

doi: 10.7541/2015.113

## 三峡水库浮游植物初级生产力的季节变化与空间分布

熊倩<sup>1,2</sup> 黄立成<sup>1,2</sup> 叶少文<sup>1</sup> 李林<sup>1</sup> 宋立荣<sup>1</sup> 吴月<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所, 中国科学院藻类生物学重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 研究在三峡库区选取秭归、巫山、云阳、忠县、木洞 5 个断面, 自 2012 年 8 月至 2013 年 4 月采用黑白瓶法进行为期一周年季节性的原位初级生产力测定, 探讨初级生产力的季节变化、水平分布、垂直分布等动态特征。结果表明: 初级生产力平均值(以溶氧计)的四季变化规律为: 夏季[5.613 mgO<sub>2</sub>/(L·d)]>春季[3.630 mgO<sub>2</sub>/(L·d)]>冬季[0.906 mgO<sub>2</sub>/(L·d)]>秋季[0.552 mgO<sub>2</sub>/(L·d)], 与浮游植物叶绿素 *a* 含量的季节变化一致; 在初级生产力的空间分布上, 5 个断面中库首最高(秭归)、库中次之(巫山、云阳、忠县)、库尾最低(木洞); 且全年所有断面干流初级生产力均显著低于支流初级生产力; 在垂直分布上, 初级生产力的最大值主要出现在水下 0—1 m 间, 在水下 1—5 m 随着水深增加呈现递减趋势, 光能可得性可能是限制浮游植物初级生产力的重要因子。相关性分析表明, 毛初级生产力与叶绿素 *a*、溶解氧、pH 呈显著正相关。

**关键词:** 三峡水库; 浮游植物; 初级生产力; 季节变化; 空间分布

中图分类号: Q948.11 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2015)05-0853-08

初级生产力是指单位面积水域在单位时间内初级生产者生产有机物的能力, 是水生生态系统结构与功能的基础环节, 对研究水生生态系统及其环境特征具有重要意义<sup>[1]</sup>, 不仅可用于评价水体营养状态、估算渔业生产潜力<sup>[2]</sup>, 同时也对湖泊水库生态系统和环境特征具有较强的指示作用<sup>[3, 4]</sup>。湖泊和水库初级生产者主要由水生维管束植物(水草)、浮游植物(藻类)和自养细菌等构成, 而深水水库, 因水草和底生藻类分布范围较狭窄, 故浮游植物成为最主要初级生产者。

三峡水库自2003年蓄水以来, 有关库区局部浮游植物初级生产力的研究已有一些报道, 主要围绕某一个支流或某一段时间内初级生产力进行调查, 如邵晓阳等<sup>[5]</sup>、马丽娜等<sup>[6]</sup>、田泽斌等<sup>[7]</sup>以香溪河水华期初级生产力为研究对象, 张佳磊等<sup>[8]</sup>研究了大宁河回水区冬季和夏季初级生产力变化。目前关于三峡水库干流初级生产力的研究尚未见报道, 对于整个库区全年浮游植物初级生产力也缺乏系统的研

究。经过十余年蓄水, 三峡水库的生态环境发生了巨大变化, 水体初级生产力现状如何? 其季节变化与时空分布特点等问题已引起关注。鉴于此, 本研究选取秭归、巫山、云阳、忠县、木洞5个断面对三峡水库浮游植物初级生产力进行了周年四季调查, 以了解三峡水库初级生产力的季节变化与空间分布情况, 为进一步研究三峡水库生态系统结构与功能, 评估库区渔产潜力提供科学依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 采样地点和时间

为对整个三峡水库水体初级生产力进行系统研究, 分别选取位于水库库首的秭归和巫山、库中的云阳和忠县, 以及库尾的木洞(图 1), 5个具有代表性的断面作为监测断面。每个断面选取4个采样点, 2个点分布在干流, 2个点分布在支流。采样时间分别为2012年8月(夏季)、2012年11月(秋季)、2013年2月(冬季)、2013年4月(春季)。

