

# 基于高频溶氧的浮游植物初级 生产力季节变化及驱动因子 ——以神农南坡香溪河库湾为例

朱永锋<sup>1, 2</sup> 谭路<sup>1</sup> 蔡庆华<sup>1</sup> 叶麟<sup>11</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,

湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**【摘要】:** 2017年7月至2018年6月, 利用高频溶氧仪直接获取水体溶解氧数值的方法估算了香溪河浮游植物初级生产力的状况, 探讨了香溪河浮游植物初级生产力季节变化及其驱动因子。结果表明: 一年四季当中初级生产力(GPP、NPP、R)数值大小趋势均一致, 都为夏季最高, 春季次之, 随之是秋季, 最后冬季最低, GPP、NPP、R在四季之间均存在显著差异(Mann-Whitney U检验,  $P < 0.001$ )。GPP变化范围为 $0.04 \sim 24.28 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ; NPP变化范围为 $-3.78 \sim 4.92 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ; R变化范围为 $0.01 \sim 16.87 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 。广义线性模型结果表明: 叶绿素a(Chl a)、总氮(TN)与总初级生产量(GPP)存在正相关关系, 而可溶性硅(DSi)与总初级生产量(GPP)则是负相关关系; 叶绿素a(Chl a)、水温(WT)与呼吸消耗量(R)存在正相关关系, 而可溶性硅(DSi)与呼吸消耗量(R)则是负相关关系; 没有发现与净初级生产量(NPP)显著相关的变量。

**【关键词】:** 总初级生产量 呼吸消耗量 浮游植物 大型水库

**【中图分类号】:** Q948.8 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)06-1472-08

水体初级生产力是水域生态系统的重要功能之一, 其代表了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, 是水域生态系统物质循环和能量流动以及食物网和渔业生产的基础<sup>[1,2]</sup>。在自然水体中, 初级生产者主要由水生植物、浮游植物和自养细菌等构成<sup>[3]</sup>。而在深水水库中, 由于水生植物和自养细菌的现存量较少, 浮游植物则成为了最主要的初级生产者<sup>[4,5]</sup>。相关研究表明浮游植物贡献的初级生产力约占全球生物圈的50%<sup>[6]</sup>, 自然水体中浮游植物初级生产力的研究已备受国内外研究者的关注<sup>[4~7]</sup>。

三峡水库蓄水后, 库区水位抬升、水流减缓、水体中污染物滞留时间延长, 水文、水环境发生了极大变化, 随之也带来了一些诸如水体富营养化、藻类水华等负面的生态环境问题<sup>[8,9]</sup>。一般认为水体富营养化将会促进浮游植物生长并提高水体初级生产力水平, 进而对食物网结构以及渔业生产潜力也产生相应的影响<sup>[10]</sup>。目前对于三峡水库初级生产力的研究主要针对与部分支

**作者简介:** 朱永锋(1995~), 硕士研究生, 主要研究方向为浮游植物生态学. E-mail: zhuyf@ihb.ac.cn

叶麟 E-mail: yelin@ihb.ac.cn

**基金项目:** 中国科学院战略先导A类项目(XDA23040500); 国家重点研发计划项目(2017YFC0506406); 国家自然科学基金项目(31670534)

流库湾的空间动态<sup>[4,5]</sup>或在某一个季节的变化情况<sup>[11,12]</sup>。仅有熊倩等<sup>[4]</sup>针对三峡水库部分支流断面 8、11、2、4 月的初级生产力情况进行研究，而对于一年四季逐日变化的研究仍未见报道。

目前，对于浮游植物初级生产力的估算方法主要的黑白瓶法<sup>[11,12]</sup>、经验模型估算法<sup>[13,14]</sup>、生物光学模型(遥感)估算法<sup>[15]</sup>等。在众多的估算方法中，黑白瓶法是较常用的一种方法<sup>[16,17]</sup>。但由于其存在对瓶内浮游动物对浮游植物的捕食、黑白瓶中的营养循环、以及黑白瓶中水体理化条件和天然水体的并不一致等缺点，将会给初级生产力的估算带来较大的不确定性<sup>[18]</sup>。因此，为了克服黑白瓶存在的缺陷，Cloe 等<sup>[19]</sup>提出了一种基于水体高频溶解氧连续监测数据估算初级生产力的方法，并在全球自然水体初级生产力估算中得到了广泛的应用<sup>[7,20~23]</sup>。

