

三峡小江回水区叶绿素 a 季节变化及其同主要藻类的相互关系

郭劲松¹, 陈园¹, 李哲¹, 方芳¹, 孙志禹², 陈永柏²

(1. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 中国长江三峡集团公司, 宜昌 443002)

摘要:通过分析三峡小江回水区 2007 年 5 月~2008 年 4 月 115 个样品叶绿素 a 的季节特点, 提出了适用于表征小江回水区叶绿素 a 与不同藻类细胞密度和生物量的 3 种状态: $\text{Chla} \leq 5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} < \text{Chla} \leq 19 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $\text{Chla} > 19 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 目的是探讨小江回水区不同水平下 Chla 与同期各主要藻类细胞密度和生物量的相互关系, 为进一步了解三峡水库特定水域藻类季节演替特征提供参考。全年数据下, 小江回水区藻类总细胞密度、生物量和叶绿素 a 间均呈极显著的正相关关系 ($r > 0.70$, $\text{Sig.} \leq 0.01$)。研究期间小江回水区叶绿素 a、绿藻、硅藻、蓝藻、甲藻生物量均值分别为 (9.58 ± 10.77) 、 (1605 ± 647) 、 (707 ± 124) 、 (511 ± 266) 和 $(4019 \pm 1345) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。Chla $\leq 5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水平下, 绿藻、硅藻与 Chla 浓度呈显著正相关; $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} < \text{Chla} \leq 19 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 水平下, 仅有蓝藻与 Chla 含量呈显著正相关关系; Chla $> 19 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 甲藻与 Chla 含量呈显著的正相关关系, 但其它藻门与 Chla 含量无显著相关关系。

关键词: 三峡水库; 小江回水区; 藻类; 叶绿素 a; 季节变化; 相关性

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)04-0976-06

Seasonal Variation of Chlorophyll A and Its Potential Relationship with Various Algal Species in Xiaojiang River Backwater Area, Three Gorges Reservoir

GUO Jing-song¹, CHEN Yuan¹, LI Zhe¹, FANG Fang¹, SUN Zhi-yu², CHEN Yong-bo²

(1. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. China Three Gorges Corporation, Yichang 443002, China)

Abstract: The seasonal variation of Chlorophyll a (Chla) in Xiaojiang river backwater area from May 2007 to April 2008 with 115 water samples was studied. Three trophic states i. e. $\text{Chla} \leq 5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} < \text{Chla} \leq 19 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and $\text{Chla} > 19 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, were applied to represent the potential relationship of Chla, algal cell density (CellD) and biomass (BioM) in Xiaojiang river backwater area. The results showed that the algal cell density, biomass and Chla had significantly positive correlations ($r > 0.70$, $\text{Sig.} \leq 0.01$) and their seasonal variation processes are synchronous. The average values of Chla and biomass of chlorophyta, diatoms, cyanobacteria, dinoflagellate during the study period in Xiaojiang river backwater area were (9.58 ± 10.77) , (1605 ± 647) , (707 ± 124) , (511 ± 266) and $(4019 \pm 1345) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. When $\text{Chla} \leq 5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, chlorophyta, diatoms and Chla were significantly positively correlated; while under $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} < \text{Chla} \leq 19 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ level, only cyanophytes and Chla showed a significantly positive correlation; At $\text{Chla} > 19 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ level, Chla was positively correlated to dinoflagellate, and there were no significant correlations among Chla and other algae.

