

云南抚仙湖水体营养元素分布 及其对人为扰动的响应*

倪建宇^{1,2} 周怀阳³ 张 美² 刘小涯² 王方国² 何宗玉⁴

(1: 国家海洋局海底科学重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012;

2: 国家海洋局第二海洋研究所海洋生态环境监测与灾害防治中心, 杭州 310012;

3: 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 4: 中国大洋矿产资源研究开发协会, 北京 100860)

提 要 本文分析了云南抚仙湖水体营养元素和溶解氧的分布特征, 并结合大洋协会在湖区进行的多金属结核采矿系统试验, 探讨了采矿系统在湖底行走而导致的人为扰动对湖区营养元素的影响。研究表明, 湖区水体中的营养元素存在着明显的季节性变化, 且主要受湖区气候水文条件的影响; 采矿系统行走时所扰动的沉积物对水体中的营养元素, 尤其是近底层水体的营养元素分布, 影响明显, 这主要是由于再悬浮的沉积物将原先吸附在沉积物上的营养元素再次释放到水体中而导致的, 因此, 在评价人类湖底采矿试验活动对湖区环境的影响时还应关注湖底沉积物对水环境的影响。

关键词 营养元素 人为扰动 抚仙湖

分类号 P343.3

抚仙湖地处云南省澄江县城以南, 地理位置为 $24^{\circ}21' - 24^{\circ}38'N, 102^{\circ}49' - 102^{\circ}58'E$, 湖面海拔 1721 m, 湖区四面环山, 沿湖有尖山河、路居河、东大河、西大河、梁王河等 20 多条溪流汇入湖中。抚仙湖流域面积约 212 km^2 , 最大水深为 155 m, 平均水深约 90 m, 为云南高原著名的深水淡水湖泊。同时, 湖区是该地区著名的旅游度假区之一, 也是当地居民的主要饮用水源, 近年来, 由于湖区范围内工农业的发展, 湖区水质开始受到污染^[1]。对于湖区环境前人有过较为系统的研究, 但主要为现状调查^[2,3], 笔者结合中国大洋矿产资源研究开发协会在湖区进行的多金属结核采矿系统试验, 对湖区的水体中营养组分及与水生生物活动密切相关的溶解氧含量进行了监测, 并对由于采矿系统在湖底行走而导致的人为扰动对湖区水质的影响进行初步的评价。

1 样品采集和分析

湖水中溶解性氮、磷、硅等营养元素是维持湖泊生态系统的基本元素, 也是评价湖泊水体营养状况的主要指标。笔者分别于 2001 年 5 月 26 日至 27 日(春季)、8 月 14 日(夏季)和 9 月 13 日至 19 日(秋季)在湖区北部西侧深水区对湖区水体中营养盐组分和溶解氧含量进

* 大洋矿产资源勘探开发专项基金项目“结核采矿系统湖试羽状流及其环境影响研究”(编号: DY95-06-08)资助。

2003-03-21 收稿; 2004-02-15 收修改稿。倪建宇, 男, 1969 年生, 博士, 研究员。E-mail: jianyuni@sio.zj.edu.cn.

行了四个航次的现场调查. 参照 GB127634-91 国家标准中相关化学要素观测的要求, 采用颠倒式水样采集器分层采集水样, 水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤后采用分光光度法和碘量滴定法分别在现场测定湖区水体中硅 ($\text{SiO}_3 - \text{Si}$)、磷 ($\text{PO}_4 - \text{P}$) 和氮 (TIN) 等营养元素及溶解氧的分布特征, 采样站位见图 1.