本研究拟利用高频溶氧仪连续监测水体溶解氧数值估算发源于神农架的香溪河下游库湾浮游植物初级生产力的日动态变化，并分析影响初级生产力变化的主要环境因子。本研究的开展对于揭示香溪河库湾初级生产力时间动态及驱动因子，分析水域生态系统结构、功能和估算渔业生产力提供基础资料等具有较大价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与样品采集

高频溶氧监测样点位于以神农南坡香溪河库湾中游三峡水库香溪河生态系统实验站附近(图 1)。香溪河发源于神农架林区，由南至北贯穿兴山全县，于秭归县香溪镇东侧汇入长江<sup>[24]</sup>。香溪河干流全长 97.3km，流域面积 3099km<sup>2</sup>，自然落差 1540m，年均流量达 65.5m<sup>3</sup>/s，是湖北省境内三峡水库最大的支流<sup>[25]</sup>。本实验于 2017 年 7 月 1 日至 2018 年 6 月 30 日进行，每日在监测样点使用 5L 采水器采集表层(0.5m)水样，使用 2 个干净的水样瓶各收集 600 和 300mL 的水样，分别用于叶绿素 a(Chl a)分析和营养盐测定。营养盐测定指标主要包括：总氮(TN, mg · L<sup>-1</sup>)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, mg · L<sup>-1</sup>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N, mg · L<sup>-1</sup>)、总磷(TP, mg · L<sup>-1</sup>)、磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P, mg · L<sup>-1</sup>)和可溶性硅酸盐(DSi, mg · L<sup>-1</sup>)。以上营养盐指标用流动分析仪(SkalarSAN++, 荷兰)测定；采用 YSI 多参数水质测量仪(YSI6600EDS)每隔 5 分钟高频率现场读取水温(WT)、浊度(Turb)、溶解氧(DO)、pH 等指标；采样及指标测定方法均参照中国生态系统研究网络(CERN)水域生态系统长期监测规范<sup>[26]</sup>。

### 1.2 初级生产力估算方法

基于高频溶解氧监测数据，我们利于 Cloe<sup>[19]</sup>等人的模型计算了香溪河库湾水体初级生产力。该模型假设在单位时间内，水体溶解氧含量发生变化主要由于水中浮游植物的净初级生产力(Net Primary Production, NPP)和气液界面气体交换(F)2 个过程共同导致，其计算方式可参考公式(1)。

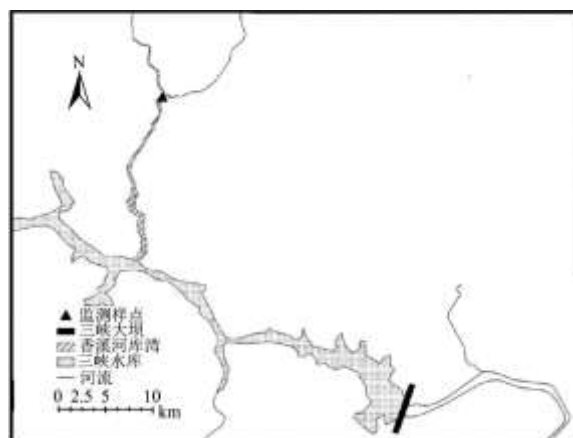


图 1 香溪河库湾高频监测样点图

$$\frac{\Delta O_2}{\Delta t} = NPP + F = GPP - R + F \quad (1)$$

气液界面气体交换(F)对于水体溶解氧含量的改变存在增加和减少两方面的效果,其计算方式可参考公式(2)。

$$F = k(O_{2sat} - O_2) \quad (2)$$

式中: $O_2$ 为水体溶解氧含量; $O_{2sat}$ 为水体饱和溶解氧含量; $k$ 是 $O_2$ 在给定温度下的气体交换系数, $k$ 的计算方法可参考 Jähne<sup>[27]</sup>。基于公式(1)、(2)我们可以计算出NPP值。