收稿日期: 2015-02-09; 修订日期: 2015-04-02

基金项目: “中国长江三峡集团公司科研项目(CT-12-08-01)”资助

作者简介: 熊倩(1988—), 女, 湖北鄂州人; 硕士研究生; 主要从事藻类生态学研究。E-mail: xiongqian010@163.com

通信作者: 李林, E-mail: lilin@ihb.ac.cn

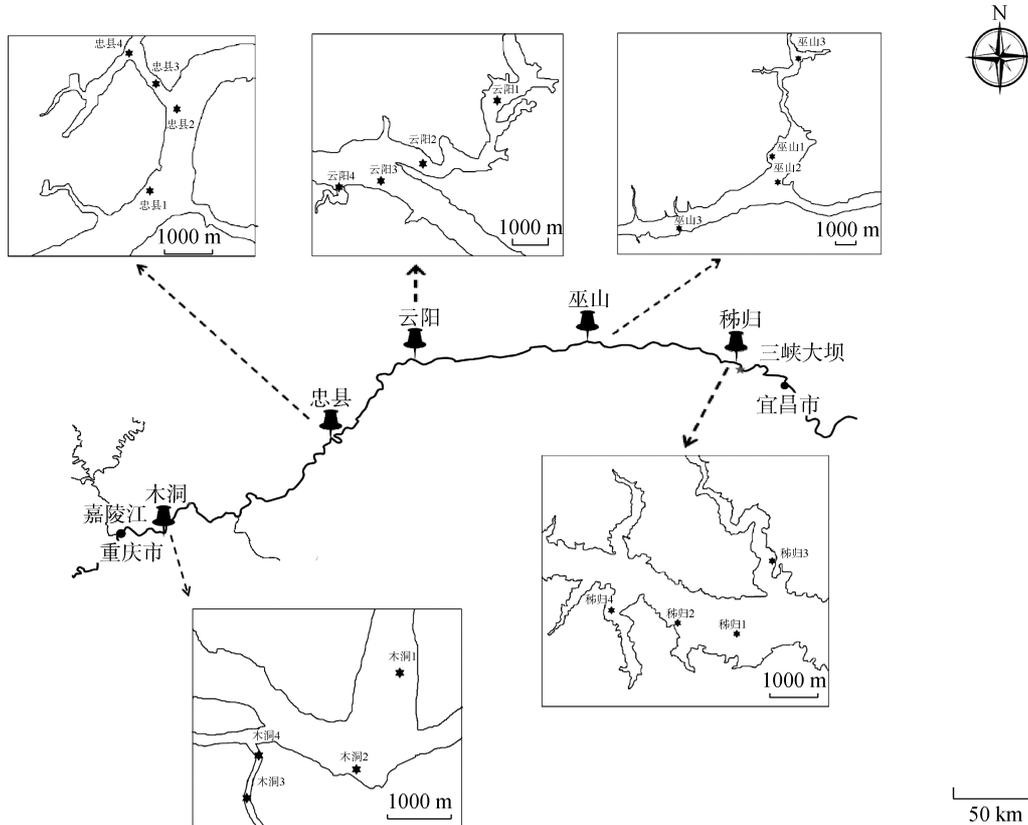


图 1 三峡水库初级生产力调查样点分布示意图

Fig. 1 The map of sampling sites for the survey of primary productivity in the Three Gorges Reservoir

## 1.2 初级生产力的测定

目前测定浮游植物初级生产力的常用方法有黑白瓶测氧法、 $^{14}\text{C}$ 法、叶绿素法等<sup>[9]</sup>。黑白瓶测氧法由于简便易行,在池塘、湖泊和水库初级生产力测定中被广泛应用<sup>[10]</sup>。

**黑白瓶法** 在本研究中,初级生产力采用黑白瓶法测定,采用固定层次挂瓶,即0、0.5、1、2、5 m五层,根据现场实际情况适当调整。用2.5 L采水器取各层水样装瓶,灌满2个白瓶、1个原样瓶和2个黑瓶(均为250 mL小口磨砂玻璃瓶)。曝光24h后用碱性碘化钾和硫酸锰现场固定瓶中溶解氧,在3h内用浓硫酸酸解,6h内用硫代硫酸钠进行滴定。

**溶解氧计算和换算** 在碱性溶液中,水样中的溶解氧与氢氧化锰生成碱性氧化锰 $[\text{MnO}(\text{OH})_2]$ 棕色沉淀,加入硫酸后, $\text{MnO}(\text{OH})_2$ 可将KI氧化,析出与溶氧量当量数相等的碘。用硫代硫酸钠标准液滴定析出的碘,根据硫代硫酸钠的用量,计算出水样中溶氧量的含量,公式如下:

$$\text{溶解氧}(\text{O}_2) = \left( V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 8 \times 1000 \right) / 100$$

式中,  $V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$  为滴定水样时消耗的硫代硫酸钠的溶液体积(单位: L),  $C_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$  为标定好的标准硫代硫酸钠的浓度(mol/L), 8为氧(1/2O)的摩尔质量, (g/mol) 100为所取水样的体积(L)。

**初级生产力日产量计算方法** 浮游植物初级生产力分为毛初级生产力( $P_G$ )和净初级生产力( $P_N$ ),毛初级生产力是指浮游植物在单位时间、单位空间内合成的全部有机物量,净初级生产力是指毛初级生产力减去浮游植物自身呼吸作用量( $P_R$ )剩余的初级生产力<sup>[11]</sup>。

$$P_G = (LB - DB) / \Delta t;$$

$$P_R = (IB - DB) / \Delta t;$$

$$P_N = (LB - IB) / \Delta t;$$

式中,  $LB$ 为白瓶曝光后溶氧量(mg/L),  $IB$ 为初始溶氧量(mg/L),  $DB$ 为黑瓶曝光后溶氧量(mg/L),  $P_G$ 为总初级生产量 $[\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{d})]$ ,  $P_R$ 为呼吸耗氧量 $[\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{d})]$ ,  $P_N$ 为净初级生产量 $[\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{d})]$ ,  $\Delta t$ 为曝光时间(d)。

在呼吸过程中除浮游植物本身耗氧外,还包括细菌、浮游动物等的耗氧,取样中异养生物的数量

变化会使呼吸消耗偏离正常值, 尤其细菌在 11—12h 消耗的氧往往可达到总呼吸量的 40%—60%。因此所测得的净产量是整个浮游生物群落的净产量, 而远低于浮游植物本身的净产量<sup>[12]</sup>, 下文提到的初级生产力为毛初级生产力。

