

香溪河库湾春季叶绿素 *a* 浓度动态及其影响因子分析

韩新芹^{1,2} 叶 麟^{1,2} 徐耀阳^{1,2} 蔡庆华¹

(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. 中国科学院研究生院,北京 100039)

摘要:2005年3月至4月,对三峡水库香溪河库湾的叶绿素 *a* 动态及其与 TN、TP 等环境因子的关系进行了研究。结果表明,从香溪河库湾下游到上游,叶绿素 *a* 存在明显的水平分布。在时间分布上,3月17日暴发一次大规模的水华,4月份水华的暴发有一个明显的平面推移的过程。叶绿素 *a* 浓度与 TN、TP 之间存在着一定的负相关关系, TN 与叶绿素 *a* 浓度的相关性较显著。香溪河库湾极可能是 N 限制型水体,而不受 P 限制。叶绿素 *a* 与透明度存在反双曲线关系,与溶解氧呈显著正相关关系。

关键词:香溪河库湾;叶绿素 *a*;环境因子;水华

中图分类号:Q178.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3207(2006)01-0089-06

香溪河系长江三峡水库湖北库区内第一大支流,发源于湖北省西北部神农架林区,流经兴山县、秭归县,于香溪镇注入长江。香溪河干流长 94km,流域范围 110°25′—111°06′E、30°57′—31°34′N,流域面积 3099km²,为峡谷型河流^[1]。三峡水库蓄水后,从秭归县香溪镇至兴山县峡口镇河段的水位随之升高,水流减缓,水体中氮、磷等营养物质聚积,为藻类生长提供了大量养料,特别是春季,水温升高,光照良好,藻类迅速生长,导致水体混浊,透明度下降,水质变坏,水体富营养化程度较高,出现水华现象。水华发生的直接原因是水体中的藻类急剧增殖^[2],而水体中叶绿素 *a* 的水平反映了浮游植物生物量的高低^[3],因此,通过研究叶绿素 *a* 可以直观地描述水华消长的情况,如暴发规模、持续时间等,操作简便快速。

本文报道了香溪河库湾春季水华发生期间叶绿素 *a* 含量的时空变化规律,并以 TN、TP 为重点分析了环境因子对叶绿素 *a* 的影响,以期对三峡库区水华暴发及消亡的机制提供分析和判断的依据。

1 材料与方法

1.1 采样点布置 从香溪河口到平邑口之间共设

置了14个样点,由南到北依次编号为 S01 至 S14(图1)。于2005年3月5日到4月28日进行了为期两个月的采样工作,水样每6d采集1次,共计10次。每次的采样工作一般在上午9:00到下午14:00之间进行,尽量减小因采样时间的不同而带来的误差。

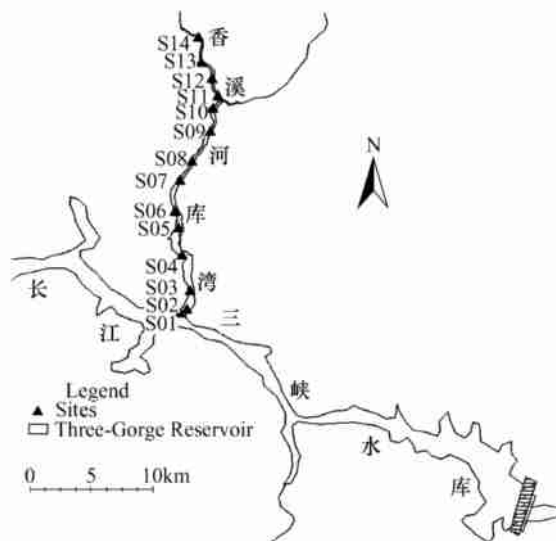


图1 香溪河库湾采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir

收稿日期:2005-07-31;修订日期:2005-09-28

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-SW-111);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(2002CB412310)资助

