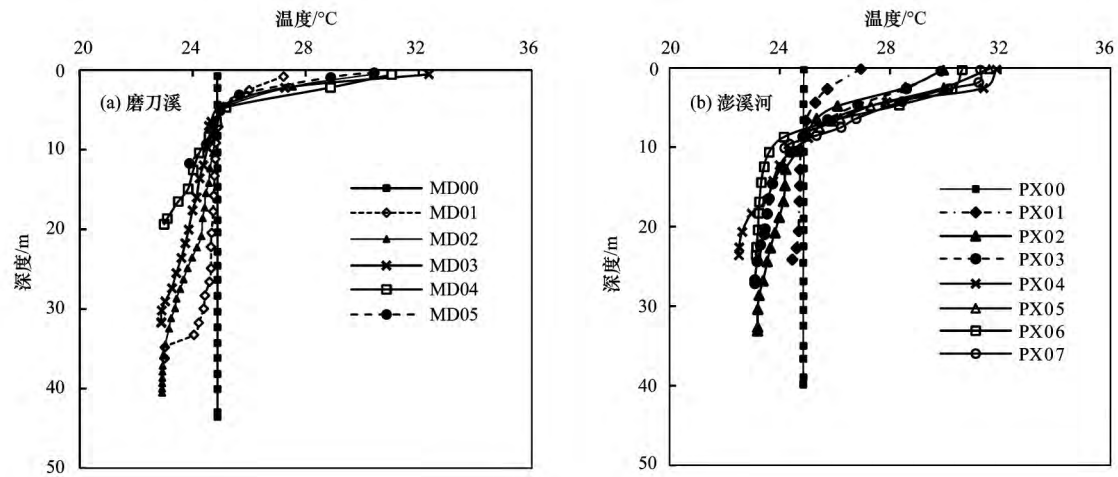


图 5 磨刀溪与澎溪河 2014 年夏季温度-深度变化图谱

Fig. 5 Temperature-depth profiles of Modao River and Pengxi River in summer ,2014

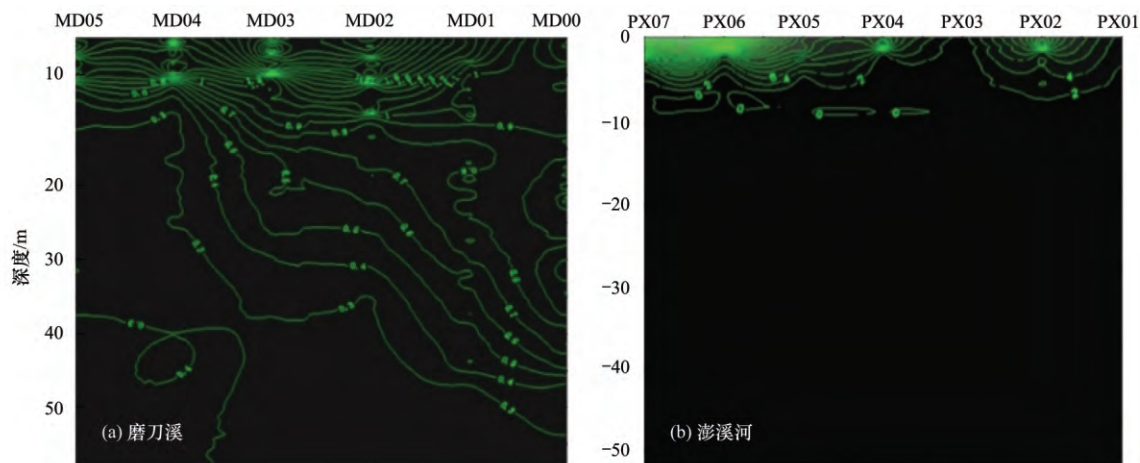


图 6 磨刀溪与澎溪河 2014 年春季Chl-a含量变化

Fig. 6 Chl-a concentration-depth profiles of Modao River and Pengxi River in spring ,2014

