

## 前期风场控制的太湖北部湖湾水动力及对蓝藻水华影响\*

吴挺峰<sup>1</sup>, 朱广伟<sup>1</sup>, 秦伯强<sup>1\*\*</sup>, 丁艳青<sup>1</sup>, 吴善锋<sup>2</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 国网电力科学研究院, 南京 210003)

**摘要:** 为明确前期风场对太湖北部湖湾水动力及蓝藻水华分布的影响, 对 2008 年 9 月梅梁湾及贡湖湾水文、水质及气象开展了同步观测, 结果表明: 受前期东北风影响, 梅梁湾及贡湖湾表层、中层及底层湖流流向均顺风向自湾内流向湾外, 两个湖湾均不存在补偿流. 表层湖流对风场变化响应敏感, 而中场及底层流场对风场变化响应存在显著滞时. 在偏南风作用下, 梅梁湾表层湖流能快速形成顺时针环流. 在偏西风作用下, 贡湖湾表层湖流流向虽未发生偏转, 但是湖流流速显著减小并导致流速沿水体垂向呈递增分布. 观测期间水动力强度对太湖北部湖区叶绿素 a 浓度垂向分层及蓝藻水华水平漂移均具有重要影响. 在水动力滞缓水域, 蓝藻水华易在水表发生漂移堆积. 在水动力强度较大水域, 强烈的垂向混合作用能使蓝藻沿水深方向混合均匀, 降低水华暴发风险. 相对于水动力条件, 营养盐对叶绿素 a 浓度空间分布的影响较弱.

**关键词:** 前期风场; 太湖; 北部湖湾; 水动力; 蓝藻水华

## Prior wind field induced hydrodynamics and its influence on cyanobacterial bloom in northern bays of Lake Taihu, China

WU Tingfeng<sup>1</sup>, ZHU Guangwei<sup>1</sup>, QIN Boqiang<sup>1</sup>, DING Yanqing<sup>1</sup> & WU Shanfeng<sup>2</sup>

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

(2: *State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, P. R. China*)

**Abstract:** In September 2008, a meteorology-hydrology-water quality simultaneous observation was conducted to study the influences of prior wind field on hydrodynamic characteristics and cyanobacterial bloom in northern bays (Meiliang Bay and Gonghu Bay) of Lake Taihu. The results showed that exposed to prior wind field, the surface, middle and bottom water layers flowed out of the bays. There was no compensation current in the two bays. Surface current field was sensitive to real wind field, but middle and bottom current fields lagged behind the wind changing. Influenced by southeast wind, a clockwise circulating current could be rapidly formed in the surface water layer of Meiliang Bay. In Gonghu Bay, the flow direction of surface current field did not change under the action of Westerlies, but its magnitude decreased obviously so that the current velocity increased with the water depth. The observation proves that hydrodynamic is very important for the stratification of chlorophyll-a concentration and drift of cyanobacterial bloom in northern bays of Lake Taihu. Cyanobacteria tended to accumulate and form bloom on water surface in low-hydrodynamic area. Under the condition of high-intensity disturbance, cyanobacteria mixed along the water depth. This can greatly decrease the risk of cyanobacterial bloom. Comparing with the influence of hydrodynamic, that of nutrients on the distribution of chlorophyll-a concentration was less important.

**Keywords:** Prior wind field; Lake Taihu; northern bays; hydrodynamic; cyanobacterial bloom

太湖位于长江下游三角洲地区, 湖泊面积 2428 km<sup>2</sup>, 平均水深 1.89 m. 根据 Nixdorf 等<sup>[1]</sup> 对浅水湖泊分

\* 国家自然科学基金项目(41101458, 40825004)、国家科技重大专项项目(2010ZX03006-006)、中国科学院百人计划择优支持项目(YOBROB045)和中国科学院南京地理与湖泊研究所青年基金项目(NIGLAS2010QD04)联合资助. 2011-07-12 收稿; 2011-09-25 收修修改稿. 吴挺峰, 男, 1981 年生, 博士, 助理研究员; E-mail: tfwu@niglas.ac.cn.

\*\* 通信作者; E-mail: qinbq@niglas.ac.cn.