作者简介:韩新芹(1982—),女,山东菏泽人;硕士生。主要从事浮游生物生态学研究。邵晓阳、贾兴焕、周淑婵、李凤清、邵美玲、吴乃成、薛俊增等在实验过程中给予帮助,谨致谢忱

通讯作者:蔡庆华, E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

1.2 分析方法 叶绿素 *a* 的测定采用分光光度法。取 610mL 水样用醋酸纤维滤膜(孔径 0.8μm)抽滤,滤膜低温干燥后,加 10mL 90%丙酮低温萃取 20—24h,样品经离心后取上清液用 UV-1601 紫外可见分光光度计在 750、665、645 和 630nm 波段处进行测量,实验方法和计算按文献方法^[4]进行。

透明度采用萨氏盘(Secchi Disc)测定,水温、溶解氧用 HORIBA-U-23 型多参数水质监测系统(HORIBA 公司,日本)现场测定,水样中 TN、TP 含量利用 SAN PLUS ANALYZER 水化学分析仪(SKALAR 公司,荷兰)分析。

1.3 数据分析 首先通过聚类分析将样本归并成类^[5,6]。聚类分析时,由于所有监测项目的单位不完全相同,为了消除量纲的影响,对原始数据进行标准化,公式如下:

$$x_{ij} = (s_{ij} - \bar{s}_j) / \sqrt{\sum (s_{ij} - \bar{s}_j)^2 / (n - 1)}$$

其中, x_{ij} 为变量标准化之后第 i 个采样点的第 j 个指标的数值, s_{ij} 为原始数据, \bar{s}_j 为第 j 个指标的均值。聚类分析的方法选择目前应用广泛的等级聚类法,以欧氏距离度量样本之间的距离^[7],运用 Ward 算法生成具有层次结构的聚类树^[8]。

聚类分析、相关与回归分析均在 SPSS for Windows 10.0 上进行。

2 结果与讨论

2.1 各样点的聚类分析结果

根据各样点的叶绿素 *a*、TP、TN 的相似性可将所有采样点分成 4 组(图 2),其中第 1 组包括 S01—S04,第 2 组包括 S05—S07,第 3 组包括 S08—S11,第 4 组包括 S12—S14。从样点分布示意图(图1)可以看

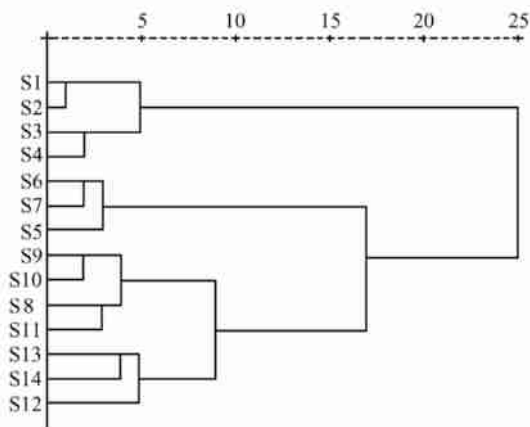


图 2 香溪河库湾 14 个采样点的聚类图

Fig. 2 Cluster dendrogram of 14 sampling sites based on chlorophyll *a*, total nitrogen and total phosphorus concentrations of Xiangxi Bay

出,第 1 组的 4 个样点靠近香溪河口,与长江之间的交换频繁;第 2 组的 3 个样点处于香溪河库湾的中下游,两岸村落分布的密度增大,土地开垦利用程度较高,人类活动频繁^[9];第 3 组的 4 个样点位于汇通港到峡口镇之间,人口密集,同时,乡镇企业集中,生活污水和工业废水的排放对库湾水质的污染严重;第 4 组的 3 个样点处于香溪河库湾的上游,是库湾静水与河流流水的交汇处。由聚类图可看出,第一组与其他三组的距离较大,第一组较其他三组来说,其主要受长江水的影响。第三组与第四组各参数的相似性较高,二者位于库湾的中上游。

