

## 香溪河官庄坪库湾叶绿素 *a* 及初级生产力的分布特征

邵晓阳<sup>1,2</sup> 徐耀阳<sup>1</sup> 韩新芹<sup>1</sup> 蔡庆华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所,淡水生态与生物技术国家重点实验室,武汉 430072;2. 杭州师范学院生物系 杭州 310036)

**摘要:**2005年2月—4月对三峡库区香溪河进行了定点初级生产力及相关影响因子的研究,分析了官庄坪库湾叶绿素 *a* 含量和初级生产力的时空分布特征。结果表明,叶绿素 *a* 含量、初级生产力在各水层的变化具有相同的周期性,均存在5个峰值,平均每个周期为7—10d左右,但两者不同步。官庄坪测站的真光层深度为10m左右,介于湖泊与海洋之间,光补偿点为4—5m。初级生产力最大值出现在水下0.5m处,并沿物理深度逐渐降低;叶绿素 *a* 含量最大值则出现在水下2m处。水温的垂直变化在后期差异明显,各水层日平均水温增量( $^{\circ}\text{C}/\text{d}$ )与平均毛初级生产、净初级生产存在极显著的相关性。

**关键词:**光照强度;叶绿素 *a*;初级生产力;官庄坪

**中图分类号:**Q178.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3207(2006)01-0095-06

影响水体初级生产的因素除浮游植物本身生物量变化之外,水环境中的光、营养盐、温度以及水体运动也是主要的因素<sup>[1]</sup>。太阳辐射强度是水生植物进行光合作用的直接动力,它同时还决定着水温的变化以及水中各种生物的生长分布<sup>[2-4]</sup>。光线进入水体后,受到水中悬浮颗粒、黄色可溶性有机质和浮游生物的影响而逐渐衰减,不同水层的初级生产力的变化是对水下光强衰减的响应<sup>[5]</sup>。温度对水体初级生产的影响,表现为单位时间内的初级生产最大光合速率与水温变化有关<sup>[7]</sup>。在真光层内、浮游植物生物量基本相同的水体中,热带湖泊的初级生产力通常为温带湖泊的2—3倍<sup>[2,6,7]</sup>。针对各种环境因素对水生生物分布以及初级生产力的影响、初级生产力的能量转化效率等方面的研究一直受到国内外学者的重视<sup>[3,8]</sup>。目前已有的关于水体初级生产的研究和认识主要是来自对湖泊和海洋的考察,而对河流型库湾的研究工作开展得相对比较缺乏<sup>[1,5,9]</sup>。

香溪河是三峡水库湖北库区内的第一大支流,由于三峡水库担负航运、调蓄、发电等诸多功能,原有的河流转变为库湾。水位升高,直接导致水体真光层深度、温度变化幅度、水流速度等重要环境因素根本性地改变<sup>[10,11]</sup>。水体初级生产力的变化以及与主要环

境因子之间的关系,则是本研究关注的问题。

本研究通过测定水下光照强度、水温、初级生产力、叶绿素,试图探求并建立它们之间的对应关系,旨在评价水位变化对特大型水库初级生产力、能量转化效率的影响,为合理利用水资源,建立预报水华的数学模型提供科学依据。

### 1 材料和方法

**1.1 采样站的设置及采样频率** 根据香溪河自然环境特点以及实验实施的可行性,在中段的官庄坪设观测站。2005年2月22日—4月28日,每隔2d测定水下光照强度、水温、初级生产力、叶绿素1次。

**1.2 光照的测定** 在香溪河官庄坪每日定点测定自表层(0m)每隔0.5m至水下9m处的光照强度,使用LI—COR250水下光量子感应仪,精确度 $0.01\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 。

**1.3 初级生产力的测定** 初级生产力采用黑白瓶法,黑白瓶按0.5m、2m、5m、10m、15m、20m的深度分层挂瓶,每天10:30~11:30完成。用5L采水器取各水层水样装瓶,灌满2个白瓶、1个原样瓶、2个黑瓶(均为250mL小口磨砂玻璃瓶),并记录水温。曝光24h,

收稿日期:2005-07-10;修订日期:2005-09-25

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-11);国家自然科学基金重点项目(30330140);国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412300)资助

