

三峡水库春季营养盐和浮游植物空间分布及其机制¹

张磊^{1,2,5}, 夏志强^{1,2,5}, 周伟³, HAMILTON Paul B⁴, HAFFNER Douglas^{1,2,5}

1 西南大学资源环境学院, 重庆 400715

2 重庆市国际科技合作示范基地“中加三峡水域科学研究中心”, 重庆 400715

3 长江流域水资源保护局长江流域水环境监测中心, 湖北 武汉 430010

4 加拿大国家自然博物馆, 加拿大 渥太华 K1P 6P4

5 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: 为研究三峡水库春季水体营养盐与浮游植物的空间分布状况, 于 2013 年 3 月对三峡水库 22 条支流及干流的 6 个断面进行采样监测。结果表明: 来水、回水、河口和干流 4 类断面 $\rho(\text{TN})$ 平均值分别为 1.69、1.84、2.01、1.51 mg/L; $\rho(\text{TP})$ 平均值分别为 0.115、0.191、0.179 和 0.181 mg/L; 不同类型断面间 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 差异不显著; 水体中 N、P 的主要形态分别为 NO_3^- -N 和 PO_4^{3-} -P; N/P (n(N)/n(P)) 从来水 (110.8) 至干流 (18.9) 逐渐降低。三峡水库总体上为中营养状态, 回水和河口区富营养化程度较高, 富营养断面比例分别为 45.4% 和 36.4%。研究期间共检出浮游植物 8 门 98 属; 其中以绿藻门、硅藻门和蓝藻门为主, 分别检出 42、26 和 17 属; 从组成上看, 来水和干流以硅藻-绿藻为主, 回水、河口以绿藻-硅藻为主。浮游植物丰度由高到低依次为回水、河口、来水和干流断面。调查期间, 22 条支流中有 15 条支流在不同位置有水华发生, 但主要集中在回水区, 拟多甲藻水华为主要类型且集中在库区的下游支流, 而库区中上游支流则以隐藻、衣藻、小球藻、小环藻等水华为主。环境因子排序分析表明, 在水华集中的回水-河口区域, 影响浮游植物丰度分布的主要环境因子数明显少于其他区域, 温度和溶解氧为该区域浮游植物丰度分布的主要影响因子, 而 TN 和 TP 的影响不明显。

关键词: 三峡水库; 水华; 春季; 回水; 空间分布; 排序分析

文章编号: H009041

中图分类号: X832

文献标识码: A

Spatial Distribution of Nutrient and Phytoplankton and the Causes for Their Differences of the Three Gorges Reservoir in Spring Season

ZHANG Lei^{1,2,5}, XIA Zhi-Qiang^{1,2,5}, ZHOU Wei³, HAMILTON Paul B⁴, HAFFNER Douglas^{1,2,5}

1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China

2. Chongqing International S&T Performance Base, China-Canada Three Gorges Reservoir Water Science Centre, Chongqing 400715, China

3. Water Environmental Monitoring Center of Yangtze River Basin, Yangtze River Water Resource Protection Bureau, Wuhan 430010, China

4. Canadian Museum of Nature, Ottawa K1P 6P4, Canada

5. Great Lakes Institute for Environmental Research, University of Windsor, Windsor Ontario N9B 3P4, Canada

Abstract: A survey of 22 tributaries and 6 mainstream sections of the Three Gorges Reservoir (TGR), was conducted in March of 2013 to study the spatial distribution of nutrients and phytoplankton composition in four categories of sections. The results showed that the total nitrogen concentrations in each kind of section, incoming flow, backwater, estuary and mainstream, were 1.69, 1.84, 2.01 and 1.51 mg/L, respectively. The total phosphorus concentrations in each kind of section were 0.115, 0.191, 0.179 and 0.181 mg/L, respectively. No significant differences (checked by using single factor ANOVA) were observed on TN ($P=0.659$) and TP ($P=0.683$) concentrations among incoming flow, backwater, estuary and mainstream sections. Regarding Nitrate and dissolved phosphate were the dominant forms of TN and TP suggesting nutrient limitation is not an important regulator of algal growth. The N:P ratio declined along the direction of water flow from the incoming flow (110.8) of the tributaries to the mainstream of Yangtze (18.9). On the whole, the study area was mesotrophic while the backwater and estuary had higher trophic level, with 45.4% and 36.4% eutrophic sections respectively. In total, 98 genera of phytoplankton were identified, dominated by Chlorophyta, Cayanophyta and Bacillariophyta, with 43, 26 and 17 genera, respectively. With regards to phytoplankton composition, the incoming flow and mainstream were dominated by Bacillariophytes

收稿日期: 2014-12-27 ; 修订日期: 2015-5-8 ;

基金项目: 国家科技部国际科技合作专项项目 (2013DFG92520)

作者简介: 张磊(1967-), 女, 内蒙古哲里木盟开鲁县人, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境微生物。zhanglei03@aliyun.com

following Chlorophytes, whereas the backwater and estuary were dominated by Chlorophyta following Bacillariophyta. The phytoplankton abundance was highest in the backwater and declined along the estuary, incoming flow and the mainstream. Algal blooms were observed in 15 out of 22 tributaries and most of them occurred in backwater. The most frequent blooms were dominated by *Peridiniopsis* sp., which was observed in the backwaters of 7 of the 8 closest tributaries to the Three Gorges Dam. In contrast, the dominant bloom forming species in the middle and upstream tributaries of TGR were more diverse with *Cryptomonas* sp., *Chlamydomonas* sp., *Chlorella* sp., *Cyclotella* sp. et al. being the dominant blooming species. Based on Ordination Analysis, the number of main environmental factors affecting the distribution of phytoplankton abundance in backwater-estuary region was obviously less than the other regions. The temperature and dissolved oxygen (DO), were the first two key factors to determine the distribution of algae abundance within this region. TN and TP were not main factors affecting the phytoplankton abundance.