类,太湖属于“极浅水湖泊”.太湖又是我国最大的存在严重蓝藻水华的湖泊,是国务院指定重点治理的富营养化水域之一<sup>[2]</sup>.作为湖泊生态系统的重要组成部分,已经证明水动力对太湖蓝藻生长具有重要影响<sup>[3-6]</sup>.但是由于水域面积大,有关太湖水动力结构及对蓝藻水华迁移扩散的研究较少.虽然已经报道了一些基于数学模型的研究<sup>[7-9]</sup>,但是受风场时空差异、水下地形分辨率、水生植物、出入湖流、风浪及行船等因素影响,数学模型模拟的动力条件往往与实际存在较大差异<sup>[10]</sup>.现场调查是掌握太湖实际水动力结构的有效手段,而且也已经报道了一些研究成果.秦伯强等<sup>[11]</sup>曾在1998年对夏季东南风影响下梅梁湾湖流结构及水化学指标分布特征开展了综合调查;2004年,罗激葱等<sup>[10]</sup>对冬季西北风影响下梅梁湾湖流结构进行了调查研究.这些研究对弄清同步风场下梅梁湾水动力结构及水化学指标分布具有重要意义,但是还缺乏有关前期风场引起的太湖湖流结构及对蓝藻水华迁移扩散影响的现场调查研究.因此,本文通过在太湖北部的梅梁湾及贡湖湾布设多个监测站点,采用摩托艇快速巡测的方式采集各点三维流速剖面及分层叶绿素 a 浓度和营养盐,结合观测前期及观测期风速风向数据,试图明确前期风场对梅梁湾及贡湖湾湖流结构的影响,并分析水动力对蓝藻水华迁移扩散的作用.本研究可为太湖水动力模拟及蓝藻水华预测提供服务.

## 1 材料与方 法

夏季,蓝藻水华易在太湖北部湖湾堆积成灾,因此观测水域选择在梅梁湾及贡湖湾.观测点沿湖湾中轴及两侧均匀布设,其中梅梁湾设13个观测点,自湾外到湾内形成5条监测剖面,贡湖湾设17个观测点,自湾外到湾内形成6条监测剖面(图1).受人力物力限制,监测采用巡测方式,沿着监测断面,乘坐摩托艇,自湾外到湾内循序推进,使用便携式全球定位仪确定观测点经纬度坐标.梅梁湾巡测开始时间为2008年9月10日10:00,结束时间为10日13:38;贡湖湾巡测开始时间为11日9:20,结束时间为11日16:40.

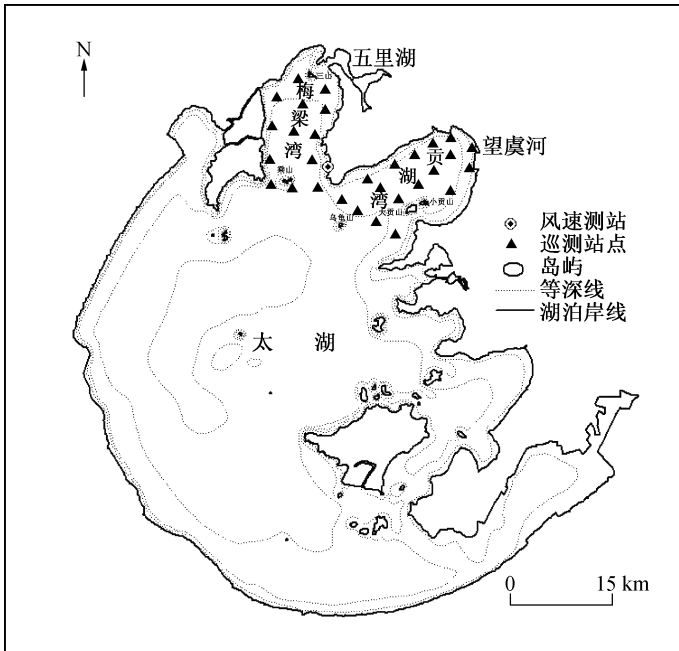


图1 太湖水下地形及巡测站点分布图

Fig. 1 The map of underwater topography and monitoring stations of Lake Taihu

风速风向数据通过定点监测及现场同步两种方式获取.定点测量数据来源于设置在梅梁湾湾口附近的太湖生态系统研究站,采样高度10 m.现场同步采用手持式风速风向仪现场记录观测点风速风向.流速监测采用 SonTek (SonTek Inc., 美国) 声学多普勒剖面仪测量三维流速剖面,流速测量分辨率为0.1 cm/s,垂向最小测量单元为15 cm.水质采样方法为:表层、中层及底层水体叶绿素 a (Chl. a) 测定采用 YSI 6600V2 (YSI