作者简介:邵晓阳(1960—),浙江江山市人;副教授。主要从事淡水生态学研究

通讯作者:蔡庆华, E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

起瓶时用碱性碘化钾和硫酸锰现场固定,在 3h 之内用浓硫酸酸解,6h 内用硫代硫酸钠滴定完毕。溶解氧测定与计算按国标执行<sup>[8]</sup>。

1.4 叶绿素的测定 采集各水层水样600mL,现场用0.8μm 微孔滤膜抽滤。冰盒保存叶绿素并带回实验室,采用 Lorenzen 法测定水样中的叶绿素含量<sup>[8]</sup>。

1.5 数据处理 用 Statistic6.0 统计软件包的多重回归分析(Multiple Regression)和非参数统计检验中的克鲁斯凯-沃利斯方差分析(Kruskal-Wallis ANOVA,median test)。

2 结果

2.1 光照强度

太阳光进入水体之后,由于不同水层物质组成不一样,对不同波长辐照度吸收和散射的程度也不一样。对太阳辐射强度随深度变化的衰减,目前大部分学者是把  $K( )$  近似地看作常数,即在观测深度范围内不随波长而变化:

$$K_d = - \frac{1}{z} \ln \frac{E(z)}{E(0)} \quad (1)^{[12]}$$

式中  $K_d$  为光学衰减系数; $z$  为深度; $E(z)$  为深度处的辐照度; $E(0)$  为起始面辐照度。

将测定的 22 组水下垂直辐照度数据转换成对数,并按照式(1)计算各水层全水柱平均光学衰减系数(图 1、图 2)。虽然  $\ln E(z)$ 、 $K$  值均随水深增加而趋于减小,但表达的含义是不一样的。 $\ln E(z)$  值曲线表明的是光通过水层,辐照度递减的过程; $K$  值曲线则显示了沿物理深度递增,对光辐照起到吸收、散射作用的物质在逐渐减少。

图 1、图 2 拟合曲线所代表的方程式分别为:

$$\ln E(z) = 6.392 - 0.7635 Z + 0.0284 Z^2$$

$(R^2 = 0.9987, P < 0.0001)$  (2)

$$K = 0.29033 + 0.49216 e^{-(Z - 0.25407)/9.27808}$$

$+ 0.11957 \cdot (Z - 0.25407)/0.22714$

$(R^2 = 0.9979, P < 0.0001)$  (3)

根据方程(3)得出 10m 处的全光谱平均衰减系数为 0.46107。一般认为在光学深度(  $= K \times z$  ) 等于 4.6 时所代表的物理深度,其水下辐照度为表面辐照度的 1%,是真光层深度<sup>[12]</sup>。所以官庄坪测站的真光层深度为:  $z = 4.6 / K = 4.6 / 0.46107$  10m。官庄坪站点的真光层深度比已报道的湖泊真光层深度要大、比海洋要小<sup>[2,9]</sup>,说明库湾水体影响水下光辐照度的因素介于湖泊与海洋之间。