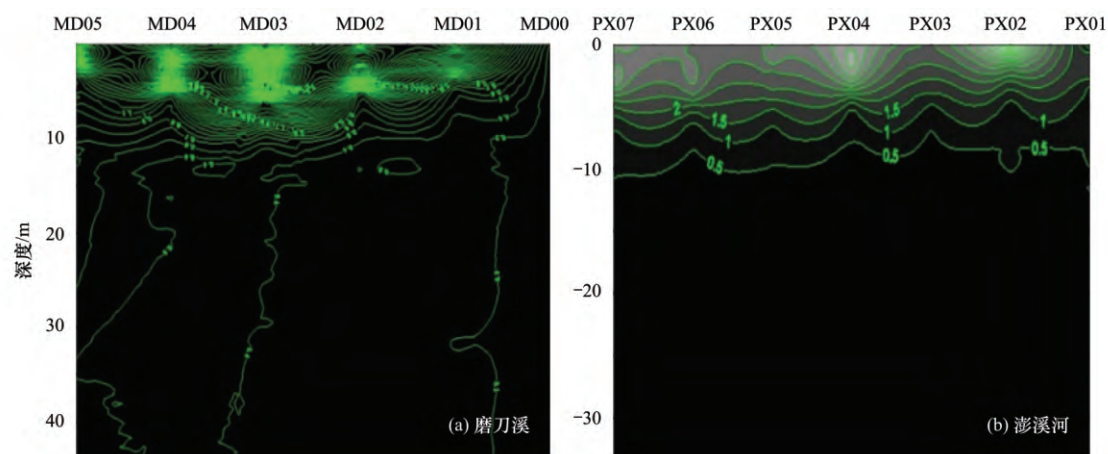


图 7 磨刀溪与澎溪河 2014 年夏季Chl-a含量变化

Fig. 7 Chl-a concentration-depth profiles of Modao River and Pengxi River in summer ,2014

条河流电导率剧烈变化层次为水深 0 ~ 10 m ,联系两河各自的温度-深度图谱(图 4 和图 5) ,两河春季与夏季电导率均在水体跃层之间变化.

磨刀溪春季上游断面 MD04 和 MD05 的电导率与断面 MD03 电导率相差 $76.61 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,断面 MD00 ~ MD03 之间并无差异 ,可知春季长江回水可

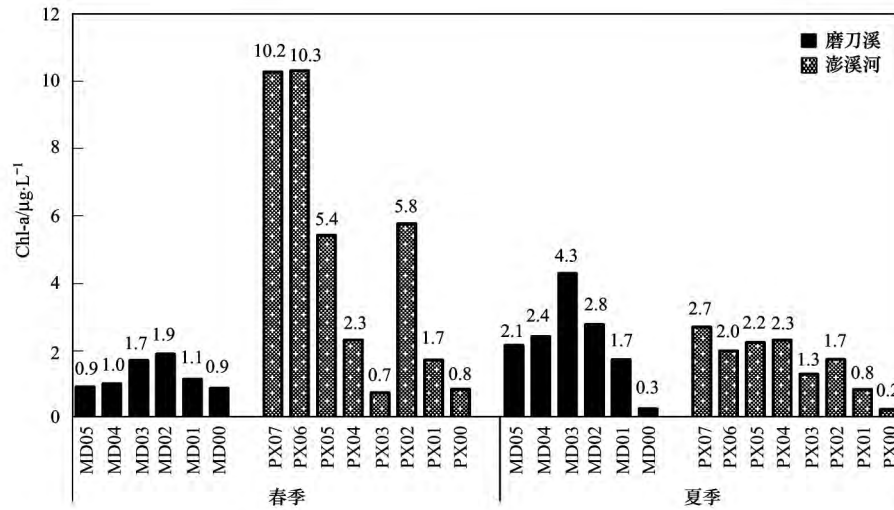


图8 磨刀溪与澎溪河Chl-a含量断面分布(平均值)

Fig. 8 Modao River and Pengxi River Chl-a content distributions (average value)

