

## 三峡水库香溪河初级生产力及其影响因素分析\*

张 琪<sup>1,2</sup>, 袁轶君<sup>1,2</sup>, 米武娟<sup>1</sup>, 杨 毅<sup>1</sup>, 毕永红<sup>1\*\*</sup>, 胡征宇<sup>1</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:** 2013—2014 年采用黑白瓶测氧法对香溪河不同站点(上、中、下游及其支流库湾)和不同水深(0.5、1.0、2.0、5.0 和 10.0 m)的初级生产力进行原位测定. 结果显示:(1) 三峡水库蓄水后香溪河水域初级生产力具有显著的空间差异, 支流和上游的总初级生产力大于中、下游, 下游的初级生产力水平最低; 初级生产力随着水深增加呈现逐渐减少的趋势;(2) 初级生产力具有显著的季节差异, 春、夏季显著高于秋、冬季;(3) 光照强度、水温 and 天气对初级生产力有显著影响, 水体叶绿素浓度与初级生产力极显著相关. 结果显示, 蓄水后改变的水文情势将香溪河的初级生产划分为明显不同的两个区域, 水动力条件成为影响初级生产力的重要因子; 依据初级生产力判断香溪河为富营养、自养代谢型水体.

**关键词:** 香溪河; 三峡水库; 初级生产力; 浮游植物; 黑白瓶法

## Primary production and its influencing factors in Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir

ZHANG Qi<sup>1,2</sup>, YUAN Yijun<sup>1,2</sup>, MI Wujuan<sup>1</sup>, YANG Yi<sup>1</sup>, BI Yonghong<sup>1</sup> & HU Zhengyu<sup>1</sup>

(1: Key Laboratory of Algal Biology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China)

**Abstract:** The dark and light bottle method of oxygen measurement was adopted to determine the primary production at different sites and different water depths (0.5, 1.0, 2.0, 5.0 and 10.0 m) in Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir during 2013 and 2014. 4 sites were located in the upper reaches (PYK), the middle reaches (XK), the anabranch (WJW) and the lower reaches (HK), respectively. There was a significant spatial difference in phytoplankton primary production. The gross primary production of the anabranch on the upper reaches was much higher than that on the middle reaches, but the least gross primary production appeared at the lower reaches. With the increase of the depth of the water, the primary production increased at 0–2 m depth, and then decreased at >2 m water depth. The primary production showed a significant seasonal variation. The light intensity, water temperature and weather have influenced the primary production of Xiangxi River significantly. There is a close relationship between the primary production and chlorophyll-a. It could be concluded that hydraulic regime was the important factor to influence the primary production and divided Xiangxi River into two different parts. Based upon the primary production, Xiangxi River was eutrophic with autotrophic metabolism.

**Keywords:** Xiangxi River; Three-Gorges Reservoir; primary production; phytoplankton; dark and light bottle method

初级生产力是指绿色植物利用太阳能进行光合作用, 把无机碳固定并转化成有机碳的能力<sup>[1]</sup>. 水体初级生产力是指单位水域在单位时间内生产有机物的能力, 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动态变化具有重要意义<sup>[2]</sup>. 早在 1960s—1970s, 国内外就有关于水体初级生产力的报道, Goulder<sup>[3]</sup> 研究了淡水生态系统中水生植物和浮游藻类初级生产效率的相互作用关系, Lewis 等<sup>[4]</sup> 和 Schindler<sup>[5]</sup> 分别研究了不同淡水水体的初级生产力水平, 证实光强、水温、透明度、叶绿素 a (Chl. a) 含量等对水体初级生产力有一定影响<sup>[6]</sup>. 对河流的初级生产力的研究一般都局限于直接用黑白瓶法或<sup>14</sup>C 法测定河流初级生

\* 中国长江三峡集团公司科研项目 (CT-12-08-01) 和国家自然科学基金项目 (31123001) 联合资助. 2014-05-27 收稿; 2014-10-11 收修改稿. 张琪 (1987~), 女, 硕士研究生; E-mail: taoqi\_zhang@gmail.com.

\*\* 通信作者; E-mail: biyh@ihb.ac.cn.

产力,Ogbuagu 等用黑白瓶测氧法对尼日利亚叶默河的研究显示,低营养盐和高浊度是河流初级生产力较低的直接原因,因为较高的浊度影响了水体中浮游植物的光合作用<sup>[7]</sup>. Sukla 等对印度 Birupa 河的水温、透明度和降雨量的研究表明,雨季初级生产力与水温有显著相关性<sup>[8]</sup>. 王骥等<sup>[9]</sup>曾对东湖浮游植物初级生产力进行过详细研究,分析初级生产力与主要生态因素的关系,探讨浮游植物与鲢、鳙之间相互作用,初步评价东湖富营养化进程. 对盐碱池塘浮游植物生产力的研究表明,浮游植物现存量、透明度、水温、盐度是决定盐碱池塘浮游植物初级生产力的主要生态因子,同时也探讨了养鱼池初级生产力在能量转化中的生态学效率<sup>[10]</sup>. 初级生产力可用来评价水体营养类型,对水生生态系统状况和环境质量具有指示作用<sup>[11]</sup>,同时也可估算渔产潜力.