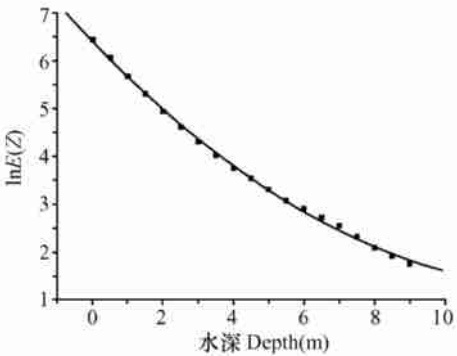


图 1 官庄坪光强对数值与水深关系

Fig. 1 The relationship between Light logarithms and water depth

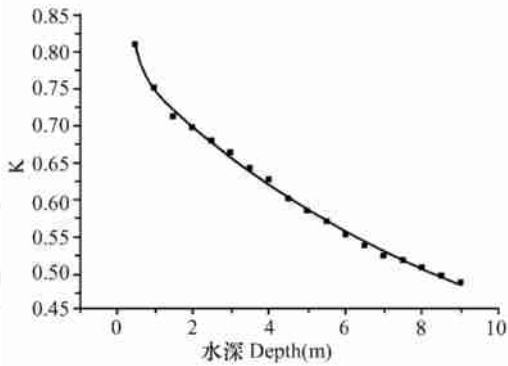


图 2 官庄坪光强衰减系数与水深关系

Fig. 2 The relationship of  $K_d$  and water depth

2.2 初级生产力

官庄坪水体的毛初级生产力( $P_G$ )和净初级生产力( $P_N$ )在不同时间沿物理深度所表现出的分布趋势基本是一致的,但各水层的变异性非常大,毛初级生产力从 0.5m 至 20m 分别为  $1.689 \pm 1.089$ 、 $0.943 \pm 0.633$ 、 $0.325 \pm 0.218$ 、 $0.099 \pm 0.121$ 、 $0.092 \pm 0.175$ 、 $0.141 \pm 0.292$   $O_2$ mg/L;净初级生产力  $1.103 \pm 0.903$ 、 $0.432 \pm 0.612$ 、 $- 0.065 \pm 0.209$ 、 $- 0.153 \pm 0.163$ 、 $- 0.245 \pm 0.267$ 、 $- 0.299 \pm 0.328$   $O_2$ mg/L。

初级生产力在不同水层表现出较大幅度的变异性,其诱发因素是不一样的。上层水体初级生产主要受气象因素、水体表面运动的扰动作用较强,也有来自浮游生物本身的周期性消长;底层水体主要是受水下流场(多向且不定,流速约为 2—5cm/s)的搅动影响。将 22 组各水层的初级生产力测定值进行算术平均,再进行拟合,分别得到初级生产沿物理深度分布的拟合方程:

$$P_G = 0.1013 + 3.1722 e^{-(Z + 1.0966)/2.3148} \quad (0.9987, P < 0.01)$$
 (4)

$$P_N = - 0.242 + 2.8555 e^{-(Z + 1.1888)/2.2328} \quad (0.9944, P < 0.01)$$
 (5)

在公式(5)中,令  $P_N = 0$ , 得到  $z = 4.32\text{m}$ , 即该值附近为光补偿点的位置, 在此物理深度以下的净光合作用为负值。也可以看出物理深度 4—5m 的范围是净初级生产负值初始出现的密集区域。

### 2.3 温度变化

水体温度对初级生产的影响主要是改变参与初级生产的生物体酶活性, 室内实验表明初级生产力与温度之间存在明确的量化关系<sup>[3]</sup>。水温的变化可以通过每日测定各水层的水温来表示沿时间梯度所表现出的水平或垂直的温度变化, 也可以通过计算温度的日增量 ( $T/d$ ) 表示其变化趋势。

沿物理深度表现出的水温变化 22 组数据可以划分为 2 类(图 3), 虚线上方的 A 类 7 组数据代表的是 4 月 10 日之后测定值, 各层水温之间较大的变化; 虚线下方的 B 类 15 组数据代表 4 月 10 日前测定值, 各层水温基本相同。将相同测定组的水温与初级生产数据进行相关性分析总体上并不能表现出显著的相关性, 可能的原因: (1) 测定的水温是瞬时的, 而初级生产则是经过 24h 曝光后的测定值, 初级生产应对的是一段时间内的水温积温变化;

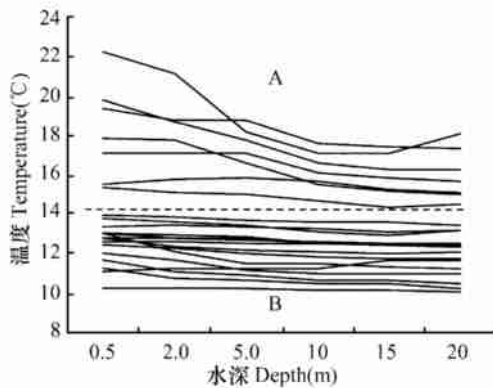


图 3 水温变化

Fig. 3 Variations of water temperature

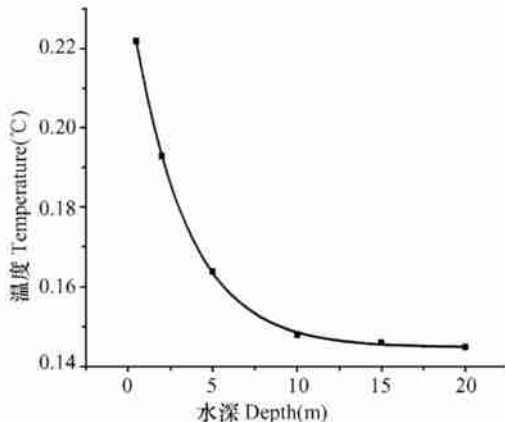


图 4 平均日增水温变化

Fig. 4 Average daily variations of water temperature increment

(2) 上下层水温出现沿物理深度的梯度分化, 主要是来自后期测定值(4 月 10 日以后)的贡献。由于水的热容量较大, 官庄坪测站水深最大可达 60m, 因此库湾水温的升高过程是缓慢、连续的增(减)温过程。所以, 考察水体增温的垂直变化过程更能显示累积增温效应对处于各水层生物体的活性产生的影响。对图 4 所表示的各水层日平均水温增量 ( $T/d$ ) 与平均毛初级生产、净初级生产进行相关性分析, 均表现极显著的相关性 ( $R_G = 0.992$ ,  $P < 0.01$ ;  $R_N = 0.988$ ,  $P < 0.01$ )。