Inc., 美国)水质仪(分辨率为  $0.1 \mu\text{g/L}$ ). 营养盐通过采集中层水样送实验室测定.

营养盐测定指标包括:总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、总磷(TP)和溶解性总磷(DTP). TN、TP测定方法为:取适量样品加碱性过硫酸钾高温消解后,分别采用紫外分光光度法和钼酸铵分光光度法测定<sup>[11]</sup>. DTN、DTP测定方法:将水样过 Whatman GF/C 玻璃纤维滤膜,加碱性过硫酸钾高温消解后,按照 TN、TP 的方法测定<sup>[11]</sup>. 流场及浓度场绘制采用 Surfer 8.0 (Golden Software Inc., 美国). 插值方法与秦,伯强等在 1998 年开展的太湖水动力观测所用的插值方法一致<sup>[12]</sup>.

## 2 结果及讨论

### 2.1 监测期风过程

定点监测及现场同步监测结果表明:受仪器、地形和下垫面等因素影响,两者所测风速、风向有一定差异,但差异不显著,定点监测数据能够代表太湖北部湖区风场变化特征. 由于要分析前期风场特征,为保证数据的一致性及稳定性,本文选用 2008 年 9 月 3 日—11 日太湖湖泊生态系统研究站记录的风速、风向数据表征监测期太湖北部湖湾风场情况.

在监测前一周(3—10日),除 4 日出现 1 次持续 4 h、平均风速为  $2.2 \text{ m/s}$  的偏南风外,太湖风场风向稳定为东北风. 梅梁湾观测开始时刻(图 2 中的 0 h),太湖风场风向转变为以偏南风为主. 梅梁湾监测持续 3.67 h,期间风向稳定,最大风速为  $5.4 \text{ m/s}$ (风向  $148^\circ$ ),最小风速为  $1.7 \text{ m/s}$ (风向  $143^\circ$ ),平均风速为  $3.8 \text{ m/s}$ ,梅梁湾观测期间存在一次显著的东南风过程. 之后,风向发生偏转,经过约 5 h,风向偏转至以偏东风为主,风向稳定,平均风速  $1.6 \text{ m/s}$ . 偏东风持续作用 15 h 之后,风向再次发生偏转. 至贡湖湾同步观测开始的 23.5 h,太湖风场风向偏转为以偏西风为主,最大风速  $8.1 \text{ m/s}$ (风向  $255^\circ$ ),最小风速  $0.5 \text{ m/s}$ (风向  $292^\circ$ ),平均风速  $3.6 \text{ m/s}$ . 贡湖湾监测期间存在一次显著的偏西风过程(图 2).

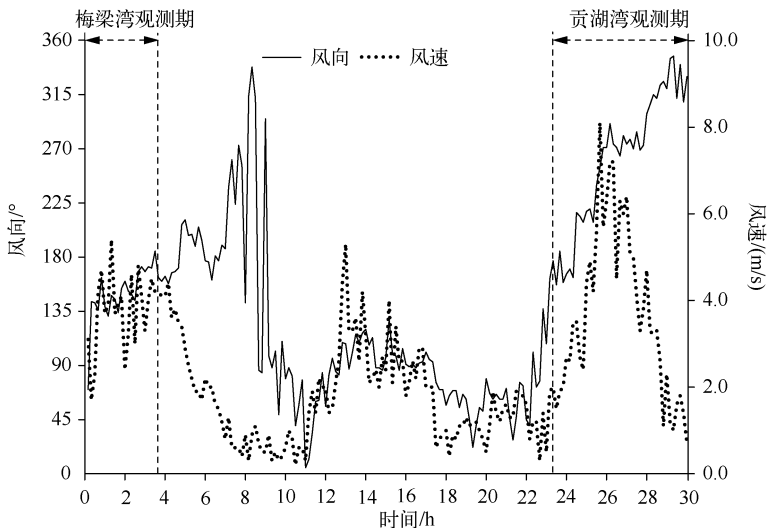


图 2 监测期间梅梁湾及贡湖湾风场变化过程

Fig. 2 The wind changing of Meiliang Bay and Gonghu Bay during the monitoring period

