

三峡水库成库初期营养盐与浮游植物分布特征

张晟^{1,2}, 刘景红², 黎莉莉², 李松¹, 徐静¹, 高吉喜³

(1. 重庆市环境科学研究院, 重庆 400020; 2. 西南农业大学资源与环境学院, 重庆 400716; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 根据 2003-09-08~2003-09-15 航行 11 个点位测试数据, 分析了三峡水库成库后营养元素及浮游生物量的分布特征, 初步探讨了营养盐分布与 Chla 的关系. 结果表明, 调查区域营养盐浓度较高, 其中 TN 各测点均超过国家地表水环境质量标准 III 类水标准, 含量范围为 $1.01 \sim 1.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. TP 含量范围为 $0.028 \sim 0.054 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; K 含量范围为 $2.80 \sim 3.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TOC 含量范围为 $1.92 \sim 2.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Chla 含量范围为 $1.58 \sim 7.35 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均浓度为 $4.69 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 利用相关分析方法, 分析了 Chla 与营养盐之间的关系, 表明 Chla 与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 成显著正相关 ($r = 0.7287$); 与浊度成显著负相关 ($r = -0.9207$). 利用系统聚类方法分析三峡水库水体指标, 随长江流向明显分为 3 类, 即上游区(长寿、涪陵、丰都、忠县)、中游区(万州、云阳、奉节)和下游区(巫山). 硅藻在 4 个测点均为优势种群, 占总量的 86%, 平均为 129 844 个/L, 浮游植物量沿水流方向有增高趋势.

关键词: 三峡水库; 营养盐; 浮游植物

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)06-1056-06

Distribution Features of Nutrient and Phytoplankton in Incipient Three Gorges Reservoir

ZHANG Sheng^{1,2}, LIU Jing-hong², LI Lili², LI Song¹, XU Jing¹, GAO Jixi³

(1. Chongqing Academe of Environmental Science, Chongqing 400020, China; 2. College of Resources and Environment, Southwest Agriculture University, Chongqing 400716, China; 3. Chinese Research Academy of Environment Science, Beijing 100012, China)

Abstract: The distribution features of nutrient and chlorophyll a were determined by cruise during 2003-09-08~2003-09-15 with 11 sites in the Three Gorges reservoir. The results showed that the concentration of nitrogen was exceed the national surface water body quality standard III. The concentration of nitrogen range $1.01 \sim 1.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Total phosphorus range $0.028 \sim 0.054 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Kalium range $2.80 \sim 3.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Total organic carbon range $1.92 \sim 2.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Chlorophyll a range $1.58 \sim 7.53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. The average concentration of chlorophyll a was $4.69 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ at surface layer. The correlation of nutrient and chlorophyll a were researched. It indicated there was a significant positive correlation ($r = 0.7287$) between chlorophyll a and $\text{NO}_3^- \text{-N}$. There was a significant negative correlation ($r = -0.9207$) between chlorophyll a and turbidity. Using the method of system cluster, it showed there was distinct distribution features which can be divided into three clusters. The upper river areas cluster included Changshou, Fuling, Fengdu, Zhongxian; The middle river areas cluster included Wanzhou, Yunyang and Fengjie; The down river areas included Wushan. The rate of diatom in phytoplankton was about 86%. Diatom was absolute predominance on 4 monitoring sites. The average of diatom was $129844 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. Amount of phytoplankton was increased along the river flow direction.

Key words: Three Gorges Reservoir; nutrient; phytoplankton

三峡水库 2003-06-01 正式蓄水成库, 坝前水位保持在 135m 或 139m. 建库后, 过水面积增大, 在流量不变的情况下, 流速从库尾至坝前逐渐减缓. 到 2009 年, 当蓄水达到 175m 时, 流速将由 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $0.25 \sim 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 水流对污染物的输移扩散能力下降, 在同样的排污方式和相同的排污负荷下污染混合区必将加大^[1]. 成库后, 由于水文条件改变, 水流速度减缓, 泥沙沉积, 透明度增高, 冬季水温较成库前有所升高, 雾日减少, 水面日照时间增加^[2], 即使在冬季水库高水位运行时也有利于水生植物特别是藻类的光合作用, 导致藻类的生长繁殖, 水体中叶绿素含量有可能增高. 因此, 分析 135m 蓄水时三峡水库营养元素和生物量的分布特征, 对深入研究三

