

# 三峡水库支流大宁河水华特征研究

郑丙辉<sup>1</sup>, 曹承进<sup>2,3\*</sup>, 张佳磊<sup>2</sup>, 黄民生<sup>2,3</sup>, 陈振楼<sup>2,3</sup>

(1. 中国环境科学研究院河流与海岸带环境研究室, 北京 100012; 2. 华东师范大学资源与环境科学学院, 上海 200062; 3. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 以三峡水库支流大宁河水华敏感期(2007 年 4~6 月和 2008 年 4~5 月)水质和水华的调查数据为依据, 研究了其水质变化、营养盐构成及水华特征。结果表明, 水华敏感期大宁河自回水段以下氮磷含量较高, 总氮范围为 0.84~3.21 mg/L, 总磷为 0.011~0.531 mg/L, 氮营养盐主要以 TDN 为主(TDN/TN 为 84%), 而磷营养盐以 TDP 占优(TDP/TP 为 60%); TP 值均高于 16, 藻类生长受磷限制。高锰酸盐指数和溶解氧含量低且变化稳定。叶绿素 a 为 1.41~219.04 mg·m<sup>-3</sup>。相关性分析表明 Chl-a 与 TP、高锰酸盐指数、DO、pH 呈显著正相关( $r_{\text{Chl-a-TP}} = 0.453$ ,  $r_{\text{Chl-a-高锰酸盐指数}} = 0.641$ ,  $r_{\text{Chl-a-DO}} = 0.584$ ,  $r_{\text{Chl-a-pH}} = 0.409$ ,  $p < 0.01$ ), 与 SD 呈显著负相关( $r_{\text{Chl-a-SD}} = -0.392$ ,  $p < 0.01$ ); pH 受多参数影响, 但受藻类生长影响较大。通过显微镜对藻类进行鉴定, 发现大宁河自回水段以下水华敏感期藻类分布较广, 共发现 8 门 82 属 124 种, 其中硅藻门和绿藻门分布最多, 其次为蓝藻门和甲藻门, 其余藻种较少。大宁河在水华敏感期暴发了 3 次自回水段以下大规模水华, 水华期间藻密度最高值是正常值的 14~1427 倍, 水华优势种主要有绿藻门的波吉卵囊藻、小空星球藻、土生绿球藻、实球藻和小球藻; 裸藻门的扁裸藻、矩圆囊裸藻; 硅藻门的小环藻、冠盘藻和舟形藻; 甲藻门的埃尔多甲藻等; 发生多藻种同时水华的情况; 出河口处藻类较少。

**关键词:** 三峡水库; 大宁河; 富营养化; 相关分析; 水华

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3218-09

## Analysis of Algal Blooms in Da-ning River of Three Gorges Reservoir

ZHENG Bing-hui<sup>1</sup>, CAO Cheng-jin<sup>2,3\*</sup>, ZHANG Jia-lei<sup>2</sup>, HUANG Min-sheng<sup>2,3</sup>, CHEN Zhen-lou<sup>2,3</sup>

(1. River and Coastal Environment Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Resource and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 3. Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** According to the survey conducted from Apr. to Jun. 2007 and from Apr. to May. 2008, the changes of water quality, forms and distributions of nutrient salts and characters of algal blooms in Da-ning River of Three Gorges Reservoir (TGR) were studied. The results indicated that the concentrations of nitrogen and phosphorus nutrient were abundant during sensitive period of algal blooms in Da-ning River. Total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) values are 0.84-3.21 mg/L and 0.011-0.531 mg/L respectively, and the nutrients' concentrations become high gradually from upstream to downstream. Total dissolved nitrogen (TDN) is the major form of TN accounting for 84%, and total dissolved phosphorus (TDP) is dominant (TDP/TP= 60%). Algal blooms bring phosphorus nutrient bio-concentration. The rates of TN and TP are all in excess of 16, which show eutrophication is limited by phosphorus. Potassium permanganate index and dissolved oxygen (DO) are at low levels and change stably. But chlorophyll a (Chl-a) becomes frequently, the value is 1.41-219.04 mg·m<sup>-3</sup>. Significant positive correlations are all observed by correlation analysis between Chl-a and the main parameters ( $r_{\text{Chl-a-TP}} = 0.453$ ,  $r_{\text{Chl-a-potassium permanganate index}} = 0.641$ ,  $r_{\text{Chl-a-DO}} = 0.584$ ,  $r_{\text{Chl-a-pH}} = 0.409$ ,  $p < 0.01$ ), but significant negative correlations are observed between Chl-a and Secchi depth (SD) ( $r_{\text{Chl-a-SD}} = -0.392$ ,  $p < 0.01$ ). The pH is fluctuated by multiparameter esp. in algal blooms. Widespread algae are observed by microscope during sensitive period of algal blooms in Da-ning River accounting for 8 phylum 82 genus 124 species, which Bacillariophyta and Chlorophyta are dominant, and then Cyanophyta and Pyrrophyta. Three whole watershed algal blooms break out in Da-ning River during the period, and the highest values of algal density are 14-1427 times as many as the normal values. The dominant species of algal blooms are mostly involved with *O. borgei*, *C. microporum*, *Chlorococcum humicola*, *P. morum* and *C. vulgaris* of Chlorophyta; *P. pleuronectes* and *T. oblonga* of Euglenophyta; *Cyclotella*, *Stephanodiscus astraea* and *Navicula* of Bacillariophyta; *P. elptiavskyi* of Pyrrophyta. Multi-algal species blooms are observed in the same time and place, and there are few algae in the estuary of Da-ning River to Changjiang River.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; Da-ning River; eutrophication; correlation analysis; algal bloom