**水柱初级生产力计算方法** 水柱初级生产量是指在 1 m<sup>2</sup> 水面下, 从水面直到水底整个水柱中的生产量, 可通过平均值积加法求得。

计算公式为

$$P = \sum_{i=1}^{n-1} [(P_i + P_{i+1})/2] \times (D_{i+1} - D_i)$$

式中,  $P_i$  为第  $i$  层的生产量 [ $\text{mg O}_2/(\text{L}\cdot\text{d})$ ],  $D_i$  为第  $i$  层的深度 (m),  $n$  为取样层次数 ( $1 \leq i \leq n-1$ )。

### 1.3 数据分析

单因素方差分析、独立样本  $t$  检验、皮尔逊相关分析均采用 SPSS 18.0 统计软件进行分析。

## 2 结果

### 2.1 初级生产力的季节变化

三峡水库浮游植物初级生产力的季节变化特征明显, 各断面最高毛初级生产力的季节变化 (表 1) 表现为夏季 [ $5.613 \text{ mgO}_2/(\text{L}\cdot\text{d})$ ] > 春季 [ $3.630 \text{ mgO}_2/(\text{L}\cdot\text{d})$ ] > 冬季 [ $0.906 \text{ mgO}_2/(\text{L}\cdot\text{d})$ ] > 秋季 [ $0.552 \text{ mgO}_2/(\text{L}\cdot\text{d})$ ], 且干流与支流初级生产力的季节变化趋势一致。单因素方差分析显示, 不同季节初级生产力之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2 初级生产力的空间分布

**水平分布** 由表 1 可见, 就三峡水库浮游植物初级生产力的水平分布来看, 各断面最高毛初级生产力全年平均值的的变化范围为  $1.895$ — $3.520 \text{ mgO}_2/(\text{L}\cdot\text{d})$ , 存在一定波动, 库首较高 (秭归)、库中次之 (巫山、

云阳、忠县)、库尾较低 (木洞)。

由图 2 可见, 对于同一断面, 同一季节干流初级生产力明显低于支流初级生产力, 四季均表现出上述规律。支流全年初级生产力平均值为  $2.493 \text{ mgO}_2/(\text{L}\cdot\text{d})$ , 而干流全年初级生产力平均值仅为  $0.309 \text{ mgO}_2/(\text{L}\cdot\text{d})$ 。独立样本  $t$  检验显示, 干流与支流初级生产力之间差异显著 ( $P < 0.01$ )。而且, 对于同一断面, 不同季节干流与支流初级生产力差值不一样, 春、夏季的差值较大, 秋、冬季的差值较小。

**垂直分布** 不同断面初级生产力的垂直分布变化趋势有所不同 (图 3): 秭归与巫山变化趋势相近, 忠县及云阳变化趋势相近, 木洞的变化趋势异于其他 4 个断面。一般水体上层初级生产力显著高于下层, 最高生产层多出现在表层或者水下 1—2 m。夏季和春季的初级生产力高, 最大值多出现在水表, 夏季初级生产力随着水深增加而显著降低, 降低的幅度相对其他三季较大; 而秋季和冬季的初级生产力较低, 各断面初级生产力最大值出现的深度不同。

### 2.3 初级生产力与理化参数的相关性

将三峡水库初级生产力和水深、水温、溶解氧等理化参数做 Pearson 相关分析 (表 2 所示), 结果表明: 初级生产力与溶解氧、叶绿素  $a$  呈显著性正相关 ( $P < 0.01$ ), 且与 pH 也呈显著性相关 ( $P < 0.05$ )。

## 3 讨论

从季节变化上看, 三峡水库 2012—2013 年初级生产力的季节差别较大, 与张运林等<sup>[13]</sup>在太湖研究所得结果的变化规律一致, 均表现为夏季初级生产力最高, 春季次之, 秋冬季节较低。本研究 5 个监测断面最高生产层的初级生产力年变幅为  $0.291$ —

表 1 三峡各断面最高毛初级生产力的季节变化

Table 1 Seasonal variations of the highest gross primary productivity in the Three Gorges Reservoir

采样断面 Sampling region	最高毛初级生产力 The highest gross primary productivity [ $P_G$ , $\text{mgO}_2/(\text{L}\cdot\text{d})$ ]				均值 Mean
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	
秭归 Zigui	6.867	5.148	0.930	1.136	3.520
巫山 Wushan	1.533	3.861	0.291	/	1.895
云阳 Yuyang	1.575	5.742	0.615	/	2.644
忠县 Zhongxian	5.475	6.485	0.308	1.136	3.351
木洞 Mudong	2.699	6.831	0.615	0.446	2.648
均值 Mean	3.630	5.613	0.552	0.906	