峡水库水体营养化现状及不同蓄水阶段演变趋势有重要的现实与理论意义. 本文选择了目前三峡水库的上游区、中游区和下游区作为研究对象, 利用航行采样方式进行营养盐(N、P、C、K 等营养盐)和生物量(Chla、浮游植物个体数量)的采样分析, 初步探讨了 135m 成库营养盐、生物量的分布规律以及各项指标的关系.

收稿日期: 2005-06-28; 修订日期: 2005-08-25

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(2004BB7075, 2005BB7239); 中-意合作项目(三峡库区生态环境调查及评价)

作者简介: 张晟(1971~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: shengzsts@126.com

1 材料与方法

1.1 样品采集

2003-09-08~ 2003-09-15, 从重庆至巫山对三峡水库进行往返航行测试各 1 次. 样品采集地点为长寿、涪陵、丰都、忠县、万州、奉节和巫山, 共设置采集

点位 11 个, 样品采集具体地点见图 1 与表 1. 营养盐采集为各断面中泓线水面下 0.5m 处, 样品采集后根据所测元素的不同分别保存. Chla 采样量为 1L, 加入碳酸镁悬浊液 10mL 在冰盒中保存. 浮游植物定量采样在 1、2、5、11 号采样点进行, 采集水样 1 000mL, 经 25 号浮游生物网过滤后装入标本瓶

表 1 采样点位置及水质参数

Table 1 Sampling location and water parameter

采样点	位置		平均流速 / m·s ⁻¹	表层水温 / °C	DO / mg·L ⁻¹	pH	电导 / μS·cm ⁻¹	浊度 / NTU
1	107°6′5.7″E;	29°45′5.9″N	2.29	22.3	8.36	8.22	215	458
2	107°2′46.7″E;	29°43′24.5″N	2.56	21.1	9.05	8.31	261	449
3	107°4′3′21.1″E;	29°52′50.6″N	2.33	21.5	8.56	8.28	222	451
4	108°8′7.8″E;	30°18′7.8″N	1.76	21.9	8.44	8.35	229	446
5	108°23′28.7″E;	30°44′17″N	1.18	21.9	8.09	8.21	276	397
6	108°26′38.7″E;	30°50′6.3″N	1.24	22.0	7.93	8.17	280	375
7	108°3′8′42.1″E;	30°53′29.9″N	1.21	21.9	7.95	8.16	271	369
8	108°5′1′23.5″E;	30°57′15.6″N	1.11	22.0	8.44	8.15	275	362
9	109°34′9.0″E;	31°2′30.6″N	1.19	22.3	8.77	8.20	272	350
10	109°5′47.8″E;	31°5′47.6″N	1.43	22.8	8.73	8.22	269	265
11	110°55′2.9″E;	31°1′42.5″N	1.47	22.6	8.32	8.10	265	285

中, 用鲁哥氏液固定^[3].

1.2 实验及分析方法

用于营养盐项目分析的水样均过孔径为 0.45μm 的 GF/F 滤膜后测试. 所有营养盐均为可溶性营养盐. TOC 采用燃烧氧化-非分散红外吸收法, 使用美国 TOC-1010 测试; TP 采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法; NO₃⁻-N 采用酚二磺酸光度法; NO₂⁻-N 采用 N-乙二胺光度法; NH₃-N 采用纳氏试剂光度法; TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; K⁺ 采用离子色谱法; 现场测定溶解氧、pH、电导, 采用便携式分析仪测定; 流速、流量采用多普勒测流仪测定; 浊度采用便携式浊度计法. 浮游植物定量样品在室内静置 48h, 静置后用虹吸管缓慢在水面以下吸去多余水样, 浓缩至 30mL, 充分摇匀后, 用定量吸管取 0.1mL 注入计数框内在显微镜下计数. 每个样品数 3 片, 取其平均值, 按 1L 水浓缩的标本量 (mL) / 计算的标本水量 (mL) × 计数得的生物数量进行计算^[4].