收稿日期: 2008-12-05; 修订日期: 2009-03-05

基金项目: 科技部国际科技合作项目(2007DFA90510); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB407306); 华东师范大学 2008 年优秀博士研究生培养基金项目(20080063)

作者简介: 郑丙辉(1963-), 男, 研究员, 主要研究方向为流域水环境保护、河流水污染, E-mail: zhengbh@cras.org.cn

\* 通讯联系人, E-mail: caochengqiao@126.com

三峡大坝截流后, 库区水体由天然河道改变为人工水库, 库区水位提高、水流减缓、水体扩散能力减弱、库湾和支流污染物的滞留时间延长, 水域环境发生了巨大变化, 这种改变已经引起了整个库区水体水质及水生生态系统的变化<sup>[1-3]</sup>. 特别是因受水库回水顶托, 库湾和部分支流污染加重, 局部水域部分时段已出现富营养化现象. 对于三峡水库富营养化研究许多学者主要关注于外源污染严重的一些支流(如香溪河、芭溪河、小江等)<sup>[4-8]</sup>, 对其水质的研究较多, 对于水华的深入研究受条件、经费等制约而较少涉及. 然而, 随着三峡移民外迁、工矿的关闭等, 三峡水库各支流的污染源大为减少, 入河污染源形式也逐渐转变, 淹没城镇农田的污染缓释、网箱养鱼、旅游业以及集中移民点产生的污染逐渐成为支流的主要污染源<sup>[9,10]</sup>. 因此, 开展这种类型河流的富营养化及水华的研究, 对于揭示库区支流在蓄水后水生生态系统如何变化, 探讨整个三峡水库水体的健康状况的演变, 以及预测和预防蓄水后三峡水库整体水质的恶化、合理利用库区流域的自然资源具有重要意义. 本研究以巫山县境内最大的长江支流水系——大宁河为对象, 对其自回水段以下的富营养化及水华进行初步分析, 以期对三峡库区支流富营养化研究提供基础数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 调查范围

大宁河回水段位于重庆市巫山县境内(E108. 25°~ 108. 35°, N30. 95°~ 31. 2°), 距离三峡大坝 123 km, 河道蜿蜒, 部分水域峡谷陡峭高深, 而部分水域地势较为平坦, 河面相对宽敞, 主要由淹没大量土壤的水面构成, 其中, 回水段淹没土壤类型主要为紫色土, 淹没土地利用方式为水田, 旱地与柑橘地, 土层较浅(0. 30~ 0. 60 m)<sup>[11]</sup>.

根据三峡水库回水情况、水文水质监测断面的布设以及大宁河流域的水文地质等特征、历年大宁河水华暴发的情况, 从大宁河上游至下游出河口(长江)水华易发河段分别设置东坪坝断面(巴雾峡出口处的开阔水域)、白水河断面(白水河入大宁河处)、龙门断面(龙门峡内)、菜子坝断面(巫山县城污染区)和大宁河口断面(大宁河入长江处), 2008 年增设大昌断面(大昌古镇淹没区)和双龙断面(双龙镇淹没区)(图 1).

每个采样断面分左、中、右 3 点. 调查时间为大宁河水华敏感期(2007-04-03~ 2007-06-04 和 2008-



图 1 三峡水库支流河流大宁河水华敏感期研究图

Fig. 1 Sketch of Da-ning River in Three Gorges Reservoir during sensitive period of algal blooms

04-15~ 2008-05-22, 下同), 每 3~ 5 d 采样 1 次.

### 1.2 样品分析方法

水样采集后立即用 0. 45 μm 微孔滤膜过滤, 并加 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1 mol/L) 酸化保存. 同时分析测定过滤水样以及未过滤水样中的氮、磷等生源要素. 经过 0. 45 μm 微孔滤膜过滤后水样测定的总氮(总磷)含量可以认为是溶解态总氮 TDN(溶解态总磷酸盐 TDP)的含量, 而未经过滤水样测定的 TN(TP)浓度减去 TDN(TDP)后得到颗粒态总氮 TSN(颗粒态总磷酸盐 TSP)浓度<sup>[12]</sup>. 总磷采用钼酸铵分光光度法; 总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法; 高锰酸盐指数为酸性高锰酸钾法; 叶绿素 a 采用分光光度法; BOD<sub>5</sub> 采用稀释与接种法. 具体分析测试方法参见文献[12~ 17]. 浮游植物的分类、计数采用显微镜视野计数法, 具体方法参见文献[12, 17~ 19]; 相关性分析采用 SPSS13.0 统计软件处理进行双变量相关性分析, 双尾检验, 显著性水平为 0.05 和 0.01<sup>[20-22]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 常规物理化学参数特征

三峡水库支流大宁河水华敏感期测定的物理化学参数结果见表 1. 大宁河自回水段以下 pH 为 7. 96~ 9. 23, 平均值为 8. 5, 为中性偏弱碱性水体, 东坪坝、白水河 pH 较高, 大宁河口(长江)最低, pH 在地表水环境质量标准容许范围内. 气温范围在 19. 5~ 40. 0 °C, 平均值为 27. 1 °C, 水温范围为: 17. 0~ 28. 0 °C, 平均值为 22. 6 °C, 气温水温季节性变化明显, 且自回水段以下水温均在浮游植物的适宜生长温度范围(18~ 25 °C)内<sup>[1,3,8]</sup>, 4~ 6 月份, 气温、水温

升速较快. 透明度变化范围为 50~ 400 cm, 平均透明度为 200 cm, 透明度随叶绿素 a 的升高而减小. 悬浮

物为 0.9~ 6.8 mg/L, 从上游至下游悬浮物含量均较稳定.