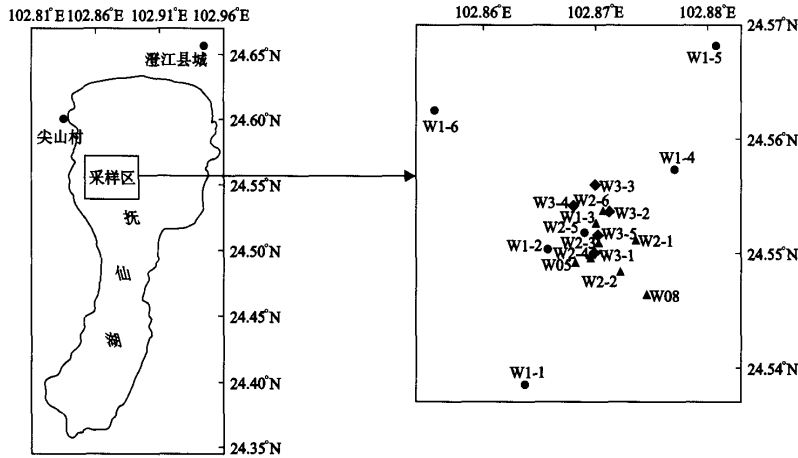


图 1 云南抚仙湖采样站位分布
Fig. 1 Sampling stations in Fuxian Lake

2 分析结果和讨论

云南抚仙湖为半封闭的高原深水湖泊, 水深而清澈, 其湖水的透明度一般为 $7-10 \text{ m}$, 最大可达 $12.5 \text{ m}^{[2]}$. 水体中悬浮物的含量极低, 一般在 $0.3-24.7 \text{ mg/L}$ 之间, 表现为表层和底层大中间小的特点^①. 为了探讨采矿试验对湖区水体的影响, 分别于春季 (5月) 和夏季 (8月) 对湖区水体中营养元素的分布进行了监测, 以便了解采矿试验前湖区水体中营养元素的分布特征及其季节变化.

2.1 水体中营养盐的分布特征

分析结果表明, 春季水体中磷的含量在 $4.34-26.33 \mu\text{g/L}$, 平均值为 $7.70 \mu\text{g/L}$; 硅的含量在 $0.09-1.09 \text{ mg/L}$, 平均值为 0.63 mg/L ; 氮的含量在 $9.24-173.40 \mu\text{g/L}$, 平均值为 $53.671 \mu\text{g/L}$. 水体中磷、硅和氮的水深分布特征见图 2. 可以看出, 总体上春季时水体中磷和氮在分布上具有 20 m 以上含量较为一致, 在整个水柱中为低值区; 20 m 以下, 则呈逐渐增加趋势的特点; 而硅则无明显的规律, 但总体上可分为两类, 一类表现为在 $0-20 \text{ m}$ 内, 含量呈增加趋势; 另一类则表现为随水深增加而略有升高的特点 (图 2).

① 周怀阳, 王春生, 梁楚进, 倪建宇等. 结核采矿系统湖试羽状流及其环境影响研究报告, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州, 2002: 126.

夏季的分析结果呈现与春季不同的特点 (图 3), 分析结果表明, 水体中磷的含量在 0.68 – 15.63 $\mu\text{g/L}$, 平均值为 7.46 $\mu\text{g/L}$; 硅的含量在 0.02 – 0.67 mg/L , 平均值为 0.21 mg/L ; 氮的含量在 9.03 – 152.38 $\mu\text{g/L}$, 平均值为 66.69 $\mu\text{g/L}$. 水体中无机氮类营养元素略高于春季的含量, 而磷和硅则明显低于春季的含量. 在垂直分布上 (图 3), 氮含量的最低值出现在 20 m 层, 硅含量的最低值出现在 50 m 层, 随后, 其含量均随水深的增加而升高. 磷的变化则较为复杂, 但总体上在 50 m 以下随深度的增加而升高.