Key words: Three Gorges Reservoir; Xiaojiang River backwater area; algae; chlorophyll a; seasonal variation; correlations

藻类是水中最主要的初级生产者, 其在水体中大量生长并繁盛被认为是水体营养状态升高的生物学标志之一^[1]。叶绿素 a (chlorophyll a, Chla) 是藻类进行光合作用的重要色素且易于分析测试, 其在水中的浓度通常被用于表征水中藻类总体含量的高低, 以及评判水体的营养状态, 是湖沼学、水环境科学中的关键水环境参数。

建立 Chla 同藻种的相互关系, 可用于反演该水域一定 Chla 水平下存在的主要藻类, 对环境管理具有重要的实际意义。国内外已有一些文献对 Chla 与水体藻类的关系进行了研究^[2~5], 但特定水域不同藻种光合作用效率、生长速率存在较大差别, 不同

藻类细胞内 Chla 含量的相对水平亦有显著不同, 各藻种对水中 Chla 总量的贡献程度存在差异^[6,7]。三峡成库后, 近年来的研究多从营养状态评价与营养盐汇积循环特点入手对三峡水库支流富营养化过程进行探讨^[8~11], 而在水库调度运行背景下典型支流 Chla 季节变化及其同主要藻种间的相互关系仍不明晰。

笔者所在课题组自 2006 年起对三峡库区中段

收稿日期: 2010-05-04; 修订日期: 2010-08-09

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07104-003, 2009ZX07104-005)

作者简介: 郭劲松 (1963~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水污染控制与治理, E-mail: guo0768@126.com

的小江流域回水区藻类特征与富营养化过程展开定位跟踪观测,前期研究围绕营养物、TN/TP、藻类总量与集群演替的季节特点进行分析探讨^[12-15].本研究着重对2007年5月~2008年4月间的Chla含量季节特点进行分析,探讨其同主要藻类的相互关系,以期为尝试建立三峡水库调度运行背景下Chla对藻类的预测模型提供研究基础.

1 材料与方法

1.1 采样点的布置

小江(亦称澎溪河)流域(图1)位于北纬30°49'~31°42',东经107°56'~108°54',流域面积5173 km²,干流全长182 km,是三峡库区中段、北岸流域面积最大的次级河流.三峡水库蓄水至172.3 m后,小江流域回水区段延伸至开县汉丰湖内,回水区长近90 km.但考虑回水末端将受172~145 m水位涨落的影响,本研究选择145 m以下的永久回水区段,即云阳县养鹿杨家坝至小江河口,约40 km河段作为研究区域(见图1),并设置5个采样断面:渠马渡口(N31°07'50.8",E108°37'13.9")、高阳平湖(N31°5'48.2",E108°40'20.1")、黄石镇(N31°00'29.4",E108°42'39.5")、双江大桥(N30°56'51.1",E108°41'37.5")、小江河口(N30°57'03.8",E108°39'30.6"),各断面采样点位于河道深泓线处,采样频率为每月2次,平均间隔时间15.3 d.

1.2 采样、监测和数据分析方法

藻类定性样品采集,采用25号藻类网在水面下作“∞”捞取,现场用甲醛固定^[16,17],在光学显微镜(10×40)下鉴定藻种,藻类种类鉴定参照文献[18,19]进行;藻类定量样品采集水深0.5、1、2、3、5、8 m处共6个测点的水样^[20],现场滴加适量鲁哥试剂,等量混合至1 L后静置48 h浓缩计数,按照各藻种体积大小换算藻类生物量^[21].叶绿素a(Chla)则根据文献[22]提供的方法进行测试.

本研究选择2007年5月~2008年4月采集的115个数据样本,均录入SPSS®后进行相关统计分析,根据全年气温、水温变化情况并参照重庆地区季节变化规律^[23],对研究期间季节情况划分为:春季3~5月上旬;夏季5月中旬~9月中旬;秋季9月下旬~11月下旬;冬季12月~次年2月.

2 结果与分析

2.1 叶绿素 a 的季节特点

2007年5月~2008年4月期间,小江回水区5个采样点Chla的均值为(9.58±10.77) μg·L⁻¹.对各采样点间的Chla进行方差分析结果发现,5个采样点间的Chla无显著统计差异且季节变化过程一致(Oneway Anova, Sig. ≤0.01).故本节着重对小江回水区Chla的季节特点进行分析.