2.2 叶绿素 *a* 的时空变化特征

根据各组叶绿素 *a* 含量均值的结果,可以看出香溪河库湾叶绿素 *a* 含量存在着明显的水平分布(图 3)。第 1 组的 4 个监测点靠近河口,受长江水影响较大,叶绿素 *a* 含量较低且变化不大,均在 62μg/L 以下。第 2、3 组的 7 个监测点处于库湾的中游,叶绿素 *a* 含量总体偏高,波动范围在 4.18—135.85μg/L 之间,平均为 36.24μg/L;而其中的 S10 相对于附近的 S09、S11 来说,叶绿素 *a* 含量偏低,这是因为香溪河的三大支流之一高岚河在其附近注入,使得流量增大,有利于河水中氮、磷等营养物的稀释^[10],从而使藻类的增长速度减小。该点的叶绿素 *a* 含量的最大值只是 S09 的最大值的 48.6%。第 4 组的 3 个监测点在 3 月份的叶绿素 *a* 含量(10.64μg/L)明显低于 4 月份(54.34μg/L)。

从时间上看,3—4 月份共暴发 2 次水华。3 月 17 号左右,除第 1 组的 S01—S03 和第 4 组的 3 个点外,其余各点均暴发水华,暴发水华的各监测点叶绿素 *a*

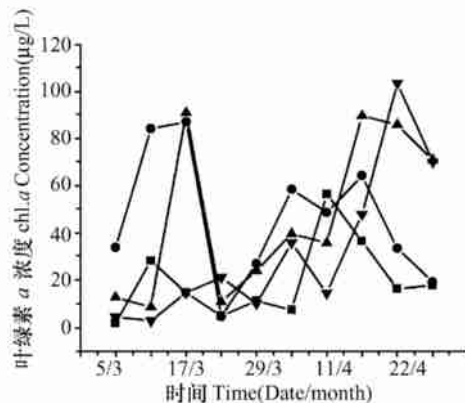


图 3 香溪河库湾各组监测点叶绿素 *a* 含量的时空变化

Fig. 3 Temporal and spatial change of chlorophyll *a* in different groups of Xiangxi Bay
—●— Group 1 —■— Group 2 —▲— Group 3 —▼— Group 4

含量均在 $34.9\mu\text{g/L}$ 以上,最高值达到 $135.85\mu\text{g/L}$ 。而 4 月份水华的暴发比较复杂。由图 3 可看出,从香溪河库湾的下游到上游,水华的暴发有一个明显的平面推移的过程。第 1 组的 4 个监测点藻类生长峰值在 4 月 11 日左右,叶绿素 *a* 含量均在 $49\mu\text{g/L}$ 以上;而第 2 组的 3 个监测点水华暴发于 4 月 16 日左右,叶绿素 *a* 含量均在 $46\mu\text{g/L}$ 以上;第 3 组的 4 个监测点中, S08、S10 藻类生长峰值在 4 月 16 日左右, S09、S11 藻类生长峰值在 4 月 22 日左右,由于采样间隔为 6d,可以推测这 4 个点的藻类生长峰值在 4 月 16 日—22 日之间,叶绿素 *a* 含量均高达 $93\mu\text{g/L}$ 以上;很显然,第 4 组的 3 个监测点水华暴发于 4 月 22 日左右,其中位于最上游的 S14 水华更是推迟了一步,大约在 4 月 28 日左右。

2.3 环境因子与叶绿素 *a* 含量的关系

浮游植物是水体中的初级生产者,通过光合作用将水体中的无机物转化为有机物。在这种物质转化过程中,无机营养元素的丰歉是影响浮游植物光合生产的重要因素,而浮游植物的生长状况又是营养盐类含量变动的主要条件。作为浮游植物体内主要色素的叶绿素 *a*,其与营养盐的关系较为复杂^[11]。