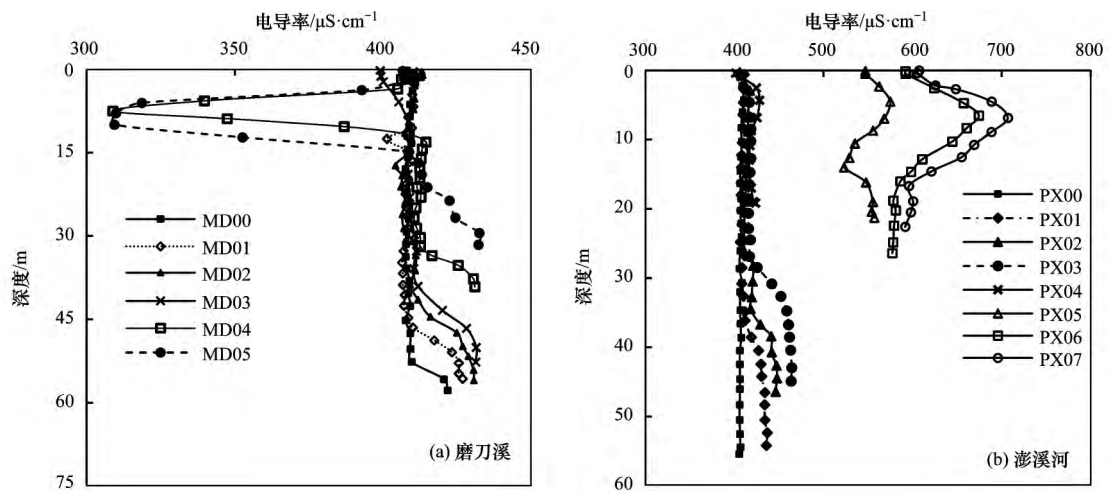


图9 磨刀溪与澎溪河2014年春季电导率-深度变化

Fig. 9 Conductivity-depth variation map of Modao River and Pengxi River in spring, 2014

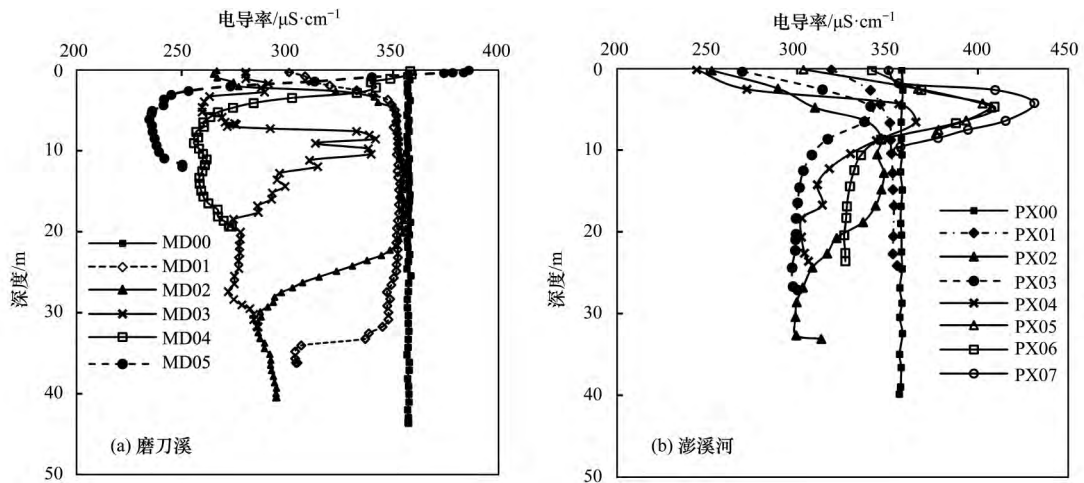


图10 磨刀与澎溪河2014年夏季电导率-深度变化

Fig. 10 Conductivity-depth variation map of Modao River and Pengxi River in summer, 2014

达到断面 MD03 ~ MD04 之间; 夏季磨刀溪上游断面 MD04、MD05 仍低于下游断面 MD00 ~ MD02, 断面 MD03 呈现较为复杂的变化趋势, 可知夏季磨刀溪回水可达断面 MD03, 此处的 Chl-a 浓度为整条支流最高. 在澎溪河, 由于高阳平湖(PX05 和 PX06 之间) 的缓冲作用, 澎溪河断面明显可以分为两组, 即 PX00 ~ PX04 断面为一组, PX05 ~ PX07 为一组; PX05 断面上层水体电导率高于 PX04 上层水体, 两者相差 $136.16 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 可知澎溪河春季高水位期干流回水顶端位于断面 PX04 与断面 PX05 之间(图 9 和图 10) .

3 讨论

三峡库区蓄水后变成了河道型水库, 河道型水库支流区域受气温影响更为显著, 气温对水体的影响主要表现为水温变化和水热分层, 水体分层会影响营养盐的垂向输移和分布^[23-24]; 水温状况及分层现象将直接或间接影响到库区水环境中各种物理、化学和生物过程^[25]. 杨正健等^[26]对香溪河的研究也表明, 水体分层是藻类水华暴发的主要原因, 水体分层越明显越容易发生水华; 陈洋等^[7]研究表明真光层深度与混合层深度的比值是影响藻类水华暴发的关键因子. 澎溪河与磨刀溪春、夏季节水体明显分层, 为温跃层 + 滞温层模式, 缺乏混合层^[27, 11]. 本研究中两条河流上游水体分层, 上游 Chl-a 含量高于下游的结果再次证明水华与水体分层的重要关系.