注: “/”代表数据缺失

Note: “/” Lack of data

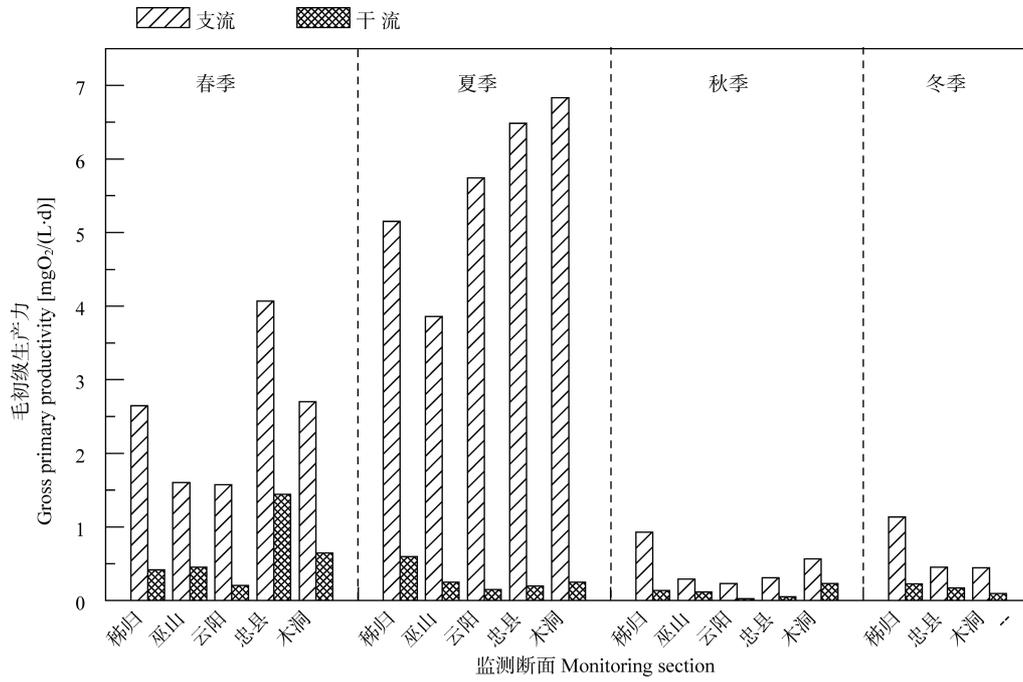


图 2 三峡水库干流与支流毛初级生产力比较

Fig. 2 Comparison of gross primary productivity in the mainstream and in the tributaries of the Three Gorges Reservoir

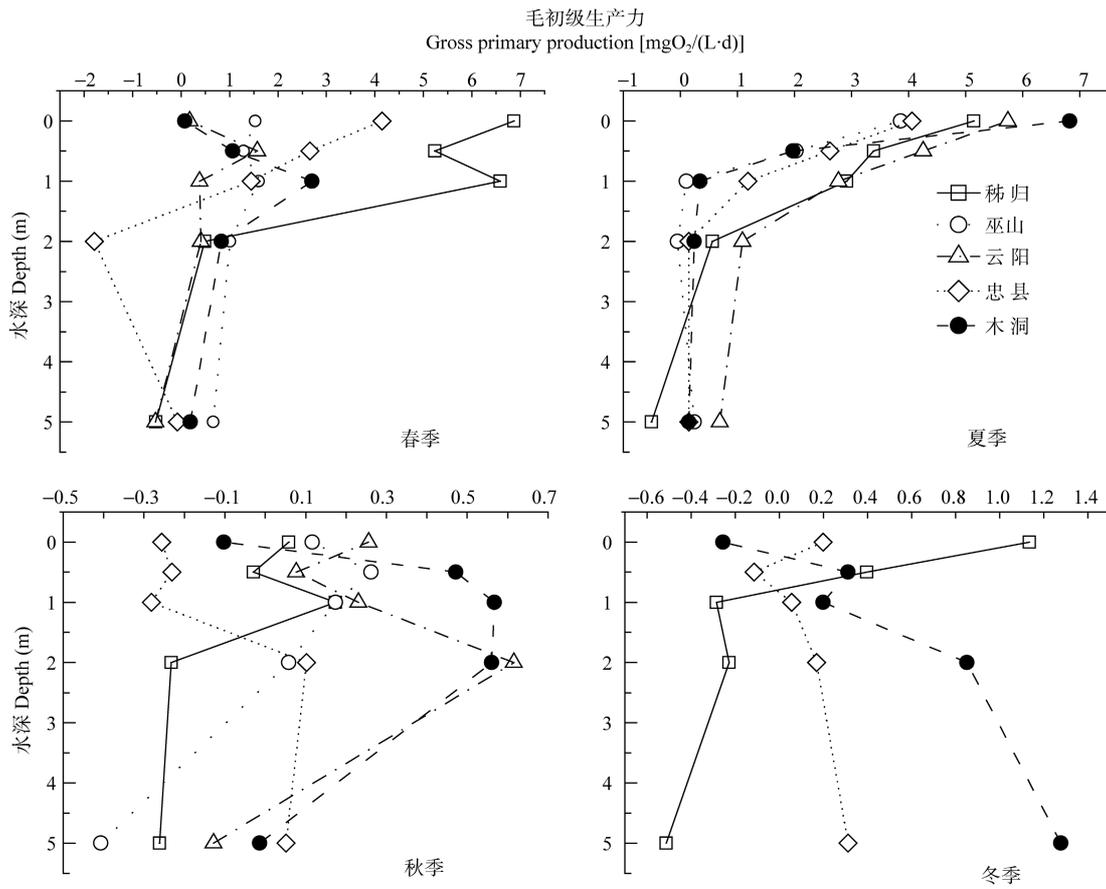


图 3 毛初级生产力的四季垂直分布

Fig. 3 The vertical distribution of gross primary productivity in different seasons