夜间时,在单位时间内,水体溶解氧含量发生变化主要由于水中浮游植物的呼吸消耗(R)和气液界面气体交换(F)2个过程共同导致,其计算方法可参考公式(3)。

$$\frac{\Delta O_2}{\Delta t} = F - R_{night} \quad (3)$$

白天时,在单位时间内,水体溶解氧含量发生变化主要由于水中浮游植物的总初级生产力(GPP)和呼吸消耗(R)和气液界面气体交换(F)3个过程共同导致,其计算方法可参考公式(4)。

$$\frac{\Delta O_2}{\Delta t} = GPP - R_{day} + F \quad (4)$$

在这里,我们认为 $R_{day}$ 与 $R_{night}$ 是相等的,NPP与 $R_{night}$ 可通过溶解氧数据估算得到,因此,我们通过公式(4)可估算出GPP数值。

### 1.3 数据处理

因为初级生产力日动态间可能存在时间自相关,因此我们利用了时间自相关回归模型<sup>[28]</sup>研究香溪河库湾初级生产力日动态与环境因子之间的关系。该模型是以自相关回归的形式分析初级生产力的驱动因子,模型公式可参考公式(5)。式中 $Y$ 是因变量, $x_{nt}$ 是预测变量, $\phi$ 是自相关回归系数, $\varepsilon$ 是误差。

$$Y_t = b_0 + b_1 x_{1t} + b_2 x_{2t} + b_n x_{nt} + \phi Y_{t-1} + \varepsilon \quad (5)$$

由于广义线性模型(Generalized Linear Model, GLM)允许因变量非正态分布,我们选择GLM作为回归模型拟合公式(5)。具体通过前向逐步回归分析方法筛选影响香溪河库湾水体初级生产力日动态的主要环境因子<sup>[7]</sup>。在前向逐步回归分析中,根据GLM模型的Akaike信息标准(Akaike's Information Criterion, AIC)选择最优环境因子组成回归方程。参考Bolker等<sup>[29]</sup>的研

究结果，当不同 GLM 模型 AIC 数值差超过 10, 即当前模型组合的 AIC 值相比上一个模型组合的 AIC 值差距超过 10 以上, 则选择当前模型组合。

初级生产力估算过程和广义线性模型使用 R3.5.1 完成, 由程序包 Lake Metabolizer<sup>[30]</sup>、rLake Analyser<sup>[31]</sup>和 mgcv<sup>[32]</sup>实现。

## 2 结果

### 2.1 初级生产力时间动态

在一年四季当中初级生产力(GPP、NPP、R)数值大小变化趋势均一致, 都为夏季最高, 春季次之, 随之是秋季, 最后冬季最低(如图 2abc, 表 1 所示)。GPP、NPP、R 在四季之间均存在显著差异(Mann-WhitneyU 检验,  $P < 0.001$ )。在春季, GPP 变化范围为  $0.53 \sim 15.00 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , NPP 变化范围为  $-3.78 \sim 4.92 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , R 变化范围为  $0.24 \sim 11.05 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ; 在夏季, GPP 变化范围为  $0.58 \sim 24.28 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , NPP 变化范围为  $-3.32 \sim 3.99 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , R 变化范围为  $0.02 \sim 16.87 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ; 在秋季, GPP 变化范围为  $0.04 \sim 15.32 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , NPP 变化范围为  $-3.20 \sim 4.18 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , R 变化范围为  $0.01 \sim 12.46 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ; 在冬季, GPP 变化范围为  $0.08 \sim 7.87 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , NPP 变化范围为  $-0.23 \sim 0.47 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ , R 变化范围为  $0.04 \sim 5.07 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 。叶绿素 a 数值的大小趋势和初级生产力的相似, 也为夏季最高, 春季次之, 随之是秋季, 最后冬季最低(图 3)。因此, 初级生产力的变动趋势与叶绿素 a 的变动趋势同步, 我们判断叶绿素 a 驱动着初级生产力。