由于抚仙湖为贫营养型湖泊^[2-4], 磷是湖区浮游植物生长的主要限制因子^[5], 湖区浮游植物生物量较低, 湖区周围也无大的污染源. 另外, 湖区春季为雨季开始的阶段, 降水较少; 而夏季则是雨季的中后期, 降雨充沛, 由周围山间径流补充的水量充沛, 对湖水中的营养元

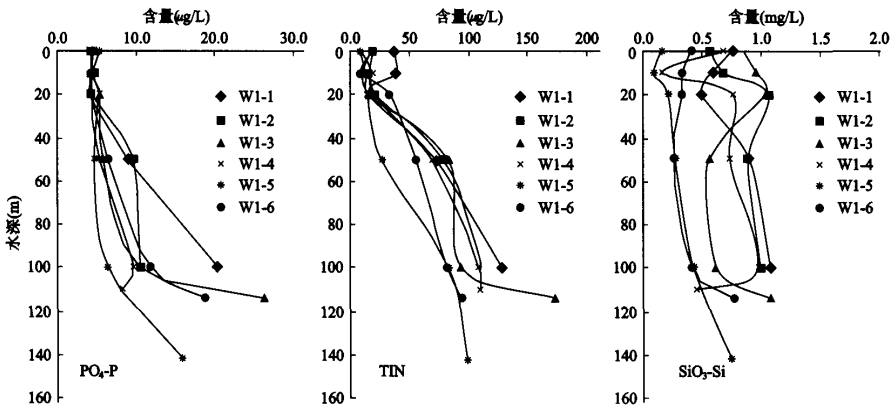


图 2 2001 年春季抚仙湖水体中磷、氮和硅水深剖面

Fig. 2 Vertical distribution of phosphate, total inorganic nitrogen and silicate in Fuxian Lake (May, 2001)

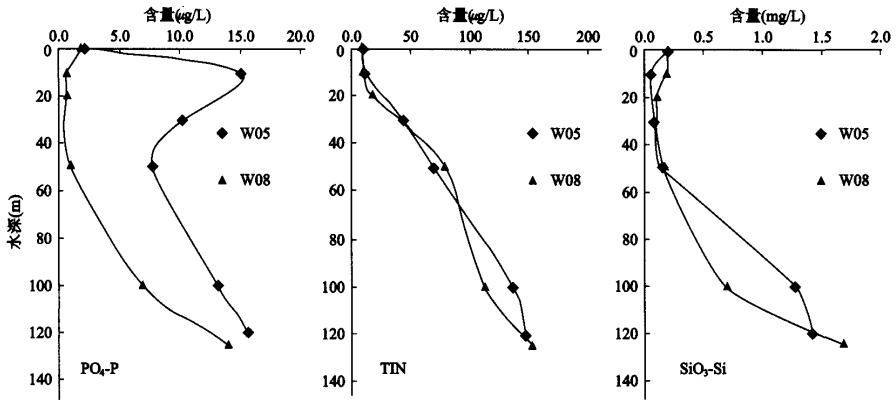


图 3 2001 年夏季抚仙湖水体中磷、氮和硅水深剖面

Fig. 3 Vertical distribution of phosphate, total inorganic nitrogen and silicate in Fuxian Lake (August, 2001)

素的含量有稀释作用。另一方面,由于降雨量的增加,光照时间减少,影响浮游植物的生长代谢速率,降低了营养元素的消耗。因此,造成湖区水体营养元素分布存在季节性变化的原因以气候条件为主,这与前人的研究结果相似,但在季节分布上,表现为夏季低于春季,与前人的研究结果相反^[2,3]。同期测定反映水体浮游植物现存生物量的叶绿素 a 浓度也表现为夏季低于春季^[5],造成这种现象可能是由于涉及的只是湖区的部分地区,或是调查时间的差异性造成的。