### 2.4 叶绿素

水体的垂直和水平运动, 会阻止浮游生物在某一水层的集聚, 其他对辐照度、叶绿素产生影响的物质也会向周围水体交换。理论上水体叶绿素的变化 ( $\text{Chl. } a/\mu\text{g/L}$ ) 与水柱初级生产力之间应该存在明确的对应关系, 在实际测量的 22 组数据中并不一定出现, 说明了库湾水体环境因素的复杂性。这可能与藻类种类不同、分布不均以及藻类对光的适应和有效利用存在差别有关<sup>[12]</sup>。在对海洋的相关研究中, 用水柱初级生产力除以相应水层的叶绿素浓度可以使初级生产力垂直分布的变异性显著降低<sup>[12]</sup>, 但本研究却未能得到相同的效果(图 5), 叶绿素浓度与一些测量指标(光、温度等)的相关性也不能达到理想状态。

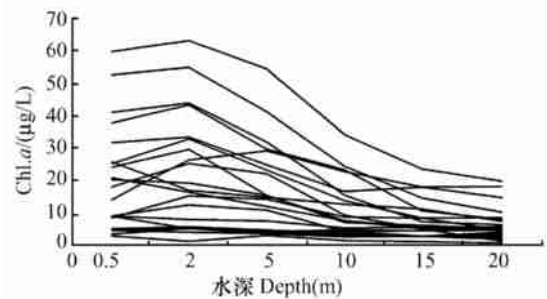


图 5 叶绿素垂直分布

Fig. 5 The vertical distribute of chlorophyll *a*

## 3 讨论

三峡水库蓄水改变了上游水体的空间结构。由于水较深, 不同水层的浮游植物对光能的利用率是不相同的。一般来讲, 水体中表层的浮游植物对光利用效率较低, 而表层下的对光的利用率较高<sup>[12]</sup>。浮游植物对光线的适应主要表现在增加藻体中的叶绿素含量、提高酶的活性等等, 因此辐照度沿物理深度的衰减对各水层的浮游植物光合作用影响较大<sup>[12]</sup>。

官庄坪水体中不同强度的光照对初级生产力有较大的影响(图 6)。随着光强的增加,初期(底层)初级生产力的增量幅度较小;但当光强增加到 50 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ) 以上时,初级生产力的增加幅度加大,这种变化趋势与湖泊是不一样的<sup>[4]</sup>。作者推测这可

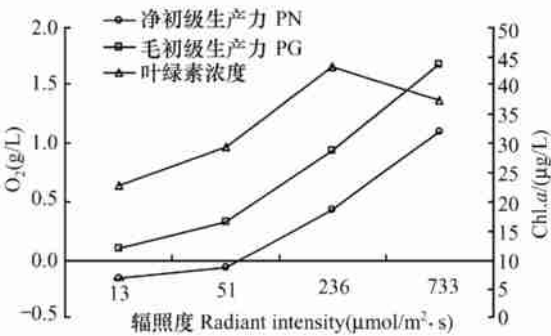


图 6 P-I 实际测量值及叶绿素变化  
Fig.6 The curves on P-I value of actual measure and chlorophyll a

能与官庄坪库湾水体真光层范围广有关。初级生产力的增加速度与本底叶绿素 a 的含量也有较大的关系<sup>[12]</sup>,当光强增加到 240 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ ) 时,叶绿素浓度达到最大值,之后开始下降。叶绿素浓度最大,辐照度和初级生产力均没有达到相应的最大值,说明官庄坪水体中的一些水层存在叶绿素“包裹效应”<sup>[12]</sup>。

对辐照度、毛初级生产力 ( $P_G$ )、净初级生产力 ( $P_N$ )、叶绿素浓度以及水温的 22 组数据采用非参数统计检验中的克鲁斯凯-沃利斯方差分析 (Kruskal-Wallis ANOVA, median test) (表 1),结果除水温之外,均因水层的变化而出现显著的差异。不同水层的水温不存在显著性差异,主要是在 4 月 10 日之前的 17 组数据。所以,在低水温季节,温度的垂直分布对初级生产力的影响不是主要的。