### 2.2 初级生产力驱动因子

逐步回归分析的结果表明 Ch1a、DSi、TN 是影响香溪河库湾水体 GPP 日动态的主要环境因子(表 2)。其中, Ch1a、TN 与 GPP 存在正相关关系, 而 DSi 与 GPP 则是负相关关系。Ch1a、DSi、WT 影响香溪河库湾水体 R 日动态的环境因子, 其中 Ch1a、WT 与 R 存在正相关关系, 而 DSi 与 R 则是负相关关系。但是, 逐步回归分析发现我们研究的候选环境因子对香溪河库湾水体 NPP 日动态没有显著影响。

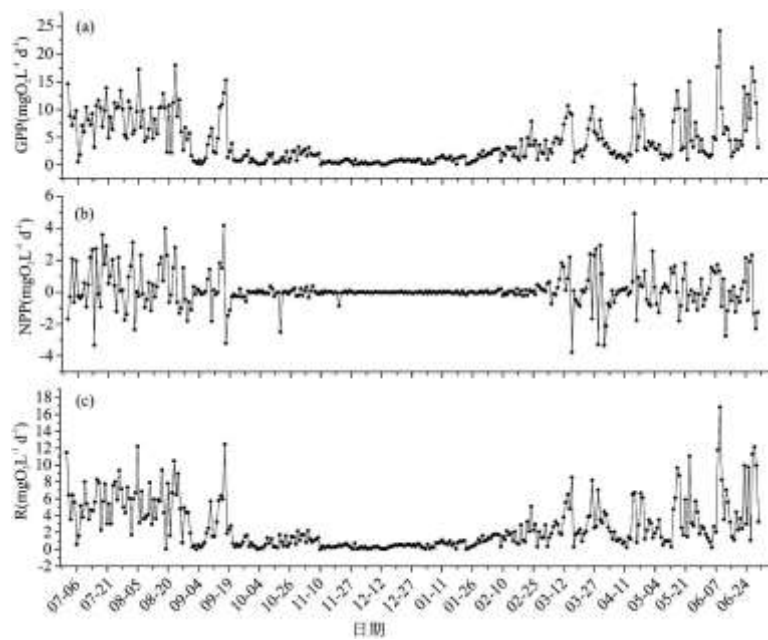


图 2 香溪河库湾浮游植物总初级生产量、净初级生产量、呼吸消耗量每天的变化情况

表 1 香溪河库湾浮游植物总初级生产量、净初级生产量、呼吸消耗量、叶绿素 a 平均值

	春季	夏季	秋季	冬季	P 值
总初级生产量( $\text{mgO}_2\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$ )	4.53	8.04	1.87	1.35	<0.001
净初级生产量( $\text{mgO}_2\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$ )	0.131	0.342	-0.027	-0.002	<0.001
呼吸消耗量( $\text{mgO}_2\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$ )	3.08	5.42	1.23	0.85	<0.001
叶绿素 a ( $\mu\text{g/L}$ )	6.31	22.42	2.87	0.42	<0.001