表 1 水华敏感期大宁河主要物理化学参数

Table 1 Results of physical chemistry parameters of Da-ning River during sensitive period of algal blooms

监测断面	项目	气温/℃	水温/℃	pH	透明度/cm	悬浮物 mg·L <sup>-1</sup>
大昌	范围	22.5~28.5	21.5~25.5	8.25~8.47	90~160	2.3~4.4
	平均值	26.0	24.0	8.33	117.5	3.3
双龙	范围	24.0~28.5	21.0~25.0	8.31~8.96	160~400	2.7~4.3
	平均值	26.4	23.1	8.58	238	3.4
东坪坝	范围	20.0~40.0	18.5~26.4	8.11~9.23	80~350	0.9~6.8
	平均值	27.5	22.6	8.68	215.6	3.1
白水河	范围	20.5~33.5	19.5~28	8.01~8.97	70~350	1.0~5.0
	平均值	27.4	23.175	8.63	224.3	3.12
龙门	范围	21.5~31.5	19.3~27.5	7.96~8.86	50~300	3.0~5.7
	平均值	27.3	23.3	8.36	181.5	3.6
菜子坝	范围	19.5~33.5	17.0~25.6	8.02~8.83	60~320	0.8~5.0
	平均值	27.3	22.7	8.45	190.2	2.9
大宁河口	范围	19.5~33	17.0~24.0	7.98~8.47	130~300	0.8~5.0
	平均值	26.5	20.8	8.23	195.9	3.28

## 2.2 营养状态因子特征

### 2.2.1 氮营养盐

图2是水华敏感期三峡水库支流大宁河自回水段以下总氮和溶解态总氮的变化情况. TN的变化范围为: 0.84~ 3.21 mg/L, 平均值为 1.56 mg/L; TDN变化范围为: 0.48~ 2.17 mg/L, 平均值为 1.35 mg/L. 在水华敏感期, 大宁河自上游至下游 TN 和 TDN 均逐

渐升高, 下游龙门、菜子坝和大宁河口断面较其它断面 TN 和 TDN 含量明显升高; 龙门和大宁河口断面 TN 和 TDN 含量均较毗邻的菜子坝断面高. 2008 年 TN 和 TDN 含量均较 2007 年高. TN 含量最大值一般出现在水华期间或水华末期, 而最小值多出现在水华暴发前; 而 TDN 含量的最大值和最小值分布规律不明显, 最大值多出现在气温升高的 5、6 月份.

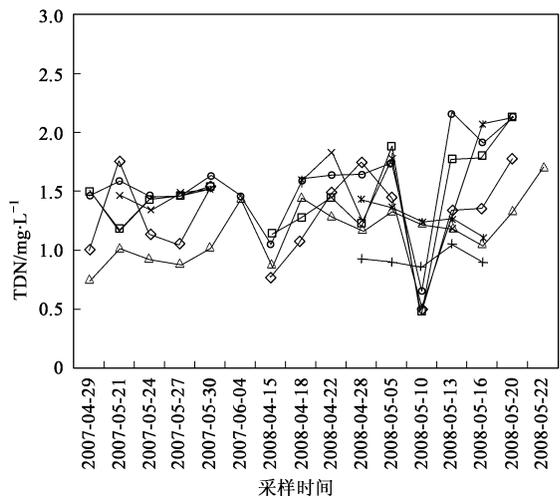
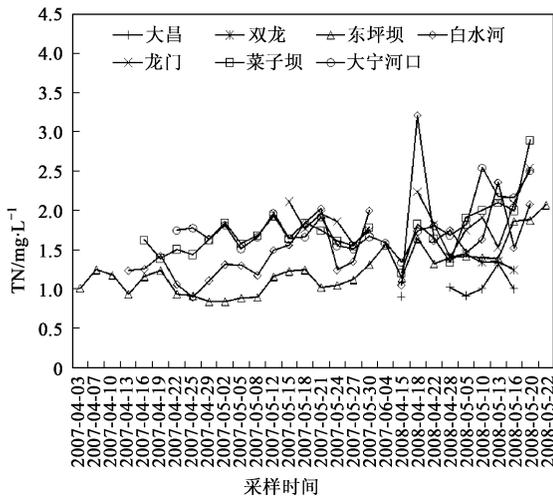


图 2 水华敏感期大宁河总氮和溶解态总氮的变化

Fig. 2 Changes of TN and TDN of Da-ning River during sensitive period of algal blooms

### 2.2.2 磷营养盐

大宁河水华敏感期总磷的变化范围为 0.011~ 0.531 mg/L, 平均值为 0.057 mg/L (图 3); 从上游到下游, TP 含量由大昌断面的 0.011 mg/L 逐渐升高菜子坝断面的 0.069 mg/L, 大宁河口断面含量略低于菜

子坝断面; 2008 年各断面平均含量较 2007 年高. 2008 年东坪坝和白水河 2 断面 TP 含量较 2007 年显著升高. 2007~ 2008 年水华敏感期大宁河自回水段以下 TDP 的变化范围为 0.010~ 0.089 mg/L, 平均值为 0.032 mg/L (图 3); 上游大昌至白水河断面含量较