表 1 主要指标随深度变化的方差分析 (Kruskal-Wallis ANOVA, median test)  
Tab.1 Kruskal-Wallis ANOVA, median test of some primary index with water depth

	Kruskal-Wallis test :H	Median Test : $\chi^2$	P
水下辐照度 Underwater radiant intensity	313. 2629	259. 2727	< 0. 01
毛初级生产力 Gross primary production	79. 13397	55. 63636	< 0. 01
净初级生产力 Net primary production	63. 37952	47. 27273	< 0. 01
叶绿素浓度 Chlorophyll a density	26. 69776	21. 09091	< 0. 01
水温 Water temperture	2. 703562	2. 181818	> 0. 05

研究各种环境因子对初级生产力的影响,是定量分析初级生产力变化所必需的。采用一元和多元线性

回归方法分析各主要测量指标平均垂直分布之间的相关性,得到各影响因子与初级生产的回归方程(表 2)。

表 2 初级生产力与主要指标的回归分析  
Tab. 2 The regression analysis on some primary index and primary production

变量 variable	回归方程 regression equation	$R^2$	P
单位叶绿素初级生产力、物理深度 The primary production of units chlorophyll a, depth	$P_G = 0. 2421 - 0. 0363z + 11. 6131 [\text{units Chl. } a]$ $P_N = - 0. 2045 + 0. 0396z + 16. 4919 [\text{units Chl. } a]$	0. 9686 0. 9536	< 0. 01 < 0. 01
水下辐照度 Underwater radiant intensity	$P_G = 0. 2041 + 0. 0031 E(z)$ $P_N = - 0. 1152 + 0. 0025 E(z)$	0. 9813 0. 9588	< 0. 01 < 0. 05
日平均增温 Average daily water temperature increment	$P_G = - 2. 9502 + 19. 6607 T - 0. 0171 [\text{Chl. } a]$ $P_N = - 2. 4935 + 18. 2116 T - 0. 0067 [\text{Chl. } a]$	0. 9729 0. 9227	< 0. 01 < 0. 01
叶绿素浓度 Chlorophyll a density			

叶绿素是藻类光合作用的核心,其浓度的高低决定水体初级生产力水平。辐照度对初级生产力的影响是通过叶绿素实现的。由于存在叶绿素的“包裹效应”,叶绿素与初级生产力之间的垂直分布没有显著的相关性。叶绿素浓度在各水层的变化具有相

同的周期性,均存在 5 个峰值,平均每个周期为 7—10d 左右;初级生产同样也具有周期性地变化,出现峰值的次数与叶绿素相同,但是在时间上不完全同步。从已有的数据尚不能清楚地分析造成叶绿素与初级生产在时间、垂直梯度上变化不一致性的原因。