Chla 测试方法为: 水样经 0.45μm 的滤纸 (GF/C 玻璃纤维滤纸) 过滤, 将带样品的滤纸煎碎后在钵中加入适量 90% 丙酮研磨至足够细, 移入具塞刻度离心管中于暗处静置萃取 24h 后, 离心得清液定容, 752 型分光光度计测波长 664nm 和 750nm 处光密度值, 然后加入 1 滴 0.1mol/L 的盐酸酸化, 再

测波长 665nm 和 750nm 处光密度值. 计算公式为:

$$c = 27.3 \times (E_b - E_a) \times V_e / V \quad (1)$$

式中, *c* 为水样中 Chla 含量 (mg·m⁻³ 或 μg·L⁻¹); *E_b* 为提取液酸化前波长 664nm 和 750nm 处的光密度之差; *E_a* 为提取液酸化后波长 665nm 和 750nm 处的光密度之差; *V_e* 为提取液的总体积 (mL); *V* 为抽滤的水样体积 (L)^[5]. 所有样品在 24h 内分析. 采用平行双样分析, 偏差均小于 10%.

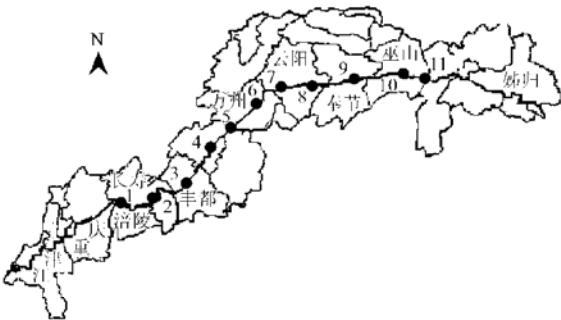


图 1 采样点位置

Fig. 1 Sampling location in the Three Gorges Reservoir

1.3 数据处理及统计方法

营养盐及 chla 数据为往返航行测试 2 次各测点的平均值. 营养元素的平均值、变异系数的计算, 营养元素、浊度与 Chla 之间的相关性分析, 以及系统聚类分析均在 SPSS 软件上进行.

2 结果与讨论

2.1 基本理化参数变化

三峡水库 135m 蓄水时, 形成库容约为 $140 \times 10^8 \text{m}^3$ 的巨大水库, 占未来三峡水库总库容的 36%. 水库全长约 430km(大坝-忠县陶家石盘), 回水变动区(忠县陶家石盘-涪陵-丰都段)约 105km. 各站点基本水文水质参数见表 1, 由于本次调查是处于丰水期期间, 普遍流速较快, 处于水库区的忠县-巫山平均流速范围在 $1.11 \sim 1.76 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 水库上游区以及回水变动区(长寿-丰都)水流速度范围为 $2.29 \sim 2.56 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. 分析三峡水库水体浊度特征, 与成库后水文变化有明显相关, 近大坝端浊度小, 而远坝端浊度大, 表明在靠近大坝区域水体由于流速变缓, 泥沙沉积, 水体透明度比远坝端明显增高. 处于上游区以及回水变动区(1, 2, 3, 4 采样点)的水体浊度 $> 400 \text{NTU}$, 水库区(5, 6, 7, 8, 9 采样点)浊度在 $300 \sim 400 \text{NTU}$ 之间, 而水库近坝端(10, 11 采样点)浊度小于 300NTU . pH 值变动范围 $8.10 \sim 8.31$ 之间, 属中性偏弱碱性水体. 水体表层水温范围为 $21.1 \sim 22.6^\circ\text{C}$, 水体表层水温平均为 22.0°C . 溶解氧变动范围为 $8.09 \sim 9.05 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $8.42 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各测点溶解氧饱和度均大于 90%, 表明成库初期虽然流速有所变缓, 但水体与大气中氧交换能力依然较强. 溶解氧、pH、电导、表层水温等在水平方向上无明显规律变化.