### 2.2 梅梁湾流场结构和浓度场特征

前期众多研究表明,梅梁湾存在一个顺时针环流系统. 1960 年,梅梁湾湖流调查表明,夏季偏南风作用下,梅梁湾存在一个方向多变的顺时针环流系统<sup>[13]</sup>; 1998 年秦伯强等通过野外调查,同样证明了此顺时针环流系统的存在<sup>[12]</sup>; 2003 年,罗澈葱通过野外调查发现,西北风作用下梅梁湾湖流结构与偏南风作用下湖流结构相似<sup>[10]</sup>.

本次调查发现,偏南风可在梅梁湾表层水体形成顺时针环流系统(图 3). 湖湾西北部以东北流向为主,

流速在 3.4 cm/s 左右. 梅梁湾东岸湖流以东南流向为主, 流速在 2.6 cm/s 左右; 在湾口附近水流以南流向为主, 流速在 5 cm/s 左右. 表层湖流流向相对风向向右偏转  $45^\circ$  以上, 这主要与北半球风生漂流受地转偏向力作用有关. 表层湖流在中部偏东岸存在一个顺时针环流系统. 环流系统的存在证明表层水体运动与风场变化是同步的.

但是, 中层及底层实测流场表明, 偏南风作用下梅梁湾中、底层水体不存在环流系统(图 3). 中层和底层流场变化与风场不同步, 整体上以南流向大太湖为主, 与偏南风风向相反, 平均流速分别为 9.9 cm/s 和 8.5 cm/s. 根据流场及 Chl. a 浓度分布可知, 观测期前后不存在出入湖流及补偿流, 因此梅梁湾中层及底层流场主要由观测前东北风持续作用引起.

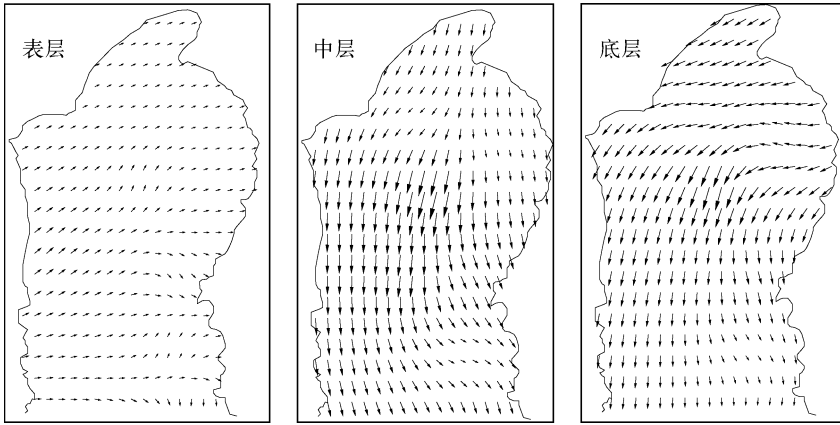


图 3 偏南风作用下梅梁湾实测湖流流场

Fig. 3 The measured current field of Meiliang Bay induced by southerly wind

梅梁湾表、中及底层流场结构对 Chl. a 浓度空间分布具有重要影响. 表、中及底层 Chl. a 浓度沿水深呈减小趋势, 存在显著分层现象(图 4). 除光合作用及藻类自身浮力外, 动力条件也是影响 Chl. a 浓度垂向分布的重要因素之一. 监测期间表、中及底层流速低, 湍流混合作用小, 水动力扰动不足以使得藻类颗粒沿水深混合均匀.

