

香溪河库湾春季水华期间硝酸盐、磷酸盐的时空分布

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:在三峡水库香溪河库湾春季水华连续暴发期间(2005年2月26日—4月28日)对香溪河与长江汇合处(河口)至香溪河库湾上游库尾处总计14个采样点进行连续监测,结果表明硝酸盐和磷酸盐在库湾中存在明显的时空分布规律。在空间上,河口的硝酸盐浓度高,库尾浓度低,其变化趋势是随着与河口距离的增加而降低;磷酸盐的分布规律是库尾的浓度高,河口的浓度低,其变化趋势与硝酸盐恰好相反。各采样点硝酸盐和磷酸盐浓度在时间上也呈现出明显的规律。河口硝酸盐的浓度在不同时间变化幅度较小,库尾采样点的硝酸盐浓度的变化幅度较大,随着与河口距离的增加硝酸盐浓度在不同时间的变化幅度逐渐增大。各样点磷酸盐在时间上的变化趋势是样点S04-S08的变化幅度较大,位于香溪河库湾河口和库尾的变化幅度较小。

关键词:硝酸盐;磷酸盐;氮磷比;富营养化;香溪河库湾;三峡水库

中图分类号:Q178.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3207(2006)01-0075-05

淡水水体中的硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)和磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)是浮游植物生长的重要营养成分,同时也是淡水生态系统中主要的限制因子。早在20世纪70年代,世界经济合作与开发组织(OECD)协调和组织湖泊富营养化合作研究,通过对世界上近200个湖泊广泛和深入的监测探讨,发现湖泊中磷的浓度与浮游生物生物量的代表参数叶绿素 *a* 之间存在明显的正相关关系^[1]。同时众多国内外学者通过研究发现在很多情况下,氮也是淡水生态系的限制因子之一^[2]。研究硝酸盐、磷酸盐在香溪河库湾中的时空分布规律,对于研究库湾水体富营养化问题具有重要的基础意义。

香溪河发源于湖北神农架林区,流经神农架林区的木鱼、红花和兴山县的湘坪、南阳、高阳、峡口,最终在秭归县香溪镇注入长江。香溪河是三峡库区坝首第一大支流,其干流长度94km,流域面积3099km²,处在亚热带大陆性季风气候^[3]。香溪河流域内的磷矿资源丰富,与磷相关的产业已是兴山县

的支柱产业。三峡水库1期蓄水后,从秭归县香溪镇至兴山县峡口镇河段的水位随之升高,形成典型的水库库湾。其显著特征就是水流速度减缓,水交换速率降低,输送N、P等营养物质的能力降低,造成了比较严重的水体富营养化问题。

1 材料与方 法

1.1 地点 从香溪河口至平邑口设置14个采样断面,其编号分别为S1-S14(图1)。于2005年3月5日—4月28日期间进行野外采样,每6d进行一次,共计10次。其中2005年3月12日,由于船只故障未完成采样。野外采样一般在上午9:00至下午14:00之间进行。

图1是各采样点在香溪河库湾中的空间分布,考虑到在河口以及香溪河库湾库尾的水文条件比较复杂,相对而言在上述两个地方的采样点的布设要密集一些。各个采样点之间的距离参照表1。

收稿日期:2005-05-31;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-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(2002CB412300)资助

作者简介:叶麟(1980—),浙江衢州人,博士研究生。主要从事GIS和生态系统模型研究。邵晓阳、徐耀阳、贾兴焕、周淑婵等先生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

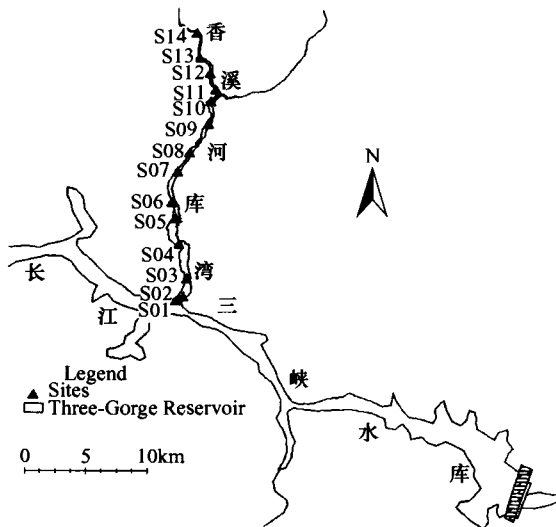


图1 香溪河库湾采样点

Fig.1 Sampling sites in the Xiangxi Bay

每个样点分别采取 300mL 水样,现场加硫酸调整 pH < 2,低温保存。同时,在每个采样点使用差分 GPS(Topcon,日本)分别记录采样点的经纬度,用于记录采样点的位置以及计算各采样点与河口之间的距离。香溪河以及长江水系图使用国家基础地理信息中心的共享数据,各样点与河口之间距离的计算在 ArcGIS 8.3 上完成(ESRI,美国)。从图 1 可以看出各个采样点在香溪河库湾中的大致分布,其中 S01 位于长江干流江段,S14 位于香溪河河流与库湾的交错区,其他采样点位于二者之间。