研究期间各季节Chla结果见表1,其季节变化如图2所示.2007年5月小江回水区Chla维持在较高水平,各采样点Chla均值为(20.49±3.28) μg·L⁻¹,入夏后受降雨、径流的影响,其值缓慢下降,至2007年夏末(8月下旬~9月)小江回水区Chla均值降至(7.42±0.85) μg·L⁻¹.入秋后,小江回水区Chla含量出现短期的显著增加,10月下旬均

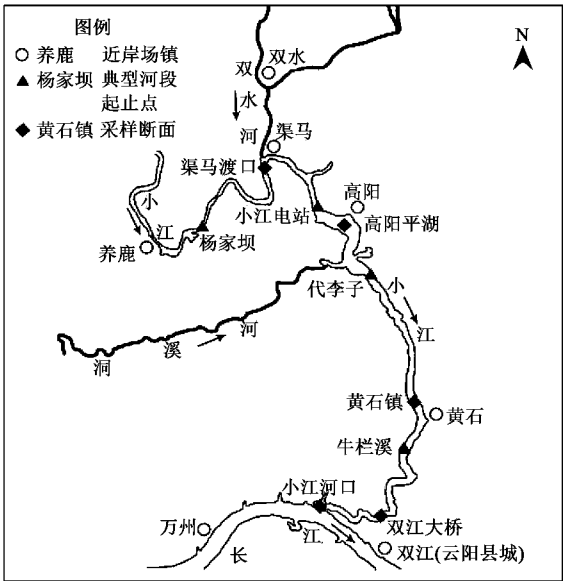


图1 养鹿-河口段回水区示意和采样点分布
Fig.1 Map of backwater area and sampling sites

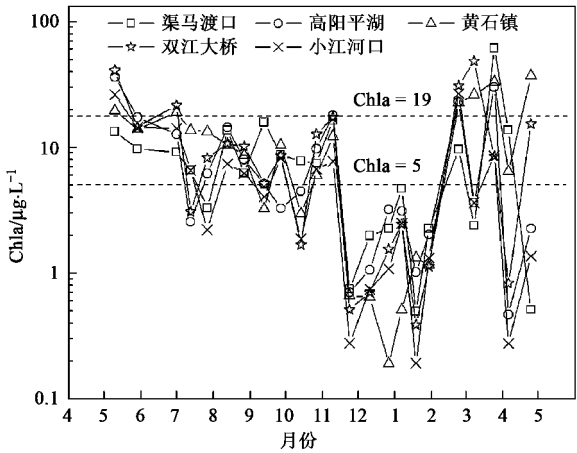


图2 藻类 Chla 季节变化
Fig.2 Seasonal variation of algal Chla

值为 $(8.49 \pm 1.22) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,但在11月下旬下降,并伴随冬季的开始而相对稳定地维持在较低的水平. 2007年11月~2008年1月,小江回水区 Chla 均值仅为 $(3.20 \pm 0.83) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,是研究期间的最低水平. 2008年冬末,小江回水区 Chla 开始升高,2月下旬达到 $(22.45 \pm 3.55) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 入春后,Chla 含量呈现出显著波动的特点,但总体呈增加的趋势. 2008年3月,小江回水区 Chla 较2月下旬显著下降,但在3月下旬则迅速上升至 $(28.17 \pm 9.70) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 小江回水区 Chla 在4月上旬降至 $(4.32 \pm 2.60) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,在4月中旬升高至 $(11.25 \pm 6.94) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

研究期间115个样本中 Chla 的频数分布如图3所示,根据文献[24]提出的三峡库区支流营养状态的划分标准,研究期间,小江回水区有34.8%的数据样本属贫营养型($\text{Chla} \leq 3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、32.2%属中营养型($3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1} < \text{Chla} \leq 10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),33.0%属富

营养型($\text{Chla} > 10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),其中11.3%位于重度富营养以上的阈值范围($\text{Chla} > 20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).

