

# 太湖梅梁湾水动力及相关过程的研究

秦伯强 胡维平 陈伟民 季 江 范成新  
陈宇炜 高锡芸 杨龙元 高 光 黄文钰  
姜家虎 张 琛 刘元波 周子元

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**提 要** 太湖是位于长江下游的一个大型浅水湖泊. 水动力过程和要素对浅水湖泊的环境演化有着复杂和深远的影响. 本文基于1998年开展的有关太湖梅梁湾的水动力过程的野外调查结果, 总结了梅梁湾在夏季盛行风向条件下的湖流特征. 发现了梅梁湾在夏季偏南风条件下, 表层湖流以顺时针环流为主要特征. 但在湾内靠近梁溪河口地区, 流场受地形影响而有所不同. 反映在叶绿素浓度和总磷、总氮浓度分布上, 因受湖流影响较大而富集在梁溪河口周围, 即偏于梅梁湾的东部. 较少受湖流影响的总溶解磷和总溶解氮则仍以西部的胥江口为浓度最高地区. 利用1998年夏季湖流调查结果, 计算发现梅梁湾与太湖的水量交换以梅梁湾流入太湖为主要特征, 交换量为  $280\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . 受动力作用影响较大的悬浮物浓度, 在冬季偏北风作用下, 湾口的浓度远高于湾内. 当风速达  $5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上时, 悬浮物浓度将显著增加, 特别是底部泥沙悬浮增加, 但在小风速条件下, 悬浮物浓度的垂直变化不显著. 指示着有机物颗粒在水表层悬浮物中占相当大的比重. 上述这些结论对梅梁湾水源地的保护, 对进一步认识水动力作用与悬浮物浓度分布, 进而影响透明度和初级生产力, 影响底泥内源污染释放, 并在此基础上建立太湖生态环境管理模型非常重要.

**关键词** 太湖 水动力过程

**分类号** P343.3

太湖位于长江下游三角洲地区 ( $30^{\circ}05' - 32^{\circ}08' \text{E}$ ,  $119^{\circ}08' - 121^{\circ}55' \text{N}$ ), 是一个大型浅水湖泊. 湖泊面积为  $2428\text{km}^2$ , 平均深度为  $1.89\text{m}$ . 表1列出了太湖的主要地理特征<sup>[1-3]</sup>. 在该地区的城市供水、养殖、灌溉和航运中, 该湖起着非常重要的作用. 太湖同时以其美丽的风光和众多的人文历史景点而远近闻名.

自80年代以来, 随着环湖地区工业化的发展, 排入湖泊的废水大量增加, 导致水质恶化和水生生态系统严重退化. 根据几十年来的调查结果, 水中无机氮 ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ,  $\text{NH}_3 - \text{N}$ ) 从60年代的  $0.01 - 0.05\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[4]</sup> 增加到1987年的  $1.0 - 5.0\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[1]</sup>, 总氮从1987年的  $1.84\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (平均)<sup>[1]</sup> 增加到1994年的  $2.5\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 总磷从1987年的  $0.032\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (平均)<sup>[1]</sup> 增加到1994年<sup>[5]</sup> 的  $0.13\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 水质评价结果显示太湖大部分水域已属于中富营养, 局部地区属于富营养状况, 甚至是重富营养, 如太湖北部的五里湖<sup>[5]</sup>. 这些地区大部分地处太湖北部的湖湾中. 生物方面的调查结果显示浮游植物生物量升高了4-5倍, 但种群数量在减

• 中国科学院“九·五”重点项目(KZ952-S1-220)和(KZ952-J1-212), “九·五”重大项目(KZ951-B1-205-02)和中国科学院“九·五”特别项目(KZ951-A1-301)联合资助.

收稿日期: 2000-09-10. 秦伯强, 男, 1963年生, 研究员.