在水平方向上, 表、中及底层 Chl. a 浓度低值区均出现在梅梁湾的东北角, 其中, 表层 Chl. a 浓度呈现显著的自湾顶向湾外浓度递增趋势(图 4), 这主要受监测期间梅梁湾湖流结构影响. 受前期东北风的持续作用, 监测前期表、中及底层流场不存在切变, 均是自湾内流向湾外, 湾顶成为动力辐散区, 从而导致梅梁湾顶部

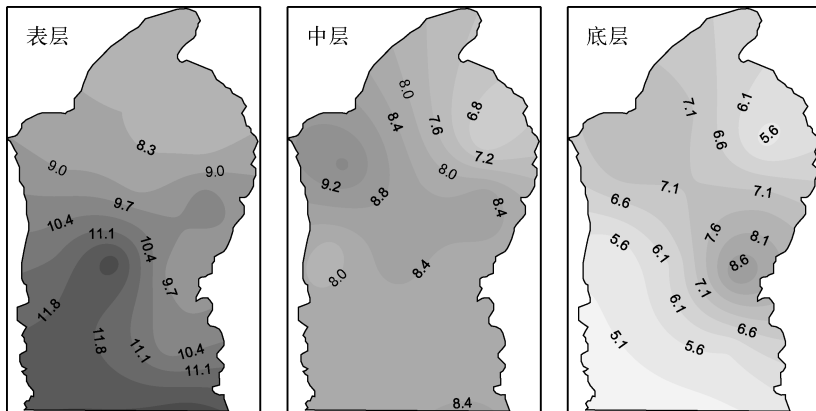


图 4 监测期间梅梁湾 Chl. a 浓度( $\mu\text{g/L}$ )分布

Fig. 4 The distribution of Chl. a concentration of Meiliang Bay during the monitoring period

Chl. a 浓度显著偏低. 监测期间,随着风向转变为偏南风,表层湖流流向偏转为以北向流为主,并将湖心区表层漂浮藻类向梅梁湾输运.但是由于观测时间短,表层湖流小,因此没有观测到藻类在湾迎风岸聚集堆积.

此外,营养盐分布对 Chl. a 浓度空间分布影响较弱. 监测期间, TN 和 TP 浓度高值位于马山航道附近水域. TDN 和 TDP 的浓度高值则分布在直湖港和武进港附近水域(图 5). 马山航道是连接竺山湾和梅梁湾的河道,其河口附近水质受竺山湾影响较大,总营养盐浓度较高,但是溶解性营养盐所占比重相对较低. 直湖港和武进港是太湖北部河网的主干河道,其水质主要受流域面上点源及面源影响,溶解性营养盐在总营养盐中所占比重较大. 溶解性营养盐是蓝藻能够直接利用的营养盐形式,能直接促进蓝藻生长<sup>[14]</sup>. 但是 Chl. a 浓度分布与营养盐,尤其是溶解性营养盐分布存在较大差别. 在梅梁湾东北角的 Chl. a 浓度低值区却是溶解性营养盐的高值区. 可见,同步观测期间梅梁湾 Chl. a 浓度空间分布主要受控于水动力条件,而非营养盐.

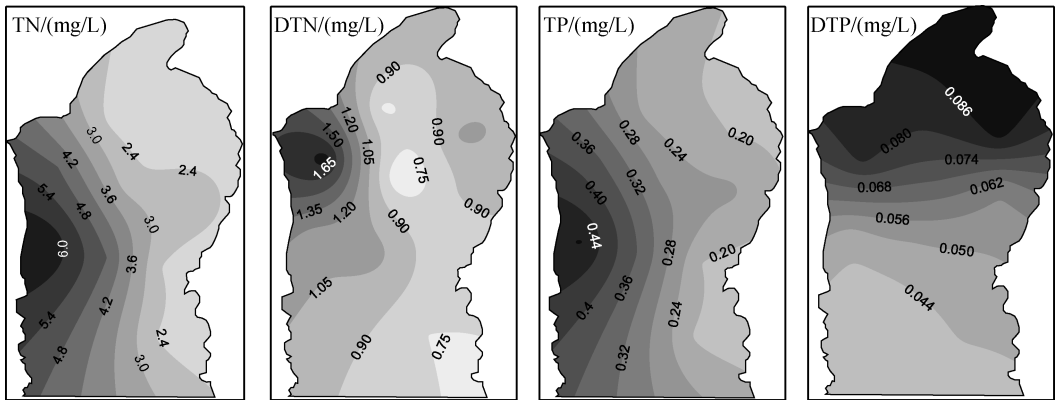


图 5 监测期间梅梁湾营养盐分布

Fig. 5 The distribution of nutrient concentrations of Meiliang Bay during the monitoring period