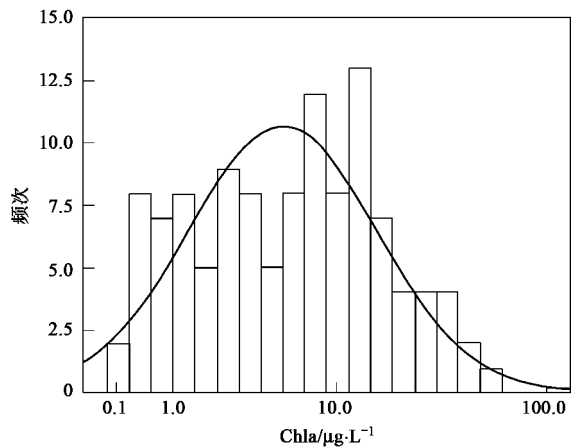


图3 藻类 Chla 频数分布图
Fig.3 Frequency distribution diagram of various Chla levels

表1 研究期间小江回水区 Chla 季节变化 ¹⁾						
Table 1 Seasonal variations of a Chla in Xiaojiang River backwater area						
项目	参数	2007-05 ~ 2008-04	春季	夏季	秋季	冬季
样本数		115	20	40	25	30
Chla	均值	9.58 ± 1.00	15.13 ± 4.02	11.87 ± 1.31	6.97 ± 1.08	5.00 ± 1.56
	变化范围	0.19 ~ 61.08	0.27 ~ 61.08	2.20 ~ 40.40	0.28 ~ 17.87	0.19 ~ 30.77
	S. D.	10.77	17.96	8.28	5.38	8.52

1) Chla 单位: $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; S. D. 为标准偏差

2.2 藻类总细胞密度、总生物量与 Chla 的相关关系及回归模型

对研究期间小江回水区藻类细胞密度 (CellD)、生物量 (BioM) 和 Chla 的相关性分析结果见表2.

研究发现,全年数据下,藻类总细胞密度、生物量与 Chla 均呈极显著的正相关关系. CellD、BioM 对 Chla 的 lg-lg 回归模型见图4、图5,回归公式及 R^2 值分别为:

表2 研究期间小江回水区不同 Chla 水平下 Chla 同各藻门生物量的相关系数矩阵 ¹⁾					
Table 2 Martix of correlation coefficients among different forms of algal biomass and Chla					
Chla	总生物量	绿藻生物量	蓝藻生物量	硅藻生物量	甲藻生物量
全年 ($n = 115$)	0.747 **	0.684 **	0.414 **	0.568 **	0.349 **
$\text{Chla} \leq 5$ ($n = 50$)	0.329 **	0.293 *	—	0.311 *	—
$5 < \text{Chla} \leq 19$ ($n = 50$)	0.379 *	—	0.328 *	—	—
$\text{Chla} > 19$ ($n = 15$)	0.691 **	—	—	—	0.568 *

1) **显著性水平为0.01; * 显著性水平为0.05; “—”表示无显著相关性

$$\begin{aligned} \lg(\text{CellD}) &= 0.777 \times \lg(\text{Chla}) + 0.536 \\ (R^2 &= 0.756, \text{Sig.} \leq 0.01, n = 107) \\ \lg(\text{BioM}) &= 0.869 \times \lg(\text{Chla}) + 2.586 \\ (R^2 &= 0.728, \text{Sig.} \leq 0.01, n = 107) \end{aligned}$$

式中,CellD 为藻类细胞密度总量 ($\times 10^5 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$), BioM 为藻类总生物量 ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), Chla 为叶绿素 a 浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), n 为样本数. 上述方程中 Chla 浓度

的适用范围为 $0 \leq \text{Chla} \leq 60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

3 讨论

表3 提供了研究期间小江回水区各主要藻门总量水平与季节特点. 研究期间将各藻总生物量同全年 Chla 进行相关性分析 (样本数 $n = 115$), 结果可以看出,各藻同 Chla 水平均呈显著的正相关关系,