两条河流 N、P 处于较高水平(高于国际公认发生富营养化的阈值). 单从营养盐角度, 两条河流的 N、P 营养均已达到发生水华的水平^[28], 但实际上, 在水华高发期磨刀溪 Chl-a 含量不高, 澎溪河夏季水华现象也不明显, 表明 Chl-a 浓度与 TN、TP 并无明显相关关系, N、P 营养不是水华暴发的限制因素, 与郭劲松等^[29]对澎溪河水华的研究结果一致.

电导率是衡量水质的重要指标, 反映水中电解质的含量, 水体电导率的大小主要由溶解在水体的离子种类、浓度和水温等决定. 洪小筠^[30]的研究认为闽江河水体氯离子浓度与电导率呈现较高相关性, 越靠近河口相关性越高; 李秋华等^[31]研究认为, 营养盐是导致水库电导率上升的重要因素, 但鲜有学者就电导率在天然水体污染及水体水华暴发中的作用进行研究. 本研究的结果表明, 首先依据电导率变化可以判断出三峡库区长江干流到达支流的回水位置, 即澎溪河回水区春季回水区可达断面 PX04 与 PX05 之间, 夏季至断面 PX02 处; 磨刀溪春季和

夏季回水区位于断面 MD03 处. 且一般干流回水与支流来水混合处, 水流缓慢, 营养丰富, 也是藻类富集的部位, 也是电导率明显变化的区域; 本研究中, 自回水区域往上, 澎溪河高电导率水域对应着高 Chl-a 含量; 同时高电导率与高 Chl-a 浓度均存在于温跃层之中, 电导率与 Chl-a 表现出极显著的正相关关系($P < 0.01$). 因此, 电导率不仅可用于判定三峡库区干流回水到达区域, 尤其是回水与来水交汇区域; 对水体藻类富集以及水华暴发区位有一定的指示作用.

李秋华等^[31]对广东大中型水库电导率分布特征研究表明, 水体富营养化程度较高的水库, NO_3^- 、 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 离子质量浓度相应较高, 电导率也较高; 但澎溪河与磨刀溪水体营养相近而电导率却表现出显著差异性, Chl-a 含量也差异显著. 有研究指出水体中其他离子对藻类生长有重要作用, 王海明等^[32]研究认为 Mn^{2+} 是限制铜绿微囊藻生长的重要因子; 刘海清等^[33]对滇池 Zn^{2+} 的研究表明, 高 Zn^{2+} 浓度会抑制滇池藻类生长, 而低浓度则会促进藻类生长; 刘静等^[34]以及魏群等^[35]研究表明水体中 Fe^{3+} 、 Cr^{6+} 对藻类具有抑制作用, 低浓度 Fe^{3+} 对藻类仍具有一定促进作用; 钟远等^[36]研究认为一定浓度硫酸盐可以抑制原有蓝藻和硅藻的生长, 而绿藻的种类和数量增加. 而近年来, 大量学者对澎溪河藻类的研究认为澎溪河水体藻类主要以蓝藻、绿藻、甲藻和硅藻为主^[37-39]; 因此, 澎溪河水华暴发可能与其他电解质离子浓度有很大关系(SO_4^{2-} 、 Cl^{-1} 、 K^+ 、 Na^+ 以及其他矿物离子等). 现有对水华的研究集中于 N、P 营养与水华的关系上, 本研究则证明除水体 N、P 以外的其他离子不仅能解释澎溪河与磨刀溪电导率的差异性, 对研究澎溪河水华暴发同样具有重要指导意义.

4 结论

(1) 澎溪河与磨刀溪在水体 N、P 营养浓度以及水体分层、Chl-a 含量主要分布层次方面均相似, 但澎溪河 Chl-a 含量在春季水华高发期显著高于磨刀溪, 暴发明显的水华现象.

(2) 两条河流温跃层是藻类生物量积累的主要层次, 也是电导率变化的主要层次.