三峡水库蓄水后,香溪河下游河段水位随之升高,水流减缓,水环境由典型的河流水体转变为类似湖泊的缓流水体<sup>[12]</sup>. 香溪河水文情势在大坝蓄水后显著改变,水文情势的改变对河流生态系统的结构和功能具有强烈冲击,但当前缺乏对变化的河流生态系统结构和功能的相关研究<sup>[6,13]</sup>,为深入认识蓄水后的支流水域生态系统,有必要对初级生产力等内容开展相关研究. 本研究对三峡库区支流香溪河 2013—2014 年度初级生产力进行原位观测研究,主要目的为:(1) 阐述香溪河水文情势改变后初级生产力的时空特征;(2) 探讨引起香溪河浮游植物初级生产力时空分布特性变化的主要影响因素. 本研究对香溪河库湾水环境状况进行科学评价具有重要的现实意义,为三峡水库水环境保护和水华防治及渔业评估提供一定的依据和参考,进一步揭示香溪河湖沼学特征.

## 1 材料与方法

### 1.1 样点设置

香溪河(30°57'~31°34'N,110°25'~111°06'E)发源于神农架林区,于秭归县香溪镇东注入长江,距离三峡大坝 38 km. 全长 94 km,流域面积为 3099 km<sup>2</sup>,拥有九冲河、古夫河、高岚河 3 条主要支流,河流经地多为深山峡谷,自然落差 1540 m,水能资源十分丰富,年径流量  $19.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[13]</sup>. 香溪河是三峡水库蓄水后最先受到影响的大型支流水域;本研究在香溪河设定 4 个监测样点,分别位于香溪河下游(HK)、香溪河中游(XK)、香溪河上游(PYK)和香溪河支流(WJW)(图 1). PYK 样点:接纳大量的生活污水,枯水期最低水位时水深在 15 m 左右;XK 样点:处于香溪河中段,接纳大量生活污水和采矿废水污染,枯水期最低水位时,水深约 30 m 左右;HK 样点:采样点离长江口 2 km 左右,为长江干流与支流的交汇水域,枯水期最低水位时,水深约 70 m 左右;WJW 样点:位于香溪河支流高岚河中游,水深约为 15 m 左右,能较好地反映支流的水体情况. 样点设置充分考虑了河流的物理形态,依据地形设置上、中、下游和支流样点,可以充分体现河流不同水域初级生产力的具体情况;同时,考虑到上、下游不同水动力学特点,PYK 样点一方面接受流域来水,一方面受到三峡蓄水造成的干流来水倒灌的影响,水体中的藻类生物量较大;WJW 样点的情况与 PYK 样点类似,具备相同的水动力条件和藻类分布特性;XK 样点尽管依然同时受到上游来水和干流倒灌的影响,但相对而言,干流倒灌水量较上游来水要大得多,存在两种水动力叠加的影响;HK 样点主要受干流倒灌的影响,水动力条件单一,藻类生物量相对偏低.

### 1.2 监测指标与测定方法

监测指标有初级生产力、Chl. a、水温、光照强度、溶解氧(DO)、pH 值、透明度(SD)等;用黑白瓶测氧

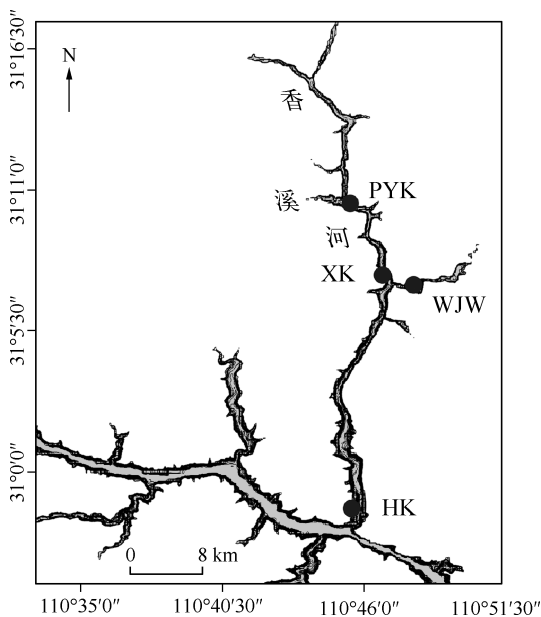


图 1 香溪河研究样点分布

Fig. 1 The sampling sites in Xiangxi River

法<sup>[14]</sup>对不同水深(0.5、1.0、2.0、5.0和10.0 m)的初级生产力进行测定. 每层设置1个对照、2个白瓶和2个黑瓶,均为250 ml溶解氧瓶,用5 L采水器在对应水层取水灌瓶,灌瓶时确保完全排空瓶内空气,黑白瓶曝光时间为24 h,起瓶时用碱性碘化钾和硫酸锰现场固定;用碘量法测定DO含量. Chl. a的测量采用分光光度法<sup>[15]</sup>,不同水层的水温、pH和DO用YSI Proplus多参仪(USA)测定,水面和水下分层光强用LI-1400照度计(USA)测定,SD用萨氏盘测定.