且优势种在 50 年代以蓝藻 - 绿藻和硅藻为主, 转为蓝绿藻和隐藻为主<sup>[1]</sup>, 特别是近年来蓝藻大量暴发, 形成水华, 严重地影响了湖泊的供水能力。

表 1 太湖水文状况特征

Tab. 1 Main physical geographical features

湖面积/km <sup>2</sup>	2428
汇水面积/km <sup>2</sup>	36500
岸线长度/km	405
平均深度/m	1.89
最大水深/m	2.8
容积/m <sup>3</sup>	44 × 10 <sup>8</sup>
年降水量/mm	1000 - 1300
年蒸发量/mm	1000 - 1100
最高湖水位/m. a. s. l.	5.08
最低湖水位/m. a. s. l.	2.02
年泥沙输入量/kg	44 × 10 <sup>7</sup>
年泥沙输出量/kg	10 × 10 <sup>7</sup>

由于太湖水浅的特点, 湖泊水动力学在湖泊环境演化中扮演着非常重要的角色. 对湖泊生态系统也有着深远和复杂的影响. 例如, 湖底沉积物中高含量的营养盐, 在动力作用下, 如风、浪、潮流等, 伴随着沉积物的再悬浮和迁移等过程而释放出来. 而悬浮质浓度又进而影响水色、透明度和初级生产力. 太湖的野外调查工作显示, 蓝藻水华在太湖中的发生往往伴随着大风过程之后出现. 这些现象隐含了水华的暴发与水动力过程有着某种有机的联系.

尽管大型浅水湖泊中, 水动力过程与理化因子对水环境演化起着非常重要的作用, 但是对湖泊水动力过程进行实地观测仍然有较大的难度. 主要表

现在时间和空间上很难进行同步调查. 从而使得有关水动力学方面的研究长期以来以室内计算机模拟为主. 本文以“九·五”期间在梅梁湾开展的湖泊水动力学过程及其相关因子的调查研究的总结, 目的是揭示大型浅水湖泊动力过程的某些特征.

## 1 太湖水动力学过程及相关因子调查的回顾

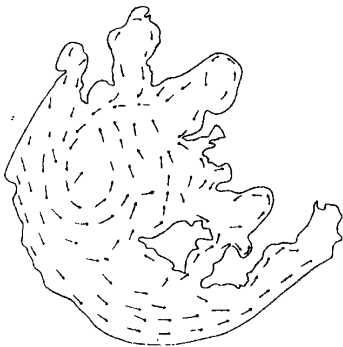


图 1 太湖夏季盛行流场(据文献[4])

Fig. 1 The dominant water current pattern during summertime of Taihu Lake

对太湖的水动力学过程进行调查最早始于 1960 年. 1960 年 6 至 7 月, 由中国科学院南京地理研究所联合中国科学院武汉水生生物研究所、南京师范学院、南京大学等单位对太湖进行了首次系统和全面的调查. 通过调查, 首次获得了太湖地区的流场分布情况(图 1)<sup>[4]</sup>. 其流场分布特征应代表太湖在夏季盛行风场情况下的主导湖流场. 从图中可以看出, 在夏季偏南风作用下, 在以太湖有一个逆时针的环流, 以平台山为中心(图 1). 平均流速大约为  $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 最大流速在  $30\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . 此外, 沿着西湖岸, 有一股向南稳定的潮流, 在梅梁湾, 则有一个方向多变不稳定的顺时针环流<sup>[4]</sup>.

此后, 在 1985 - 1986 年间, 由中日两国合作开展的太湖、琵琶湖对比研究中, 对太湖进行了湖流、波浪、沉积物的再悬浮和风浪的关系等研究<sup>①</sup>, 初步开展了太湖湖流的水动力学模拟<sup>[6,7]</sup>. 这些工作对于认识象太湖那样的大型浅水湖泊, 水动力在环境演化中的作用是非常有帮助的, 特别是有关波浪与沉积物的再悬浮. 尽管仅是波浪与悬浮物关系的单点观测, 但这在国内仍是首次开展. 统计分析显示对大多数波浪而