2.2 营养盐与浮游植物分布

2.2.1 营养盐分布

在营养元素中, 分析了 3 种形态氮的可溶性无机氮, 无机氮($\text{DIN} = \text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NH}_3 - \text{N} + \text{NO}_2^- - \text{N}$)含量范围为 $0.93 \sim 1.41 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $1.12 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在三峡水库水体中无机氮以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主, 其水体含量平均为 $0.96 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占无机氮总量的 85%; $\text{NH}_3 - \text{N}$ 次之, 平均含量为 $0.14 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占无机氮的 13%; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量最低, 平均为 $0.02 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在无机氮中所占比例低于 2%. 与 80 年代中期夏季不同形态氮占无机氮的比例比较变化不大^[6]. 从不同形态氮所占比例分析, 三峡水库在成库初期由于流速较快, 水体复氧能力依然较强, 使 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 向 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 方向转化, 硝化反应较活跃, 水体对污染物的自净能力较强^[7]. 钾含量范围为 $2.80 \sim 4.36 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TOC 含量范围为 $1.92 \sim 2.59 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 由于光合成等内部生产速度较低,

TOC 有机物浓度指标普遍偏低; 可溶性总磷范围为 $0.028 \sim 0.054 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均超过湖泊富营养化发生的浓度值^[8] ($0.020 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 可溶性总氮范围为 $1.01 \sim 1.35 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 11 个测点浓度均超过国家地表水环境质量标准(GB3838-2002) II 类水质标准和湖泊富营养化发生的浓度值 ($0.20 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[8]. 各形态氮与总磷浓度与成库前报道有所降低^[9, 10], 但这种降低一方面可能是采集样品的时间不同, 另外已成库部分水体营养盐降低可能还与泥沙等悬浮物对营养盐的吸附和沉积有关. 部分营养盐浓度水平分布见图 2, DTP、DTN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、K、TOC 变异系数分别为 18.3%、8.4%、13.9%、27.2%、13.2% 和 9.3%, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 沿程变化最大, DTN 变化最小.

从营养盐浓度水平分析, 三峡水库水体中营养盐浓度已经达到产生富营养化的条件. 一般认为 N/P 大于 16:1 时, 水体受磷限制, 藻类增殖的最佳 N/P 范围为 12:1~13:1^[11, 12]. 从 N/P 关系分析水体营养盐限制, DIN:DTP 范围为 19~42 之间, 表明三峡库区水体藻类生长主要受磷限制. 从 N/P 范围分析, 这可能也是水体未出现富营养化的原因. 与长江口及其临近海域中 P 可能是浮游生物的主要限制因子的结论较一致^[13, 14]. 三峡水库蓄水发育出的水库生态系统可将上游输入的 2%~7% 的溶解无机 N 和 13%~42% 的溶解无机 P 转化为有机颗粒态营养盐, 同时库区生态系统光合固碳能力的增强将加大水库向下游输出的 N/P 比, 三峡水库对营养盐的截流将使长江流域 N、P 输出通量减少 10% 左右, 将加剧目前长江中、下游 N/P 增高的趋势^[15].

2.2.2 Chla 浓度及分布

三峡水库成库后, Chla 含量水平总体较低, 其范围为 $1.37 \sim 7.35 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, Chla 分布有明显规律见图 3, 即处于上游区和回水变动区(长寿-忠县)水体中 Chla 含量显著低于成库(万州-巫山)水体含量. 成库水体 Chla 含量也有差异, 其浓度分布规律为沿三峡大坝方向上(万州-云阳-巫山)浓度逐渐增高, 最高达到 $7.35 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 近坝端 Chla 值比上游区域增加约 4 倍. 对比成库前研究结果, 上游区和回水变动区 Chla 含量基本无变化, 而处于库区水体增加约 4 倍^[2]. 与通常湖泊 Chla 的分布有显著区别, 一般湖泊主要受岸边污染影响, Chla 以及营养盐浓度梯度分布为岸边浅水区高于湖心深水区^[16]. 根据 OECD 湖泊评价标准, 成库区域水体 Chla 含量水平均达到中营养程度(5~11 采样点). 上游区及回水变动区为贫营养水平(1~4 采样点). Chla 的水平分

布可能是由于三峡水库流速的改变, 导致水库区域水体流速减缓, 泥沙沉积致使水体透明度增加, 有利于浮游植物的生长^[17]. 在成库初期, 由于水力、水环境条件处于变动时期, 水体中浮游生物对环境化学条件(营养盐等浓度)的适应需要一定时间过程, 而

水力条件变化是直接影响其分布的主导因素. 另外, 值得注意的是, 随着三峡水库的蓄水, 受蓄水影响的大部分次级河流回水区在 2003-09 均发生了严重的“水华”现象, 成库区域干流 Chla 的显著增高也可能和次级河流大量浮游藻类排入有关.