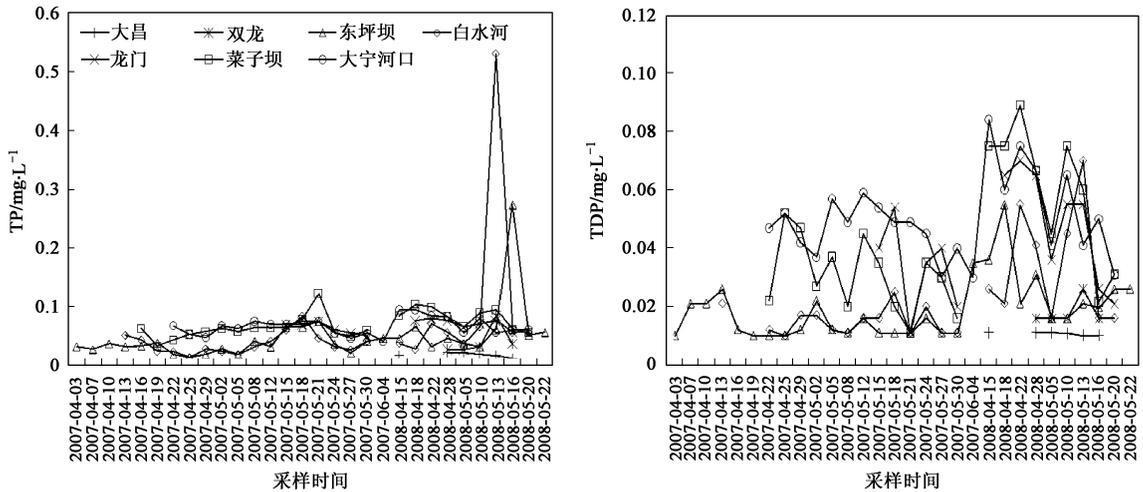


图 3 水华敏感期大宁河总磷和溶解态总磷的变化

Fig. 3 Changes of TP and TDP of Daining River during sensitive period of algal blooms

低, 下游龙门、菜子坝和大宁河口断面含量较高。大宁河口断面 TDP 含量较菜子坝断面高。2008 年水华敏感期各断面 TDP 含量较 2007 年高。TP 出现 2 次异常峰值, 分别为 2008-05-13 白水河断面 (0.531 mg/L) 和 2008-05-16 东坪坝断面 (0.274 mg/L)。

### 2.2.3 高锰酸盐指数和溶解氧

大宁河水华敏感期自回水段以下高锰酸盐指数变化范围为 1.06~ 7.19 mg/L, 平均值为 2.09 mg/L (图 4)。自回水段以下高锰酸盐指数均较低 (属于 II~ III 类地表水); 东坪坝、白水河和菜子坝断面较高, 且变化频繁, 最大值出现在水华高峰期; 大昌和大宁河口断面高锰酸盐指数较低, 且变化较稳定。由此可知, 大宁河流域水体受有机污染物污染较小<sup>[23~25]</sup>。

大宁河自回水段以下水华敏感期溶解氧的变化范围为 6.13~ 20.17 mg/L, 平均值为: 10.10 mg/L (图

4)。大宁河口溶解氧含量较低且变化稳定, 最大值出现在水华的高峰期, 上下游溶解氧含量变化小, 年际变化也小, 这表明溶解氧主要是受藻类的繁殖而受影响<sup>[15~17]</sup>。

### 2.3 叶绿素 a 和藻类种群

从大昌到菜子坝断面水华敏感期 Chl-a 的变化范围为 1.41~ 219.04 mg·m<sup>-3</sup>, 而大宁河口 (长江) 为 1.03~ 6.18 mg·m<sup>-3</sup> (图 5), Chl-a 出现 3 次高峰期, 分别为: 2007-04-13~ 2007-04-22 (白水河和菜子坝); 2007-05-02~ 2007-05-30 (东坪坝、白水河、龙门和菜子坝); 2008-04-28~ 2008-05-16 (从大昌到菜子坝)。其中, 东坪坝、白水河和菜子坝断面 Chl-a 变化较频繁, 含量也较高; 大宁河口水体 Chl-a 含量较低且稳定。

进一步对藻类种群的研究发现, 藻密度的变化

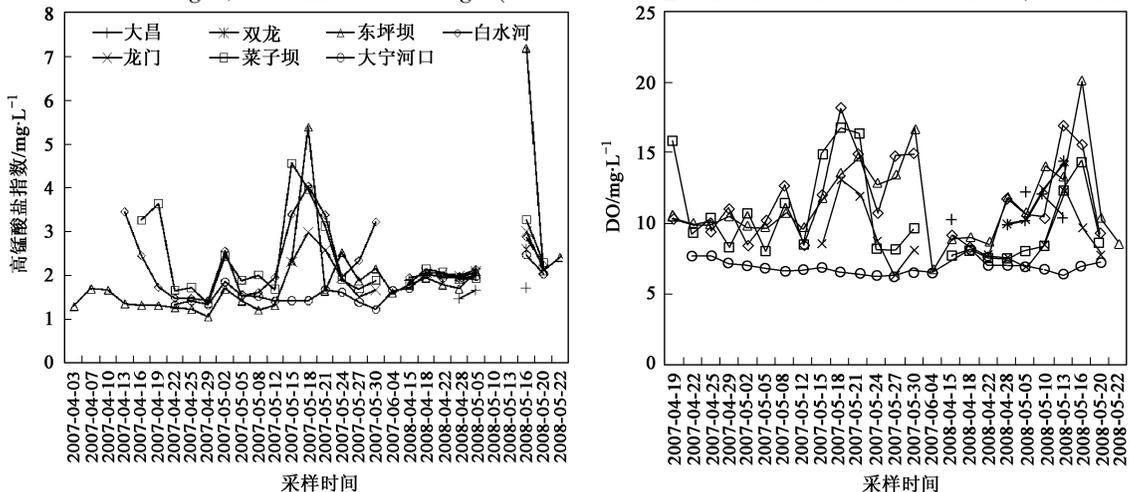


图 4 水华敏感期大宁河高锰酸盐指数和溶解氧的变化

Fig. 4 Changes of potassium permanganate index and DO of Daining River during sensitive period of algal blooms

范围为6112~872182个/L(图5),主要有硅藻门、绿藻门、蓝藻门、甲藻门、裸藻门、隐藻门、黄藻门和金藻门8门82属124种,其中以硅藻门和绿藻门分布最多分别为47种和46种,其次是蓝藻门的16种和甲藻门9种,裸藻门、隐藻门、金藻门和黄藻门较少分别为3种、1种、1种和1种.上游大昌和双龙断面藻密度较低,藻类种群也较少,分别发现5门34种和6门21种,优势藻均为硅藻门和绿藻门.东坪

坝、白水河和菜子坝断面藻密度变化较大,藻类分布较广,东坪坝和白水河断面分别发现6门45种和6门48种,优势藻均为硅藻门、绿藻门和蓝藻门,而菜子坝断面藻类有8门49种,优势藻为硅藻门和绿藻门.龙门断面藻类较少,有5门33种.大宁河口断面由于处于长江中,流速相对较大、水动力条件相对复杂,其藻类分布也较少,发现4门34种,且多为适宜于河流峡谷中生长的硅藻门(20种).