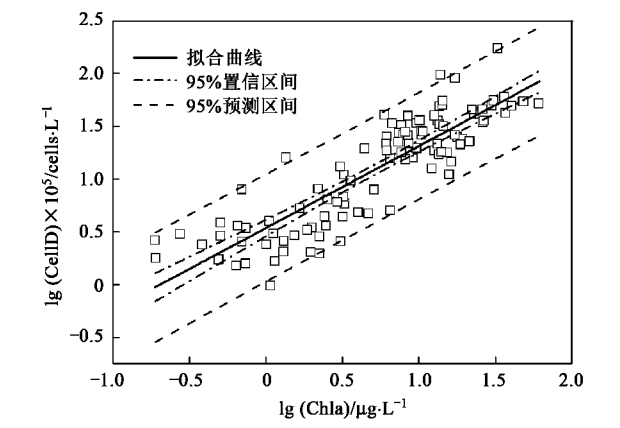


图 4 藻类总细胞密度与 Chla 的 lg-lg 回归模型

Fig. 4 The lg-lg linear fitting between total algal CellD and Chla

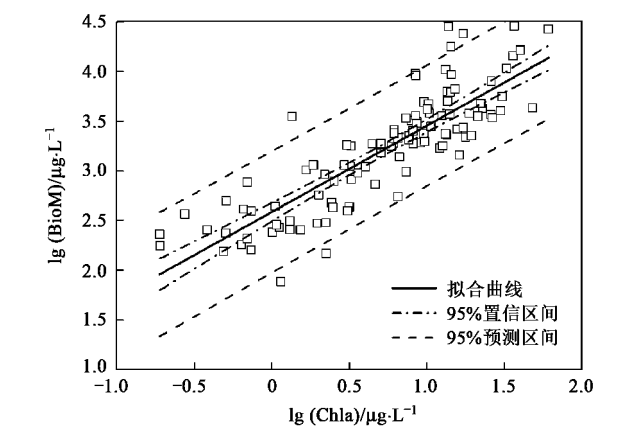


图 5 藻类总生物量与 Chla 的 lg-lg 回归模型

Fig. 5 The lg-lg linear fitting between total algal BioM and Chla

表 3 各门藻类的细胞密度和生物量的季节变化

Table 3 Seasonal variation of algal cell density and alga biomass

项目	全年	春季 (n = 25)	夏季 (n = 35)	秋季 (n = 25)	冬季 (n = 30)
蓝藻细胞密度 × 10 ⁵ /cells·L ⁻¹	8.73 ± 1.51	13.13 ± 3.66	11.93 ± 3.11	4.98 ± 1.13	0.07 ± 0.01
蓝藻生物量/μg·L ⁻¹	934 ± 35 745	511 ± 267	2 226 ± 974	103 ± 20	7 ± 1
绿藻细胞密度 × 10 ⁵ /cells·L ⁻¹	8.73 ± 0.89	14.04 ± 3.11	8.23 ± 0.81	11.27 ± 1.61	2.78 ± 0.63
绿藻生物量/μg·L ⁻¹	896 ± 158	1 605 ± 647	1 098 ± 148	840 ± 167	118 ± 29
硅藻细胞密度 × 10 ⁵ /cells·L ⁻¹	4.02 ± 0.67	7.93 ± 1.64	2.62 ± 0.34	0.93 ± 0.18	4.97 ± 1.99
硅藻生物量/μg·L ⁻¹	513 ± 70	707 ± 124	587 ± 86	152 ± 28	565 ± 219
甲藻细胞密度 × 10 ⁵ /cells·L ⁻¹	0.36 ± 0.10	1.04 ± 0.32	0.15 ± 0.03	0.08 ± 0.01	0.02 ± 0.00
甲藻生物量/μg·L ⁻¹	1 216 ± 398	4 019 ± 1345	144 ± 30	237 ± 38	57 ± 13