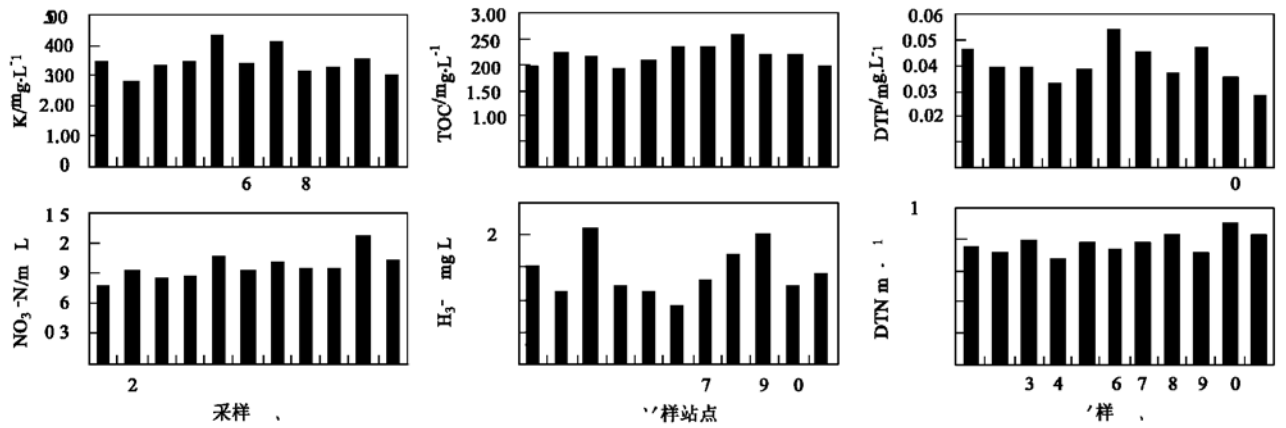


图 2 主要营养盐含量沿江变化
Fig. 2 Concentration of nutrient along the Three Gorges Reservoir

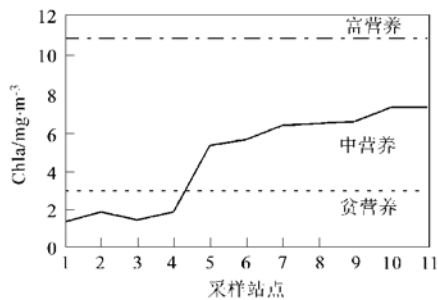


图 3 三峡水库 Chla 沿程分布
Fig. 3 Changing of chl a concentration along the flow direction

将 11 个测点 Chla、营养盐及浊度作相关分析, 结果见表 2, 营养盐之间无显著相关关系; Chla 与营

养盐相关关系中, 与 TN、NO₃-N、K 及 TOC 成正相关, 与 TP、NO₂-N、NH₃-N 为负相关. 其中与 NO₃-N ($p < 0.005$) 呈显著正相关, 相关系数达到 0.728 7; 与浊度 ($p < 0.001$) 呈显著负相关, 相关系数达到 0.920 7. 通常湖泊中 Chla 与 TP 具有较强的相关性^[18~21], 但关于河流水体中 Chla 与 TP 关系报道很少, 可能与河流水体流态变化快, 营养盐与浮游藻类分布受其影响较湖泊复杂有关. 另外, 也与深水水体中 Chla 浓度变化缓慢, 变成非磷浓度依赖性有关^[22]. 从相关关系分析, 三峡水库 Chla 含量变化在成库初期, 与水文、水力条件(浊度等)的变化趋势较一致.