在2013—2014年分4个季节开展原位监测,其中为分析水平分布特征设置了5次对照,分别在同一天测定上游与中游、上游与支流、中游与下游、中游与支流、下游与支流的初级生产力;为分析香溪河浮游植物初级生产力日变化情况,在2013年8月6日对支流WJW样点进行分时间段采样测定,曝光时间分别为6:00—9:00、9:00—12:00、12:00—15:00、15:00—18:00、18:00—21:00,起瓶的同时悬挂另一组黑白瓶并同步现场记录不同水层的水温、pH、DO、光照强度等参数,对初始瓶和所取黑白瓶进行现场固定,并及时测定DO含量.

1.3 数据分析与计算

1.3.1 DO浓度的计算 DO(mg/(L·d))采用碘量法测定,计算公式为:

$$DO = \frac{c_{Na_2SO_4} \cdot V_{Na_2SO_4} \times 8 \times 1000}{V} \tag{1}$$

式中, $V_{Na_2SO_4}$ 为滴定水样时消耗的硫代硫酸钠溶液的体积(L),8为氧(1/2O)的摩尔质量(g/mol), $V$ 为所取水样的体积(ml), $c_{Na_2SO_4}$ 为标定好的标准硫代硫酸钠的浓度(mol/L).

1.3.2 水柱日生产力的计算 水柱日生产力 $P_i$ (g O<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·d))用水柱日生产量来表示,水柱日生产量指1 m<sup>2</sup>水面下,从水表面一直到水底整个柱形水体的生产量.用算术平均值累加法计算,公式为:

$$P_i = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_i + P_{i+1}}{2} (D_{i+1} - D_i) \tag{2}$$

式中, $P_i$ 为第*i*层初级生产力(g/(m<sup>3</sup>·d)), $D_i$ 为第*i*层深度(m), $n$ 为取样层次( $1 \leq i \leq n-1$ )<sup>[16]</sup>.

1.3.3 统计分析方法 数据分析采用SPSS 20.0(USA)进行*t*检验、Pearson相关性分析、回归分析等.图像绘制采用Origin 9.0.

2 结果与分析

2.1 初级生产力

2.1.1 空间分布 初级生产力随水深的变化趋势基本一致(表1);总初级生产力和净初级生产力最大值都出现在水深0.5 m处,并随水深增加呈现下降趋势,最小值出现在水深10.0 m处;2003—2004年不同样点总初级生产力随水深的变化趋势与此相同(图2a);初级生产力的水平分布为:支流>上游>中游>下游.为验证水平分布特性,本研究还设置了5组对照实验,分别在不同的两个样点同时测定,确认初级生产力的水平分布具有“支流>上游>中游>下游”的特征(图2b).

表1 香溪河不同水层总初级生产力、净初级生产力和呼吸作用的年分布  
Tab. 1 The annual distribution of gross primary production, net primary production and respiration at different water depths in Xiangxi River

水深/m	总初级生产力/(g O <sub>2</sub> /(m <sup>3</sup> ·d))	净初级生产力/(g O <sub>2</sub> /(m <sup>3</sup> ·d))	呼吸量/(g O <sub>2</sub> /(m <sup>3</sup> ·d))
0.5	3.06 ± 3.18	1.58 ± 1.97	1.49 ± 1.75
1.0	2.19 ± 1.88	0.96 ± 1.39	1.23 ± 1.49
2.0	1.03 ± 0.74	0.037 ± 0.79	0.99 ± 0.72
5.0	0.34 ± 0.34	-0.35 ± 0.78	0.69 ± 0.77
10.0	0.16 ± 0.15	-0.28 ± 0.41	0.45 ± 0.38

2.1.2 时间分布 初级生产力时间分布特性的研究具体体现在:一天当中初级生产力随时间变化情况;不同

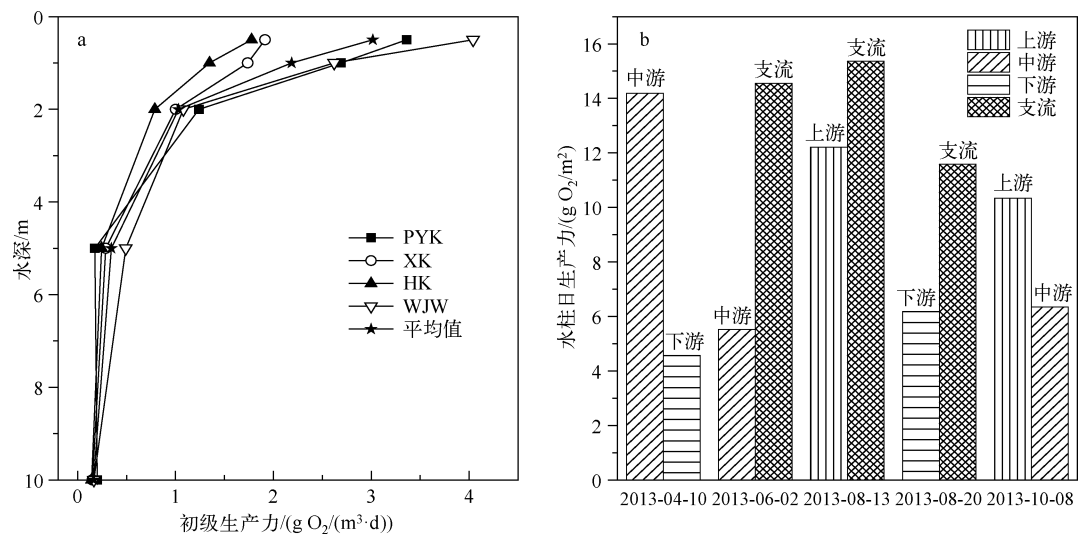


图 2 香溪河初级生产力的空间分布情况(a:不同采样点初级生产力的垂直分布;  
b:初级生产力的水平分布)