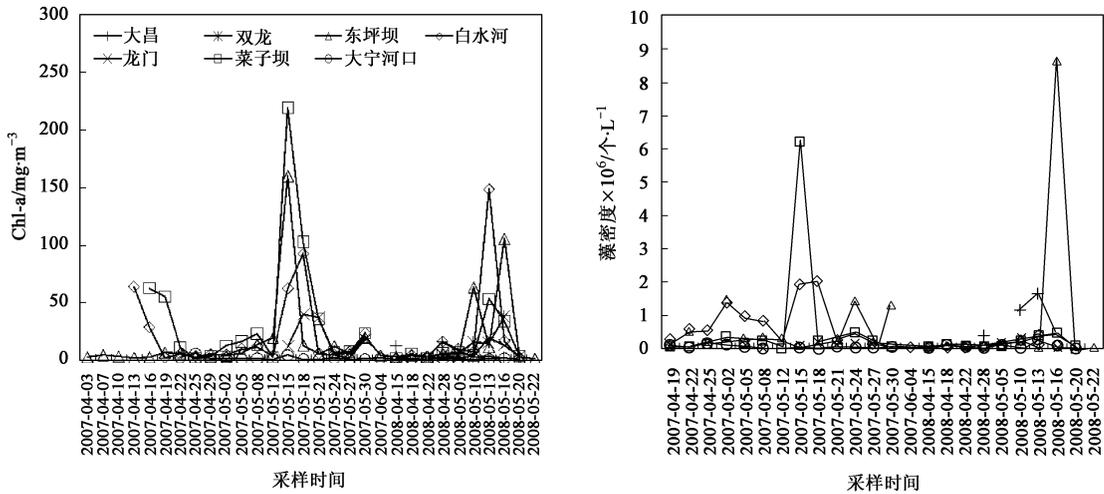


图5 水华敏感期大宁河自回水段以下叶绿素a和藻密度的变化

Fig.5 Changes of Chl-a and algal density of Daining River during sensitive period of algal blooms

### 3 讨论

#### 3.1 营养盐的状况

##### 3.1.1 营养盐的组成

三峡水库库区水体中,氮营养盐主要以溶解态形式存在,而磷营养盐多以颗粒态磷占优<sup>[1-3,22]</sup>.水华期间大宁河自回水段以下氮营养盐也是如此,TDN/TN平均达到84%(表2);而磷营养盐却以溶解态总磷占优,TDP/TP平均为60%,并且大昌和大宁河口断面TDP/TP较高,经常发生水华的双龙至菜子坝断面较低,这是由于:藻类生长中吸收TDP并集聚形成植物体内固定的颗粒态磷(TP升高),而同时水体中作为氮、磷营养盐的储备形式存在的颗粒态的磷和溶解态磷之间存在平衡<sup>[2,15,22]</sup>,TDP大量消耗的同时TSP及时给以补充所以TDP含量较稳定,这就导致发生水华的水体的TDP/TP较低.水华敏感期

大宁河TP出现2次异常峰值(2008-05-13白水河断面和2008-05-16东坪坝断面),同期Chl-a也异常高(分别为 $148.6\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $105.6\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),且外源性磷营养盐输入没有出现异常增加,这表明TP的异常增长和藻类生长密切相关(Chl-a含量升高)<sup>[22,23]</sup>.

整个大宁河流域的工业污染很小,污染主要来自旅游业、农田地表径流、浸没土地缓释以及城镇点源污染等<sup>[1,9,10]</sup>.上游大昌和双龙断面由于移民迁移及新建城镇等原因,其污染主要是由于淹没土地缓释造成的,所以氮磷营养盐含量较低且变化较其它断面稳定;中游东坪坝和白水河农业地表径流和网箱养鱼污染严重<sup>[22,26]</sup>,据现场观测统计2008年网箱养鱼规模和数量较2007年显著增加,营养盐含量也随之升高.下游龙门、菜子坝和大宁河口断面的氮磷营养盐较其它断面高,其原因主要是巫山县城的点源污染和周边农村农业地表径流污染造成

表2 水华敏感期大宁河氮、磷营养盐的组成/%

Table 2 Forms of nitrogen and phosphorus of Daining River during sensitive period of algal blooms/%

项目	大昌	双龙	东坪坝	白水河	龙门	菜子坝	大宁河口	总平均值
TDN/TN	89	94	84	78	83	81	87	84
TDP/TP	65	50	52	51	63	60	76	60

的<sup>[10,27,28]</sup>. 值得注意的是: 大宁河出口断面(长江)氮、磷营养盐含量较大宁河其它断面都高, 表明大宁河流域营养盐对长江干流水体污染负荷贡献较小<sup>[11]</sup>.