2.2 水体中溶解氧的分布特征

抚仙湖水体春季的溶解氧含量分布呈现与海水不同的分布特征(图 4a),即在 20 m 层出现溶解氧最大值,20 m 以下则呈逐渐降低的趋势,不出现明显的氧最低层。而在夏季,溶解氧则呈“S”形特点(图 4b),其含量从水面到 20 m 呈降低趋势,而从 20 m 到 50 m,则呈增加趋势,50 m 以下则再呈降低趋势,这与春季的测定结果显著不同。夏季溶解氧含量也要低于春季。水体中溶解氧的含量主要取决于水体和大气交换,水团的混合以及水体中的生物活动。湖区水流主要由风引起的,表现为表层和底层流速大中层流速小,且表层流和底层流流向大致相反的特点;另外,抚仙湖在春季表现为双温跃层结构,主温跃层出现在 24 - 35 m 附近,次温跃层则在 4 - 10 m 附近;而夏季则为单温跃层结构,使得湖水分为密度不同的上下两层。同时,夏季湖区降雨量明显增多,光照时间减少,影响浮游植物的光合作用和生长代谢速率,这些可能是湖区水体中溶解氧含量呈现季节性分布特征的原因。

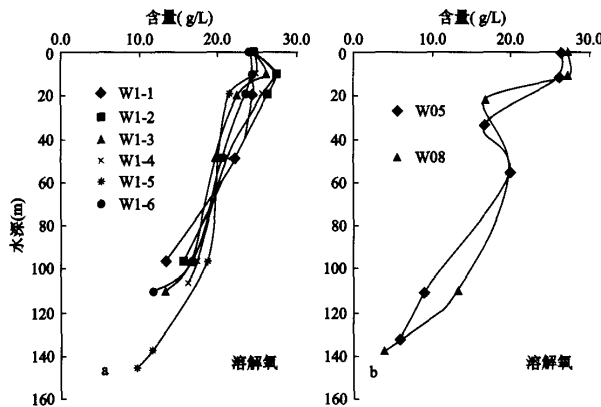


图 4 2001 年春季(a)和夏季(b)抚仙湖水体中溶解氧水深剖面

Fig. 4 Vertical distribution of dissolved oxygen in Fuxian lake(a: May; b. August)

2.3 采矿试验对湖区水体营养元素的影响

近年来,时有探讨人类活动对湖泊影响的报道,但由于湖泊本身的自净能力,人类活动对湖泊的影响并不是很直观的表现出来,而需要一个相对长的时间才能有所体现。如影响湖区水体面积^[6],湖区生态系统的改变^[7]等,而等到这些改变发生后则很难发生逆转和修复,因此,目前主要通过模拟研究来探索人类活动对湖泊环境,尤其是水体环境的影响^[8-10],以期预测人类活动对湖泊的负面影响并提出相应的对策。虽然这些研究有利于我们认识湖泊

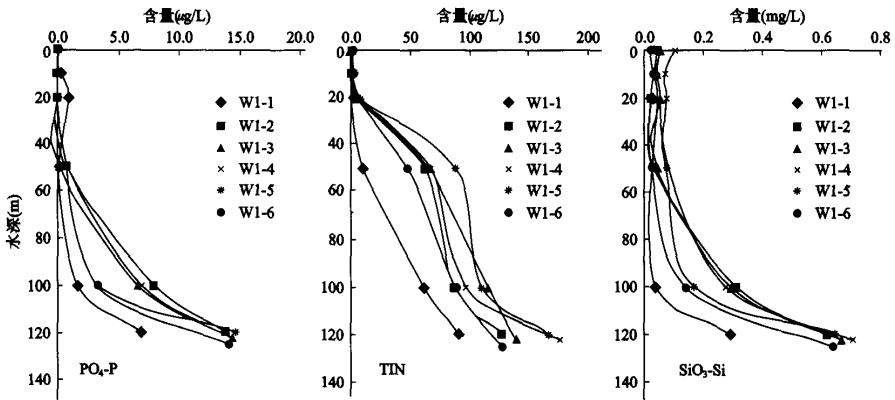


图 5 2001 年秋季采矿系统试验期间磷、氮和硅的水深剖面图

Fig. 5 Vertical distribution of phosphate, total inorganic nitrogen and silicate during test (Sep., 2001)

对人类活动的响应,但其研究方法本身存在着一定的局限性,如主要是通过人为改变一些参数来考量湖泊的响应,不能真实地反映实际的情况.通过利用结核采矿系统进行湖泊行走试验的机会,来研究湖泊水体对人为扰动的响应,可更直接地了解人类活动对湖泊,尤其对湖泊水环境的直接影响.