Fig. 2 The spatial distribution of primary production of Xiangxi River(a: the vertical distribution of primary production at different sampling sites; b: the horizontal distribution of primary production)

季节初级生产力的差异.

对 2013 年 8 月 6 日支流 WJW 样点初级生产力日变化情况进行监测发现,一天中初级生产力先增加,在中午达到顶峰,然后逐渐减少,最大值出现在 12:00—15:00,并随时间推移呈现下降趋势(图 3a);初级生产力与光强呈显著相关( $P < 0.05$ ).

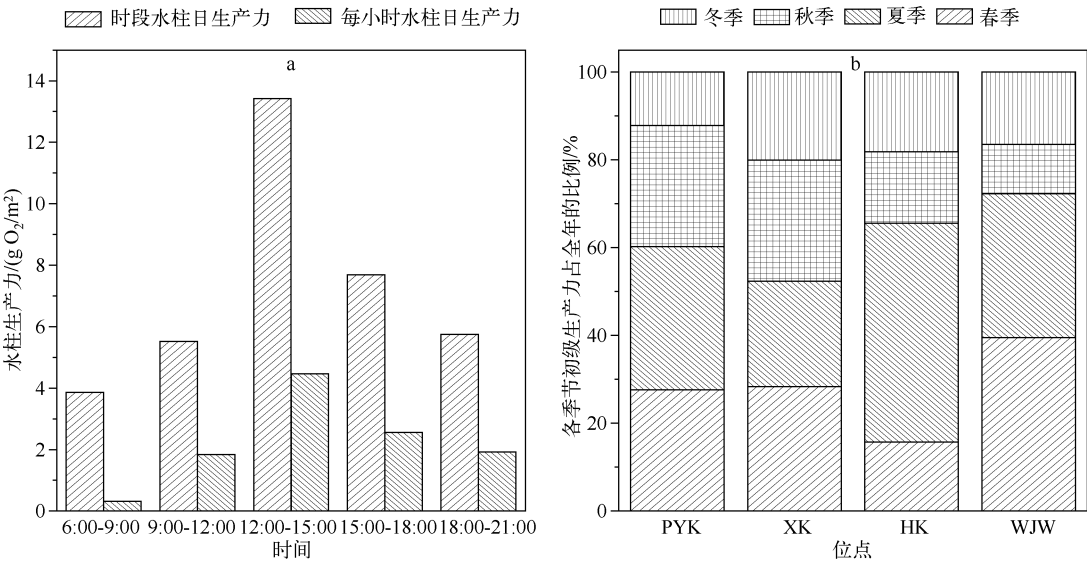


图 3 香溪河初级生产力的时间分布(a:WJW 点位一天不同时段初级生产力分布情况;  
b:各季节初级生产力占全年的百分比)

Fig. 3 The temporal distribution of primary production of Xiangxi River (a: the daily distribution of primary production at WJW; b: the seasonal distribution of primary production at different sampling sites)

上游 PYK 样点 4 个季节的初级生产力分别占全年的 27.61%、32.62%、27.61%、12.15%；中游 XK 样点 4 个季节的初级生产力分别占全年的 28.38%、23.98%、27.57%、20.08%；下游 HK 样点 4 个季节的初级生产力分别占全年的 15.71%、49.87%、16.30%、18.13%；支流 WJW 样点 4 个季节的初级生产力分别占全年的 39.49%、32.83%、11.22%、16.46% (图 3b)。根据配对样本  $t$  检验,不同季节的初级生产力有显著性差异,春季显著高于秋季( $P=0.04<0.05$ )和冬季( $P=0.001<0.05$ ),夏季显著高于秋季( $P=0.001<0.05$ )和冬季( $P<0.001$ ),而春季和夏季无显著性差异( $P>0.05$ ),秋、冬两季也无显著差异( $P>0.05$ )。

表 2 不同天气香溪河初级生产力的分布情况

Tab. 2 The primary production of Xiangxi River on sunny day or rainy day

指标	水深/m	晴天	阴雨
初级生产力/(mg O <sub>2</sub> /(m <sup>3</sup> ·d))	0.5	7.8736	2.2344
	1.0	4.5752	1.1704
	2.0	0.9044	0.0532
	5.0	0.6384	0.4788
水柱日生产力(mg O <sub>2</sub> /(m <sup>2</sup> ·d))		11.5843	3.3782