表 2 Chla、营养盐及浊度相关性

	可溶性总磷	总氮	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₃ -N	K ⁺	TOC	Chla	浊度
DTP	1								
TN	-0.380 4	1							
NO ₂ -N	-0.049 3	-0.307 5	1						
NO ₃ -N	-0.339 5	0.693 9	-0.078 7	1					
NH ₃ -N	-0.035 9	0.056 5	-0.267 5	-0.309 8	1				
K ⁺	0.207 5	0.083 0	-0.470 5	0.282 3	-0.250 6	1			
TOC	0.345 9	0.224 6	0.104 8	0.140 2	0.084 7	-0.076 4	1		
Chla	-0.063 4	0.564 8	-0.379 4	0.728 7	-0.097 3	0.199 6	0.382 0	1	
浊度	0.259 2	-0.705 6	0.332 4	-0.810 4	0.084 3	-0.020 3	-0.177 6	-0.920 7	1

将 11 个测点 Chla、营养盐及浊度作系统聚类分析, 聚类结果见图 4. 三峡水库在成库初期可明显分

为 3 个不同类型, 即水库上游区(长寿、涪陵、丰都、忠县)、中游区(万州、云阳、奉节)和下游区(巫山).

表明成库初期三峡水体营养盐、Chla 及浊度的分布呈较强地域性分布与水力条件的改变有较大关系。

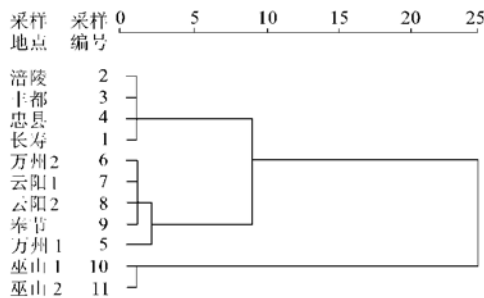


图 4 聚类结果

Fig. 4 Results of cluster

2.3 浮游植物分布

对 4 个站点样品的分析结果表明: 每个断面硅藻门藻类个体的平均数量为 $129\,844 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 占绝对优势, 其数量占浮游植物总量的 86%; 绿藻门个体数量为 $11\,179 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 占总量的 7.4%; 蓝藻门个体数量为 $8\,152 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 占总量的 5.4%; 其他各门藻类植物的种群密度与上述各门藻类植物相比相对较小(各个断面的种群数量见表 3), 隐藻门与裸藻门个体数量为 $1\,229 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $500 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$. 浮游植物数量沿三峡水库流速方向有较明显增高, 但其增高幅度低于 Chla, 这与不同采样断面浮游生物种类不同有关。

表 3 三峡水库浮游植物数量分布/个 $\cdot \text{L}^{-1}$

Table 3 Distribution of phytoplankton in the Three Gorges Reservoir/ cells $\cdot \text{L}^{-1}$

门类	采样点编号			
	1	2	5	11
蓝藻门	6 930	8 037	8 273	9 368
隐藻门	174	582	108	365
硅藻门	89 172	94 839	145 783	189 584
裸藻门	197	679	436	691
绿藻门	9 261	9 478	1 1247	14 731

2.4 讨论

根据有关成果, 富营养化发生所需最必要的外力条件为: TP、TN 等营养盐相对较充足、缓慢的水流流态和适宜的气候条件^[23]. 从营养盐浓度水平分析, 三峡水库 135m 蓄水时, 水体中营养盐浓度已经达到产生富营养化的条件. 从氮、磷比值关系分析水体营养盐限制, 三峡库区水体藻类生长主要受磷限制. 从水文、水力条件分析水库界于河流与湖泊之间, 流速一般比河流小而比湖泊大; 换水周期因人需要而改变^[24]. 三峡水库在 2009 年 175m 蓄水时,

其换水周期也仅为 33d ^[16], 换水频率远远大于一般水库, 类比三峡水库 135m 蓄水营养盐与浮游植物量分布, 库区干流有较大的流速, 营养物质输送较快, 可能不易发生大面积的水华现象. 但在一些较小的支流河口回水区、库湾死水区以及受水淹的平坝地区, 由于水流速度较缓, 均有发生局部水华现象的可能. 由于本次调查是在成库初期调查, 对成库后水体营养化演变趋势还应作进一步研究。