总体来看,从香溪河库湾的下游到上游,TP 含量表现出梯度升高的趋势,而 TN 含量则表现出先下降后上升的趋势。在回水末端流速较大,磷不易沉降和被藻类吸收^[12],浓度较大;随着向河口迁移,沉降和降解作用增强,磷的浓度逐渐减小^[12],加之上游分布着两个化工厂,长期向河中排放未经达标处理的含磷废水^[13,14],因此 TP 含量表现出梯度升高的趋势。河口与长江水体交换频繁,库湾中游水体交换较差,上游有支流氮源的补给,又是库湾静水与流水的交汇处,所以 TN 含量表现出先下降后上升的趋势。

在 P 为限制因子的水体中,叶绿素 *a* 和 P 的相关程度一般较高^[15]。大多数水库 P 的含量都不高,特别是在枯水季节 P 对水库的浮游植物生长的限制作用更为明显^[9]。但本研究表明,TP 含量的变化范围为 $0.07\sim0.74\text{mg/L}$,平均为 0.25mg/L ,根据国家地表水 V 类标准(0.12mg/L)^[16]的规定,香溪河库湾超标 2.17 倍,TP 超过国际上一般标准的富营养型湖泊的浓度($\text{TP} > 0.02\text{mg/L}$)。谢平等在研究汉江水华时发现,通过富营养化动力学模型对藻类生长所必需的营养条件进行调试,当水体 TN 浓度高于 1.0mg/L 、TP 浓度高于 0.07mg/L 时,营养条件已经基本满足藻类生长的需求^[17]。香溪河库湾整个水

华发生期间 TN 和 TP 的平均值分别为 0.91mg/L 和 0.25mg/L ,而 TN 与 TP 的比值在 $0.57\sim21.14$ 之间(图 4),均值为 5.25,10 次采样 TN/TP 的平均值分别为 6.50、5.07、6.94、4.30、4.77、4.27、4.27、4.26、5.18、6.22、5.13。这些数据表明,尽管水体中氮磷的含量都较高,但氮磷比很低。当藻细胞接近于饱

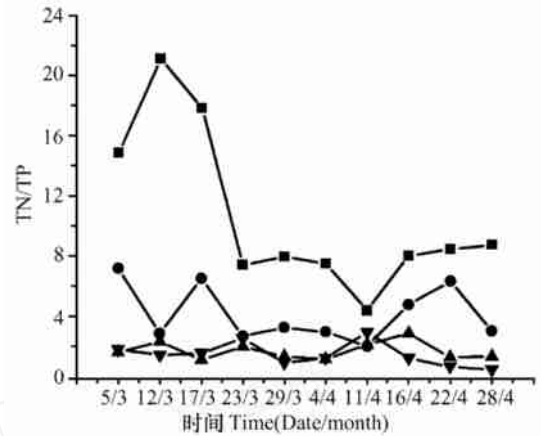


图 4 香溪河库湾 TN/TP 的变化

Fig. 4 The fluctuations of TN/TP in Xiangxi Bay

—□— Group 1
—●— Group 2
—▲— Group 3
—▼— Group 4

和营养生长时,其 N、P 的原子比约为 $16:1$ ^[12],根据 Rhee 的研究, $\text{N/P} > 30$ 时,会出现 P 的抑制; $\text{N/P} < 8$ 时,可能出现 N 抑制,而 N/P 比在 $8\sim30$ 之间是正常的波动,在 $15\sim16$ 之间时为最佳生长需要^[2]。10 次采样的 N/P 比平均值均低于 8,因此水华的不会受到磷的限制,而可能受到 N 的限制,尚需生物实验证实。相关分析也表明,TP 和叶绿素 *a* 之间没有显著的相关性。研究表明,叶绿素 *a* 浓度与 TN 之间存在着显著负相关关系,其双侧皮尔森相关系数为 -0.404 ,其回归方程为 $y = 63.9 - 34.2x$ 。浮游植物旺盛的生长代谢吸收大量的营养盐,因被高度利用的营养盐得不到及时补充,破坏营养盐结构的平衡,导致 TN 浓度下降,因而呈现负相关关系。由各组叶绿素 *a* 和总氮的均值(图 5)也可看出,叶绿素 *a* 的高峰值大多是 TN 的低峰值。