其中绿藻生物量同 Chla 含量的相关关系显著高于其他藻类的相应值,其后依次为硅藻、蓝藻、甲藻,说明研究期间总体上绿藻生物量水平的变化对 Chla 含量改变影响较其他藻种显著,而甲藻改变对 Chla 含量变化的影响则较其他 3 种藻弱。

为进一步说明上述主要藻类对 Chla 的贡献,本研究结合 Chla 的频次分析结果,将 Chla 划分为 3 种状态:Chla ≤ 5 μg·L⁻¹ (样本数 n = 50, 出现频率 45.2%), 5 μg·L⁻¹ < Chla ≤ 19 μg·L⁻¹ (样本数 n = 50, 出现频率 42.6%), Chla > 19 μg·L⁻¹ (样本数 n = 15, 出现频率 12.2%), 分别用于探讨小江回水区 Chla 同主要藻门生物量的相关关系,如表 2 所示。

研究发现,当 Chla ≤ 5 μg·L⁻¹ 时,绿藻、硅藻与 Chla 含量显著正相关,而蓝藻和甲藻与 Chla 的相关关系并不显著;当 5 μg·L⁻¹ < Chla ≤ 19 μg·L⁻¹ 时,仅有蓝藻与 Chla 含量呈显著正相关关系,其他藻种同 Chla 的正相关关系并不显著;当 Chla > 19 μg·L⁻¹ 时,甲藻与 Chla 含量呈显著的正相关关系,但其它藻门与 Chla 含量无显著相关关系。

上述结果可以看出,在低的 Chla 水平下,硅藻、

绿藻对 Chla 的影响显著强于其它藻种。这是因为 Chla ≤ 5 μg·L⁻¹ 时为藻类非旺盛生长期,该时期主要位于秋季至冬季的高水位运行期间,水温下降在一定程度上限制了藻类生长。硅藻耐受低温且喜好光学透射性较优的生境条件^[25],能够通过迅速增加单位细胞叶绿素和辅助色素的含量以提高对光的捕捉能力^[26,27];而绿藻种类数量多,适宜生境的阈值范围较广,在低水温时期仍能保持一定的丰度,且部分藻种(如栅藻等)亦具有生长优势,使得在该时期绿藻生物量的改变亦对 Chla 变化产生较显著的影响。图 6 提供了硅藻、绿藻同 Chla 的 Loess 拟合结果,进一步说明在低 Chla 水平下上述 2 种藻对 Chla 含量影响的显著性。

中等的 Chla 水平主要位于 5 ~ 10 月的水库低水位运行期,水温、光照与丰足的营养物水平适宜于各种藻类大量生长,是各种藻类的旺盛生长季节,但蓝藻生物量的变化对 Chla 的影响更为显著,其原因可能包括 2 个方面:①该水平下蓝藻生物量相对占优;②同其他藻类相比,该时期蓝藻对生境变化的响应更为敏感,使得蓝藻生物量的改变对 Chla 含