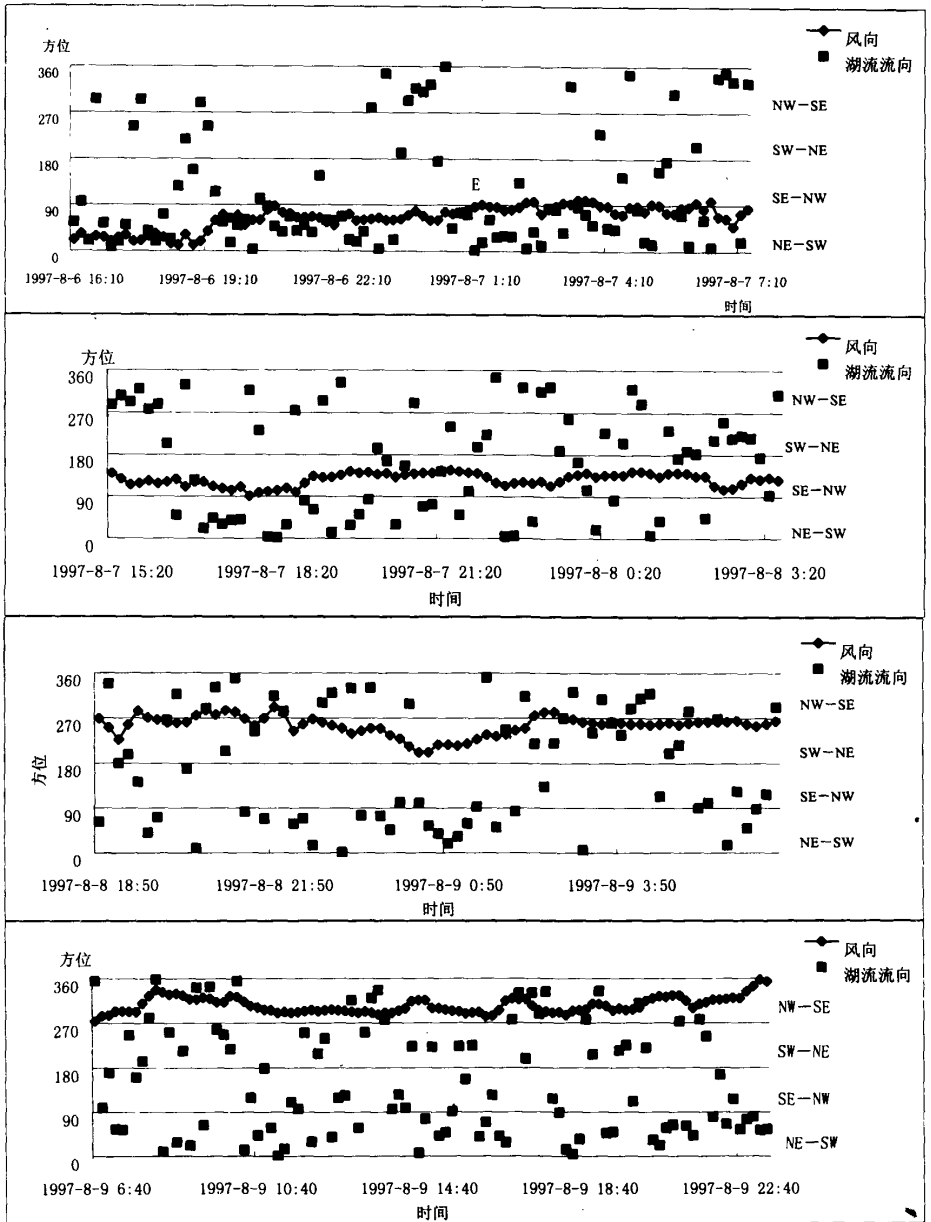


图2 1997年8月4次稳定风向与梅梁湾口湖流流向

Fig.2 Four selected typical wind processes and water current direction variability during August 1997 at the mouth of Meiliang Bay

言,其最大波高( $H_{max}$ )和最大波高的三分之一统计值( $H_{1/3}$ )均很低。累计频率为80%时, $H_{1/3}$ 不超过8cm;累计频率为98%时, $H_{1/3}$ 不大于20cm。只有约5%的波浪,其 $H_{1/3}$ 值大于40cm。

在此基础上,获得了波高与风速的关系.此后,虽然有些零星的湖流方面的观测研究,但大部分工作转入室内数值模拟试验为主.

## 2 梅梁湾水动力学及相关因子的观测

本次大规模的野外调查始于 1997 年 8 月,当时在梅梁湾与太湖交界湾口上进行了定点(J2, 120.188E, 31.41N)观测.所用仪器为三维超声波流速仪.记录长度约一个月.从图 2 可以看出,太湖梅梁湾口的湖流特征主要有两点.其一,太湖湖流很不稳定.图 2 所反映的风场与湖流的流场说明流场远较风场紊乱.这可能与该点离岸较近,从而受岸边反射流的影响较大;其二,波浪的影响很大.这可以从垂直方向上的流速分量的大小看出.因为观测的垂直方向上的流速分量与水平方向上的流速分量在同一个数量等级上,这与人们传统的关于浅水湖泊垂直流速与水平方向上的流速相比很小的看法是不一致的.