小平均值都出现在 10 m 处(图 4a);在水平方向,上游 Chl. a 含量极显著高于中游( $P=0.006<0.01$ )和下游( $P=0.005<0.01$ ),支流 Chl. a 含量显著高于中游( $P=0.026<0.05$ )和下游( $P=0.03<0.05$ ),支流和上游 Chl. a 含量无显著差异( $P>0.05$ ),中游与下游 Chl. a 含量无显著差异( $P>0.05$ )。即 Chl. a 含量的水平分布为:上游>中下游,支流>中下游(图 4b)。

香溪河上游水柱 Chl. a 含量最大值出现在春季,为 477.75 mg/m<sup>2</sup>;中游 Chl. a 含量最大值出现在夏季,为 156.32 mg/m<sup>2</sup>;下游 Chl. a 含量最大值出现在夏季,为 161.60 mg/m<sup>2</sup>,支流 Chl. a 含量最大值出现在夏季,为 380.83 mg/m<sup>2</sup>(图 4b)。通过配对样本  $t$  检验,不同季节 Chl. a 含量存在显著差异,夏季水体中 Chl. a 含量显著高于春季( $P<0.05$ ),春季极显著高于秋季( $P<0.01$ ),秋季极显著高于冬季( $P<0.01$ ),即 Chl. a 的季节分布为:夏季>春季>秋季>冬季。

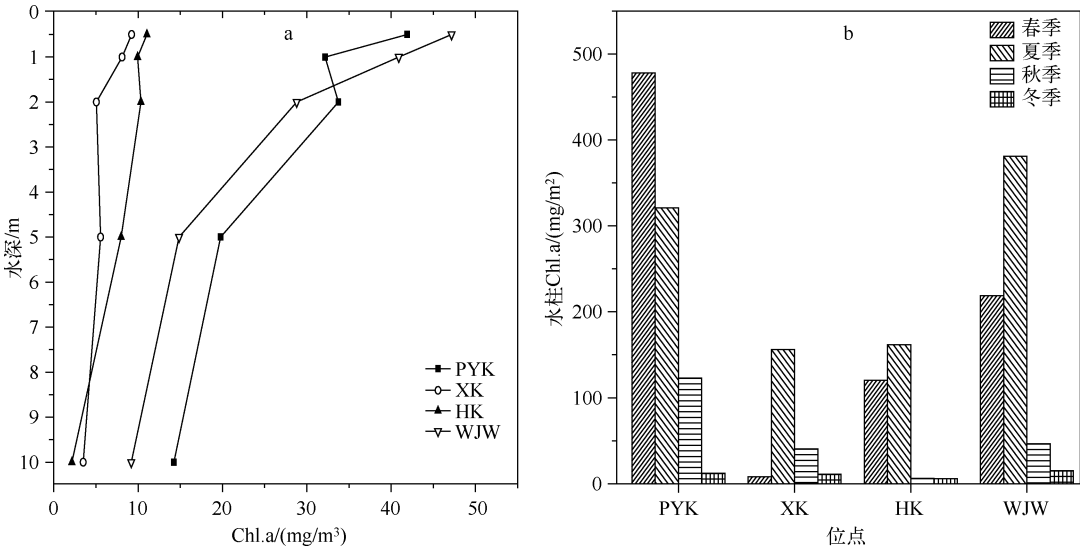


图 4 香溪河 Chl. a 的分布情况(a:不同季节的分布情况;b:垂直分布情况)

Fig. 4 The distribution of chlorophyll-a in Xiangxi River (a: seasonal distribution; b: vertical distribution)

2.3 环境因子

对香溪河 4 个采样位点的水温、光强、pH 值、SD 和水体 DO 进行了同步测定,结果见表 3. 水温、光强和 DO 随水深增加显著降低( $P < 0.05$ ). 不同水层的 pH 值有显著差异( $P < 0.05$ ),而不同采样点的 pH 值没有显著差异( $P > 0.05$ ). 表层水体 Chl. a 与环境因子的季节分布见表 4,夏季水温最高,冬季最低;DO 在春季最高,夏季次之,秋季最低. pH 值随季节变化在 8.44~9.28 间波动. SD 与 Chl. a 含量呈显著负相关( $P < 0.05$ ).

表 3 香溪河环境因子的空间分布状况  
Tab.3 The spatial distribution of different environment factors in Xiangxi River