1.2 水质分析 野外采集水样于实验室中由连续流动(Skarlar San++, 荷兰)分析水样中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 。

1.3 GIS 分析 根据各个采样点的经纬度坐标以及香溪河数字化地图,利用软件 ArcGIS8.3(ESRI,美国)分别计算各采样点沿着河道方向与河口之间的距离。

表1 香溪河库湾各采样点 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的基本统计学特征Tab.1 The basic statistic characteristic of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ in the Xiangxi Bay

采样点	与河口距离 离(km)	$\text{NO}_3\text{-N}$				$\text{PO}_4\text{-P}$			
		Means	Range	SD	CV	Means	Range	SD	CV
S01	0.00	1.46	1.24—1.76	0.18	12.36	0.10	0.07—0.13	0.02	20.00
S02	0.65	1.37	0.77—1.81	0.29	21.42	0.10	0.07—0.13	0.02	17.20
S03	2.07	1.21	0.69—1.59	0.28	22.70	0.10	0.05—0.14	0.03	25.46
S04	5.22	1.04	0.65—1.34	0.24	23.23	0.11	0.05—0.18	0.04	41.76
S05	7.64	0.92	0.62—1.25	0.21	23.13	0.12	0.07—0.21	0.05	43.03
S06	9.00	0.77	0.47—1.05	0.22	28.19	0.14	0.08—0.26	0.06	46.94
S07	11.79	0.66	0.36—1.19	0.27	41.56	0.15	0.07—0.26	0.07	43.74
S08	13.63	0.61	0.24—1.13	0.27	45.44	0.17	0.09—0.27	0.07	39.57
S09	16.36	0.43	0.01—0.63	0.18	42.47	0.21	0.08—0.30	0.07	30.95
S10	18.29	0.46	0.13—0.62	0.14	31.02	0.22	0.09—0.31	0.06	29.12
S11	19.37	0.41	0.07—0.63	0.19	47.75	0.29	0.15—0.40	0.09	31.15
S12	20.94	0.42	0.02—0.70	0.21	50.32	0.32	0.17—0.49	0.10	30.04
S13	22.49	0.46	0.02—0.81	0.26	57.12	0.35	0.23—0.55	0.09	24.91
S14	24.62	0.56	0.08—0.87	0.20	35.81	0.38	0.25—0.56	0.11	29.79

2 结果

2.1 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的空间分布规律

从表 1 中可以发现,在香溪河库湾的河口位置(S01) $\text{NO}_3\text{-N}$ 的多次采样均值为:1.46mg/L, $\text{PO}_4\text{-P}$ 的均值为:0.10mg/L。在香溪河库湾库尾位置(S14)的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的均值为:0.56mg/L, $\text{PO}_4\text{-P}$ 的均值为:0.38mg/L。其中 S01 的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度是 S14 的 2.6 倍,

而 S14 的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度是 S01 的 5.6 倍之高。可见在香溪河库湾中不同样点之间的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的差别是非常明显的。

为方便比较不同时期的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 沿香溪河库湾中的变化规律,分别绘制了各个采样时期 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度与河口距离之间的变化曲线(图 2)。从图 2 可以看出,香溪河库湾 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在空间分布的基本规律是河口位置(香溪河与长江交界的位置)的浓度高,

位于库湾的尾部(接近河流状态的位置)位置的浓度低,在香溪河库湾中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的浓度随着与河口的距离增大而降低。而 $\text{PO}_4\text{-P}$ 在库湾中的分布规律与 $\text{NO}_3\text{-N}$

的分布规律基本相反,即在库尾位置的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量很高,而在河口位置的浓度低,其在库湾中的变化规律是随着与河口的距离增大而增大。