2.3.1 人为扰动的影响范围 由于湖泊本身具有一定的自净能力,在其自净容量限度内的污染物将通过生物的、化学的、物理的等方式而得到净化.这种自净能力主要和湖泊水体的水量、水质、以及生态系统有关.研究表明,抚仙湖属贫营养型高原半封闭深水淡水湖泊,水体初级生产力水平相对较低,且存在着明显的温度跃层现象,湖流主要为风生流.

2001 年在抚仙湖进行的大洋多金属结核采矿系统湖泊试验,主要在湖底地势相对平缓的湖区的西侧,平均水深约 130 m、铺有丰度为 5-10 kg/m² 人造模拟结合的 300×100m 的矩形区域内进行的.采矿机主要由行走履带车和采矿头组成,通过喷水枪喷射水流将结核悬浮起来进行采集.采矿试验时,履带车的平均速度为 0.3 m/s,侵入表层沉积物的深度为 9-21 cm,平均为 10 cm.因此,采矿系统将对湖底沉积物产生扰动,并在湖底上一定高度内形成一个高悬浮物含量的浑浊层.现场浊度监测和悬浮颗粒物采集的结果表明,由采矿系统扰动而再悬浮的颗粒物影响深度至水深约 70 m,即 70 m 以上的范围内并没受到影响,因此,本次试验仅影响近底湖区.

2.3.2 对水体营养元素的影响 由于沉积物是湖区所有物质的最终归宿,采矿系统在湖底行走时必然将一定厚度的沉积物扰动起来,改变了湖底沉积物的结构构造和沉积环境,使得原本吸附在沉积物上的一些元素发生溶解而再释放到水体中,而一些可溶性的元素则可能为沉积物所吸附而从水体中清除.

现场监测结果表明(图 5),采矿试验期间,水体中磷的含量在 0.00-15.32 µg/L,平均值为 3.58 µg/L;硅的含量在 0.02-0.71 mg/L,平均值为 0.18mg/L;氮的含量在 0.64-177.23 µg/L,平均值为 53.55 µg/L.垂直向上,湖区水体中典型性营养元素的分布特征不同与春季和夏季,除氮的分布特征与夏季的相似外,其它营养元素的最低值出现在 100 m 水

层,且从水面至 100 m,它们的含量较为一致,100 m 以下则呈快速增加的趋势.溶解氧依然呈现 S 形特征,但分布曲线的斜率较大,呈现快速变化的特点(图 7a).含量上则低于春季的,而与夏季的相当.

采矿系统试验完成后,对试验区再次进行了监测.水体中磷的含量在 0.00 - 17.41 $\mu\text{g}/\text{L}$,平均值为 3.87 $\mu\text{g}/\text{L}$;硅的含量在 0.02 - 0.74 mg/L ,平均值为 0.19 mg/L ;氮的含量在 1.04 - 149.50 $\mu\text{g}/\text{L}$,平均值为 54.94 $\mu\text{g}/\text{L}$.典型性剖面见图 6,可以看出,除了氮的分布特征无明显变化外,其它营养元素呈现不同于试验期间和试验前的特点,即其最低值出现在 40 - 50 m 内,发生了明显的上移,50 m 以下则呈现一致性的快速增加特点.溶解氧的分布特征则无明显变化,反映试验前后水体中溶解氧的含量无明显变化.