	水深/m	水温/℃	DO/(g/m <sup>3</sup> )	pH	光照强度/(μmol/(m <sup>2</sup> ·s))	SD/m
上游 PYK	0.5	26.95 ± 3.73	8.59 ± 5.67	8.57 ± 0.18	94.14 ± 113.55	1.62 ± 1.15
	1	25.98 ± 2.00	8.10 ± 5.64	8.64 ± 0.32	45.77 ± 60.34	
	2	25.48 ± 2.10	7.06 ± 4.10	8.65 ± 0.30	12.09 ± 12.89	
	5	24.63 ± 2.75	6.25 ± 3.22	8.61 ± 0.27	1.09 ± 1.10	
	10	22.60 ± 3.12	5.57 ± 3.82	8.47 ± 0.19	0.003 ± 0.006	
中游 XK	0.5	21.38 ± 3.80	7.25 ± 3.68	8.36 ± 0.14	163.95 ± 121.36	2.08 ± 0.78
	1	21.32 ± 3.84	7.01 ± 3.67	8.37 ± 0.12	119.72 ± 96.15	
	2	21.28 ± 3.84	6.73 ± 3.26	8.37 ± 0.12	59.05 ± 53.42	
	5	21.18 ± 3.89	6.47 ± 3.02	8.37 ± 0.11	9.00 ± 9.07	
	10	20.76 ± 4.28	5.76 ± 2.25	8.36 ± 0.09	0.95 ± 1.23	
下游 HK	0.5	24.46 ± 5.71	6.97 ± 1.80	8.72 ± 0.43	266.47 ± 82.86	2.14 ± 1.02
	1	24.22 ± 5.53	7.07 ± 2.22	8.67 ± 0.41	161.10 ± 31.38	
	2	23.94 ± 5.32	6.64 ± 1.65	8.61 ± 0.34	70.20 ± 36.15	
	5	23.58 ± 5.04	5.76 ± 0.51	8.45 ± 0.27	9.76 ± 7.73	
	10	23.34 ± 5.27	5.47 ± 0.52	8.34 ± 0.09	0.93 ± 1.15	
支流 WJW	0.5	24.55 ± 4.55	7.74 ± 3.89	8.68 ± 0.25	127.10 ± 130.29	1.92 ± 1.2
	1	24.45 ± 4.54	7.77 ± 3.86	8.60 ± 0.18	58.92 ± 42.68	
	2	24.07 ± 4.55	7.14 ± 2.80	8.57 ± 0.15	23.15 ± 23.02	
	5	23.37 ± 4.38	6.08 ± 1.89	8.53 ± 0.12	4.49 ± 6.42	
	10	20.54 ± 4.99	6.52 ± 2.46	8.47 ± 0.10	0.26 ± 0.30	

表 4 香溪河水柱 Chl. a 与环境因子的季节变化  
Tab.4 Seasonal distribution of environmental factors and chlorophyll-a concentration in Xiangxi River

季节	DO/(mg/L)	pH 值	光照强度/(μmol/(m <sup>2</sup> ·s))	SD/m	水柱 Chl. a/(mg/m <sup>2</sup> )	水温/℃
春季	9.18	8.44	129.04	2.1	218.9581	23.2
夏季	7.86	8.59	22.11	1.0	380.8258	28.9
秋季	6.47	9.07	51.24	2.6	46.4652	23.4
冬季	7.15	9.28	33.82	3.0	15.0859	16.3

3 讨论

3.1 香溪河初级生产力的时空格局及其影响因素

三峡大坝蓄水前长江上游水位为 64 m,2003 年蓄水至 135 m,2006 年 10 月蓄水至 156 m,2010 年完成 175 m 蓄水. 蓄水前,香溪河为典型的山涧溪流,河流最宽和最深处均在河口,宽不足 30 m,深不过 10 m,自中游往上游,水深不足 1 m,流速最高可达到 1.5 m/s 以上,水体清澈透明,生产力低. 蓄水后,作为长江上游主要支流之一的香溪河水文情势发生显著改变:河口水深达到近 90 m,河面宽度增加到 1000 多米,流速锐减到不足 0.2 m/s;同时,上、中、下游水体存在显著不同的水文情势,上游依然保持河流态,存在一定的流速,中、下游流速较小,演变成为典型库湾,频繁发生水华<sup>[17]</sup>. 从初级生产力的水平分布格局来看,香溪河浮游植物

初级生产力表现为支流 > 上游 > 中游 > 下游, 空间差异主要是由水文情势差异造成的. 不同水文情势主导了水体不同的营养盐结构和传质效率, 同时对水体的光学特性和温度结构存在显著影响<sup>[18]</sup>, 导致初级生产力显著的空间差异. 从本文结果来看, 河流上游与河流支流具有类似的水文情势, 均显著受到流域来水的影响, 而河流中下游则属于另外一种水文情势, 主要受到干流倒灌的影响, 这样的水文分异直接影响到水体的初级生产力, 导致河流上游和支流的初级生产力与中下游存在显著差异.

浮游植物的生产力受其赖以生存的理化环境制约, 本研究中, 香溪河初级生产力的最大值出现在水下 0.5 m 处, 并沿水深逐渐降低, 与邵晓阳等的研究结果一致<sup>[6]</sup>. 湖北浮河桥水库水体初级生产力最大值也出现在表层水体, 占水柱日生产力的 53.81%<sup>[11]</sup>. 表层水体初级生产力占据水柱初级生产力的较大比例, 与表层水体 Chl. a 含量具有密切关系, 本研究中表层水体 Chl. a 含量占水柱 Chl. a 的 32%, 统计分析确认 Chl. a 含量与水体初级生产力间存在极显著的相关关系 ( $P < 0.01$ ); 周伟华等<sup>[19]</sup>的研究也显示表层水体 Chl. a 含量最高, 春、夏季几乎占据水柱 Chl. a 含量的 50%, 叶绿素的分布在一定程度上决定了初级生产力的格局. 对初级生产力与水温、水体 DO、pH、光照强度、Chl. a 含量等进行 Pearson 相关性分析, 结果显示, 初级生产力与 Chl. a 含量、水温、光照强度、DO 呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ). 通过 SPSS 20.0 拟合水柱日生产力与水柱 Chl. a 含量的关系方程为:  $y = -4.219 + 2.772 \lg x$  ( $r = 0.78$ ,  $n = 20$ ,  $P < 0.0001$ ), 其中  $y$  为水柱日生产力,  $x$  为水柱 Chl. a 含量. 水体 Chl. a 含量能用于核算水体初级生产力, 在很多文献中都得到应用, 例如 Arst 等<sup>[20]</sup>和 Kauera 等<sup>[21]</sup>在研究中主要使用 Chl. a 含量、太阳辐照度和光衰减系数等参数, 对浅水湖泊的初级生产力进行估算, 结果显示初级生产力受入射光强的显著影响, 而入射光强度又受入射角度和天气情况 (多云或无云) 的直接影响. 天气对初级生产力的影响在于晴天光照强度较强, 能量充足, 光合作用和初级生产旺盛; 阴雨天气光照强度弱, 能量不足, 光合作用和初级生产相对较弱.