1998 年 7 月 28 日,通过在梅梁湾内布设的 14 个点,利用三维超声波流速仪及快速艇,快速地在每个点测其表层流速与流向,同时观测每点的风速、风向、总磷(TP)、可溶性总磷(TDP)、总氮(TN)、可溶性总氮(TDN)、叶绿素 a(Chl-a)、有机污染物(COD)等项目.结果如图 3 和图版 I.可以看出,在观测和取样时期内,风向以东南风为主,风速在  $1.5 - 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .而流场分布显示梅梁湾在东南风作用下,湖流呈顺时针环流,即从梅梁湾的西边,湖流从湾外流向湾内;而在湾的东边,湖流从湾里流向湾外.在拖山周围流场较为紊乱,估计有小范围的辐合或辐散存在.在湾的东北部,即靠近梁溪河口地区,流向与梅梁湾大流场流向不一致,几乎相反.估计在该地区有局地的小环流存在,从而易于成为飘浮物质的聚集地.

湖流是水中一切物质输送与迁移的动力.从水中营养物质的浓度分布来看,由于风速不是太大,因此,浓度场的分布特征并不鲜明.图版 I - a 反映了在当时的动力条件下叶绿素 a 的分布,这实际上也反映了蓝藻浓度的分布.这一项较易受湖流影响.原因是蓝藻的粘滞系数较大.蓝藻浓度最高的位于梅梁湾的东北部,那儿也是流场辐合区,TP(图版 I - b),TN(图版 I - c)的浓度分布与叶绿素类似.但是,TDP(图版 I - d)和 TDN(图版 I - e),由于粘滞系数较小,受流场影响小,其分布仍然以位于西北部的闾江口为最高,原因是由于污水主要来自这一河流的上游.这同其他的研究发现是一致的<sup>[8]</sup>.值得注意的是在梅梁湾口的拖山岛的东边,也有一个各项化学要素都很高的高值区,原因可能是拖山岛上的农业污染排放.在整个湾内,营养盐浓度较低的地区位于梅梁湾中部的马山和岬嶂山的两侧.

除了污染物来源对梅梁湾的水质状况产生影响外,湾内水体与太湖开阔水域的交换也极大地影响梅梁湾的水质.1998 年 7 月 28 日在梅梁湾湾口从东向西共布设五个监测点,每个点分三层.从表 2 可以看出,每个点的底层流向均由北向南,或偏南.表层流向在西部由南向北,在东部由北向南;而在拖山附近,表层流向没有明显的规律.但从总体上看,湖流是从湾内流向

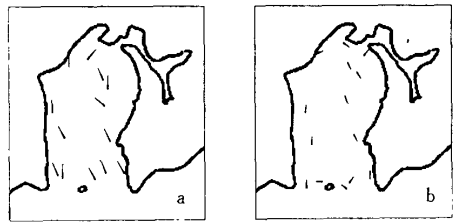


图 3 太湖梅梁湾 1998 年 7 月 28 日风场与流场分布

(a) 各点的风向; (b) 各点流向

Fig. 3 The directions of wind forcing and water current on July 28, 1998 in Meiliang Bay

(a) Wind directions;