Keywords: Three Gorges Reservoir; algal bloom; spring; backwater; spatial distribution; ordination analysis

三峡工程自建成以来, 在航运、防洪、发电方面带来了巨大的社会和经济效益, 但随之而来的水质恶化程度却超出了设计预期^[1-3]。如根据国家环保部发布的《长江三峡工程生态环境监测公报》, 2004 年 2 月下旬香溪河首次记录到爆发水华, 之后每年的春、夏季均能在不同支流中监测到水华, 而且影响范围和持续时间均呈不断扩大的趋势。三峡水库蓄水后, 受回水顶托影响, 库区水体流速降低, 物质和能量交换能力下降, 水体自净能力弱化^[4], 营养盐累积, 水华易发, 是近年来水质恶化和一系列水华事件的重要原因^[5-9]。在流域生态系统健康研究中, 空间尺度上的连续性十分重要^[10,11]。在目前大量的三峡水库水环境问题的研究中, 绝大多数的研究对象仅限于支流回水区或干流, 少量的对支流来水的研究也只考察了其营养状态^[12], 对于包含支流来水区在内的全库区营养状态和浮游藻类的综合研究较为鲜见。作为淡水生态系统中最重要初级生产者, 浮游植物的生长和影响水环境的同时, 也能反映水环境的变化, 其种类和存量信息对于了解水环境质量有着重要的研究价值。为全面了解库区水体春季浮游植物组成及水质状况, 探索蓄水对水库生态系统的影响, 该研究于 2013 年 3 月这一水华易发期对从库首三峡大坝至库尾重庆朝天门的 22 条支流的来

水、回水和河口断面及干流 6 个重点断面的浮游植物和水质进行了采样研究, 以期对三峡水库水环境保护工作提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域及断面设置

本研究共调查了三峡库区 22 条支流。每条支流在来水、回水和河口设置断面。其中来水和河口各设置 1 个断面, 回水设 1 至 3 个断面。根据回水区长度和流量, 在龙河、澎溪河、大宁河、神农溪和香溪河设 3 个回水断面; 磨刀溪、长滩河、梅溪河、童庄河设 2 个回水断面, 其余支流各设 1 个回水断面。回水断面均匀分布于来水及河口断面之间; 河口断面距干流 0.5 (库尾支流)~3 km (库首支流); 来水断面设置在来流流速明显处。在实际采样中, 由于支流回水末端渔网、砂石采掘施工等导致无法达到采样点, 九畹溪、神农溪、绵竹峡、抱龙河、澎溪河等 5 条支流来水断面样品缺失。干流共设置朝天门、寸滩、清溪场、沱口、官渡口和太平溪 6 个断面。支流分布和干流断面设置见图 1。采样时间为 2013 年 3 月 8—25 日, 其中 3 月 9 日因风浪禁航, 21、22 日因补给而未采样。每日采样时间集中在 9:00—17:00 之间。同一支流不同断面的采样工作在同一天内完成。

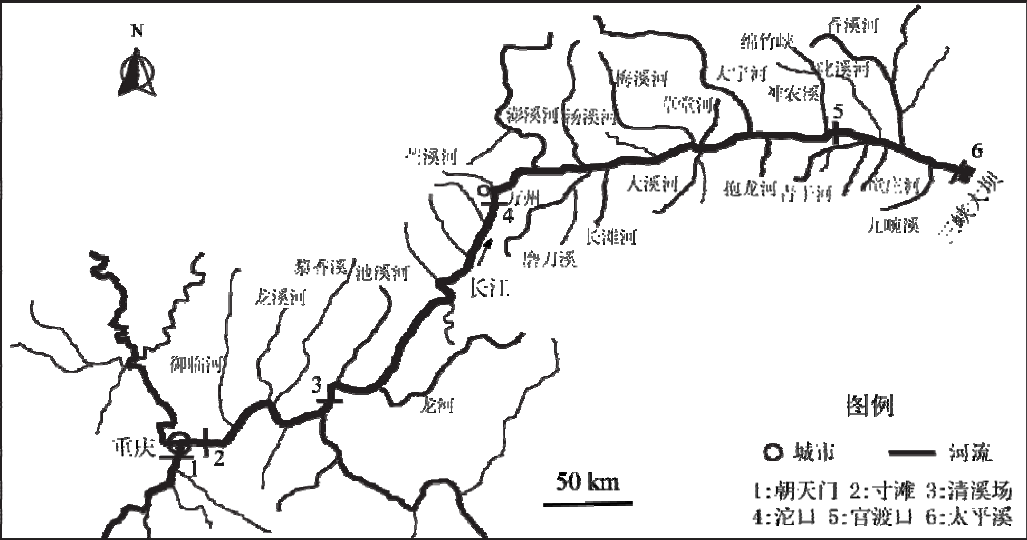


图 1 研究区域支流和干流断面分布
Fig.1 Map of Tributaries and Mainstream Sections of Study Area

1.2 样品采集及分析方法

各断面采样点设置、水样采集、处理以及化学指标的测定按《水和废水监测分析方法》(第四版)^[13]中规定方法进行, 采样深度为水面下 0.5 m, 取静置 30 min 去除沉降性固体的澄清水样测定化学指标。每 L 浮游植物定量样品中加入 10 mL 鲁哥试剂进行固定, 定性样品以 25#生物滤网采集并加入适量固定液固定。以水质自动分析仪(YSI6600, 美国)现场记录水温、pH、 $\rho(\text{DO})$ 、浊度、电导率及 $\rho(\text{Chla})$, 以塞氏盘记录透明度, 同时记录天气、风浪及水体感官等特征。所测定的化学指标为 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$, 以及部分采样点 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 和 $\rho(\text{NO}_3^{-}\text{-N})$, 测定工作于采样当天在监测船上的实验室完成。浮游植物沉淀浓缩后以常用的 0.1 mL 计数框计数, 每个样品计数 2~3 片; 定性样以加拿大国家自然博物馆(Canadian Museum of Nature)藻类专家 Paul B. Hamilton 所赠的改进型沉降室^[14]做水封片后在显微镜(OLYMPUS VANOX, 日本)下镜检到属。藻类种

属参考《中国淡水藻类分类、鉴定和生态》^[15]。水体富营养化评价采用综合营养状态指数法^[16]。

数据采用 SPSS 18.0 软件进行分析, 作图采用 Origin 8.6 软件, 浮游植物与环境因子排序分析采用 CANOCO for Windows 4.5 软件。