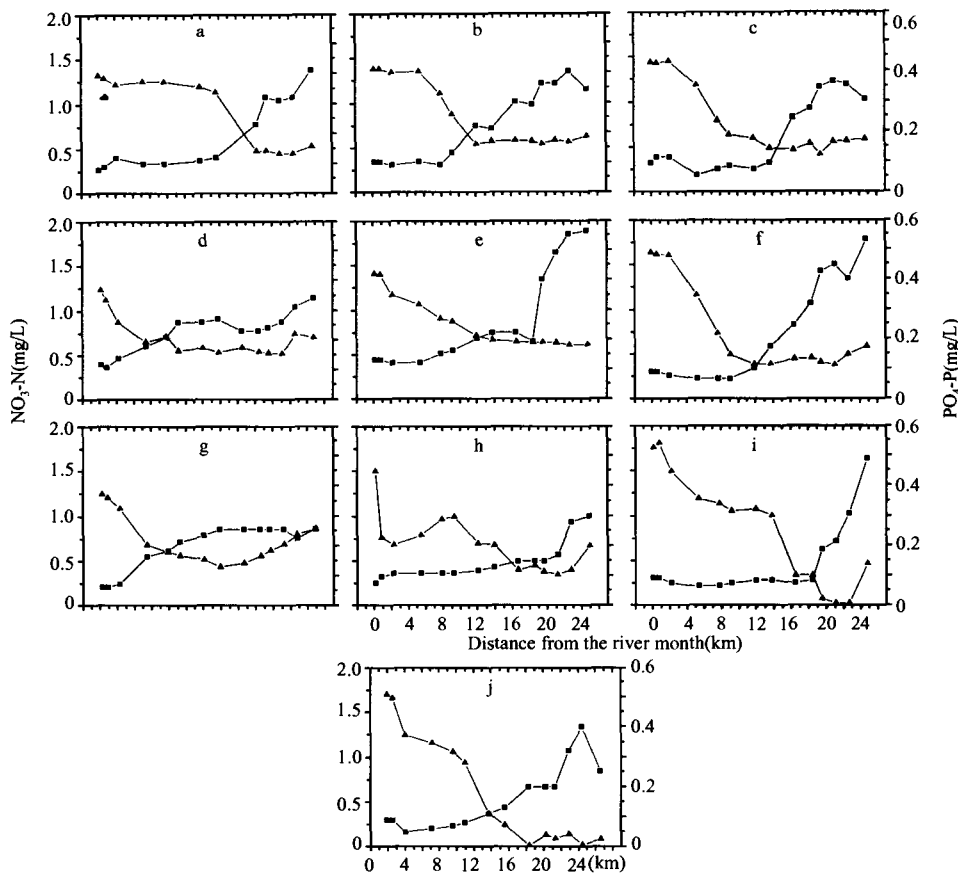


图 2 不同时期 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 在香溪河库湾空间分布图

Fig. 2 The spatial distribution of $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ in Xiangxi River Bay at different times

a. 26, Feb. b. 5, Mar. c. 17, Mar. d. 23, Mar. e. 29, Mar. f. 4, Apr. g. 10, Apr. h. 16, Apr. i. 22, Apr. j. 28, Apr. triangle: $\text{NO}_3\text{-N}$ square: $\text{PO}_4\text{-P}$

2.2 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的时间变化规律

从图 2 上看,虽然每次监测的数据显示硝酸盐在空间上的变化趋势是一致的,但是其随距离变化的规律在不同时期也是存在差异的。在靠近长江的采样点的 N、P 的变化比较缓慢,而在库尾的位置样点的变化相对而言也比较缓慢。在位于二者之间的样点的变化不是特别有规律。

从表 1 上看,除了样点 S10 和 S14,其他采样点 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的变异系数(CV)随着与河口的距离的增加而增大。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的变异系数是在在样点 S04—S08 之间高,库湾河口位置的采样点以及库尾的采样点的变异系数相对较小,河口位置的采样点的变异系数较库尾位置采样点的变异系数小。

同时连续监测的结果显示,有一阶段在库尾的

部分采样点的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度很低(图 2i, j)。如 2005 年 4 月 22 日 S12、S13 样点的硝酸盐含量均为 0.02mg/L ,2005 年 4 月 28 日 S09 样点的硝酸盐的含量仅为 0.01mg/L ,推测可能与藻类水华暴发摄取了水体中大量的硝酸盐氮有关。

3 讨论

氮磷是水体重要的营养元素。本次连续监测的数据显示(2005 年 2 月 26 日—4 月 28 日)硝酸盐、磷酸盐在香溪河库湾中存在明显的时空分布规律。

从空间分布上看硝酸盐在河口附近采样点的浓度高,在库尾附近采样点的浓度低,随着与河口的距离增加,硝酸盐呈逐渐降低的趋势。而磷酸盐的空间分布规律恰恰相反。如此完全相反的空间分布规律,