(b) Water current directions

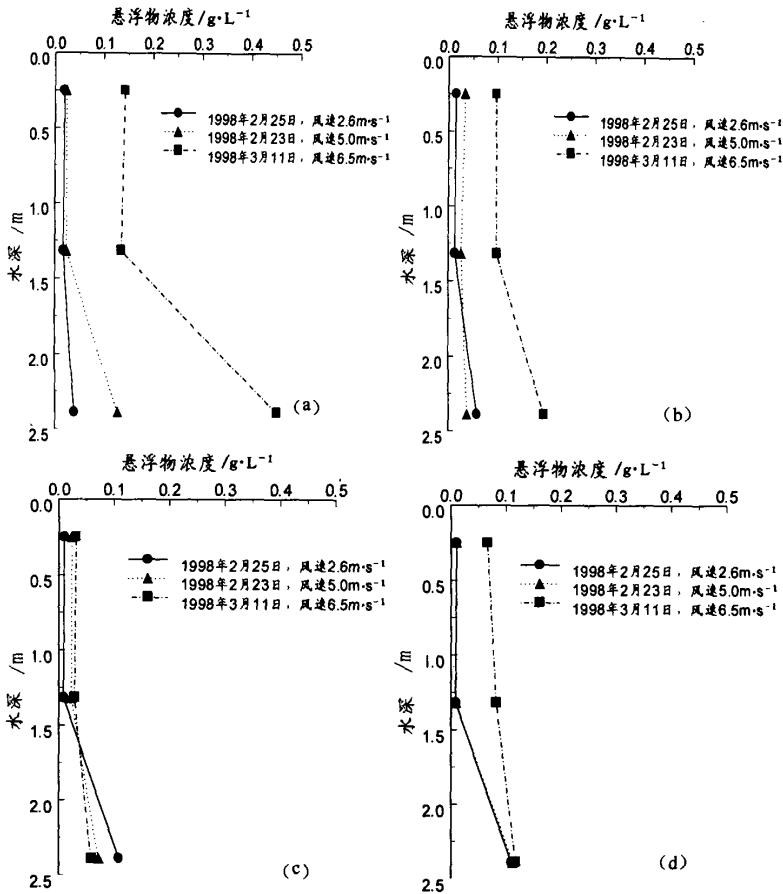


图4 1998年2月梅梁湾不同风速情况下的悬浮物浓度分布

(a)梅梁湾口拖山以东(J2点);(b)梅梁湾口拖山以西(J4点);

(c)梅梁湾内西岸(J6点);(d)梅梁湾内东岸(J7点)

Fig. 4 The particle suspension concentrations change with depth under different wind forcings during February 1998 in Meiliang Bay

(a) At the east to Tushan (J2); (b) At the west to Tushan (J4);

(c) At the western coast inside Meiliang Bay (J6); (d) At the eastern coast inside Meiliang Bay (J7)

湾外的。这种湖流究竟是由于表层向湾内流而导致底层的补偿流向湾外,还是由于梅梁湾内有河道大量流入所致,仍有待进一步的调查。

利用上述湖流观测结果,可以计算出梅梁湾在夏季时与大太湖的水量交换。计算结果显示(表略),在梅梁湾口的东部,即拖山以东,水量交换是以梅梁湾输出至太湖为主要特征,水量交换为  $271\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ;在梅梁湾口的西部,即拖山以西,又可以分为东西两部分。东部(紧邻拖山)的

水量交换是由梅梁湾流入太湖,交换量为  $27\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ .而西部(紧邻马山)的水量交换是由湾外流入湾内,交换量为  $18\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ .但是,在梅梁湾口西部总的水量交换是由湾内流入太湖,交换量为  $9\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ .就整个梅梁湾而言,水量交换特征是由湾内流入湾外,交换量为  $280\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ .

表 2 1998 年 7 月 28 日梅梁湾口潮流观测结果

Tab.2 Observed water current between Meiliang Bay and open area on July 28, 1998

点号	水深 /m	纬度	经度	水平方向流速 /cm·s <sup>-1</sup>	流向(正北为零度, 顺时针方向)	垂直流速 /cm·s <sup>-1</sup>	观测 次数	风速 /m·s <sup>-1</sup>	风向	观测时间
F1	0.5	120.205	31.409	4.0	181	1.5	6	1.6	SE	13:26-13:47
F1	1.4	120.205	31.409	4.6	178	1.4	6			
F1	2.5	120.205	31.409	2.0	193	1.5	7			
J2	0.5	120.188	31.41	3.5	46	1.8	6	1.4	SE	12:59-13:04
J2	1.5	120.188	31.41	4.0	195	1.7	4			
J2	2.6	120.188	31.41	6.9	149	1.1	6			
F3	0.5	120.176	31.404	4.2	298	1.7	1	1.7	SE	12:36-12:52
F3	1.5	120.176	31.404	2.4	195	1.5	6			
F3	2.6	120.176	31.404	6.5	158	1.1	6			
J4	0.5	120.15	31.407	2.5	271	1.7	7	2.4	S	11:59-12:21
J4	1.4	120.15	31.407	2.8	58	0.9	6			
J4	2.5	120.15	31.407	3.5	155	1.2	6			
F5	0.5	120.14	31.408	3.5	5	-0.2	5	2.2	SE	11:34-11:53
F5	1.4	120.14	31.408	2.1	175	1.8	5			
F5	2.6	120.14	31.408	0.3	233	1.1	5			