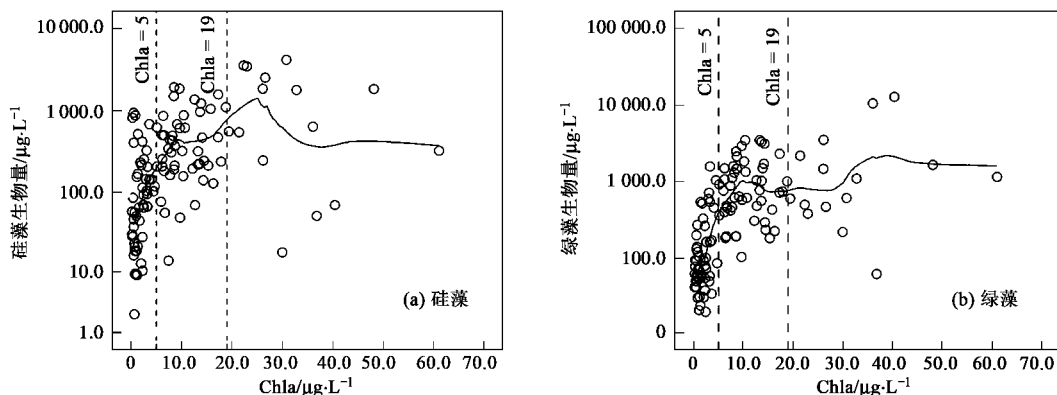


图 6 硅藻、绿藻生物量与 Chla 的 Loess 拟合

Fig. 6 Loess fitting of diatom, chlorophyta biomass and Chla

量的影响较其他藻种明显. 进一步分析认为, 中等 Chla 水平下虽为各种藻类旺盛生长时期, 但在丰足的营养物和较强的光辐射条件下蓝藻将呈现生长优势, 而同期亦为水库低水位运行的洪水季节, 间歇性的径流、降雨过程构造了不稳定的水动力条件并在一定程度上干扰了蓝藻的充分生长过程^[28], 迫使蓝藻生物量水平变化波动显著进而使其同 Chla 统计相关性显著强于其他藻种.

在 $\text{Chla} > 19 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的藻类繁盛状态, 甲藻同 Chla 显著正相关, 而其他藻类与 Chla 的统计相关性并不显著. 研究期间在小江回水区发现的甲藻主要为角甲藻和多甲藻, 其在理想条件下的生长速率低于其他藻种(包括蓝藻)^[29], 具备在极端环境条件下的耐受性与竞争优势, 易于在集群中形成顶极状态. 因此在藻类繁盛状态下, 甲藻绝对占优, 其生物量水平的改变对 Chla 的影响较其他藻种显著.

值得注意的是, 营养物浓度、流速、水位、光照等生境要素是影响藻类生长的直接要素^[30]. Chla 浓度分级及其同特定藻类的相关关系在一定程度上反映了该特定水域生境背景下的优势藻类季节分布特点, 将在小江背景下所得 Chla 水平与各主要藻门的关系直接应用于三峡库区藻类发展模型预测还具有一定的局限性. 但该关系可作为特定水域下研究 Chla 与藻类相互关系的经验规律, 为进一步了解三峡次级支流回水区优势藻类的演替规律提供参考手段.

4 结论

(1) 研究期间 Chla 季节变化明显, 春季最高可达 $61.08 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 而冬季最低值仅为 $0.19 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

(2) 研究期间, 小江回水区藻类总生物量、细胞密度和 Chla 之间均呈极显著的正相关关系. 藻类

总细胞密度对 Chla 的 lg-lg 回归模型为: $\lg(\text{CellD}) = 0.777 \times \lg(\text{Chla}) + 0.536$; 藻类总生物量对 Chla 的 lg-lg 回归模型为: $\lg(\text{BioM}) = 0.869 \times \lg(\text{Chla}) + 2.586$.

(3) $\text{Chla} \leq 5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水平下, 绿藻、硅藻与 Chla 浓度呈显著正相关; $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} < \text{Chla} \leq 19 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 水平下, 仅有蓝藻与 Chla 含量呈显著正相关关系; $\text{Chla} > 19 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 甲藻与 Chla 含量呈显著的正相关关系, 但其它藻门与 Chla 含量无显著相关关系.