2 结果与分析

2.1 水质的空间分布特征

2.1.1 基本理化指标

采样期间为三峡水库腾库容排水期, 水位从 170 m 降至 165 m, 天气平稳, 以晴天和多云天气为主, 水体基本理化指标(见表 1)波动较大。其中水温为 11.5~19.8 $^{\circ}\text{C}$, 平均值为 15.2 $^{\circ}\text{C}$; pH 为 7.7~9.2, 平均值为 8.3; 电导率为 305~1045 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 平均值为 402 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 浊度为 1.44~14.43 NTU, 平均值为 4.60 NTU; $\rho(\text{DO})$ 为 8.84~14.33 mg/L , 平均值为 10.72 mg/L 。

表 1 研究区域水文及水质基本参数

Table 1 Basic Hydrological and Water Quality Parameters of the Study Area											
断面	水温/ $^{\circ}\text{C}$	pH	电导率/ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	浊度/ NTU	$\rho(\text{DO})$ / (mg/L)	$\rho(\text{TN})$ / (mg/L)	$\rho(\text{TP})$ / (mg/L)	$\rho(\text{Chla})$ / (mg/m^3)	藻密度/ 10^3L^{-1}	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ / (mg/L)	水华及 位置
御临河	18.1	8.4	394	3.00	11.04	1.43	0.074	19.40	6133	4.25	+/B/E
龙溪河	17.6	8.0	448	2.47	9.70	1.85	0.083	7.30	39231	4.46	+/I/B/E
支 黎香溪	17.0	8.7	305	2.87	10.97	1.39	0.088	14.60	4417	3.32	+/B
流 池溪河	16.5	8.4	395	2.25	10.62	1.99	0.193	27.60	5186	2.54	+/E
龙河	15.9	8.1	339	2.98	9.62	1.84	0.091	1.50	131	1.16	-
苕溪河	19.8	8.1	543	10.3	8.94	5.40	0.658	20.90	4988	6.38	+/I/B/E

7											
澎溪河	16.2	8.7	428	3.69	12.26	2.10	0.182	25.50	3074	3.45	+/B/E
汤溪河	17.3	8.2	346	5.65	9.98	1.33	0.100	4.40	457	1.82	-
磨刀溪	15.2	8.3	400	2.75	10.42	1.69	0.102	2.80	584	1.97	-
长滩河	15.4	8.4	457	6.22	12.10	1.28	0.072	3.30	440	1.79	-
梅溪河	15.5	8.8	375	1.53	12.51	2.16	0.253	28.40	2697	4.03	+/B
草塘河	16.7	9.1	462	3.38	14.33	2.34	0.205	49.40	25530	3.39	+/B/E
大溪河	13.3	8.2	358	1.44	11.39	1.93	0.091	1.60	131	1.49	-
大宁河	14.6	8.3	413	1.44	10.90	1.36	0.039	4.10	861	1.62	-
抱龙河	14.0	8.3	461	5.98	10.83	1.29	0.118	41.80	4078	3.11	+/B
绵竹峡	14.4	7.7	1045	4.30	8.84	0.30	0.089	18.30	6103	2.17	+/B
神农溪	13.4	8.3	518	1.88	12.31	0.67	0.079	22.30	4297	2.15	+/B
青干河	12.4	8.5	375	5.85	12.49	1.35	0.056	33.60	1559	2.18	+/E
叱溪河	11.6	8.4	333	14.43	11.20	2.38	0.272	33.60	8782	5.07	+/I/B
童庄河	12.6	8.4	386	3.28	11.38	2.16	0.075	35.70	11611	1.87	+/B
香溪河	13.7	8.6	350	4.82	12.40	1.40	0.572	25.50	4700	3.24	+/B
九畹溪	14.0	8.1	364	10.70	9.94	1.91	0.096	4.20	120	1.28	-
朝天门	17.3	8.1	378	10.43	9.35	1.11	0.136	1.60	78	1.40	-
干 寸滩	17.7	8.1	388	6.60	9.12	1.32	0.144	1.90	113	1.64	-
流 清溪场	16.4	8.1	387	4.33	8.97	1.53	0.172	1.20	641	1.28	-
断 沱口	13.9	8.1	404	2.10	9.40	2.13	0.200	2.07	89	1.38	-
面 官渡口	11.5	8.1	428	1.80	9.54	1.09	0.238	1.70	17	1.40	-
太平溪	12.9	8.0	414	2.16	9.70	1.86	0.195	2.28	24	1.40	-

注：各支流指标为平均值；+：发生水华，-：未见水华；I：来水断面，B：回水断面，E：河口断面。

2.1.2 营养盐含量及形态

调查期间干流水体 $\rho(\text{TN})$ 平均值为 1.51 mg/L，沱口断面最高，官渡口断面最低； $\rho(\text{TP})$ 平均值为 0.181 mg/L，官渡口断面最高，朝天门断面最低。支流水体 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 波动较大，其中 $\rho(\text{TN})$ 平均值为 1.86 mg/L，其中芄溪河最高，绵竹峡最低； $\rho(\text{TP})$ 平均值为 0.167mg/L，其中芄溪河和香溪河远高于其他支流，大宁河最低。

由表 2 可见，干流断面 $\rho(\text{TN})$ 明显低于支流，来水类断面 $\rho(\text{TP})$ 明显低于其他类断面。但方差分析显示，来水、回水、河口、干流这 4 类断面间的 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 并无显著差异。总体来看，三峡库区水体 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 均远高于国际公认的水体发生富营养化的水平 [$\rho(\text{TN})$ 0.2 mg/L、 $\rho(\text{TP})$ 0.02 mg/L]。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 是浮游植物可直接利用的形态。该研究检测了御临河、龙河、芄溪河、澎溪河、磨刀溪、长滩河、梅溪河、大宁河、神农溪、童庄河和香溪河等 11 条支流的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和溶解性 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 。结果显示， $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 分别是 TN、TP 的主要形态， $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})/\rho(\text{TN})$ 为 69.2%~76.8%， $\rho(\text{PO}_4^{3-} \text{-P})/\rho(\text{TP})$