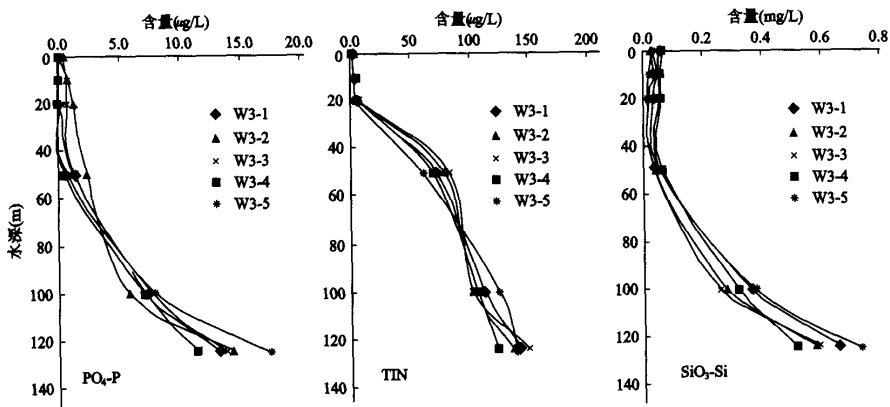


图 6 2001 年秋季采矿系统试验后抚仙湖水体营养元素水深剖面

Fig. 6 Vertical distribution of phosphate, total inorganic nitrogen and silicate after testing (Sep., 2001)

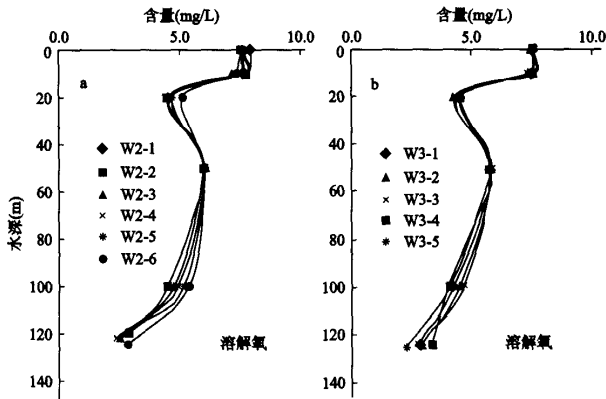


图 7 2001 年秋季采矿系统试验期间(a)和试验后(b)抚仙湖水体溶解氧水深剖面

Fig. 7 Vertical distribution of dissolved oxygen in Fuxian Lake (a. during testing; b. after testing)

自然条件下,湖区水体的营养元素的含量处于一种动态平衡状态,它主要通过水体中的生物活动、湖底沉积物的吸附与释放作用以及外来水体输入等方式进行调节的^[10,11]。在外来输入不变的前提下,水体中营养元素含量的变化则主要取决于水体生物活动、湖区水文特征以及沉积物的解吸和吸附。

水文组的现场监测结果表明,9月份湖区水体表现为单温跃层结构,试验期间和试验后无明显的变化;反映浮游生物活动的叶绿素 a 含量在试验期间和试验后也无明显的改变^[5]。由于沉积物对营养盐的吸附和释放是同时存在的^[9],而何种作用起主导作用则取决于水体中的溶解氧含量、pH 值以及上覆水体中营养盐的含量等因素^[8,9],湖区底层水体中上述环境因素在试验前后并没有显著改变。但试验前后水体中营养元素呈现显著的差异,造成这种变化的主要因素只能是由于水—沉积物界面平衡被破坏再悬浮的沉积物将原先吸附在沉积物上以及间隙水中的营养元素再次释放到水体中而导致的。W1-1 站由于采水器着底导致底层水体中营养元素含量异常偏高也表明沉积物对水体中营养元素的影响。因此,采矿系统在湖底行走时所扰动的沉积物对水体中的营养元素,尤其是近底层水体的营养元素组成,影响较明显。

3 结论

(1) 湖区水体中的营养元素和溶解氧等与湖区水体中生物活动密切相关的参数主要与气候环境相关。在雨季开始的初期,湖区水体营养元素的最低层较浅,溶解氧则在 20 m 层出现最大值;而在雨季的中期,由于降水充沛,水体中营养元素的最低层变深,充沛的降水对水体中营养盐含量起稀释作用;溶解氧呈现“S”形分布的特点,其含量从水面到 20 m 呈降低趋势,而从 20 m 到 50 m 则呈增加趋势,50 m 以下则呈降低趋势,反映表层生物活动消耗氧,底层则是由于沉降有机质的分解作用以及温跃层的存在导致溶解氧含量的再次降低。