悬浮物浓度的变化与动力作用有密切关系.风力作用于湖面,产生波浪和湖流,波浪的作用使沉积物发生再悬浮.在1998年2月的三次野外调查中,发现风力在  $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下时,悬浮物浓度的变化较小(图4a, b, c, d),但当风速超过  $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  后,悬浮物浓度迅速增加至一倍甚至数倍以上,特别是在梅梁湾的湾口上(J2和J4点).在湾内(J6和J7点),悬浮物浓度随风速的变化不及湾口剧烈.在1998年7月进行的三次野外调查中,湾口上的悬浮物浓度随风力的变化不及2月的调查结果有规律.究其原因,由于三次调查期间,风速均小于  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而且调查期间均为偏南风,吹程小,风浪发育受限制;但在冬天,由于以西北风为主,吹程大,风浪发育较好,对底泥影响也大.在风力较小时,无论是冬季或夏季,悬浮物浓度随深度的变化上都不大.检测悬浮物的组成即可发现,在水表层及近表层的悬浮物中有机物占一半以上,由于有机物比重较轻,因此在风力很小时,同样可以浮到表层处,从而使得总的悬浮物浓度在深度上的变化不大.而当风浪继续加大时,随着底部泥沙的再悬浮,使得悬浮物组成中泥沙比重增加,悬浮物浓度随深度的变化呈现典型的抛物线型.

### 3 讨论

与水动力过程有关的湖流、波浪观测及与之相联系的营养盐、叶绿素、藻类生物量等物质迁移与扩散研究,长期以来一直是野外工作中的难点.这种困难首先表现为缺乏大范围、长时间、而且在空间上同步的观测手段.由于对某一地区的流场结构缺乏了解从而对营养盐、生物量的迁移与堆积的认识;对底泥分布,动力过程对底泥作用产生的悬浮物浓度分布等诸多问题更无从谈起.太湖是一个浅水湖泊,水动力过程的研究意义重大.多年来积累的零星观测

资料既缺乏系统性,又缺乏可比性,因而也就限制了对太湖水动力作用的了解。一个非常现实的问题是,太湖梅梁湾地区,夏天经常有蓝藻水华爆发,当其死亡后,飘浮在水面上,随风迁移。水华问题直接导致水厂供水能力下降。而无锡市的大部分水厂多位于梅梁湾的东岸,因而了解该地区的流场状况,从而预测水华的堆积地对当地水源地的保护非常有帮助。1960年的观测结果,反映了夏季偏南风作用下的平均流场,从当时的观测的梅梁湾的流场情况看,在夏季,梅梁湾以顺时针环流为主。根据1987年的观测资料描绘的梅梁湾流场状况在偏南风作用下,也是以顺时针为主要的模式<sup>[9]</sup>。本文给出的流场情况与其相同,从而可以断言,太湖梅梁湾在夏季偏南风作用下,以顺时针环流为主要模式。在此前提下,在梅梁湾的东岸,特别是在梁溪河口附近,由于有局地环流存在而易于成为飘浮物富集地。

用水动力模拟模型来模拟不同风向和风力作用下的湖流流场特征是弥补野外观测不足的有效途径。无论是二维模式<sup>[6]</sup>或三维模式<sup>[9]</sup>,绝大多数模拟结果显示在偏南风作用下,梅梁湾的流场以西部由南向北,而东部由北向南为主要特征,在梅梁湾底靠近梁溪河的地区有一个小范围的逆时针环流,这与观测到的该湾内的表面湖流分布非常相似。这就可以解释为什么在这一地区叶绿素浓度要远远高于其他地区,总磷和总氮的浓度也是远高于其他地区。从而可以肯定,在夏季偏南风作用下,梅梁湾东部易于成为蓝藻水华的富集地。