### 3.1.2 氮磷比

氮磷营养盐的相对结构常以 N/P(TN/TP) 比值来表示, 这是表征水环境营养盐结构的重要指标之一. 一般来说, 藻类健康生长及生理平衡所需的氮磷比率(N/P) 为 16: 1 (Redfield 比值)<sup>[29,30]</sup>, N/P 比值低于 16, 表明氮相对不足, 藻类的生长受氮限制; 而 N/P 比值高于 16, 则表明磷相对不足, 藻类生长受磷限制<sup>[31~34]</sup>. 由上文知, N、P 绝对浓度条件均适宜藻类的生长, 而水华敏感期大宁河自回水段以下 N/P 值

均高于 16(表 3), 藻类生长受磷限制; 经常暴发水华的断面 N/P 值较低, 主要是由于藻类集聚 TSP 造成 TP 含量升高, 从而 N/P 值较低; 大昌断面较其它断面高, 可能是由于被淹没的大昌老城的氮污染源缓释导致 TN 含量较高而 TP 含量较低引起的; 龙门至大宁河口断面 N/P 值较低, 一方面是由于这 3 个断面水体中磷含量均较高, 另一方面由于长江水体磷含量相对于大宁河内各断面高, 江水河水交换频繁导致临近出河口处 3 断面磷含量较高而造成的<sup>[28]</sup>. 大宁河流域氮营养盐污染严重, 流域内大量使用氮肥、淹没城镇农田氮污染源的缓释和氮营养盐地表径流输入可能是造成 N/P 值较高的原因<sup>[11,22]</sup>.

表 3 水华敏感期大宁河的 N/P 比值

Table 3 N/P value of Da-ning River during sensitive period of algal blooms

项 目	大昌	双龙	东坪坝	白水河	龙门	菜子坝	大宁河口	总平均值
N/P	63	41	35	43	29	27	29	35

### 3.2 Chl-a 与营养化因子的关系

在湖泊、水库缓流状态下, 一般 Chl-a 与 N、P 等营养盐间存在不同程度的线性关系<sup>[17,35,36]</sup>. 但由于三峡水库支流河流库湾是一个非常复杂的环境生态体系, 一方面受支流上游来水的影响, 另一方面还受干流顶托水的影响, 所涉及的富营养化影响因子很多<sup>[6,7,26]</sup>. 水华敏感期大宁河富营养化指标相关性分析结果见表 4<sup>[20,21]</sup>. 和大多数湖泊、水库不同, 水华敏感期大宁河自回水段以下 Chl-a 与 TP、高锰酸盐指数、DO、pH 呈显著正相关 ( $r_{\text{Chl-a-TP}} = 0.453$ ,  $r_{\text{Chl-a-高锰酸盐指数}} = 0.641$ ,  $r_{\text{Chl-a-DO}} = 0.584$ ,  $r_{\text{Chl-a-pH}} = 0.409$ ,  $p < 0.01$ ), Chl-a 与 SD 呈显著负相关 ( $r_{\text{Chl-a-SD}} = -0.392$ ,  $p < 0.01$ ), 表明 TP 和高锰酸盐指数的来源与藻类的生长 (Chl-a 升高) 有关, 而同时藻类的增加也导致 DO、pH 升高以及透明度下降, 水库为静止水体, 颗粒态物质沉降, 藻类增加 SD 降低; TN、TP 和高锰酸盐指数 3 个参数彼此均呈显著正相关 ( $r_{\text{TN-TP}} = 0.379$ ,  $r_{\text{TN-高锰酸盐指数}} = 0.261$ ,  $r_{\text{TP-高锰酸盐指数}} = 0.554$ ,  $p < 0.01$ ), 表明 3 种污染物来源相同, 随藻类的增长而升高, 藻类生长对氮、磷进行富集造成 TN 和 TP 升高, 而大宁河流域有机污染较低, 因此高锰酸盐指数也主要来自藻类. TN 与 Chl-a 无相关性, 表明氮污染源主要来自外源污染, 由于总体 TN 含量高, 藻类的集聚对 TN 影响不大. pH 与 Chl-a、高锰酸盐指数、DO 和水温呈显著正相关 ( $r_{\text{pH-Chl-a}} = 0.409$ ,  $r_{\text{pH-高锰酸盐指数}} = 0.433$ ,  $r_{\text{pH-DO}} = 0.758$ ,  $r_{\text{pH-水温}} = 0.387$ ,

$p < 0.01$ ); 与 TN、TDN、TDP 呈显著负相关 ( $r_{\text{pH-TN}} = -0.311$ ,  $r_{\text{pH-TDP}} = -0.527$ ,  $p < 0.01$ ;  $r_{\text{pH-TDN}} = -0.291$ ,  $p < 0.05$ ), 这表明 pH 受诸多参数的影响, 受藻类生长影响较大. 三峡水库蓄水后, 受蓄水影响的支流库湾水体流速虽然比天然河流状态时有不同程度下降, 但受水库蓄水以及库区暴雨等影响支流水体与干流交换依然较快, 与其它湖泊水库水文条件相比还不完全相同, 导致 Chl-a 与营养因子间的关系与湖泊、水库不一致.