### 2.3 贡湖湾流场结构和浓度场特征

贡湖湾是太湖的重要饮用水水源地,也是“引江济太”工程的入口水域,但有关其水动力结构的研究相对较少. 1960 年的全湖湖流调查结果表明,夏季偏南风将在贡湖湾产生一个逆时针环流系统<sup>[12]</sup>;姜加虎利用二维模型讨论了贡湖湾流场特征,发现贡湖湾稳定状态下的湖流由若干环流及沿岸流构成<sup>[15]</sup>;胡维平等通过三维数值模型,对东南、西南及西风作用下贡湖湾湖流进行模拟,发现贡湖湾表层湖流与风向相同,底层流向与风向相反,且不论何种风向,8 m/s 风速在贡湖湾形成的流速很少超过 10 cm/s,底层流速更低<sup>[16]</sup>.

本次调查发现贡湖湾流场与前期调查及数值模拟结论存在较大差别(图 6). 虽然监测期间平均风速仅为 3.6 m/s,但是在湖湾北侧出现一股自湾内流向大太湖的湖流,该湖流最大流速达到 37.4 cm/s,湖流流向与监测期间最大风速的风向相反. 受水下地形及水生植物分布影响(图 1),湾顶望虞河口附近水域流速滞缓、流向多变. 同时,在最大风速达 8.1 m/s 的偏西风作用下,贡湖湾实测平均流速垂向分布呈递增趋势,分别在 20、25、28 cm/s,湖流垂向不存在切变现象.

由于监测前一周及监测期间望虞河均未进行引水,因此贡湖湾调查同样证明前期风场对湖流结构的巨大影响. 前期 15 h 东北风有利于西南向水体加速,生成西南向湖流. 同时,受湖湾岸线、水生植物、大贡山及小贡山的影响(图 1),整个湖湾的水流均向湾深槽汇入,形成了贡湖湾大规模湖流. 可以预见,在望虞河引水之时,贡湖湾将形成相似的湖流系统.

同样的,贡湖湾的湖流结构对湾内蓝藻迁移扩散具有重要影响. 在水体垂直方向,除湾底和湾口附近的 Chl. a 浓度高值区外,Chl. a 浓度沿水深不存在分层现象(图 7). 这主要受观测期间贡湖湾水动力条件影响. 监测期间,除湾顶流速较小外,湖湾大部分水域的大强度湖流将对表层漂浮藻类产生强烈的湍流混合作用,并导致表层、中层及底层 Chl. a 浓度分布的均一化.

目前常以临界风速作为藻类垂向混合标志<sup>[17]</sup>,本文认为这并不科学. 朱永春等<sup>[7]</sup>通过数值模拟认为太湖的临界风速为 3.0 m/s. 范成新等<sup>[18]</sup>根据在太湖的观测认为,当平均风速在 1.5~3.6 m/s 时,风速对藻类