叶绿素 *a* 含量是水体中各种理化因子共同作用的综合反映。

石村根据日本湖泊而得到的结论是,透明度与叶绿素 *a* 间存在反双曲线关系,其关系式为 $\log[\text{SD}] = 0.79 - 0.49\log[\text{Chl. } a]$;北美北欧近年来的调查也表明存在同样的反双曲线关系^[18]。香溪河库湾透明度与叶绿素 *a* 之间也表现出同样的反双曲线关系(图 6),

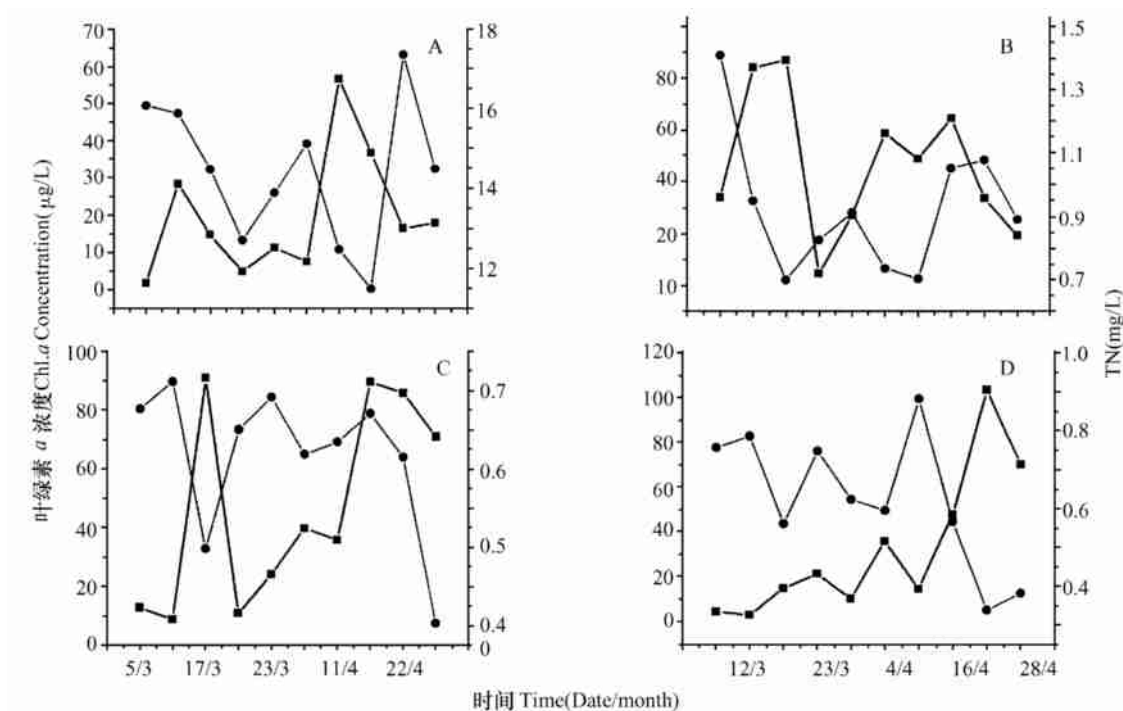


图5 香溪河库湾各组叶绿素 *a* 与 TN 的变化

Fig. 5 The fluctuations of Chlorophyll *a* and TN in Xiangxi Bay

(A) 第一组 Group (B) 第二组 Group (C) 第三组 Group (D) 第四组 Group

— —TN — —Chl-*a*

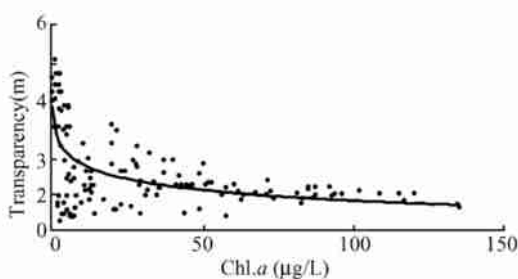


图6 香溪河库湾透明度与叶绿素 *a* 的相关关系

Fig. 6 The relationship between chlorophyll-*a* and transparency of Xiangxi Bay

其关系式为 $\log[\text{SD}] = 0.38 - 0.20\log[\text{Chl-}a]$ 。

叶绿素 *a* 浓度与溶解氧之间存在明显正相关关系,其双侧皮尔森相关系数为 0.637,回归方程为 $y = 6.44x - 44.1$,系因浮游植物在光合作用中释放氧分子^[19],使水体中溶解氧浓度增加的缘故。

参考文献:

- [1] 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]
- [2] Reynolds C S. The Ecology of Freshwater Phytoplankton [M]. Lorr-

don: Cambridge University Press, 1984

- [3] Wang F Er, L Ü H C, Chen Y X, *et al.* Analysis of the spatial and temporal changes in chlorophyll *a* concentration in Qiandao Lake and its impact factors [J]. *Journal of Zhejiang University (Natural Science)*, 2004, 30(1): 22—26 [王飞儿, 吕唤春, 陈英旭, 等. 千岛湖叶绿素 *a* 浓度动态变化及其影响因素分析. 浙江大学学报(自然科学版), 2004, 30(1): 22—26]
- [4] Huang X F. Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology [M]. Beijing: Standards Press of China, 2000 [黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000]
- [5] Liu J K. Advanced Hydrobiology [M]. Beijing: Science Press, 1999 [刘建康, 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999]
- [6] Danielsson A, Cato I, Carman R, *et al.* Spatial clustering of metals in the sediments of the Skagerrak/ Kattegat [J]. *Applied Geochemistry*, 1999, 14(6): 689—706
- [7] Fovell R, Fovell M Y. Climate zones of the conterminous United States defined using cluster analysis [J]. *Journal of Climate*, 1993, 6(11): 2103—2135
- [8] Sharma S. Applied multivariate techniques [M]. New York: Wiley, 1996
- [9] Ye L, Li D F, Tang T, *et al.* Spatial distribution of water quality in Xiangxi river [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1959—1962 [叶麟, 黎道丰, 唐涛, 等. 香溪河水质空间分布特性研究. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1959—1962]