### 3.3 水华敏感期藻类种群的变化

一般认为, 当水体中 TN、TP 含量分别达到 0.20、0.02 mg/L 以上时, 水体存在发生富营养化的风险<sup>[10,15]</sup>, 图 2、3 表明水华敏感期大宁河自回水段以下除大昌以外 (TP 含量为 0.017 mg/L) 其余各断面水体 TN、TP 含量均远高于限制阈值, 表明 N、P 浓度条件适宜藻类生长. 由叶绿素 a 和藻密度的变化看 (图 5), 大宁河在 2007-04~2007-06 和 2008-04~2008-05 的水华敏感期暴发了 3 次较大规模的自回水段以下性水华, 分别为 2007-04-22~2007-05-12、2007-05-15~2007-05-30 和 2008-05-10~2008-05-16 (藻密度  $> 10^6$  个/L<sup>[5,7]</sup>). 水华期间藻密度最高值是正常值的 14~1427 倍. 不同营养状态的水体中存在不同的生物种类, 特别在优势种方面差异明显<sup>[15~17]</sup>. 大宁河水华期间藻类的优势种随时间和空间的变化有所不同 (表 5), 2007-04-22~2007-05-12 主要是绿藻门的波吉卵囊藻、小空星球藻; 裸藻门的扁裸藻、矩圆囊裸藻和硅藻门的小环藻、舟形藻. 适

表 4 水华敏感期大宁河富营养化指标相关性分析结果<sup>1)</sup>

Table 4 Correlation of trophic factors of Da-ning River during sensitive period of algal blooms

	Chla	TN	TDN	TP	TDP	高锰酸盐指数	DO	水温	SD	pH
Chla	1									
	Pearson 系数									
	Sig. (2-tailed)									
	N									
TN	0.078	1								
	Pearson 系数									
	Sig. (2-tailed)									
	N	127								
TDN	-0.044	0.556**	1							
	Pearson 系数									
	Sig. (2-tailed)									
	N	82	82							
TP	0.453**	0.379**	0.055	1						
	Pearson 系数									
	Sig. (2-tailed)									
	N	127	82	127						
TDP	-0.090	0.403**	0.122	0.425**	1					
	Pearson 系数									
	Sig. (2-tailed)									
	N	123	82	123	123					
高锰酸盐指数	0.641**	0.261**	0.085	0.554**	-0.132	1				
	Pearson 系数									
	Sig. (2-tailed)									
	N	113	68	113	109	113				
DO	0.584**	-0.174	-0.289**	0.238**	-0.485**	0.671**	1			
	Pearson 系数									
	Sig. (2-tailed)									
	N	116	80	116	114	102	116			
水温	0.137	0.172	-0.139	0.106	-0.282**	0.394**	0.415**	1		
	Pearson 系数									
	Sig. (2-tailed)									
	N	101	66	101	99	87	95	102		
SD	-0.392**	-0.201*	-0.069	-0.232*	0.095	-0.465**	-0.367**	-0.278**	1	
	Pearson 系数									
	Sig. (2-tailed)									
	N	107	68	107	105	93	102	96	107	
pH	0.409**	-0.311**	-0.291*	0.146	-0.527**	0.433**	0.758**	0.387**	-0.166	1
	Pearson 系数									
	Sig. (2-tailed)									
	N	109	72	109	107	95	106	98	105	109

1) 数据经 SPSS13.0 统计软件处理, \*\* 表示显著性水平为 0.01(双尾检验); \* 表示显著性水平为 0.05(双尾检验)

表 5 大宁河水华期间藻类的优势种  
Table 5 Dominant species of algal blooms of Da-ning River

时 间	大昌	双龙	东坪坝	白水河	龙门	菜子坝
2007-04-22~ 2007-05-12	—	—	绿藻门: 波吉卵囊藻 裸藻门: 扁裸藻	绿藻门: 波吉卵囊藻 裸藻门: 扁裸藻; 矩圆 囊裸藻 硅藻门: 小环藻	—	绿藻门: 小空星 球藻 硅藻门: 舟形藻
2007-05-15~ 2007-05-30	—	—	绿藻门: 小空星藻; 土生绿球藻	绿藻门: 小空星球藻 硅藻门: 小环藻	—	硅藻门: 舟形藻; 小环藻; 冠盘藻 绿藻门: 小球藻
2008-05-10~ 2008-05-16	硅藻门: 小 环藻	绿藻门: 实球藻 甲藻门: 不显多 甲藻	绿藻门: 实球藻	绿藻门: 泡状胶囊藻; 实球藻	绿藻门: 实球藻 甲藻门: 埃尔多甲藻	绿藻门: 实球藻 甲藻门: 埃尔多 甲藻

宜生长在重度富营养化水体中的裸藻在东坪坝和白水河断面发生水华; 并且绿藻和裸藻水华是同时发生在同一水体. 2007-05-15~ 2007-05-30 随着气温回升等条件的改变, 水华藻类的优势种也发生改变, 这一时期主要是绿藻门的小空星藻、土生绿球藻、小球藻; 硅藻门的小环藻、舟形藻、冠盘藻等, 这些藻类多生长在中营养水体中. 2008-05-10~ 2008-05-16 水华的优势种主要是绿藻门的实球藻和甲藻门的埃尔多甲藻等, 水华优势种的范围较 2007 年趋于单一化; 2008 年气温回升较 2007 年晚, 水华暴发也较晚, 但 2a 中 5 月份均发生水华.

由于整个大宁河流域地理气候等条件差异较大, 这就造成水华具有其自身的特点.

(1) 大宁河水华的优势藻种范围较大, 从适宜生长于中营养水体的甲藻、硅藻和绿藻到适宜于富营养水体的蓝藻、绿藻和裸藻均发生过水华, 且水华时优势种不单一, 发生多藻种同时同地水华的情况.

(2) 大宁河流域水华随流域差异较大, 中游水体(东坪坝和白水河断面)持续时间较长, 下游水体(龙门和菜子坝断面)由于水体营养盐丰富、和江水交换频繁, 水华持续时间较短, 但水华发生较上中游频繁. 现场实际观测发现菜子坝断面只要天气晴朗、气温持续较高几乎每周都发生水华(尤其是甲藻水华).

(3) 出河口(长江)由于水动力等条件制约, 藻类不宜生长, 藻密度低.

#### 4 结论

(1) 水华敏感期大宁河自回水段以下氮、磷含量高, 总氮范围为 0.84~ 3.21 mg/L, 总磷为 0.011~ 0.531 mg/L; 氮营养盐主要以 TDN 为主, 而磷营养盐以 TDP 占优, N/P 值均高于 16, 藻类生长受磷限制;

大宁河口氮、磷含量较其它断面高.