(3) 电导率的变化对三峡库区支流回水区域具有指示作用, 回水与来水交汇处电导率明显变化, 以此可判定回水所到达区域; 且回水交汇处及上游来水区域 Chl-a 含量明显高于干流回水区域, 电导率可

初步判定水华富集与暴发位置。

(4) 澎溪河上层水体电导率明显高于磨刀溪上层水体; 电导率与 Chl-a 含量表现出明显的相关关系, 但与水体 N、P 并无明显相关性; 澎溪河与磨刀溪水体中其他离子对电导率的贡献较大, 且影响水体藻类的生长繁殖。

参考文献:

- [1] Holbach A, Floehr T, Kranzioch I, *et al.* Dilution of pollution? Processes affecting the water quality in the river-style Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(10): 7140-7141.
- [2] Li H M, Tang H J, Shi X H, *et al.* Increased nutrient loads from the Changjiang (Yangtze) river have led to increased harmful algal blooms [J]. *Harmful Algae*, 2014, **39**: 92-101.
- [3] 李崇明, 黄真理, 张晟, 等. 三峡水库藻类“水华”预测 [J]. *长江流域资源与环境*, 2007, **16**(1): 1-6.
Li C M, Huang Z L, Zhang S, *et al.* Risk forecast of algal bloom in the Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, **16**(1): 1-6.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 刘流, 刘德富, 肖尚斌, 等. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3046-3050.
Liu L, Liu D F, Xiao S B, *et al.* Effects of thermal stratification on spring blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3046-3050.
- [7] 陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 等. 混合层深度对藻类生长的影响研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3049-3056.
Chen Y, Yang Z J, Huang Y L, *et al.* Research on the influence of mixing layer depth on algal growth [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3094-3056.
- [8] 刘建康. 高级水生生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [9] Jones G J, Poplawski W. Understanding and management of Cyanobacterial blooms in sub-tropical reservoirs of Queensland, Australia [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(2): 161-168.
- [10] 李哲, 方芳, 郭劲松, 等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征 [J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(1): 36-44.
Li Z, Fang F, Guo J S, *et al.* Spring algal bloom and nutrients characteristics in Xiaojiang River backwater area, Three Gorge Reservoir, 2007 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(1): 36-44.
- [11] 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.
- [12] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡小江回水区氮素赋存形态与季节变化特点 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1588-1594.
Li Z, Guo J S, Fang F, *et al.* Seasonal variation of nitrogen in Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(6): 1588-1594.
- [13] 孙荣, 袁兴中, 刘红, 等. 磨刀溪梯级水电开发对河岸植物群落的影响 [J]. *水科学进展*, 2011, **22**(4): 561-567.
Sun R, Yuan X Z, Liu H, *et al.* Influence of cascaded exploitation of small hydropower on riparian plant communities in Modaoxi River [J]. *Advances in Water Science*, 2011, **22**(4): 561-567.
- [14] 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.
- [15] 李国刚. 水和废水污染物分析测试方法 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [16] 《地表水常规监测项目质量控制指标》编写组. 地表水常规监测项目质量控制指标 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [17] 胡鸿均, 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.
- [18] 翁建中, 徐恒省. 中国常见淡水浮游藻类图谱 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.
- [19] 福建省环境监测中心站. 福建省大中型水库常见淡水藻类图集 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [20] 《浙江省主要常见淡水藻类图集(饮用水水源)》编委会. 浙江省主要常见淡水藻类图集(饮用水水源地) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [21] GB 3838-2002 地表水环境质量标准 [S].
- [22] Thomann R V, Mueller J A. Principles of surface water quality modeling and control [M]. New York: Pearson, 1987.
- [23] 赵林林, 朱广伟, 许海. 太湖梅梁湾理化指标分层的空间分布特征 [J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(7): 721-727.
Zhao L L, Zhu G W, Xu H. Spatial distribution of the physicochemical parameter stratification in Meiliang Bay, Lake Taihu, China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(7): 721-727.
- [24] Obenour D R, Michalak A M, Zhou Y T, *et al.* Quantifying the impacts of stratification and nutrient loading on hypoxia in the northern gulf of Mexico [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(10): 5489-5496.
- [25] 张玉超, 钱新, 石川忠晴, 等. 浅水型湖泊水温日成层现象的初步探讨——以太湖为例 [J]. *四川环境*, 2008, **27**(3): 45-48.
Zhang Y C, Qian X, Ishikawa T, *et al.* Study on diurnal stratification in a typical shallow lake——Taihu Lake [J]. *Sichuan Environment*, 2008, **27**(3): 45-48.
- [26] 杨正健, 刘德富, 马骏, 等. 三峡水库香溪河库湾特殊水温分层对水华的影响 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2012, **45**(1): 1-9, 15.
Yang Z J, Liu D F, Ma J, *et al.* Effects of special vertical layered water temperatures on algal bloom in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2012, **45**(1): 1-9, 15.