表 2 三峡水库毛初级生产力和理化参数的相关分析

Tab. 2 Correlation analysis between the gross primary productivity and physio-chemical parameters in the Three Gorges Reservoir

	毛初级生产力 PP [mgO <sub>2</sub> /(L·d)]	水深 WD (m)	水温 WT (°C)	溶解氧 DO (mg/L)	pH	光照强度 LI (μE·m <sup>2</sup> /s)	叶绿素 <i>a</i> Chl. <i>a</i> (mg/m <sup>3</sup> )	透明度 SD (m)
毛初级生产力 PP	1							
水深 WD	-0.074	1						
水温 WT	0.107	-0.787**	1					
溶解氧 DO	0.669**	-0.049	0.253	1				
pH	0.659*	-0.314	0.462	0.702**	1			
光照强度 LI	0.399	0.325	-0.414	0.224	0.087	1		
叶绿素 <i>a</i> Chl. <i>a</i>	0.851**	-0.240	0.377	0.874**	0.878**	0.234	1	
透明度 SD	-0.427	0.742**	-0.765**	-0.345	-0.712**	-0.054	-0.582*	1

注: “\*”表示在0.05水平上显著相关, “\*\*”表示在0.01水平上显著相关

Note: “\*” and “\*\*” denoted that significant differences (\* ( $P < 0.05$ ) and \*\* ( $P < 0.01$ )) were determined

6.867 mgO<sub>2</sub>/(L·d), 年平均值为2.675 mgO<sub>2</sub>/(L·d)。汪益斌等<sup>[14]</sup>对淀山湖浮游植物初级生产力及其影响因子的研究表明, 浮游植物生产量的季节分布主要取决于水温, 对富营养型水体而言, 温度与生产量之间常表现为正相关, 即在夏季最高。蔡后建等<sup>[15]</sup>对太湖梅梁湾口浮游植物初级生产力及其相关因素关系研究结果表明, 浮游植物生产力与水温有相似的变化趋势, 全年初级生产力主要集中在夏季, 也与本研究结果一致。张佳磊等<sup>[8]</sup>对大宁河回水区夏季与冬季初级生产力的比较研究表明, 水中悬浮颗粒和温度是影响初级生产力的主要因素。本研究各断面秋冬季干流与支流初级生产力整体较低而春夏季较高, 可能主要受水温的影响; 虽然三峡水库秋冬季为枯水期, 来水量少, 水体悬浮物少、透明度高、光能可利用性高, 但较低的水温成为限制浮游植物生长的主要因子。在本文调查中, 秋季初级生产力低于冬季, 可能与11月秋季采样时5个断面水温(11°C左右)小于2月冬季采样时的水温(19°C左右)有关。

三峡水库各季节同一断面干流初级生产力均明显低于其支流, 这可能和干流与支流水文水质差异有关。与支流相比, 干流流速快泥沙含量大, 水体透明度低, 水柱可利用光能减少, 浮游植物生长受到光限制。夏季支流与干流初级生产力差距进一步增大, 这与三峡水库夏季丰水期水文调蓄有关, 低水位运行使干流江面变窄, 而且上游来水量、泥沙量大导致干流流速大增, 透明度剧减(低至10—20 cm), 水柱光能明显减少限制了干流初级生产力增加; 而夏季高温、面源营养流入和较高的透明度都有利于支流浮游植物生长, 初级生产力大增。

水库由入水口处到大坝一般分为3个具有不同生态特征的区域: 河流区、过渡区、湖泊区<sup>[16]</sup>。这3个区域的水域范围是不稳定, 在时空上是动态变化, 均可扩展或收缩, 主要依据入库和出库的流量及其季节动态变化。在水动力过程的驱动下, 水库水体中发生的物理、化学、生物过程通常存在着明显的梯度。河流区位于水库的入口处, 既窄又浅; 过渡区相对于河流区结构上宽而深; 湖泊区位于水库大坝处, 是水库最宽最深的区域。以此类推, 本研究所选的5个断面, 木洞位于河流区, 忠县、云阳、巫山位于过渡区, 秭归位于湖泊区。各断面测得初级生产力结果与各个区域的水文特征基本相符, 河流区是水库中流速最快, 水体滞留时间最短的区域, 营养物含量最高, 透明度最低, 藻类的生长受到光抑制, 藻类生物量及生长率均相对较低; 过渡区透明度升高, 藻类生长受光照条件限制现象得到改善, 同时该区营养盐的含量仍相对较高, 因而藻类的生物量及生长率是水库中最高的区域; 湖泊区水流流速最慢, 水体透明度达到最高, 在该区藻类生长主要受营养盐限制, 藻类生物量及生长率常低于过渡区。曹明等<sup>[17]</sup>在三峡水库及香溪河库湾理化特征的比较研究表明库湾叶绿素含量显著高于库首( $P < 0.01$ ), 且库湾pH显著高于库首( $P < 0.01$ ), 这与本研究结果一致。

影响浮游植物初级生产力的主要理化因子有温度、光强、营养盐浓度, 然而对于不同水体, 影响浮游植物初级生产力的主要理化因子并不相同。张运林等<sup>[18]</sup>研究表明在太湖这种富营养化浅水湖泊中, 温度和光强在初级生产力的变化中扮演了关键角色。庄建山等研究表明河口浮游植物的初级生产力