为 47.3%~65.0%。回水类断面的 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})/\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{PO}_4^{3-} \text{-P})/\rho(\text{TP})$ 最低，来水类断面次之，河口类断面最高。但 3 类断面无显著性差异。

$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 为 1.28~6.38mg/L，干流较低且各断面之间差异不大。支流 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 明显高于干流 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 且不同支流间波动较大。4 类断面中，回水类断面 $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ 最高，河口类断面次之，干流断面最低，但除回水类断面与干流断面间差异达到显著水平 ($P<0.05$) 外，其余各类断面间差异并不显著，表明支流受有机污染程度高于干流，回水-河口区域受有机污染程度高于来水区域。

$\rho(\text{Chla})$ 水平可以一定程度上表征水体浮游植物的存量。干流和支流的 $\rho(\text{Chla})$ 差异明显。干流 6 个断面 $\rho(\text{Chla})$ 均处于较低水平且不同断面间差异不大。除龙河和大溪河的 $\rho(\text{Chla})$ 与干流相当外，其余支流 $\rho(\text{Chla})$ 均远高于干流。此外，不同支流 $\rho(\text{Chla})$ 波动较大，最高的为草堂河(49.40mg/m³)，是最低的龙河的 33 倍。

水体 N/P [$n(\text{N})/n(\text{P})$] 影响浮游植物的生长^[17]。根据 Redfield 的理论，在地球化学尺度上，浮游植物

的化学组成总是趋于 $n(\text{C}):n(\text{N}):n(\text{P})=106:16:1^{[18]}$, 当水体中的 $n(\text{C}):n(\text{N}):n(\text{P})$ 吻合该值时, 浮游植物生长速率最大。调查期间, 来水、回水、河口类断面和干流断面水体的 N/P 依次递减但均高于 16(见表 2)。其中, 来水类断面显著高于其他类断面; $n(\text{NO}_3^--\text{N})/n(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})$ 与 N/P 呈相同的趋势, 从来水至

河口逐渐减小, 但也均高于 16。其中, 来水和回水的 $n(\text{NO}_3^--\text{N})/n(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})$ 分别极显著和显著高于河口 (P 值分别为 0.001 和 0.048), 但来水和回水无显著差异。这表明虽然各类水体的氮、磷营养水平较高, 但与氮相比, 磷的供给相对不足。

表 2 不同类型断面营养盐差异

Table 2 Nutrients' Difference Different Category of Sections

断面类型	$\rho(\text{TN})/$ mg/L	$\rho(\text{TP})/$ mg/L	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})/\rho$ (TN) (%)	$\rho(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})/$ $\rho(\text{TP})$ (%)	$n(\text{N})/n(\text{P})$	$n(\text{NO}_3^--\text{N})/n$ ($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/$ mg/L	$\rho(\text{Chla})/$ mg/m ³
来水	1.69±0.78 ^a	0.115±0.185 ^a	71.6 ^a	49.7 ^b	110.9±118.6 ^a	116.1 ^a	2.34±1.63 ^{ab}	5.90±7.72 ^b
回水	1.84±1.20 ^a	0.191±0.272 ^a	69.2 ^a	47.3 ^b	49.7±49.7ab	72.1 ^a	3.64±2.34 ^a	23.51±23.98 ^a
河口	2.01±1.01 ^a	0.179±0.112 ^a	76.8 ^a	65.0 ^a	27.6±9.2 ^b	25.3 ^b	2.49±1.32 ^{ab}	18.85±19.26 ^a
干流	1.51±0.42 ^a	0.181±0.038 ^a	NA	NA	18.9±4.6 ^b	NA	1.41±0.12 ^b	1.79±0.38 ^b

注: 不同字母表示在 0.05 水平差异显著。

2.1.3 营养状态评价

综合营养状态指数法评价表明(见表 3), 来水类断面主要为中营养, 个别支流(如吡溪河、苕溪河)的来水类断面为富营养, 龙河的为贫营养。回水类断面主要为中营养和轻度富营养, 但苕溪河、香溪河回水为中度富营养, 吡溪河为重度富营养,

大溪河回水为贫营养。河口类断面主要为中营养, 其次为轻度富营养, 但苕溪河和草堂河河口断面均为中度富营养。6 个干流断面均为中营养。来水、回水、河口和干流 4 类断面富营养断面比例依次为 13.4%、45.4%、36.4%和 0%。回水-河口是富营养化最严重的区域。

表 3 不同类型断面富营养化断面比例

Table 3 Ratio of Eutrophic Sections in Different Category of Sections

营养级别	TLI 范围	来水	回水	河口	干流
贫营养	TLI<30	6.7%	4.5%	0	0
中营养	30≤TLI≤50	80.0%	50.0%	63.6%	100%
轻度富营养	50<TLI≤60	6.7%	31.8%	27.3%	0
中度富营养	60<TLI≤70	6.7%	9.1%	9.1%	0
重度富营养	TLI>70	0	4.5%	0	0

2.2 浮游植物组成及空间分布

2.2.1 浮游植物种类组成

研究区共检出藻类 8 门 98 属, 其中支流检出了全部种类。绿藻、硅藻和蓝藻是最主要的种类, 分别检出 42、26 和 17 属, 占总检出属的 87%。甲藻、隐藻、裸藻、金藻和黄藻分别检出 4、3、3、2 和 1 属, 共占 13%。从检出频率来看, 蓝藻门的颤藻(*Oscillatoria* sp.)、小尖头藻(*Raphidiopsis* sp.) 和微囊藻(*Microcystis* sp.), 硅藻门的脆杆藻(*Fragilaria* sp.)、小环藻(*Cyclotella* sp.)、针杆藻(*Synedra* sp.)、

直链藻(*Melosira* sp.)、舟形藻(*Navicula* sp.), 绿藻门的衣藻(*Chlamydomonas* sp.)、小球藻(*Chlorella* sp.)、新月藻(*Closterium* sp.)、空球藻(*Eudorina* sp.)、栅藻(*Scenedesmus* sp.), 隐藻门的隐藻(*Cryptomonas* sp.), 甲藻门的拟多甲藻(*Peridiniopsis* sp.) 分别为各门常见属。