(2) 水华敏感期大宁河自回水段以下高锰酸盐指数和溶解氧含量较低且稳定.

(3) 水华敏感期大宁河自回水段以下叶绿素 a 变化范围为 1.41~ 219.04 mg·m<sup>-3</sup>, 东坪坝、白水河和菜子坝断面叶绿素 a 较高变化较频繁, 大宁河口含量较低且稳定; Chl a 与 TP、高锰酸盐指数、DO、pH 呈显著正相关, Chl a 与 SD 呈显著负相关; TN 与 Chl a 无相关性; pH 与 Chl a、高锰酸盐指数、DO 和水温呈显著正相关, 与 TN、TDN、TDP 呈显著负相关.

(4) 水华敏感期大宁河自回水段以下藻类分布较广, 主要有硅藻门、绿藻门、蓝藻门、甲藻门、裸藻门、隐藻门、黄藻门和金藻门 8 门 82 属 124 种, 其中硅藻门和绿藻门分布最多, 其次为蓝藻门和甲藻门, 其余藻种较少. 水华敏感期大宁河暴发了 3 次自回水段以下大规模的水华, 藻密度最高值是正常值的 14~ 1427 倍; 水华优势种主要有绿藻门的波吉卵囊藻、小空星球藻、土生绿球藻、实球藻和小球藻; 裸藻门的扁裸藻、矩圆囊裸藻; 硅藻门的小环藻、冠盘藻和舟形藻; 甲藻门的埃尔多甲藻等.

#### 参考文献:

- [1] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 1-6.
- [2] 曹承进, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 310-315.
- [3] 张远, 郑丙辉, 刘鸿亮. 三峡水库蓄水后的浮游植物特征变化及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(2): 254-257.
- [4] Zeng H, Song L, Yu Z, et al. Distribution of phytoplankton in the Three-Gorge Reservoir during rainy and dry seasons [J]. Science of the Total Environment, 2006, 367: 999-1009.
- [5] Zeng H, Song L, Yu Z, et al. Post Impoundment Biomass and Composition of Phytoplankton in the Yangtze River [J]. Internat Rev Hydrobiol, 2007, 92(3): 267-280.
- [6] 张远, 郑丙辉, 富国, 等. 河道型水库基于敏感性分区的营养状

- 态标准与评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 1016-1021.
- [7] 郑丙辉, 张远, 富国, 等. 三峡水库营养状态评价标准研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 1022-1030.
- [8] 李锦秀, 廖文根. 三峡库区富营养化主要诱发因子分析[J]. 科技导报, 2003, (2): 49-52.
- [9] 国家环境保护总局. 2005 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 北京: 国家环境保护总局, 2005.
- [10] 国家环境保护总局. 2007 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 北京: 国家环境保护总局, 2007.
- [11] 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.
- [12] 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. 239-284.
- [13] HJT 91-2002, 地表水和污水监测技术规范[S].
- [14] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [15] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [16] 金相灿. 中国湖泊水库环境调查研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [17] 金相灿, 屠清英. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 114-132, 292-293.
- [18] 赵文. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [19] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物图谱[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [20] 程子峰, 徐富春. 环境数据统计分析基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006 77-97.
- [21] 陈平雁, 黄浙明. SPSS10.0 统计软件应用教程[M]. 北京: 人民军医出版社, 2002 146-176.
- [22] 张晟, 李崇明, 付永川, 等. 三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 7-12.
- [23] Tchobanoglous G, Burton F L, Stensel D H. Wastewater Engineering - I: Treatment and Reuse[M]. (4th ed). McGraw-Hill Inc., New York, 2003. 62-63.
- [24] 王彦军, 盖赫莉, 赵永哲. 高锰酸盐指数分析结果的数据处理[J]. 黑龙江环境通报, 2001, 25(1): 54.
- [25] 陈晓立, 张诚芳. 影响高锰酸盐指数测定的主要因素[J]. 污染防治技术, 2007, 20(1): 77-78.
- [26] 李崇明, 黄真理, 常剑波, 等. 三峡水库网箱养殖利弊分析[J]. 中国三峡建设, 2005, 4: 49-52.
- [27] 周建军, 林秉南, 李玉. 关于三峡水库内源污染控制的研究[J]. 科技导报, 2006, 24(10): 5-10.
- [28] 梁常德, 龙天渝, 李继承, 等. 三峡库区非点源氮磷负荷研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 26-31.
- [29] Klausmeier C A, Litchman E, Daufresne T, *et al.* Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton [J]. Nature, 2004, 429: 171-174.
- [30] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment [J]. Am Sci, 1958, 46: 205-222.
- [31] Hecky R E, Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment [J]. Limnol Ocean, 1988, 33(4): 796-822.
- [32] Rhee G Y, Gotham I J. Optimum N: P ratios and coexistence of plankton algae [J]. J Phycol, 1980, 16: 486-489.
- [33] Justic 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: 339-336.
- [34] Vollenweider R A, Kerekes J. Background and summary results of the OECD cooperative program on eutrophication in Restoration of lakes and inland waters[R]. Washington D. C: U.S. Environmental Protection Agency, 1980. 25-36.
- [35] Prairie Y T, Duarte C M, Kalf J. Unifying nutrient-chlorophyll relationships in lakes [J]. Can J Fish Aquat Sci, 1989, 46: 1176-1182.
- [36] Erwin E, Van Nieuwenhuysse, Jones J R. Phosphorus-chlorophyll relationships in temperate streams and its variation with stream catchment area [J]. Can J Fish Aquat Sci, 1996, 53: 29-36.