主要取决于透明度、营养盐和光强,蓄水型水库初级生产力主要受营养盐和微量元素的影响<sup>[19]</sup>。三峡水库独特的季节性调蓄过程使回水区段水动力条件受河流型和湖泊水库型的双重生态特征的影响,影响初级生产力的主要因素与前述湖泊、河口和蓄水型水库可能有差异。与理化参数相关性分析表明,三峡水库初级生产力与Chl. *a*、DO、pH等显著正相关。蔡后建等<sup>[15]</sup>在太湖的研究表明毛初级生产力与Chl. *a*存在显著性正相关,郭劲松等<sup>[20]</sup>在小江回水区的研究也发现毛初级生产力与Chl. *a*存在显著性正相关。氮、磷营养常被认为是对浮游植物生产力的限制因子,有研究表明,氮通常是海洋初级生产力的主要限制因子,而磷常是淡水水体初级生产力的主要限制因子<sup>[21]</sup>。窦勇等<sup>[22]</sup>在山东近黄海段的研究发现氮是影响其全年初级生产力最为重要的营养元素,张运林等<sup>[13]</sup>在太湖的研究发现磷是影响初级生产力的限制因素。曾台衡等<sup>[23]</sup>对长江流域湖泊初级生产力的研究也发现,湖水中总磷浓度上升,导致浮游植物过量增殖,最终引起湖泊浮游植物初级生产力增加。本项目组王司阳等同期研究(另文发表)表明,三峡水库春夏季总磷较秋冬季节高,且5个断面中秭归断面的总磷最高,不同断面间总氮无显著性差异。其总磷的分布情况与本研究初级生产力的断面分布结果一致,磷可能是影响三峡水库初级生产力的重要营养因子。

三峡水库自2003年6月完成139 m蓄水之后,由于受回水顶托,加上氮、磷等营养盐输入的影响,库湾回水区富营养化现象颇受关注,其中香溪河和大宁河等支流局部水华现象严重<sup>[8]</sup>。目前对于三峡水库浮游植物初级生产力的研究也主要集中在水华多发的地区。重庆巫山县环境监测站测得2009年6月大宁河水华多发河段白水河初级生产力为 $6.689 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ <sup>[24]</sup>,显著高于本研究中巫山2012年夏季支流测得的初级生产力 $[1.472 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ ;郭劲松等<sup>[20]</sup>于2010年春季4、5月测得小江回水区双江断面浮游植物最大水层处的初级生产力为 $1.63 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,约为本研究巫山2013年春季支流初级生产力 $[0.723 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ 的2倍;马丽娜等<sup>[6]</sup>测得香溪河2011年夏季水华期间浮游植物最大水层处的初级生产力为 $5.35 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,比本研究同期在2012年秭归支流所测定的结果 $2.135 \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 高1倍。以上已报道的初级生产力结果与本文结果的

差异与采用时间和样点不同有关,也反映了支流初级生产力的变化幅度较大。

已有一些根据初级生产力来估算渔业生产潜力的国内外文献报道。我国学者梁彦龄和王骥等<sup>[25]</sup>早在1981年通过对长江流域湖北省武汉市附近的18个池塘和湖泊(平均水深为0.7—3 m)进行调查,获得毛初级生产力与渔业产量的经验公式: $F_{yg} = 370PGa - 852$ , ( $r^2=0.94$ ,  $P<0.001$ ),其中 $PGa$ 为毛初级生产力 $\text{gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , $F_{yg}$ 为渔业产量 $\text{kg}/(\text{ha} \cdot \text{yr})$ 。韦众等<sup>[26]</sup>采用以上经验公式年以万佛湖初级生产力对其渔业产量进行了评估和推算。以本研究初级生产力结果采用该经验公式来粗略估算三峡水库渔产潜力,则支流 $F_{yg}$ 为 $351.7 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{yr})$ ,干流 $F_{yg}$ 为 $44.24 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{yr})$ 。Downing等<sup>[27]</sup>对分布在北美洲、欧洲和非洲的19个不同富营养化程度的湖泊(平均水深为1.4—33 m)的渔业产量与总氮、总磷、电导率、水深、鱼生物量、初级生产力等16个参数进行了相关性分析,结果表明初级生产力与渔业产量具有最显著性的正相关性 $[\lg FP = 0.600 + 0.5751g PP$ , ( $r^2=0.79$ ,  $P<0.001$ )],其中 $FP$ 为渔业产量 $\text{kg}/(\text{ha} \cdot \text{yr})$ , $PP$ 为初级生产力 $\text{g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$ ,可通过初级生产力来估算渔业潜力。采用该经验公式以本研究初级生产力结果粗略估算三峡水库渔产潜力,以1 mg氧对应0.3 mg碳<sup>[28]</sup>计算,则三峡水库支流 $FP$ 为 $67.249 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{yr})$ ,干流 $FP$ 为 $20.244 \text{ kg}/(\text{ha} \cdot \text{yr})$ 。可见据以上2种不同的模型估算出的渔业潜力相差较大,鉴于前者是我国学者基于浅水湖泊池塘水体情况总结的经验公式,而三峡水库为深水水体,依据Downing等<sup>[27]</sup>归纳的经验模型来估算三峡水库的渔业潜力可能更为合适。当然,此估算结果仅作为参考,还需与三峡库区的渔产量实际调研结果进行比较验证,对经验公式进行修正完善后提高估算准确性,进而为三峡水库渔业资源利用和水生态环境保护提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] Odum H T. Primary production in flowing waters [J]. *Limnology & Oceanography*, 1956, 1(2): 102—117
- [2] Wang J, Liang Y L. An estimation of the potential productivity and stocking rate of fingerlings of silver and bighead carps in Dong hu by means of phytoplankton production [J]. *Journal of Fisheries of China*, 1981, 5(4): 343—350 [王骥, 梁彦龄. 用浮游植物的生产量估算武昌