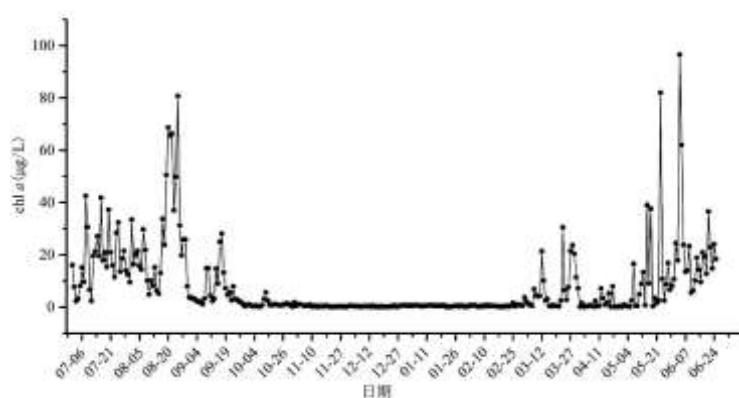


图 3 香溪河库湾叶绿素 a 值每天的变化情况

表 2 广义线性模型对于预测香溪河浮游植物总初级生产量、净初级生产量、呼吸消耗量每天变化情况的结果

因变量	AIC 值	预测变量	变异系数	标准误	t-值	p
GPP	1641.8	Intercept	1.6155	1.1525	1.402	0.1619
		$\text{GPP}_{t-1}$	0.3954	0.0483	8.187	<0.0001
		Chla	0.0814	0.0140	5.800	<0.0001
		DSi	-0.9762	0.2784	-3.507	0.0005
		TN	1.8492	0.5143	3.595	0.0004
R	1442.3	Intercept	2.1168	0.9655	2.193	0.0290
		$R_{t-1}$	0.2839	0.0501	5.670	<0.0001
		Chla	0.0689	0.0103	6.655	<0.0001
		DSi	-0.5954	0.2045	-2.912	0.0038
		WT	0.0554	0.0267	2.079	0.0384

NEP	/	/	/	/	/	/
-----	---	---	---	---	---	---

### 3 讨论

#### 3.1 初级生产力动态

我们的研究结果显示了香溪河库湾总初级生产量变化趋势为：夏季 ( $8.04\text{mgO}_2\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) > 春季 ( $4.53\text{mgO}_2\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) > 秋季 ( $1.87\text{mgO}_2\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$ ) > 冬季 ( $1.35\text{mgO}_2\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$ )。从季节变化上来看，香溪河库湾总初级生产量的季节差异较大，这与熊倩等<sup>[4]</sup>、张琪等<sup>[33]</sup>的研究结果相一致。初级生产量在四季之间差异较大的最直接原因就是水温的变化影响了浮游植物的代谢活动，夏季水体水温的范围最适合浮游植物进行代谢活动，秋季到冬季水体水温不断降低使浮游植物代谢不断减弱，春季水体水温不断回升，浮游植物代谢加强<sup>[16]</sup>。从总初级生产量的大小上来看，本研究所用的高频溶氧监测方法获取的数值与此前众多研究人员所采用的黑白瓶法获取的数值基本在一个水平，两种方法具有一定的可比性。黄立成等<sup>[17]</sup>在云南程海的研究为例，该研究在云南程海利用黑白瓶法测量了初级生产力的时空分布格局，其春夏季的总初级生产量平均值为  $2.01\text{mgO}_2\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$ 。另外，也可将全年的平均值做一个对比，本研究总初级生产量全年的平均值为  $3.95\text{mgO}_2\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$ ，黄立成等人的研究结果为  $2.71\text{mgO}_2\text{L}^{-1}\text{d}^{-1}$ 。虽然香溪河水体初级生产力与程海水体初级生产力在同一水平，但具体数值略有差别，我们猜测可能是由于水体的营养状态有所差别。据研究表明，程海水体营养状态为中营养<sup>[34]</sup>，香溪河为富营养<sup>[35]</sup>。

#### 3.2 初级生产力驱动因子

逐步回归分析的结果显示影响总初级生产量(GPP)日动态的环境因子为 Ch1a、DSi、TN，其中 Ch1a、TN 与 GPP 存在正相关关系，而 DSi 与 GPP 则是负相关关系；影响呼吸消耗量(R)日动态的环境因子为 Ch1a、DSi、WT，其中 Ch1a、WT 与 R 存在正相关关系，而 DSi 与 R 则是负相关关系。熊倩等<sup>[4]</sup>的研究结果表明，GPP 与 Ch1a 显著正相关；张琪等<sup>[33]</sup>的研究结果表明，Ch1a 与 GPP 显著相关；Ye 等<sup>[7]</sup>的研究结果表明 GPP、R 均与 Ch1a 显著正相关，以上 3 人的研究结果都与我们的研究结果相一致。并且，根据散点图(图 4)结果来看，GPP ( $R^2=0.37$ ) 和 R ( $R^2=0.36$ ) 与 Ch1a 均存在显著正相关的关系。在与香溪河不同水体状况的其他水域的研究中也发现与本研究类似的结果，郭劲松<sup>[5]</sup>等人在小江的研究结果揭示了 Ch1a 和 WT 是 GPP 的驱动因子；黄立成等<sup>[17]</sup>在云南程海的研究结果为例，Ch1a 和 TN 与 GPP 之间具有显著的正向关系。而在本研究中揭示的 DSi 与 GPP、R 显著负相关的结果，可能由于在本研究区域中，硅藻一直是浮游植物群落结构组成的重要部分(未发表数据)，硅藻的生长繁殖消耗了水中的可溶性硅。另外，对于在本研究中未发现与 NPP 显著相关的影响因子，可能是因为 NPP 的每日数值变化受 GPP 和 R 两者共同影响，其调控过程较复杂。