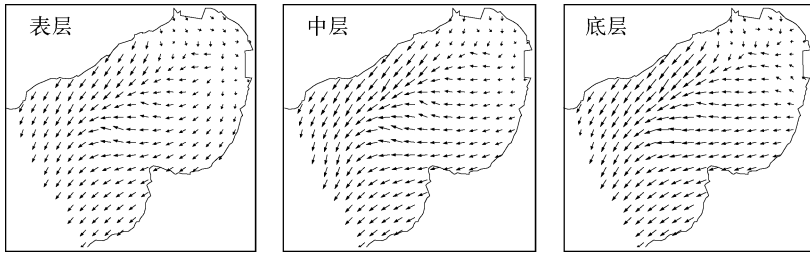


图6 偏西风作用下贡湖湾实测湖流流场

Fig. 6 The measured current field of Gonghu Bay induced by west wind

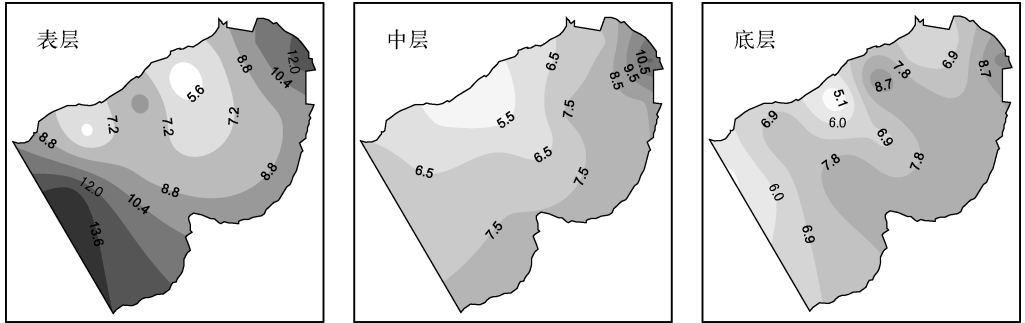
图7 监测期间贡湖湾 Chl. a 浓度( $\mu\text{g/L}$ )分布

Fig. 7 The distribution of Chl. a concentration of Gonghu Bay during the monitoring period

沿下风方向迁移堆积具有重要影响;当平均风速大于  $4 \text{ m/s}$  后,藻类浓度将沿水深分布趋于均一.然而,本次观测到梅梁湾的平均风速是  $3.8 \text{ m/s}$ ,水体 Chl. a 浓度出现了垂向分层;而贡湖湾的平均风速为  $3.6 \text{ m/s}$ ,水体 Chl. a 浓度不出现垂向分层.可见,使用平均风速的概念作为藻类垂向混合标志并不合理.事实上,水体动力扰动强度主要由湖流、波浪等决定.虽然风场是太湖湖流、波浪的主要能量来源,但前期风场、地形、吹程、航道、水生植物、出入湖流等因素也可影响太湖水动力结构.因此,本文认为使用水动力作为表征太湖藻类垂向混合的临界指标比风速更加切合实际.

在水平方向,贡湖湾 Chl. a 浓度高值区域主要分布在湾顶和湾南岸滨岸水域,其中浓度最大值出现在望虞河河口附近水域,湾北岸滨岸水域 Chl. a 浓度显著偏低.此分布模式主要受潮流控制.南岸滨岸带水动力滞缓,有利于蓝藻的聚集堆积,尤其是在流速滞缓的望虞河河口附近水域.北岸滨岸水域湖流方向稳定,流速大,对蓝藻产生的冲刷作用能够降低此水域 Chl. a 浓度.此外,同步 TN、DTN、TP 及 DTP 监测数据表明,受流域营养盐负荷的影响,营养盐浓度高值区主要分布在湾北岸滨岸水域(图 8).营养盐浓度分布与 Chl. a 浓度分布存在较大差异.贡湖湾的调查也证明水动力对太湖蓝藻空间分布具有重要影响.

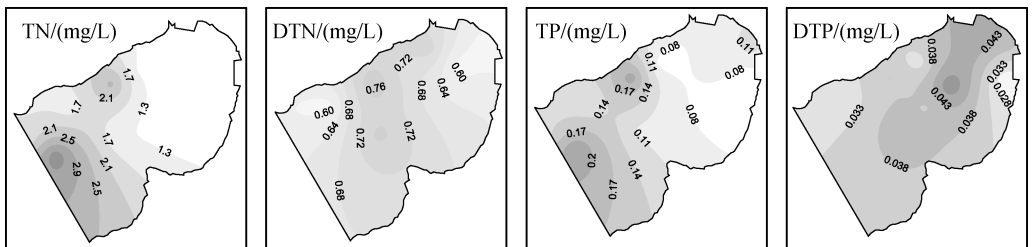


图8 监测期间贡湖湾营养盐分布

Fig. 8 The distribution of nutrient concentrations of Gonghu Bay during the monitoring period