- [27] 付莉, 张磊, 蔚建军, 等. 三峡库区支流回水区水体分层与藻类生长[J]. 环境工程学报, 2015, 9(5): 2265-2271.
Fu L, Zhang L, Yu J J, et al. Water stratification and its relevance to growth of algal community at backwater area in Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(5): 2265-2271.
- [28] 李小平. 美国湖泊富营养化的研究和治理[J]. 自然杂志, 2002, 24(2): 63-68.
Li X P. Lake eutrophication research and control in USA [J]. Nature Magazine, 2002, 24(2): 63-68.
- [29] 郭劲松, 陈园, 李哲, 等. 三峡小江回水区叶绿素 a 季节变化及其同主要藻类的相互关系[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 976-981.
Guo J S, Chen Y, Li Z, et al. Seasonal variation of chlorophyll a and its potential relationship with various algal species in Xiaojiang river Backwater Area, Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2011, 32(4): 976-981.
- [30] 洪小筠. 闽江河口区水体氯离子浓度与电导率相关性研究[J]. 水利科技, 2010, (4): 31-32, 60.
- [31] 李秋华, 林秋奇, 韩博平. 广东大中型水库电导率分布特征及其受 N、P 营养盐的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 16-20.
Li Q H, Lin Q Q, Han B P. Conductivity distribution of water supply reservoirs in Guangdong province [J]. Ecology and Environment, 2005, 14(1): 16-20.
- [32] 王海明, 王宁, 王晓蓉, 等. 不同浓度 Mn^{2+} 对铜绿微囊藻的生长及其生物可利用性的影响[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(1): 13-16.
Wang H M, Wang N, Wang X R, et al. Effects of Mn^{2+} concentrations on growth of *Microcystis aeruginosa* and its bioavailability of Mn^{2+} [J]. Environmental Pollution & Control, 2008, 30(1): 13-16.
- [33] 刘晓海, 段刚, 高云涛, 等. Zn^{2+} 对滇池藻类生长的影响[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(7): 47-48.
Liu X H, Duan G, Gao Y T, et al. Effect of Zn^{2+} on algae growth in Dianchi Lake [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(7): 47-48.
- [34] 刘静, 赵海涛, 盛海君, 等. 铁对太湖常见藻类生长及 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子吸收的影响[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(1): 59-64.
Liu J, Zhao H T, Sheng H J, et al. Effects of Fe^{3+} on growth and calcium/magnesium ions uptakes of Three common algae in Taihu Lake [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(1): 59-64.
- [35] 魏群, 胡智泉, 李根保, 等. 铬离子对藻类生长的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 12-15.
Wei Q, Hu Z Q, Li G B, et al. Effects of chromium on the growth of microalgae [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(1): 12-15.
- [36] 钟远, 樊娟, 刘春光, 等. 硫酸盐对淡水浮游藻类群落结构的影响研究[J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2253-2258.
Zhong Y, Fan J, Liu C G, et al. Effects of sulfate on the community structure of phytoplankton in freshwater [J]. Environmental Science, 2009, 30(8): 2253-2258.
- [37] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡小江回水区蓝藻季节变化及其与主要环境因素的相互关系[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 301-309.
Li Z, Guo J S, Fang F, et al. Seasonal variation of cyanobacteria and its potential relationship with key environmental factors in Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2010, 31(2): 301-309.
- [38] 周川, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 873-883.
Zhou C, Yu J J, Fu L, et al. Temporal and spatial distribution of environmental factors and phytoplankton during algal bloom season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2016, 37(3): 873-883.
- [39] 郭劲松, 盛金萍, 李哲, 等. 三峡水库运行初期小江回水区藻类群落季节变化特点[J]. 环境科学, 2010, 31(7): 1492-1497.
Guo J S, Sheng J P, Li Z, et al. Seasonal variation of phytoplankton community in Xiaojiang backwater area during the preliminary operation stage of the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2010, 31(7): 1492-1497.