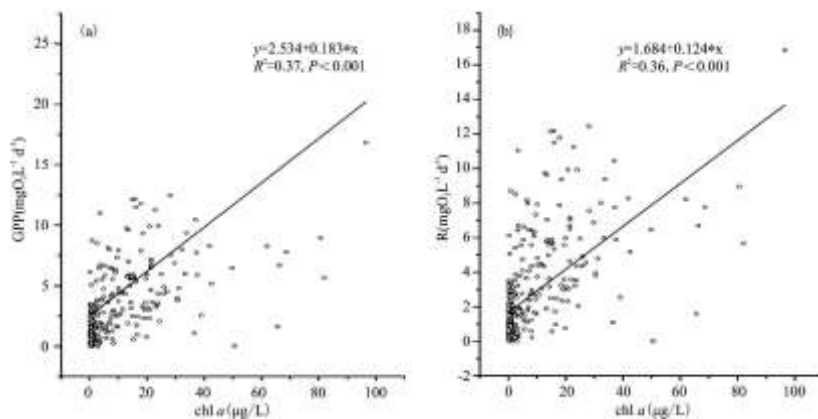


图 4 香溪河浮游植物总初级生产量、呼吸消耗量与叶绿素 a 值线性关系散点图

## 4 结论

(1) 在一年四季当中初级生产力(GPP、NPP、R)数值大小变化趋势均一致,都为夏季最高,春季次之,随之是秋季,最后冬季最低(如图2abc,表1所示)。GPP、NPP、R在四季之间均存在显著差异(Mann-Whitney U 检验,  $P < 0.001$ )。GPP变化范围为  $0.04 \sim 24.28 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ; NPP变化范围为  $-3.78 \sim 4.92 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ ; R变化范围为  $0.01 \sim 16.87 \text{mgO}_2 \text{L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 。

(2) 逐步回归分析结果表明:叶绿素 a(Ch1a)、总氮(TN)与总初级生产量(GPP)存在正相关关系,而可溶性硅(DSi)与总初级生产量(GPP)则是负相关关系;叶绿素 a(Ch1a)、水温(WT)与呼吸消耗量(R)存在正相关关系,而可溶性硅(DSi)与呼吸消耗量(R)则是负相关关系;我们没有发现与净初级生产量(NPP)显著相关的变量。

(3) 从总初级生产量的大小上来看,高频溶氧监测方法获取的数值与此前众多研究人员所采用的黑白瓶法获取的数值基本在一个水平,两种方法具有一定的可比性。

(4) 从叶绿素 a 对于浮游植物初级生产力的驱动作用中可以推断出浮游植物初级生产力对于水体初级生产力的贡献会不断上升,从而对水体的富营养化以及渔业生产潜力产生影响。

### 参考文献:

- [1] ODUM H T. Primary production in flowing Waters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1956, 1(2):102-117.
- [2] BEHRENFELD M J, O' MALLEY R T, SIEGEL D A, et al. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity[J]. *Nature*, 2006, 444(7120):752-755.
- [3] REDFIELD A C, KETCHUM B H, RICHARDS F A. The influence of organisms on the composition of sea-water[EB/OL]. 1963.
- [4] 熊倩, 黄立成, 叶少文, 等. 三峡水库浮游植物初级生产力的季节变化与空间分布[J]. *水生生物学报*, 2015, 39(5):853-860.
- [5] 郭劲松, 李伟, 李哲, 等. 三峡水库小江回水区春季初级生产力[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(4):591-596.
- [6] BAUER B, SOMMER U, GAEDKE U. High predictability of spring phytoplankton biomass in mesocosms at the species, functional group and community level[J]. *Freshwater Biology*, 2013, 58(3):588-596.
- [7] YE L, CAI Q H, ZHANG M, et al. Ecosystem metabolism and the driving factors in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir, China[J]. *Freshwater Science*, 2016, 35(3):826-833.
- [8] TAN L, CAI Q H, ZHANG H Y, 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.
- [9] YE L, CAI Q H. Spring phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three-Gorges Reservoir: Spatiotemporal dynamics across sharp nutrient gradients[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2011, 26(1):11-18.