- 东湖鲢鳙生产潜力与鱼种放养量的探讨. 水产学报, 1981, 5(4): 343—350]
- [3] Wang X Q, Zeng Y Y, Wu H H, *et al.* Investigation on plankton community composition and water quality state in the mainstream of Xiangjiang River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(3): 488—494 [王晓清, 曾亚英, 吴含含, 等. 湘江干流浮游生物群落结构及水质状况分析. 水生生物学报, 2013, 37(3): 488—494]
- [4] Li Z, Guo W J, Cheng S P, *et al.* The spatial and temporal distribution of chlorophyll-*a* and its correlation with environmental factors in the Nanfeihe River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, 38(2): 342—350 [李柱, 郭伟杰, 成水平, 等. 南淝河叶绿素 *a* 时空分布特征及环境因子影响分析. 水生生物学报, 2014, 38(2): 342—350]
- [5] Shao X Y, Xu Y Y, Han X Q, *et al.* The distribution of chlorophyll-*a* content and primary productivity in Guanzhuangping Bay of Xiangxi River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 96—100 [邵晓阳, 徐耀阳, 韩新芹, 等. 香溪河官庄坪库湾叶绿素 *a* 及初级生产力的分布特征. 水生生物学报, 2006, 30(1): 96—100]
- [6] Ma L N, Bi Y H, Hu Z Y, *et al.* Phytoplankton primary production during summer bloom in Xiangxi Bay, branch of the Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(Z1): 123—128 [马丽娜, 毕永红, 胡征宇, 等. 三峡水库香溪河库湾夏季水华期间浮游植物的初级生产力. 长江流域资源与环境, 2011, 20(Z1): 123—128]
- [7] Tian Z B, Liu D F, Yao X J, *et al.* Effect of water temperature stratification on the seasonal succession of phytoplankton function grouping in Xiangxi Bay [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5): 700—707 [田泽斌, 刘德富, 姚绪姣, 等. 水温分层对香溪河库湾浮游植物功能群季节演替的影响. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 700—707]
- [8] Zhang J L, Zheng B H, Huang M S, *et al.* Seasonal variation of primary productivity in the Daning River backwater area [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)* 2011, 1: 1—11 [张佳磊, 郑丙辉, 黄民生, 等. 大宁河回水区初级生产力的季节变化. 华东师范大学学报, 2011, 1: 1—11]
- [9] Huang X F, Chen W M, Cai Q M. Observation and Analysis of Lake Ecological Investigation [M]. Beijing: China Standards Press, 1999, 77—79 [黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析. 中国标准出版社, 1999, 77—79]
- [10] Zhao W, Dong S L, Li D S, *et al.* Daily change of primary productivity of phytoplankton in saline-alkaline ponds [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(2): 234—236 [赵文, 董双林, 李德尚, 等. 盐碱池塘浮游植物初级生产力日变化的研究. 应用生态学报, 2003, 14(2): 234—236]
- [11] Zhang Y L, Qin B Q, Hu W P, *et al.* Temp-spatial various of euphotic depth and its ecology significance in typical area of Taihu Lake [J]. *Science in China Ser. D Earth Science*, 2006, 36(3): 287—296 [张运林, 秦伯强, 胡维平, 等. 太湖典型湖区真光层深度的时空变化及其生态意义. 中国科学, 2006, 36(3): 287—296]
- [12] Yan X Z. The different methods for determining primary production [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2000, 13(1): 81—86 [阎希柱. 初级生产力的不同测定方法. 水产学杂志, 2000, 13(1): 81—86]
- [13] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Chlorophyll *a* content and primary productivity of phytoplankton in Meiliang Bay of Taihu Lake [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2127—2131 [张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖梅梁湾浮游植物叶绿素 *a* 和初级生产力. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2127—2131]
- [14] Wang Y P, Zhang W Y, Xu C Y, *et al.* Phytoplankton productivity and its influencing factors in Dianshan Lake [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(5): 1249—1256 [汪益斌, 张维砚, 徐春燕, 等. 淀山湖浮游植物初级生产力及其影响因子. 环境科学, 2011, 32(5): 1249—1256]
- [15] Cai H J, Chen Y W, Cai Q M, *et al.* Relations between primary production of phytoplankton and relative factors at mouth of Meiliang Bay in Taihu Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1994, 6(4): 340—347 [蔡后建, 陈宇炜, 蔡启铭, 等. 太湖梅梁湾口浮游植物初级生产力及其相关因素关系的研究. 湖泊科学, 1994, 6(4): 340—347]
- [16] Han B P. Reservoir ecology and limnology in China: a retrospective comment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(2): 151—160 [韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望. 湖泊科学, 2010, 22(2): 151—160]
- [17] Cao M, Cai Q H, Liu R Q, *et al.* Comparative research on physicochemical factors between Xiangxi Bay and the front region of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 20—25 [曹明, 蔡庆华, 刘瑞秋, 等. 三峡水库及香溪河库湾理化特征的比较研究. 水生生物学报, 2006, 30(1): 20—25]
- [18] Zhang Y L, Qing B Q, Chen W M, *et al.* Experimental study on under water light intensity and primary productivity of total suspended matter [J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(5): 615—620 [张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 悬浮物浓度对于水下光照和初级生产力的影响. 水科学进展, 2004, 15(5): 615—620]
- [19] Zhuang J S. Study on the primary production and the influence factors in demonstration area to control cyanobacterial of Dianchi Lake during 2002—2003 [D]. Shanghai: Institute of Applied Ecology, Shanghai Normal University, 2004 [庄建山. 滇池控制水华示范区 (2002—2003) 初级生产力及其影响因素. 上海: 上海师范大学, 2004]
- [20] Guo J S, Li W, Li Z, *et al.* Spring primary productivity in Xiaojiang River backwater area in the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(4): 591—596 [郭劲松, 李伟, 李哲, 等. 三峡水库小江回水区春季初级生产力. 湖泊科学, 2011, 23(4): 591—596]