- [10] Wang H P, Xia J, Xie P, *et al.* Mechanisms for hydrological factors causing algal blooms in Hanjiang River —Based on kinetics of algae growth [J]. *Resources and Environment in Yangtze Basin*, 2004,

- 13(3):282—285[王红萍,夏军,谢平,等.汉江水华水文因素作用机理-基于藻类生长动力学的研究,长江流域资源与环境,2004,13(3):282—285]
- [11] Hu R,Lin Q Q,Duan S S, *et al.* Distribution of Chlorophyll-*a* and phosphorus in subtropical reservoirs,south China [J]. *Ecological Science*,2002,21(4):310—315[胡韧,林秋奇,段舜山,等.热带亚热带水库浮游植物叶绿素 *a* 与磷分布的特征.生态科学,2002,21(4):310—315]
- [12] Luo W S,Tan G. Three Gorges Reservoir Xiangxihe Bay Water quality prognosis [J]. *International Journal Hydroelectric Energy*,2000,18(4):46—48[雒文生,谈戈.三峡水库香溪河库湾水质预测.水电能源科学,2000,18(4):46—48]
- [13] 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]
- [14] Xu X Q,Deng G Q,Hui J Y, *et al.* Heavy Metal Pollution in sediment from the Three Gorge Reservoir Area [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*,1999,23(1):1—10[徐小清,邓冠强,惠嘉玉,等.长江三峡库区江段沉积物的重金属污染特征.水生生物学报,1999,23(1):1—10]
- [15] Komarkova J,Hejzlar J. Summer maxima of phytoplankton in the Rimov reservoir in relation to hydrologic parameters and phosphorus loading [J]. *Arch Hydrobiology*,1996,136:217—236
- [16] State environmental protection administration of China, Environmental quality standards for surface water (GB3838-2002) [M], Beijing: Environmental sciences of China Press,2002[国家环境保护总局,地表水环境质量标准(GB3838-2002),北京:中国环境科学出版社,2002]
- [17] Xie P,Xia J,Dou M, *et al.* Research onto the effects of the middle route of China's south-to-north water transfer project on water bloom in the countermeasures Part :An analysis of the key factors generating water bloom in Hanjiang River [J]. *Journal of Natural Resources*,2004,19(4):418—422[谢平,夏军,窦明,等.南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响及对策研究(一)—汉江水华发生的关键因子分析.自然资源学报,2004,19(4):418—422]
- [18] Liu H L. The normalized methods for investigation on lake eutrophication. [M]. Beijing: Environmental Sciences of China Press,1987[刘鸿亮,湖泊富营养化调查规范,北京:中国环境科学出版社,1987]
- [19] Liu Z S,Wang C S,Ni J Y, *et al.* Ecological distribution characteristics of chlorophyll *a* in Fuxian Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2003,23(9):1773—1780[刘镇盛,王春生,倪建宇,等.抚仙湖叶绿素 *a* 的生态分布特征.生态学报,2003,23(9):1773—1780]