3 结论

(1) 三峡水库水体中可溶性营养盐浓度较高, 11 个测点的 DTN、DTP 浓度均超过水体发生富营养化的最低限制值. 成库初期 Chla 含量与浊度成显著负相关, 除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 外与其它营养盐浓度相关关系不显著。

(2) 根据聚类分析(Chla、营养盐及浊度), 三峡水库水体明显分为 3 部分, 即上游区(长寿、涪陵、丰都、忠县)、中游区(万州、云阳、奉节)和下游区(巫山)。

(3) 对已成库区域水体而言, 水体中 Chla 含量、浮游植物个体数量比成库前有增高, 但总体上处于贫-中营养水平。

参考文献:

- [1] 黄时达, 徐小清, 鲁生业, 等. 三峡工程与环境污染及人群健康[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 16~ 27.
- [2] 长江水利委员会. 三峡工程生态环境影响研究[M]. 湖北: 湖北科学技术出版社, 1997. 38~ 40.
- [3] 金相灿, 屠清瑛. 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. 17~ 35.
- [4] 魏复盛. 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. 123~ 165.
- [5] Vinod T, Ajay V S Y, Purnendu B. Analysis of photosynthetic activity in the most polluted stretch of river Ganga[J]. Water Research, 2002, 37: 67~ 77.
- [6] 沈志良. 长江干流营养盐通量的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(5): 522~ 527.
- [7] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997. 146~ 148.
- [8] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 中国湖泊营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 16~ 17.
- [9] 刘瑞秋. 三峡大坝截流前后长江中上游江段水化学特征的初步调查[J]. 水生生物学报, 2000, 24(5): 446~ 450.
- [10] 徐开钦, 林诚二, 牧秀明, 等. 长江干流主要营养盐含量的变化特征[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 118~ 124.
- [11] 饶群, 芮孝芳. 富营养化机理及数学模拟研究进展[J]. 水文, 2001, 21(2): 16~ 24.
- [12] 彭近新, 陈慧君. 水质富营养化与防治[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 12~ 17.

- [13] Zhang Jing. Chemical trend of national rivers in China; huanghe and changjiang[J]. AMBIO, 1995, **24**: 274~ 278.
- [14] 段水旺, 章申, 陈喜宝, 等. 长江下游氮、磷含量变化及其输送量的估计[J]. 环境科学, 2000, **21**(1): 53~ 56.
- [15] 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.
- [16] Reynolds C S. The ecology of freshwater phytoplankton[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 83~ 122.
- [17] 李文通, 覃瑞坤, 曹淑君, 等. 三峡工程对三峡库区水体有机物污染影响的评价及其对策[A]. 见: 中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组. 长江三峡工程对生态与环境影响及其对策研究论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1987. 779~ 788.
- [18] Prairie Y T, Duarte C M, Kalff J. Unifying nutrient-chlorophyll relationships in lakes[J]. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 1989, **46**: 1176~ 1182.
- [19] Jones J R, Knowlton M F. Limnology of Missouri Reservoirs: an analysis of regional patterns[J]. Lake and Reservoir Management, 1993, **8**: 17~ 30.
- [20] Osgood R A. Lake mixis and internal phosphorus dynamics[J]. Arch. Hydrobiol., 1988, **113**: 629~ 638.
- [21] Erwin E, Nieuwenhuyse V, Jones J R. Phosphorus-chlorophyll relationship in temperate streams and its variation with stream catchment area[J]. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 1996, **53**: 29~ 36.
- [22] 吴生才, 陈伟民. 太湖浮游植物生物量的周期变化[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(2): 151~ 154.
- [23] 黄真理, 李锦绣, 廖文根, 等. 中国环境水力学 2002[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. 106~ 109.
- [24] 顾丁锡, 舒金华. 湖泊水污染预测及其防治规划方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988. 5~ 6.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自 2006 年 5 月 1 日起, 我们各刊在接受作者投稿时, 要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果, 文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分) 未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前, 所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺, 并建立信息共享机制, 对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者) 采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法, 并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

2005 年 12 月 1 日