来水、回水、河口和干流分别检出 49、59、52 和 51 属(见图 2)。来水和干流均以硅藻门最丰富, 其次为绿藻; 回水与河口均以绿藻门最丰富, 其次为硅藻。这表明回水、河口浮游植物组成具有明显

的湖泊型特征，而干流和来水具有河道型特征。

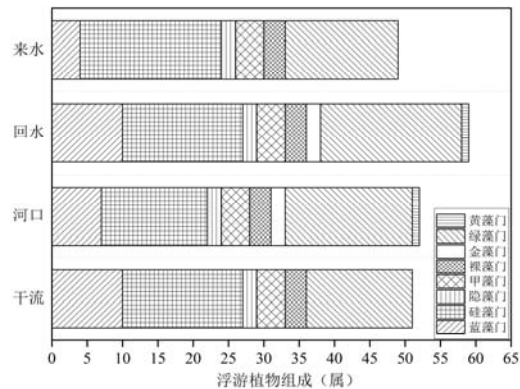


图 2 研究区不同类型断面浮游植物组成

Fig.2 the Composition of Phytoplankton in Different Category of Sections of the study area

2.2.2 浮游植物丰度及分布

干流浮游植物丰度为 $1.7\times10^4\sim6.4\times10^5\text{ L}^{-1}$, 平均值为 $1.6\times10^5\text{ L}^{-1}$; 支流浮游植物丰度为 $8\times10^3\sim5.5\times10^7\text{ L}^{-1}$, 平均值为 $5.9\times10^6\text{ L}^{-1}$, 远高于干流。不同支流间浮游植物丰度差异较大, 其中龙溪河、草堂河和童庄河较高, 分别达到 $3.9\times10^7\text{ L}^{-1}$ 、 $2.6\times10^7\text{ L}^{-1}$ 和 $1.2\times10^7\text{ L}^{-1}$, 而龙河、大溪河仅为 $1.3\times10^5\text{ L}^{-1}$ 。就同一支流而言, 回水区是浮游植物丰度最集中的区域, 4 类断面浮游植物丰度表现为回水类>河口类>来水类>干流类。

2.2.3 水华种类及其分布

采样期间, 干流未见水华, 15 条支流不同区段

水色改变, 感官异常, 出现程度不等的水华(见表 1)。其中回水区发生水华的有 13 条支流, 占所调查支流总数的 59%; 河口区发生水华的支流占 32%; 龙溪河、芑溪河和叱溪河的回水发生水华, 占 14%。

水华类型上, 回水主要为拟多甲藻、隐藻和绿藻水华。河口主要为隐藻和绿藻水华, 个别为硅藻水华(黎香溪)。来水水华有伪鱼腥藻水华(龙溪河)和拟多甲藻水华(叱溪河)。水华空间分布上, 拟多甲藻水华主要集中在库区下游支流。在临近库首的 8 条支流中, 除神农溪外, 其他 7 条支流均发生拟多甲藻水华; 距库首较远的库区中、上游支流的水华类型则较多样, 出现隐藻、衣藻、小球藻、小环藻等水华。

2.3 浮游植物和环境因子的关系

2.3.1 浮游植物与环境因子的排序分析

为弄清浮游植物与环境因子的关系, 对浮游植物丰度和环境因子进行排序分析。排序前先以环境和藻类数据进行除趋势对应分析 (Detrend Correspondence Analysis, DCA)(表 5), 确定是采用典范对应分析 (Canonical Correspondence Analysis, CCA) 还是冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA)。排序时对藻类丰度数据进行 $\text{Lg}(X+1)$ 处理。排序分析结果如图 3~6。

表 4 排序分析中优势属及其代码

Table 4 Dominant Phytoplankton and Their Codes in Ordination Analysis

编号	<i>Cya1</i>	<i>Cya2</i>	<i>Chl1</i>	<i>Chl2</i>	<i>Chl3</i>	<i>Chl4</i>	<i>Cry1</i>	<i>D1</i>	<i>E1</i>
优势属	伪鱼腥藻	小尖头藻	衣藻	小球藻	栅藻	单针藻	隐藻	拟多甲藻	裸藻
编号	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B5</i>	<i>B6</i>	<i>B7</i>	<i>B8</i>	
优势属	针杆藻	小环藻	舟形藻	直链藻	脆杆藻	星杆藻	异极藻	卵形藻	

表 5 浮游植物丰度与环境因子在两轴上的相关性

Table 5 Correlation between Phytoplankton Abundance and Environmental Variables on Axis 1 and Axis 2

断面	来水		回水		河口		干流	
物种-环境因子	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2
相关系数	0.953	0.762	0.915	0.818	0.935	0.902	1.000	1.000

由表 5 可知, 除来水轴 2 以外, 浮游植物丰度与环境因子在前两轴上的相关系数较高。从图 3~6 可知, 在物种与环境因子相关性贡献率上, 各断面第一排序轴均高于第二排序轴, 两轴累积贡献率除来水类断面略低, 其余断面均较高。

总体上, 在 4 类水体断面中, 影响浮游植物丰

度分布的环境因子明显不同, 具体表现为以下 3 方面: ①主要环境因子数量上的差异。对于来水和干流, 主要环境因子数目较多, 从排序图上可分别提取 6 个、8 个主要影响因子。河口的主要环境因子也较多, 但少于来水和干流。但回水的主要环境因子数明显少于来水和干流, 仅能提取 3 个主因子。②

各区域影响浮游植物丰度分布的主要环境因子明显不同。其中,溶解氧(DO)和水温(Tem)在 4 类断面中均与浮游植物分布关系密切,此外,浊度(Tur)在回水、河口和干流均为主要的环境因子。其余环境因子在不同区域分化较大。在水华集中的回水区,最重要的环境因子为 DO、Tem 和 Tur。③4 类断面中营养盐因素对浮游植物丰度分布影响不大。尽管来水 TN、河口 TP 和干流 TP 等在排序图中具有较长的箭头,但仍短于其他非营养盐因子的箭头,这表明其对浮游植物分布的影响弱于非营养盐因子。综