不同季节初级生产力水平亦有明显差异. 淀山湖浮游植物初级生产力季节变化表现为夏季 > 冬季 > 春季 > 秋季, 分布特性可能跟浮游植物群落结构和优势种更替有较大关系<sup>[22]</sup>. 对湖北浮河桥水库的研究表明, 初级生产力季节分布表现为秋季 > 夏季 > 春季 > 冬季, 与浮游植物 Chl. a 含量和生物量的季节变化一致<sup>[11]</sup>. 而本研究显示, 香溪河浮游植物初级生产力的季节分布表现为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 与 Chl. a 浓度的分布一致. 研究表明, 印度 Birupa 河<sup>[8]</sup>浮游植物初级生产力最大值也出现在夏季. 初级生产力的季节性差异主要是由光照、温度等季节性特征导致, 春季表层水温升高, 光照强度较冬季逐渐增强, 夏季变温层位置下移, 而香溪河浮游植物主要集中在水体上层, 适宜的环境因子是春、夏季初级生产力高的主要原因. 冬季水体为等温状态, 而且水温低、光强弱, 浮游植物处于休眠越冬期, 光照和水温限制其生长, 即使水体中的营养盐浓度与其他季节相差不大, 但水体初级生产力依然最低.

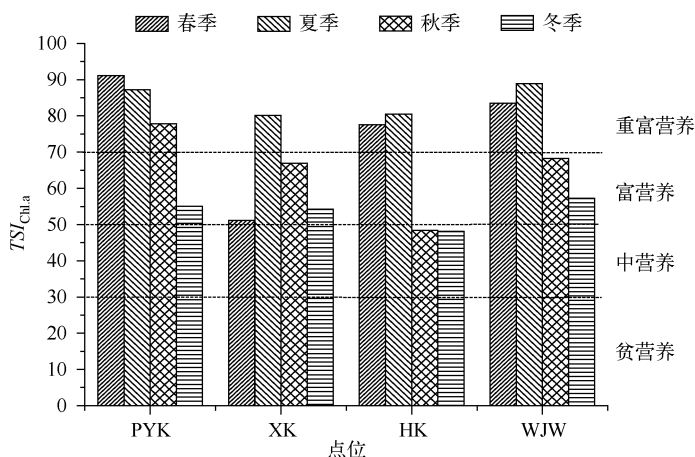
香溪河浮游植物初级生产力日变化的研究与盐碱池塘<sup>[14]</sup>和太湖梅梁湾<sup>[23]</sup>的日变化研究结果相似, 初级生产力在一天当中的变化趋势为先增加, 在中午达到顶峰, 然后逐渐减少. 在同一天同一点的浮游植物生物量和水温没有太大变化, 初级生产力的日变化主要是由于光合作用是初级生产力的基础<sup>[24]</sup>, 光照强弱直接影响光合作用速率, 从而导致黑白瓶内 DO 含量不同, 光照强度的日变化是导致初级生产力日变化的主要原因.

### 3.2 香溪河的初级生产力及其营养状况

三峡大坝蓄水后, 库湾和部分支流污染加重, 出现富营养化现象. 富营养化不仅给库区社会、经济 and 环境的可持续发展造成严重影响, 并将最终影响到三峡工程各项预期服务目标的实现<sup>[25]</sup>. Winberg 根据前苏联湖泊的测定资料, 提出最高水柱日生产  $O_2$  量为  $2.5 \sim 7.5 \text{ g/m}^2$  的湖泊属于富营养湖泊. 对于湖泊, 王骥认为该项指标较为恰当<sup>[26]</sup>. 本研究中测得香溪河的最高水柱日生产  $O_2$  量为  $17.1304 \text{ g/m}^2$ , 远远高于富营养湖泊的标准, 可以认为香溪河水体属于重度富营养水体.

按照卡尔森综合营养状态指数法 ( $TSI$ ), 根据 Chl. a 计算得到不同位点的  $TSI_{\text{Chl. a}}$  指数 (图 5).  $TSI_{\text{Chl. a}}$  指数表明香溪河常年处于富营养状态, 上游和支流常年处于重富营养状态. 直接用初级生产力数据判断水体营养状况与采用  $TSI$  计算结果基本一致, 说明初级生产力可以作为水体营养状况指标评价水体营养状况.