- [21] Valiela I. Producers and Processes Involved in Primary Production [M]. Marine Ecological Processes, Second Edition. New York: Springer-Verlag, 1995, 3—35
- [22] Dou Y, Tang X X, Yang Z, *et al.* Effect of nutrients structure on primary production in offshore of Shandong Province [J]. *Marine Environmental Science*, 2011, **30**(2): 177—181 [窦勇, 唐学玺, 杨震, 等. 山东近海黄海段营养盐结构对初级生产力的影响研究. 海洋环境科学, 2011, **30**(2): 177—181]
- [23] Zeng T H, Liu G X, Hu Z Y. Estimation of phytoplankton primary production of lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(6): 717—722 [曾台衡, 刘国祥, 胡征宇. 长江中下游湖区浮游植物初级生产力估算. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(6): 717—722]
- [24] Wan D, Wu G Y. The determination of primary productivity by the method of black and white in the Daning River [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(12M): 264—266 [万丹, 吴光应. 黑白瓶测氧法测定大宁河白水河段初级生产力. 环境科学与技术, 2013, **36**(12M): 264—266]
- [25] Liang Y L, Wang J, Melack J M. Primary production and fish yields in Chinese ponds and lakes [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1981, **110**: 346—350
- [26] Wei Z, Bao C H, Ding S Q, *et al.* Assessment and analysis of primary productivity and fish productivity in Wanfo Lake [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2012, **39**(6): 871—874 [韦众, 鲍传和, 丁淑荃, 等. 万佛湖初级生产力和鱼产力的评估与分析. 安徽农业大学学报, 2012, **39**(6): 871—874]
- [27] Downing J A, Plante C, Lalonde S. Fish production correlated with primary productivity, not the morphoedaphic index [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1990, **47**: 1929—1936
- [28] Zhang Z S, Huang X F. Study Methods of Freshwater Plankton [M]. Beijing: Science Press. 1991, 351—353 [章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991, 351—353]

## THE SEASONAL VARIATIONS AND SPATIAL DISTRIBUTION OF THE PRIMARY PRODUCTIVITIES OF PHYTOPLANKTON IN THE THREE GORGES RESERVOIR

XIONG Qian<sup>1,2</sup>, HUANG Li-Cheng<sup>1,2</sup>, YE Shao-Wen<sup>1</sup>, LI Lin<sup>1</sup>, SONG Li-Rong<sup>1</sup> and WU Yue<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Algae Biology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In this study, we carried out the field sampling from August 2012 to April 2013 in order to analyze the seasonal variation and spatial distribution of the primary productivity (PP) of phytoplankton in the Three Gorges Reservoir (TGR). Five regions along the longitudinal axis of the TGR (i.e. Zigui, Wushan, Yunyang, Zhongxian, and Mudong) were selected for the measurements of PP with the white and black bottles method. The seasonal average values of PP (according to the dissolved oxygen) followed the order: summer [5.613 mgO<sub>2</sub>/(L·d)] > spring [3.630 mgO<sub>2</sub>/(L·d)] > winter [0.906 mgO<sub>2</sub>/(L·d)] > autumn [0.552 mgO<sub>2</sub>/(L·d)]. Light was an important limiting factor in the vertical distribution of PP. The maximum values were obtained between 0 m and 1 m underwater, and the PP decreased along with the increase in the depth from 1 m to 5 m. As for the horizontal distribution, the primary productivity was higher in the head region of the TGR, and the highest was in Zigui, followed by the middle region and the tail region. Moreover, the PP values were higher in the tributaries than in the mainstream. The gross primary productivity was highly correlated with chlorophyll-a, dissolved oxygen, and pH.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; Phytoplankton; Primary productivity; Seasonal variation; Spatial distribution