上,在 4 类断面中,影响浮游植物丰度分布的主要环境因子存在明显差异。其中,回水区影响浮游植物丰度分布的主要环境因子数目明显少于其他区域;相对于其他环境因子而言,TN、TP 在排序轴中的作用并不明显,这也进一步表明在三峡水库水体中,TN 和 TP 充足,成为浮游植物生长特别是水华发生的限制性因子的可能性不大。对于水华集中的回水区而言,与 TN、TP 相比,温度和溶解氧等非营养因素更有可能是引起水华发生的主要原因。

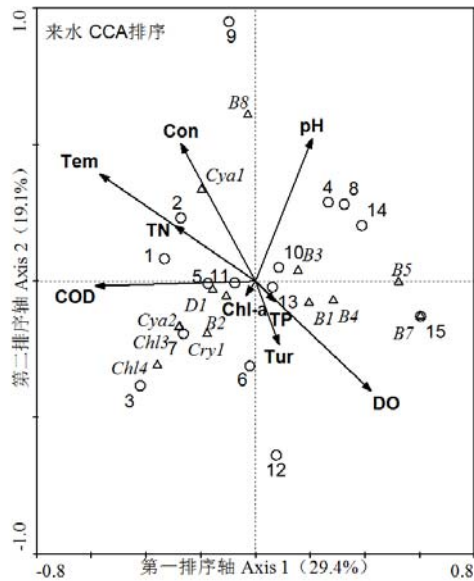


图 3 来水浮游植物和环境因子 CCA 排序
Fig. 3 CCA Ordination Plot of Phytoplankton and Environmental Variables in Incoming Flow

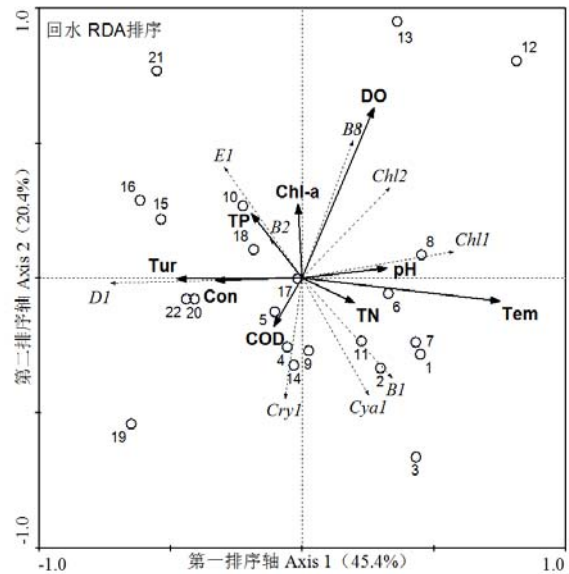


图 4 回水浮游植物和环境因子 RDA 排序
Fig. 4 RDA Ordination Plot of Phytoplankton and Environmental Variables in Backwater

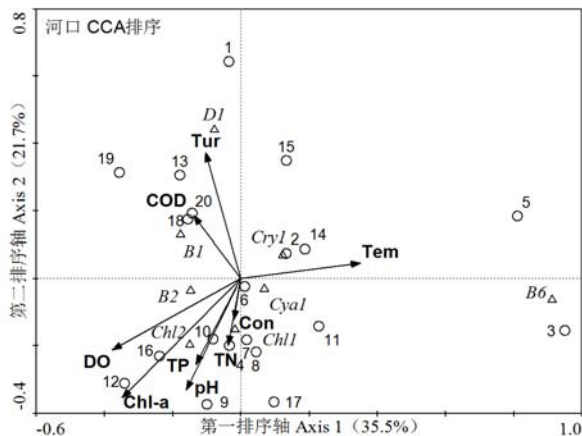


图 5 河口浮游植物和环境因子 CCA 排序
Fig. 5 CCA Ordination Plot of Phytoplankton and Environmental Variables in Estuary

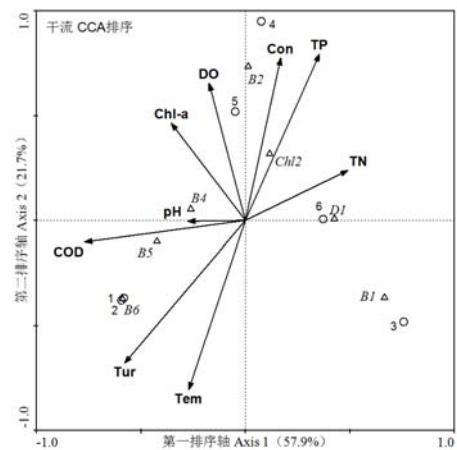


图 6 干流浮游植物和环境因子 CCA 排序
Fig. 6 CCA Ordination Plot of Phytoplankton and Environmental Variables in Mainstream

注: 数字为样点代号, 其顺序与表 1 中样点顺序相同。

3 讨论

该研究中, 来水、回水、河口和干流 4 类断面之间 TP 并无显著差异, 但不同支流之间差异较大,

个别支流 TP 含量超高,如芑溪河和香溪河,其平均 TP 分别达到了 0.658 mg/L 和 0.572mg/L,远高于大多数支流的 0.1~0.2 mg/L 水平。芑溪河接纳了大量生活污水,香溪河则受其流域内分布的众多磷矿的影响,如此高浓度的 TP 含量直接导致两条支流在回水断面均具有极高的富营养化水平。此外,三峡水库蓄水后,大量溶解态无机 N 和溶解态无机 P 被固定在浮游生物中^[19],回水-河口区域远高于来水和干流的浮游植物生物量也是导致不同类型断面间 TN、TP 含量差异的重要原因。三峡水库入库营养盐丰水期最高,调查期间为枯水期,入库营养盐处于最低水平^[20-22],支流由于浮游植物大量生长,悬浮颗粒较多,故形成了表层水体中营养盐支流高,干流低的分布格局。从氮磷比来看,支流三类断面氮磷比均远高于 16,相关分析表明,来水、回水和河口三类断面 $\rho(\text{Chla})$ 与 N/P 呈负相关(相关系数分别为 -0.424、-0.488 和 -0.126)但仅回水类断面达到显著水平($P=0.021$),干流类断面 $\rho(\text{Chla})$ 与 N/P 呈正相关(相关系数为 0.351)但相关性不显著($P=0.495$)。这表明在 N/P 远高于 16 的支流, N/P 是限制浮游植物生长的因子之一,同类研究^[20]也有相似的结论。尽管 P 被普遍看作是三峡库区水华发生的主要营养盐因子,但上述 4 类断面浮游植物生物量变化并不与 P 含量或 N/P 完全一致,这表明还有其他因子在调控浮游植物生长中起作用,例如有研究表明在水华的发展过程中,硅(Si)可能是比 P 和 N 更加重要的营养因子^[23],物理因素如水位调度和不同水流混合等也具有重要的调节作用^[24,25]。