- 
- [10]何志辉. 淡水生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11]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[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(S1):123-128.
- [12]陈钊, 刘德富, 杨正建, 等. 影响香溪河流域秋季初级生产力主导因素的分析[J]. 环境工程, 2016, 34(S1):107-111.
- [13]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[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11):2127-2131.
- [14]COX T J S, MARIS T, SOETAERT K, et al. Estimating primary production from oxygen time series: A novel approach in the frequency domain[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2015, 13(10):529-552.
- [15]BEHRENFELD M J, FALKOWSKI P G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(1):1-20.
- [16]张敏. 嘉兴水域叶绿素  $\alpha$  和初级生产力的时空分布特征及影响因素[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2017.
- [17]黄立成, 周远洋, 周起超, 等. 云南程海浮游植物初级生产力的时空变化及其影响因子[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5):1424-1436.
- [18]WETZEL R G. *Limnology: Lake and river ecosystems*[M]. gulf professional publishing, 2001.
- [19]COLE J J, PACE M L, CARPENTER S R, et al. Persistence of net heterotrophy in lakes during nutrient addition and food web manipulations[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(8):1718-1730.
- [20]LOWE A T, BOS J, RUESINK J. Ecosystem metabolism drives pH variability and modulates long-term ocean acidification in the Northeast Pacific coastal ocean[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1):963.
- [21]SOLOMON C T, BRUESEWITZ D A, RICHARDSON D C, et al. Ecosystem respiration: Drivers of daily variability and background respiration in lakes around the globe[J]. *Limnology and Oceanography*, 2013, 58(3):849-866.
- [22]BATT R D, CARPENTER S R. Free-water lake metabolism: Addressing noisy time series with a Kalman filter[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2012, 10(1):20-30.
- [23]SHEN X M, SUN T, SU M R, et al. Short-term response of aquatic ecosystem metabolism to turbidity disturbance in experimental estuarine wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 136:55-61.
- [24]王杰. 长江大辞典[M]. 武汉: 武汉出版社, 1997.
- [25]黄真理, 李玉樑, 陈永灿. 三峡水库水质预测和环境容量计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [26]中国生态系统研究网络科学委员会. 水域生态系统观测规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

- 
- [27] JAHNE B, MÜNNICH K O, BOSINGER R, et al. On the parameters influencing air-water gas exchange[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1987, 92(C2):1937-1949.
- [28] COLOSIO J J, COLE J J, PACE M L. Difficulty in discerning drivers of lake ecosystem metabolism with high-frequency data[J]. *Ecosystems*, 2011, 14(6):935-948.
- [29] BOLKER B M, BROOKS M E, CLARK C J, et al. Generalized linear mixed models: A practical guide for ecology and evolution[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(3):127-135.
- [30] WINSLOW, L, ZWART, J, BATT, R, et al. LakeMetabolizer: tools for the analysis of ecosystem metabolism[J]. R package version, 2014.
- [31] READ J S, HAMILTON D P, JONES I D, et al. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(11):1325-1336.
- [32] WOOD, S. MGCV: mixed GAM computation vehicle with GCV/AIC/REML smoothness estimation. 2016[J]. R package version, 2016.
- [33] 张琪, 袁轶君, 米武娟, 等. 三峡水库香溪河初级生产力及其影响因素分析[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(3):436-444.
- [34] 董云仙, 赵磊, 陈异晖, 等. 云南九大高原湖泊的演变与生态安全调控[J]. *生态经济*, 2015, 31(1):185-191.
- [35] 叶麟, 谭路, 蔡庆华. 三峡水库水生态系统健康评价[J]. *水生生物学报*, 2019, 43(S1):49-55.