## 4 结语

本文对太湖梅梁湾的有关水动力学方面的野外调查资料进行了初步分析整理。发现在梅梁湾地区,在东南风作用下,湖流流场以顺时针环流为主要特征,即在梅梁湾口的西部,湖流由南向北,在梅梁湾口的东部,湖流由北向南。上述观测结果可以与以前的若干在靠近梅梁湾口地区的观测结果相对照。在靠近梁溪河口的湾内,观测显示是一个与地形有关的逆时针环流流场,这在模型模拟结果中也可以得到证实。与这种流场分布相对应的是总磷,总氮和叶绿素的浓度分布多集中在河口地区,而较少受湖流影响的溶解性磷和溶解性氮的浓度分布则依然是以直湖港和閘江口为中心向湾内扩散。应该指出,由于观测时期的风速较小,因此,动力的搬运和迁移扩散作用并不显著,但随着风速加大,其影响必然会更大。风力对悬浮物的影响,在冬季的观测中,湾口的悬浮物浓度要明显高于湾内,而当风速大于 $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,梅梁湾内的悬浮物浓度将会显著增加,从而指示随着风浪的加剧,泥沙悬浮增加。这些野外观测结果,对下一阶段关于太湖三维水动力学模型的研制,进而模拟悬浮物的悬浮和透明度分布,及初级生产力等过程,最终实现太湖生态环境管理模型的建立有着重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 孙顺才,黄满平.太湖.北京:海洋出版社,1993.1-5
- 2 毛锐,高俊峰.太湖地区湖泊水面蒸发.北京:科学技术文献出版社,1993.92-109
- 3 吴秦来.太湖流域1999年特大洪水和防洪规划的思考.湖泊科学,2000,12(1):6-10
- 4 中国科学院南京地理与湖泊研究所等.太湖综合调查报告.北京:科学出版社,1965.1-84
- 5 范成新,陈荷生.太湖富营养化问题及其综合控制对策.湖泊科学,1998,10(增刊):95-100
- 6 王谦谦.太湖风成流的模拟.河海大学学报,1987,15:11-17
- 7 吴坚,濮培民.用非规则有限差分模式模拟太湖风成流.中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊,1989,6:1-13
- 8 水利部太湖流域管理局,中国科学院南京地理与湖泊研究所.太湖生态环境地图集.北京:科学出版社,1999

9 梁瑞驹, 仲金华. 太湖风生流的三维数值模拟. 湖泊科学, 1994, 6(4): 289 - 297

## Studies on the Hydrodynamic Processes and Related Factors in Meiliang Bay, Northern Taihu Lake, China

QIN Boqiang    HU Weiping    CHEN Weimin    FAN Chengxin    JI Jiang  
CHEN Yuwei    GAO Xiyun    YANG Longyuan    GAO Guang    HUANG Wenyu  
JIANG Jiahu    ZHANG Shen    LIU Yuanbo    ZHOU Ziyuan

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

### Abstract

Taihu Lake is a large shallow lake, located in the Delta of the Yangtze River. The hydrodynamic processes exert a profound influence on the lake environmental evolution. Based on the field investigation in Meiliang Bay, Taihu, in the summer of 1998, this paper attempts to summarize the water current pattern during the summer prevailing wind forcing. With the prevailing of southeast wind, the water current shows a clockwise circle, i. e. the water flows northward in the western coast and southward along the eastern coast. But in the northeast, close to the mouth of Liangxi River, a small inconsistent water current pattern is presented. In the presence of above water current pattern, the distribution of Chl-a concentration, as well as the total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP), shows a pattern associated with directions of water flow in the Meiliang Bay, i. e. Chl-a, TN and TP mostly concentrated in the northeast of Meiliang Bay. But the total dissolved nitrogen (TDN) and total dissolved phosphorus (TDP) concentrated in the northwest of bay because these components are less affected by the transportation of water flow. The solid suspension (SS) concentration changed with the intensity of wind forcing and with water depth. The investigation found that the concentration of SS at the mouth of bay is greater than that in the bay. Moreover, SS increased dramatically when the wind speed greater than  $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , but slight difference with the water depth if wind speed less than  $4 - 5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , which indicated a high concentration of organic matter in the upper layer of water. These findings will be very helpful for the protection of drinking water source, and understanding the relation between hydrodynamic processes and water transparency, primary production, etc. It is also of importance for the construction of Taihu Lake environmental management model.

**Key Words** Taihu Lake, hydrodynamic process