三峡水库是一个复杂的系统,其营养水平和影响水华发生的关键因子具有较大的时空差异,受到物理、化学和生物综合因素的调控^[26]。即使在同一支流中,不同区段的浮游植物群落随季节变化也呈现不同的特征^[27]。此外,由于不同支流的物理、化学特征不同,浮游植物群落组成和存量往往与支流所在位置相关,物理类的影响因子往往在流量较小和短时间研究中作用明显^[28,29]。三峡水库支流众多,尽管蓄水从一定程度上削弱了支流之间的差异,但不同支流营养和水文特征仍各有特点,从图 3~6 可见,在环境因子和采样点分布上,4 类断面呈现不同的分布模式;在同一类断面中,不同支流分布也未见较为统一的规律。如尽管干流的混合程度较高,

除朝天门和寸滩(样点 1、2)断面以外,下游各断面之间仍然存在较大的差异(图 6)。支流的这种分化更加明显(图 3~5),这表明在不同支流之间或不同断面之间污染状况差异较大。这主要是由于不同支流之间地形地貌差异、工农业生产和污染背景值差异引起的。在缓慢的水流条件下,污染物交换受阻,从而形成这种非均一的分布。从营养盐含量的角度,三峡水库已具备发生水华的条件。但从局部来看,不同类型断面之间水底地形、水深、光照等^[26]物理条件造成的局部生境差异,水位调度^[30]、降水、风浪、船舶活动等因素使水华发生的时间、地点和规模等具有不确定性。因此,在未来的研究中,针对不同区域的主要污染物种类和水文、水动力条件采取更具有针对性的水华预测、防控措施十分必要。

水库蓄水导致支流回水流速降低至极低水平,成为典型的湖泊型水体。从图 3~6 可以看出,在水华发生频率高的回水-河口区,影响浮游植物丰度分布的主要环境因子数目较少,而在水华发生频率较低的来水和干流,主要环境因子数目较多。即容易发生水华的回水-河口区域,其浮游植物生物量只由极少数环境因子控制。以回水区为例,如果把浊度变化(Tur)当作发生水华后的结果,则该区域的最主要环境因子为温度(Tem)和溶解氧(DO)。在这种情况下,从控制浮游植物丰度的角度看,这一系统是不稳定的,只要上述环境因子发生改变,浮游植物丰度就会发生较大的变化,而对于其他区域,主要环境因子数目较多,各因子间相互影响,整体系统较为稳定。尽管这一推论还有待进一步验证,但这也为我们认识该区域水华发生的机理提供了新的视角。

4 结论

a) 三峡水库春季 TN、TP 含量较高,来水、回水、河口和干流 4 类断面的 $\rho(\text{TN})$ 分别达到 1.69 ± 0.78 、 1.84 ± 1.20 、 2.01 ± 1.01 和 1.51 ± 0.42 mg/L, $\rho(\text{TP})$ 分别达到 0.115 ± 0.185 、 0.191 ± 0.272 、 0.179 ± 0.112 和 0.181 ± 0.038 mg/L,4 类断面间无显著差异; NO_3^- -N 和 PO_4^{3-} -P 分别是 TN、TP 的主要形态, $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})/\rho(\text{TN})$ 为 69.2%~76.8%, $\rho(\text{PO}_4^{3-} \text{-P})/\rho(\text{TP})$ 为 47.3%~65.0%;从支流来水到干流,氮磷比逐渐降低;三峡水库各类断面以中营养为主,但回水、

河口类断面富营养断面比例较高。

b) 三峡水库春季浮游植物种类丰富, 共检出 8 门 98 属, 其中, 绿藻、硅藻、蓝藻是最主要的类型, 分别检出 42、26 和 17 属。种类组成上, 来水、干流为硅藻-绿藻型, 回水、河口为绿藻-硅藻型。浮游植物丰度空间差异显著, 回水-河口区域丰度最高, 该区域也是水华集中的区域, 而来水少见水华, 干流未见水华。甲藻水华是最主要的水华类型, 集中在库区下游支流, 中、上游支流以隐藻、绿藻、硅藻水华为主。

c) 不同类型断面影响浮游植物丰度分布的主要环境因子差异较大。回水-河口区主要环境因子数明显少于其他断面, 其浮游植物丰度主要受水温、溶解氧和浊度等非营养盐因子影响。