参考文献:

- [1] 周谐, 郑坚, 黄书铭, 等. 三峡库区重庆段浮游藻类调查及水质评价[J]. 中国环境监测, 2006, 22(4): 70-73.
- [2] 王伟, 顾继光, 韩博平, 等. 华南沿海地区小型水库叶绿素 a 浓度的影响因子分析[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(1): 64-71.
- [3] 刘波, 崔莉凤, 刘载文. 北京市城区地表水体叶绿素 a 与藻密度相关性研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(8): 29-33.
- [4] Boyer J N, Kelble C R, Ortner P B, et al. Phytoplankton bloom status: Chlorophyll a biomass as an indicator of water quality condition in the southern estuaries of Florida, USA [J]. Ecological Modeling, 2009, 9(6): 56-67.
- [5] Gregor J, Maršálek B. Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll a: a comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods[J]. Water Research, 2004, 38(3): 517-522.
- [6] Arhonditis G B, Winder M, Brett M T, et al. Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA) [J]. Water Research, 2004, 38(18): 4013-4027.
- [7] Rakocevic-Nedovic J, Hollert H. Use of chlorophyll-Secchi disk relationships, phytoplankton community and chlorophyll a as trophic state indices of Lake Skadar (Montenegro, Balkan) [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2005, 12(3): 146-152.
- [8] 张晟, 李崇明, 郑坚, 等. 三峡水库支流回水区营养状态季节

变化[J]. 环境科学,2009,**30**(1):64-69.

[9] 郑丙辉,曹承进,秦延文,等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学,2008,**29**(1):1-6.

[10] 张晟,李崇明,付永川,等. 三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出[J]. 环境科学,2008,**29**(1):7-12.

[11] 曹承进, 秦延文,郑丙辉,等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学,2008,**29**(2):310-315.

[12] 郭劲松,陈杰,李哲,等. 156 m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价[J]. 环境科学,2008,**29**(10):2710-2715.

[13] 李哲,方芳,郭劲松,等. 三峡小江回水区段 2007 年春季水华与营养盐特征[J]. 湖泊科学,2009,**21**(1):36-44.

[14] 李哲,郭劲松,方芳,等. 三峡小江回水区氮素赋存形态与季节变化特点[J]. 环境科学,2009,**30**(6):1588-1594.

[15] 方芳,李哲,田光,等. 三峡小江回水区磷素赋存形态与季节变化特征及其来源分析[J]. 环境科学,2009,**30**(12):3488-3493.

[16] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京:中国标准出版社,2000. 142-144.

[17] 沈韞芬,章宗涉,龚循矩,等. 微型生物监测新技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990. 145.

[18] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类:系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社,2006.

[19] 福迪·B 著,罗迪安译. 藻类学[M]. 上海:上海科学技术出版社,1980. 17-20.

[20] 隋战鹰. 浮游藻类与水质污染监测[J]. 生物学通报,2002,**37**(8):49.

[21] 章宗涉,黄祥飞. 淡水浮游植物研究方法[M]. 北京:科学出版社,1991. 338-347.

[22] 方芳,李哲,田光,等. 三峡小江回水区磷素赋存形态季节变化特征及其来源分析[J]. 环境科学,2009,**30**(12):3488-3493.

[23] 重庆气象网. 重庆市气候与气象灾害[EB/OL]. 2007. <http://www.121.cq.cn/service/cqweather.htm#one>.

[24] 郑丙辉,张远,富国,等. 三峡水库营养状态评价标准研究[J]. 环境科学学报,2006,**26**(6):1022-1030.

[25] 况琪军,马沛明,胡征宇,等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报,2005,**5**(2):87-91.

[26] Reynolds C S, Descy J P, Padisák J. Are phytoplankton dynamics in rivers so different from those in shallow lake? [J]. *Hydrobiologia*, 1994,**289**(1):1-7.

[27] 韩博平,韩志国,付翔. 藻类光合作用机理与模型[M]. 北京:科学出版社,2003. 8-15.

[28] 李哲,郭劲松,方芳,等. 三峡小江回水区蓝藻季节变化及其与主要环境因素的相互关系[J]. 环境科学,2010,**31**(2):301-309.

[29] Relonds C S. Ecology of Phytoplankton [M]. Cambridge: Cambrige University Press, 2006. 176-238.

[30] 刘信安,张密芳. 重庆主城区三峡水域优势藻类的演替及其增殖行为研究[J]. 环境科学,2008,**29**(7):1838-1843.