ANALYSIS OF THE SPATIAL AND TEMPORAL CHANGES OF CHLOROPHYLL A CONCENTRATION IN XIANGXI BAY IN SPRING AND ITS IMPACT FACTORS

HAN Xin-Qin^{1,2}, YE Lin^{1,2}, XU Yao-Yang^{1,2} and CAI Qing-Hua¹

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

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract : The investigations on chlorophyll *a* of the water body, total nitrogen, total phosphorus and other environmental factors were carried out at 14 sampling sites of Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir from March to April 2005. We have also analyzed the spatial and temporal variation of chlorophyll *a* and its relationship with environmental factors.

Chlorophyll *a* was extracted and measured according to procedures of UNESCO's spectrometer methods under 750nm, 665nm, 645nm and 630nm wavelengths. Dissolved oxygen and nutrient data were supplied by the chemical working group of the research project. The result showed that from the upper reaches to the lower reaches of the Xiangxi Bay, there was evident horizontal variation of chlorophyll *a* concentrations in the water column. One bloom event occurred at March 17th at a very large scale. Then bloom went forward from the lower reaches to the upper reaches along with the time in April. In detail, bloom event occurred at April 11th at the sampling sites of group , then about five days later it occurred at the sampling sites of group . Bloom event occurred at the sampling sites of group between April 16th and April 22th, while it occurred at April 22th at the sampling sites of group .

Obviously, ecological factors, including total nitrogen, total phosphorus, water temperature, transparency and dissolved oxygen, had significant impact on the concentrations of chlorophyll *a* directly and indirectly. Generally speaking, total phosphorus increased from the lower reaches to the upper reaches of the Xiangxi Bay, while total nitrogen decreased first, then increased. The result obtained showed that on the one hand total phosphorus and total nitrogen were enough for the growth of phytoplankton, on the other hand the ratio of total nitrogen to total phosphorus was very low, which ranged from 0.57 to 21.14. The relationship between chlorophyll *a* and total nitrogen, total phosphorus was negative to some extent. The correlation coefficient between chlorophyll *a* and total nitrogen was higher than that between chlorophyll *a* and total phosphorus. Considering the distribution of the nutrients and their correlation with the chlorophyll *a*, total nitrogen was possibly the main limited factor of phytoplankton growth, while total phosphorus was not the main limited factor of phytoplankton growth. The relationship between chlorophyll *a* and transparency was a curve of anti-hyperbola. This result was similar to the research result of the Japan and North America's experts. The relationship between chlorophyll *a* and dissolved oxygen was positive. It was due to the increase of oxygen which was released during photosynthesis.

Key words : Xiangxi Bay; Chlorophyll *a*; Environmental factor; Bloom