总初级生产力与生物呼吸耗氧的比值 ( $P_g/R$ ) 称为群落代谢率, 是反映水生态系统的重要指标. 通常  $P_g/R < 1$  表明生态系统以异养生产为主, 为异养代谢型水体,  $P_g/R > 1$  表明水体以自养过程为主, 为自养代

图 5 香溪河不同季节各点位的  $TSI_{Chl.a}$  指数Fig. 5 Seasonal  $TSI_{Chl.a}$  values derived by chlorophyll-a at different stations in Xiangxi River

谢型水体。一般在贫营养和中营养湖泊中  $Pg/R < 1$ , 在富营养湖泊中  $Pg/R > 1$  [27]。河流生态系统不同于湖泊生态系统, Grace 等认为在河流生态系统中  $Pg/R > 1$  为自养型, 当  $Pg/R < 0.5$  时为异养型河流,  $0.5 < Pg/R < 1$  的河流介于自养型和异养型之间。香溪河上游 PYK、中游 XK、下游 HK 和支流 WJW 各位点  $Pg/R$  分别为  $1.24 \pm 0.58$ 、 $1.17 \pm 0.60$ 、 $1.45 \pm 1.03$  和  $1.49 \pm 0.70$ , 均表现为自养代谢型水体。

#### 4 结论

香溪河初级生产力在垂直方向表现为沿水深逐渐降低, 在水平方向表现为支流 > 上游 > 中游 > 下游, 水文情势导致初级生产力明显分为上游与支流区域、中下游区域; 不同季节具有显著差异, 春、夏季显著高于秋、冬季节。初级生产力的分布与水体叶绿素 a 含量的分布直接相关, 主要受理化因子如水温、光照、营养盐等因素的影响。香溪河的水柱日生产力常年维持在较高水平,  $TSI$  指数显示其属于富营养型河流,  $Pg/R$  值显示为自养代谢型水体。

#### 5 参考文献

- [1] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1995.
- [2] Odum HT. Primary production in flowing waters. *Limnology and Oceanography*, 1956, **1**(2): 102-117.
- [3] Goulder R. Interactions between the rates of production of a freshwater macrophyte and phytoplankton in a pond. *Oikos*, 1969, **20**(2): 300-309.
- [4] Lewis Jr WM. Primary production in the plankton community of a tropical lake. *Ecological Monographs*, 1974, **44**(4): 377-409.
- [5] Schindler D. Factors regulating phytoplankton production and standing crop in the world's freshwaters. *Limnology and Oceanography*, 1978, **30**(1): 478-486.
- [6] 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): 95-99.
- [7] Ogbuagu DH, Ayoade AA. Estimation of primary production along gradients of the middle course of Imo River in Etche, Nigeria. *International Journal of Biosciences*, 2011, **1**(4): 68-73.
- [8] Sukla B, Patra A, Panda R. Primary production in River Birupa, India. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 2013, **83**(4): 593-602.
- [9] 刘建康. 东湖生态学研究. 北京: 科学出版社, 1990.
- [10] 赵 文, 董双林, 李德尚等. 盐碱池塘浮游植物初级生产力的研究. 水生生物学报, 2003, **27**(1): 47-54.
- [11] 朱爱民, 刘家寿, 胡传林等. 湖北浮桥水库浮游植物初级生产力及其管理. 湖泊科学, 2007, **19**(3): 340-344.



- [12] 谭路, 蔡庆华, 徐耀阳等. 三峡水库 175 m 水位试验性蓄水后春季富营养化状态调查及比较. 湿地科学, 2010, **8**(4): 331-338.
- [13] 马丽娜, 毕永红, 胡征宇. 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**(1): 123-128.
- [14] 赵文, 董双林, 张兆琪等. 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.
- [15] 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. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 黄祥飞, 孙鸿烈, 刘光菴. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [17] 胡征宇, 蔡庆华. 三峡水库蓄水前后水生态系统动态的初步研究. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 1-6.
- [18] Thorsten W, Murugesu S, ATP *et al.* The future of hydrology: An evolving science for a changing world. *Water Resources Research*, 2010, **46**: W05301.
- [19] 周伟华, 袁翔城, 霍文毅等. 长江口邻域叶绿素 a 和初级生产力的分布. 海洋学报, 2004, **25**(3): 143-150.
- [20] Arst H, Nöges T, Nöges P *et al.* In situ measurements and model calculations of primary production in turbid waters. *Aquatic Biology*, 2008, **3**(1): 19-30.
- [21] Kauera T, Arst H, Nöges T *et al.* Development and application of a phytoplankton primary production model for well-mixed lakes. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2013, **62**(4): 267-276.
- [22] 汪益娣, 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.
- [23] 张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 太湖梅梁湾春季浮游植物初级生产力. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 81-86.
- [24] Sukla B, Patra A, Panda R. Primary production in River Birupa, India. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 2013, **83**(4): 593-602.
- [25] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 7-11.
- [26] 刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999.
- [27] Giorgio PAD, Peters RH. Balance between phytoplankton production and plankton respiration in lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1993, **50**(2): 282-289.