必然会使得 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{PO}_4\text{-P}$ 的比值在香溪河库湾中出现很大的变化幅度(表 1),其中在此次监测的过程中 $\text{NO}_3\text{-N}/\text{PO}_4\text{-P}$ 的最大比值为 24.2,最小值为 0.06。氮磷比的变化对不同浮游生物的生长具有重要的作用^[4-6]。根据 Reynolds 的研究^[7],在淡水水体中 $\text{N/P} > 30$ 时,会出现 P 的抑制, $\text{N/P} < 8$ 的时候,可能出现 N 的抑制,而 N/P 在 8—30 之间是正常的波动,在 15—16 之间时为浮游植物最佳生长需要。但是根据已有的研究,水体在不同的物理和化学条件下,不同藻类的最优生长氮磷比可能会与上述氮磷比的范围存在一定的偏差^[8-11]。 N/P 比值对藻类水华的暴发具有重要的作用,而香溪河库湾中藻类的最适生长的氮磷比值还需要进一步深入的研究。

从香溪河库湾中氮磷的来源上看,本研究区域内长江水体氮的浓度高,其向库湾内部扩散是造成硝酸盐空间分布格局的主要原因。磷的主要贡献是上游磷化工排放的工业污水。从图 2 看,香溪河库湾位于河口的采样点的硝酸盐的含量总是最高的,分析其主要原因是由于长江流域的面积大,水土流失相对较为严重,故水体中硝酸盐的含量比较高。而位于河库交错带的 S14 的磷酸盐在整个库湾中的含量基本上也是最高的,但是 3 月 5 日和 3 月 17 日两次监测的数据显示 S14 磷酸盐的浓度要略低于 S13、S12(图 2b、c),分析原因可能是上游化工厂排放污水中的磷酸盐的含量并不是恒定不变的,S14 是在整个库湾的最上游,因而受到的影响比较明显,而其后的样点相对比较稳定。

从时间变化的角度来看,各个采样点的硝酸盐和磷酸盐在香溪河库湾中存在较强的规律性。除了位于高岚河汇入点附近的样点 S10 以及位于库湾最上游的样点 S14,随着与河口的距离增加,各个采样点的硝酸盐浓度的变异系数(CV)是不断增大的。推测原因是随着与河口的距离的增加,硝酸盐的浓度逐渐降低,N 对藻类的限制逐渐增强。随着库湾中浮游植物生物量的变化,在硝酸盐浓度低的地方变化幅度显然要高于硝酸盐相对充足的河口位置。在香溪河库尾附近的几个点有时候的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的浓度非常低。根据汤洪波等人的研究^[12],香溪河库湾上游水华期间的优势种为甲藻。甲藻水华的暴发与水体中氮盐是密切相关的^[13]。在这一时段此区域的叶绿素含量很高^[14],推测是藻类的大量繁殖消耗了水体中的 $\text{NO}_3\text{-N}$,因而出现了上述情况。库湾中各个采样点的磷酸盐的变异系数的最大值出现在样点 S4—S8 之间,而不是出现在

磷酸盐浓度较低的河口位置,这是一个值得继续深入研究的问题。

参考文献:

- [1] Liu H L, Jin X C, Tu Q Y, et al. The standards for the lake eutrophication survey [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1987 [刘鸿亮, 金相灿, 屠清瑛, 等. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1987]
- [2] Cai Q H. Multivariate analysis of planktonic blooms in Lake Donghu, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1990, 14(1): 22—31 [蔡庆华. 武汉东湖浮游植物水华的多元分析. 水生生物学报 1990, 14(1): 22—31]
- [3] Ye L, Li D F, Tang T, et al. Spatial distribution of water quality in Xiangxi River China (J). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1959—1962 [叶麟, 黎道丰, 唐涛, 等. 香溪河水水质空间分布特性研究. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1959—1962]
- [4] Liu Y S, Han M, Liang Z B, et al. Influence of light intensity, temperature and nutrients on the growth of microcystis in water of Dianchi Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1995, 8(6): 7—11 [刘玉生, 韩梅, 梁占彬, 等. 光照、温度和营养盐对滇池微囊藻生长的影响. 环境科学研究, 1995, 8(6): 7—11]
- [5] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment [J]. *American Scientist* 1958, 46: 561—600
- [6] Wan X L, Deng N N, Zhu C J, et al. Effect of nutrients (phosphate and nitrate) composition on the growth of HAB algae [J]. *Periodical of ocean university of China*, 2004, 34(3): 453—460 [王修林, 邓宁宁, 祝陈坚, 等. 磷酸盐、硝酸盐组成对海洋赤潮藻生长的影响. 中国海洋大学学报, 2004, 34(3): 453—460]
- [7] Reynolds C S. The Ecology of Freshwater Phytoplankton [M]. London: Cambridge University Press, 1984
- [8] Hodgkiss I J, Ho K C. Are changes in N:P ratios in coastal waters the key to increased red tide blooms? [J]. *Hydrobiologia* 1997, 352(1—3): 141—147
- [9] Hu M H, Yang Y P, Xu C L, et al. The phosphorus limited the growth of the phytoplankton in Changjiang River Estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1989, 11(4): 439—443 [胡明辉, 杨逸萍, 徐春林, 等. 长江口浮游植物生长的磷酸盐限制. 海洋学报, 1989, 11(4): 439—443]
- [10] Liu Y D, Sun J, Gong J, et al. The effects of different N/P ratios on the growth of *Isochrysis galbana* [J]. *Marine Fisheries Research*, 2002, 23(1): 29—32 [刘艳东, 孙军, 巩晶, 等. 不同氮、磷比例对球等鞭金藻生长的影响. 海洋水产研究, 2002, 23(1): 29—32]
- [11] Liu Y D, Sun J, Cheng Z T, et al. Effect of N/P ratio on the growth of a red tide diatom *Skeletonema Costatum* [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2002, 2: 39—44 [刘艳东, 孙军, 陈宗涛, 等. 不同氮磷比对中肋骨条藻生长的影响. 海洋湖沼通报, 2002, 2: 39—44]
- [12] Tang H B, Liu G X, Hu Z Y. Preliminary research on the algal bloom of *Peridiniopsis* sp. in Gaolan River of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 47—51 [汤洪波, 刘

- 国祥,胡征宇.三峡库区高岚河甲藻水华初步研究.水生生物学报,2006,30(1):47—51]
- [13] Fan C L, Glibert P M, The importance of reduced nitrate nitrogen in a natural *Proocentrum minimum* bloom—a model approach [J]. *Ecologic Science*, 2003, 22(3):199—204 [范春雷, Glibert P M. 还原态氮源在微小原甲藻大规模赤潮中的重要性——动力学模型. 生态科学, 2003, 22(3):199—204]
- [14] Han X Q, Cai Q H. Analysis of the spatial and temporal changes of chlorophyll a concentration in Xiangxi River estuary in Spring and its impact factors [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1):89—94 [韩新芹, 蔡庆华. 香溪河库湾春季叶绿素 a 浓度动态变化及其影响因子分析. 水生生物学报, 2006, 30(1):89—94]

THE SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF NITRATE AND PHOSPHATE IN THE XIANGXI BAY, THREE GORGE RESERVOIR REGION DURING THE SPRING BLOOM PERIOD

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: Field survey was carried out at 14 sites along the Xiangxi Bay, which had been the former Xiangxi River prior to the construction of Three-Gorge Reservoir, during a spring phytoplankton bloom (2, Feb.-28, Apr., 2005). The sampling sites distributed from the mouth of Xiangxi River (where adjacent to the Yangtze River) to the head of the Xiangxi Bay. And field survey was performed every six days, and the water was sampled and preserved with pH < 2 using H₂SO₄. The concentrations of nitrate and phosphate of the water sample were analyzed by the Segmented Flow Analyzers (Skalar, Netherlands) using the standard methods. The results showed a legible representation for the spatial and temporal distribution of the nitrate and phosphate. In the spatial, the concentration of nitrate was high in the mouth of the Xiangxi River and low in the head water of the Xiangxi Bay. And the concentration of nitrate was decreased with the distance increased from the mouth of the Xiangxi River. The spatial pattern of phosphate was reverse to the nitrate. The concentration of the phosphate was low in the mouth of the Xiangxi River and high in the head water of the Xiangxi Bay. The concentration of the phosphate was increased with the distance increased from the mouth of the Xiangxi River. The spatial distribution of nitrate and phosphate may indicated that nitrate diffusion from the Yangtze River and phosphate diffusion from the head water of the Xiangxi Bay were the main factor driving the spatial pattern of nitrate and phosphate in the Xiangxi Bay. In the temporal, the variation of the concentration of nitrate in the sites near the mouth of the Xiangxi River was small, and the variation in the head water of Xiangxi Bay was large. With the distance from the mouth of Xiangxi River increased, the variation of nitrate was increased. A large variation of the concentration of phosphate was found in the middle reach of Xiangxi Bay (S04—S08).

Key words: Nitrate; Phosphate; N/P Ratio; Eutrophication; Xiangxi Bay; Three Gorge Reservoir Region