### 3 结论

本文通过对2008年9月太湖梅梁湾及贡湖湾的水文、水质及气象同步观测,对受前期东北风影响的梅梁湾及贡湖湾水动力结构及蓝藻水华分布开展了研究.结果表明,前期风场对观测期间梅梁湾及贡湖湾湖流结构影响显著.表层湖流对同步风场变化响应迅速,而中层及底层湖流对同步风场变化响应存在显著滞后. Chl. a 浓度空间分布受控于水动力条件,而非营养盐.此外,本文认为水动力扰动强度比同步风速更适合作为表示藻类垂向混合状态的标志.当然,由于太湖水动力时空变化非常大,本文基于2008年9月10日—11日调查数据所得出的分析结论还需要更多的野外调查、实验以及数值模型来验证.

### 4 参考文献

- [ 1 ] Nixdorf B, Deneke R. Why “very shallow” lakes are more successful opposing reduced nutrient loads. *Hydrobiologia*, 1997, **342/343**: 269-284.
- [ 2 ] Qin BQ, Xu PZ, Wu QL *et al.* Environmental issues of Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 3-14.
- [ 3 ] Zhang YL, Zhang B, Ma RH *et al.* Optically active substances and their contributions to the underwater light climate in Lake Taihu, a large shallow lake in China. *Fund Appl Limnol*, 2007, **170**(1): 11-19.
- [ 4 ] Luettich RAJ, Harleman DRF, Somlyudy L. Dynamic behavior of suspended sediment concentrations in a shallow lake perturbed by episodic wind events. *Limnol & Oceanogr*, 1990, **35**(5): 1050-1067.
- [ 5 ] 张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 悬浮物浓度对水下光照和初级生产力的影响. *水科学进展*, 2004, **15**(5): 615-620.
- [ 6 ] 颜润润, 逢勇, 赵伟等. 环流型水域水动力对藻类生长的影响. *中国环境科学*, 2008, **28**(9): 813-817.
- [ 7 ] 朱永春, 蔡启铭. 风场对藻类在太湖中迁移影响的动力学研究. *湖泊科学*, 1997, **9**(2): 152-158.
- [ 8 ] 白晓华, 胡维平, 胡志新等. 2004年夏季太湖梅梁湾席状漂浮水华风力漂移入湾量计算. *环境科学*, 2005, **26**(6): 57-60.
- [ 9 ] Hu WP, Zhai SJ, Zhu ZC *et al.* Impacts of the Yangtze River water transfer on the restoration of Lake Taihu. *Ecol Eng*, 2008, **34**: 30-49.
- [ 10 ] 罗激葱, 秦伯强, 朱广伟等. 太湖梅梁湾冬季湖流特征. *湖泊科学*, 2004, **16**(1): 73-76.
- [ 11 ] Ebina J, Tsutsui T, Shirai T. Simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in water using peroxodisulfate oxidation. *Water Res*, 1983, **17**: 1721-1726.
- [ 12 ] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民等. 太湖梅梁湾水动力及相关过程的研究. *湖泊科学*, 2000, **12**(4): 327-334.
- [ 13 ] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民等. 太湖水环境演化的过程与机理研究. 北京: 科学出版社, 2004.
- [ 14 ] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据. *科学通报*, 2005, **50**(1): 66-71.
- [ 15 ] 姜加虎. 贡湖及其相关水域风生流模拟研究. *海洋湖沼通报*, 1997, (4): 1-7.
- [ 16 ] 胡维平, 濮培民, 秦伯强. 太湖水动力学三维数值实验研究——2. 典型风场风生流的数值计算. *湖泊科学*, 1998, **10**(4): 26-34.
- [ 17 ] Webster IT. Effect of wind on the distribution phytoplankton ceils in lakes. *Limnol & Oceanogr*, 1990, **35**: 989-1001.
- [ 18 ] 范成新, 陈宇炜, 吴庆龙. 夏季盛行风对太湖北部藻类水华分布的影响. *上海环境科学*, 1998, **17**(8): 4-6.