(2) 采矿系统行走时所扰动的沉积物对水体中的营养元素,尤其是近底层水体的营养元素,影响较明显,这主要是由于再悬浮的沉积物将原先吸附在沉积物上的营养元素再次释放到水体中所致,因此,在考量人类活动对湖泊的影响时也要考虑湖泊沉积物的再释放效应。

(3) 近年来,抚仙湖富营养化趋势有所加快^[12]。本研究旨在通过采矿系统试验,分析了水体营养元素和溶解氧分布特征,以期对抚仙湖湖泊环境调查和环境保护研究和治理提供背景资料。

致 谢 感谢陈琪、董如洲、王春生、刘镇盛等课题组其他成员以及当地某试验场在现场调查时所给予的帮助和支持!

参 考 文 献

- 1 吴献花,李荫玺,侯长定. 抚仙湖环境现状分析. 玉溪师范学院学报,2002,18(2):66-68
- 2 杨世宽. 云南抚仙湖. 见:金相灿等主编. 中国湖泊环境. 北京:海洋出版社,1995:211-235
- 3 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 抚仙湖. 北京:海洋出版社,1990:317
- 4 舒金华,黄文钰,吴廷根. 中国湖泊营养类型分类研究. 湖泊科学,1996,8(3):193-200

- 5 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
- 6 柯长青. 人类活动对射阳湖的影响. 湖泊科学, 2001, 13(2):111 - 117
- 7 王云飞,潘红玺,吴庆龙等. 人类活动对洱海的影响及对策研究. 湖泊科学, 1999, 11(2):123 - 128
- 8 尹大强,覃秋荣,阎航. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响. 湖泊科学, 1994, 6(3):240 - 244
- 9 吴根福,吴雪昌,金承涛等. 杭州西湖底泥磷的初步研究. 中国环境科学, 1998, 18(2):107 - 110
- 10 张路,范成新,秦伯强等. 模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷释放行为的研究. 湖泊科学, 2001, 13(1):35 - 42
- 11 濮培民,王国祥,胡春华等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? 湖泊科学, 2000, 12(3):269 - 279
- 12 李荫玺,刘红,陆娅等. 抚仙湖富营养化初探. 湖泊科学, 2003, 15(3):285 - 288

Nutrients Distribution in Fuxian Lake and Its Response to Human Disturbance

NI Jianyu^{1,2}, ZHOU Huaiyang³, ZHANG Mei², LIU Xiaoya², WANG Fangguo² & HE Zongyu⁴

(1: Key Lab of Submarine Geosciences of SOA, Second Institute of Oceanography SOA, Hangzhou 310012, P. R. China;

2: Monitor and Protect Center of Marine Ecosystem and Environment, Second Institute of Oceanography SOA, Hangzhou 310012, P. R. China; 3: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, P. R. China;)

4: China Ocean Mineral Resources R&D Association, Beijing 100860, P. R. China)

Abstract

This paper discusses the vertical distribution of nutrients and dissolved oxygen in water column of Fuxian Lake. Combined with lake-test of multimetallic nodules mining system, we also discuss the influence of human disturbance to lake water quality. Based on the results, we find that the distribution of nutrients and dissolved oxygen obviously displayed seasonal variation and was controlled by climatic parameters. The re-suspended sediment caused by moving of mining system on the lake-floor, will influence the distribution of nutrients, especially in near bottom water which is caused by re-releasing of nutrients from sediments previously adsorbed on sediment. Therefore, we should pay more attentions on sediment when we assess the influence of human activities on lake environment.

Keywords: Nutrients; human disturbance; Fuxian Lake