## 参考文献:

- [1] Falkowski P G, Woodhead A D. Primary productivity and biogeochemical cycles in thesea[M]. New York: Plenum Press, 1992
- [2] Zhu M Y, Mao X H, Lu R H. Chlorophyll *a* and primary productivity in the Yellow Sea[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1993, **11**(3): 38—51 [朱明远, 毛兴华, 吕瑞华. 黄淮海区的叶绿素 *a* 和初级生产力. 黄渤海海洋, 1993, **11**(3): 38—51]
- [3] 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, 陈宇伟, 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]
- [4] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M. Advances and main applications of lake optics research[J]. *Dvances in Water Science*, 2003, **14**(5): 653—659 [张运林, 秦伯强, 陈伟民. 湖泊光学研究动态及其应用. 水科学进展, 2003, **14**(5): 653—659]
- [5] Yang D T, Chen W M, Zhang Y L, *et al.* Optical measurements of primary production in Meiliang Bay[J]. Taihu Lake[J]. *Journal of lake sciences*, 2002, **14**(4): 363—368 [杨顶田, 陈伟民, 张运林, 等. 太湖梅梁湾水体中初级生产力的光学检测. 湖泊科学, 2002, **14**(4): 363—368]
- [6] Kalf J. The utility of latitude and other environmental factors as predictors of nutrients, biomass and production in lakes worldwide: Problems and alternatives [J]. *Verh. int. Ver. Limnol*, 1991, **24**: 1235—1239
- [7] Pollinger U, Berman. T. Phytoplankton composition and activity in lakes of the warm belt[J]. *Verh. int. Ver. Limnol*, 1991, **24**: 1230—1234
- [8] Huang X F, Chen W M, Cai Q M. Survey, observation and analysis of lake ecology [M]. Beijing: Chinese standardization publisher, 1999, 77—108 [黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1999, 77—79]
- [9] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* Analysis on distribution and variation of beam attenuation coefficient of Taihu Lake's water[J]. *Dvances in Water Science*, 2003, **14**(4): 447—453 [张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体光学衰减系数的分布及其变化特征. 水科学进展, 2003, **14**(4): 447—453]
- [10] Kuang Q J, Bi Y H, Zhou G J, *et al.* Study on the phytoplankton in the Three Gorges Reservoir before and after sluice and the protection of water quality [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, **29**(4): 353—358 [况琪军, 毕永红, 周广杰, 等. 三峡水库蓄水前后浮游植物调查及水环境初步分析. 水生生物学报, 2005, **29**(4): 353—358]
- [11] Kuang Q J, Hu Z Y, Zhou G J, *et al.* Investigation on Phytoplankton in Xiangxi River Watershed and the Evaluation of Its Water Quality [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004, **22**(6): 507—513 [况琪军, 胡征宇, 周广杰, 等. 香溪河流域浮游植物调查与水质评价. 武汉植物学研究, 2004, **22**(6): 507—513]
- [12] Han B P, Han Z G, Fu X. The algae photosynthesis mechanism and model[M]. Beijing: Science press, 2003, 150—201 [韩博平, 韩志国, 傅翔. 藻类光合作用机理与模型. 北京: 科学出版社, 2003, 150—201]

## THE DISTRIBUTION OF CHLOROPHYLL A CONTENT AND PRIMARY PRODUCTIVITY IN GUANZHUANGPING BAY OF XIANGXI RIVER

SHAO Xiao-Yang<sup>1,2</sup>, XU Yao-Yang<sup>1</sup>, HAN Xin-Qin<sup>1</sup> and CAI Qing-Hua<sup>1</sup>

(1. Institute of Hydrobiology, The Chinese Academy of Sciences; State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Wuhan 430072;

2. Hangzhou Normal Biology Department, Hangzhou 310036)

**Abstract** Based on the investigations on primary productivity and related factors at one fixed stations in Guanzhuangping Bay of Xiangxi River from February to April 2005, this paper studied the temporal and spatial distribution of chlorophyll *a*, primary productivity, and their relationships with change of ray radiation intensity in water. Although the results showed that there were obvious same periodic change appeared 5 peak value and were 7—10 days interval averagely, not synchronization in chlorophyll *a* and primary productivity in the each layer of water. The true light layer depth that was lied intervenient the lake and ocean, was as 10m water depth or so at Guanzhuangping Bay, the light compensates to order for the 4—5m water depth. The high values of primary productivity were confirmed in 0.5 underwater, and one of chlorophyll *a* content was 2m water depth. The vertical change of water temperature showed that the obvious difference was recorded at latter days. There were significant positive correlation between increment daily average temperature ( $T \cdot d^{-1}$ ) and average gross primary productivity, net primary productivity in every water layer.

The investigation also made us know more about the unique characteristics of the river ecosystem's primary productivity, differ from other types water body in Guanzhuangping Bay of Xiangxi River in Sanxia reservoir. With the strengthen of the strong light, the primary productivity of the initial stage (bottom floor) increases with small extent; when the light strengthen rises to over 50 ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ), the increasing extent of the primary productivity was enlarged. This changing trend was different from that of lakes. The result of 17 group data measured before April 10 showed that the temperature in different water layer does not have significant difference. So, in the low water temperature season, the perpendicularity of the temperature has minor influence on the primary productivity. Because of "enwrapping effect" of the existing chlorophyll, there is no significant relationship between the perpendicularity of chlorophyll and the primary productivity. The chlorophyll density has the same periodic as the variety of each layer of water, both including 5 peak value. The each average period was about 7—10 d; The entry-level produces also have the periodic changes, with the times of existing crests same as that of chlorophyll, yet did not exit at the same time. However, based on the acquired data, we can't clearly analyze the causes of the differences between the varieties of time and the perpendicularity of the chlorophyll and primary producing.

**Key words** : Ray radiation; Chlorophyll *a*; Primary productivity