致谢

感谢长江水利委员会长江流域水环境监测中心陈水松、梁辉朝、黄壮建等人在采样及营养盐分析工作中的支持与帮助。

参考文献

- [1] STONE Richard. The legacy of the Three Gorges Dam[J]. *Science*, 2011, 333(12): 817.
- [2] ZHAO Pei, TANG Xiang-yu, TANG Jia-liang, *et al.* Assessing water quality of Three Gorges Reservoir, China, Over a Five-Year Period from 2006 to 2011[J]. *Water Resources Management*, 2013, 27: 4545-4558.
- [3] 蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 169-177.
CAI Qing-hua, SUN Zhi-yu. Water environmental and aquatic ecosystem of Three Gorges Reservoir, China: progress and prospects[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(2): 169-177.
- [4] LI Kai-feng, ZHU Cheng, WU Li, *et al.* Problems caused by the Three Gorges Dam construction in the Yangtze River basin: a review[J]. *Environmental Reviews*, 2013, 21: 127-135.
- [5] 孟春红, 赵冰. 三峡水库蓄水后的富营养化趋势分析[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3): 863-867.
MENG Chun-hong, ZHAO Bing. Study on the trend of eutrophication after impounding in Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 863-867.
- [6] 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): 254-258.
ZHANG Yuan, ZHENG Bing-hui, LIU Hong-liang. Characteristics of phytoplankton composition with analysis of its impact factors after impounding of the Three Gorges Reservoir[J]. *Resources and Environment in Yangtze Basin*, 2006, 15(2): 254-258.
- [7] 丁玲, 逢勇, 李凌 等. 水动力条件下藻类动态模拟[J]. *生态学报*, 2005, 25(8): 1863-1868.
DING Ling, PANG Yong, LI Ling, *et al.* Simulation study on algal dynamics under different hydrodynamic condition[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1863-1868.
- [8] 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 Tao, FU Chang-ying, AO Hong-yi, *et al.* The comparison of phosphorus and nitrogen pollution status of the Xiangxi Bay before and after impounding of the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Hydrobiology Sinica*, 2006, 30(1): 26-30.
- [9] 胡征宇, 蔡庆华. 三峡水库蓄水前后水生生态系统动态的初步研究[J]. *水生生物学报*, 2006, 30(1): 1-6.
HU Zheng-yu, CAI Qing-hua. Preliminary report on aquatic ecosystem dynamics of the Three Gorges Reservoir before and after impoundment[J]. *Acta Hydrobiology Sinica*, 2006, 30(1): 1-6.
- [10] 罗跃初, 周忠轩, 孙轶 等. 流域生态系统健康评价方法[J]. *生态学报*, 2003, 23(8): 1606-1614.
LUO Yue-chu, ZHOU Zhong-xian, SUN Yi, *et al.* Assessment methods of watershed ecosystem health[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1606-1614.
- [11] 董哲仁. 河流形态多样性与生物群落多样性[J]. *水利学报*, 2003, (11): 1-7.
DONG Zhe-ren. Diversity of river morphology and diversity of bio-communities[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003 (11): 1-7.
- [12] 张晟, 宋丹, 张可 等. 三峡水库典型支流上游区和回水区营养状态分析[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(2): 201-207.
ZHANG Sheng, SONG Dan, ZHANG Ke, *et al.* Trophic status analysis of the upper stream and backwater area in typical tributaries, Three Gorges Reservoir. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(2): 201-207.
- [13] 国家环境保护总局—水和废水监测分析方法编委会. *水和废水监测分析方法(第四版)*[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Ministry of Environmental and Protection of China, Editorial Board of Water and Wastewater Monitor and

- Analysis Methods. Water and Wastewater Monitoring and Analyzing Methods (4th edition)[M]. China Environmental Science Press, Beijing, 2002.
- [14] HAMILTON P B, PROULX M, EARLE C. Enumerating phytoplankton with an upright compound microscope using a modified settling chamber[J]. *Hydrobiologia*, 2001, (444): 171-175.
- [15] 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.
- HU Hong-jun, WEI Yin-xin. The Freshwater Algae of China-Systematics, Taxonomy and Ecology[M]. Science Press, Beijing, 2006.
- [16] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. *中国环境监测*, 2002, 18(5): 47-49.
- WANG Ming-cui, LIU Xue-qin, ZHANG Jian-hui. Evaluation methods and classification standard in lake eutrophication[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2002, 18(5): 47-49.
- [17] LI Ye-guang, LI Zhong-kui, GENG Ya-hong, *et al.* Effect of N, P concentration on growth rate[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 317-325.
- [18] TETT P, HEANEY S I, DROOP M R. The Redfield ratio and phytoplankton growth rate[J]. *J. mar. biol. Ass. U.K.*, 1985, (65): 487-504.
- [19] 张仁恩, 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 Ren-en, ZHANG Jing. 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.
- [20] 张晟, 郑坚, 刘婷婷 等. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出[J]. *环境科学*, 2009, 30(1): 58-63.
- ZHANG Sheng, LIU Ting-ting, ZENG Fan-hai, *et al.* Seasonal variation and output of nutrient in tributaries of Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Sciences*, 2009, 30(1): 58-63.
- [21] 曹承进, 秦延文, 郑炳辉 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.
- CAO Cheng-jin, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, *et al.* Analysis of phosphorus distribution characters and their sources of the major input rivers of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(2): 310-315.
- [22] 张晟, 刘景红, 张全宁 等. 三峡水库成库初期氮、磷分布特征[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 123-126.
- ZHANG Sheng, LIU Jing-hong, ZHANG Quan-ning, *et al.* Distribution features of Nitrogen and phosphorus in incipient Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4): 123-126.
- [23] YE L, HAN X Q, XU Y Y, *et al.* Spatial analysis for spring bloom and nutrient limitation in Xiangxi bay of Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 127: 135-145.
- [24] LIAN Ji-jian, YAO Ye, MA Chao, *et al.* Reservoir operation rules for controlling algal blooms in a tributary to the impoundment of Three Gorges Dam[J]. *Water*, 2014, (6): 3200-3223.
- [25] HOLBACH Andreas, WANG Li-jing, CHEN Hao, *et al.* Water mass interaction in the confluence zone of the Danning River and the Yangtze River-a driving force for algal growth in the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2013, (20): 7027-7037.
- [26] TAN Lu, CAI Qing-hua, ZHANG Hong-ye, *et al.* Trophic status of tributary bay aggregate and their relationships with basin characteristics in a large, subtropical dendritic reservoir, China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2014, 23(3): 650-659.
- [27] ZHU Kong-xian, BI Yong-hong, HU Zheng-yu. Response of phytoplankton functional groups to the hydrologic regime in the Daning River, a tributary of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 450: 169-177.
- [28] HAMILTON P B, LAVOIE I, POULIN M. Spatial, seasonal and inter-annual variability in environmental characteristics and phytoplankton standing stock of the temperate, lowland Rideau River, Ontario, Canada[J]. *River Research and Applications*, 2012, 28: 1551-1566.
- [29] HAMILTON P B, LAVOIE Isabelle, LEY Linda M., *et al.* Factors contributing to the spatial and temporal variability of phytoplankton communities in the Rideau River (Ontario, Canada) [J]. *River Systems*, 2011, 19(3): 189-205.
- [30] ZHENG Tie-gang, MAO Jin-gqiao, DAI Hui-chao, *et al.* Impacts of water release operations on algal blooms in a tributary bay of Three Gorges Reservoir[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54: 1588-1598.

(责任编辑: 周巧富)