

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.02.002

# 夏季风下的太湖风场-流场野外观测研究

丁文浩<sup>1,2</sup>, 秦伯强<sup>1</sup>, 吴挺峰<sup>1</sup>, 王汗<sup>1,3</sup>, 许王辰<sup>1,4</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;

3. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

4. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为研究太湖风场特征、湖流特征以及不同类型风场对太湖湖流的影响, 在太湖不同区域布设6台多普勒剖面流速仪和4座气象站, 获取同步流场和风场数据, 分析夏季风与湖流流场的关系。结果表明:(a)风场方面, 空间分布具有不均匀性, 各观测点间风速差异较大, 各观测点间风向随风速减小而差异扩大化。(b)太湖流场具有明显的风生流特征: 空间上, 大风(时段平均风速在6.7 m/s以上)情况下, 西部湖区出现逆时针环流, 湖流分层不明显; 小风(时段平均风速在3.8 m/s以下)情况下, 没有明显的环流出现, 上、下层湖流分层明显, 各层流向相对稳定但不相同, 补偿流发育。(c)流速方面, 10 cm/s以下流速比率90%以上, 局部区域水流速度在强风条件下可达20 cm/s。

**关键词:** 太湖; 风场; 流速; 流向; 补偿流; 声学多普勒测流剖面仪

中图分类号: TV131.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2020)02-0102-07

## Study on Taihu Lake's wind field and flow field under summer monsoon

DING Wenhao<sup>1,2</sup>, QIN Boqiang<sup>1</sup>, WU Tingfeng<sup>1</sup>, WANG Han<sup>1,3</sup>, XU Wangchen<sup>1,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to obtain the characteristics of wind field and flow field as well as the influence of different types of wind fields on the flow field of Taihu Lake, 6 acoustic doppler current profilers (ADCP) and 4 meteorological stations were set up in different areas of Taihu Lake, and the synchronous data of flow field and wind field were obtained. The results show the following: (a) The spatial distribution of wind field in Taihu Lake was not uniform, the wind speed varied greatly among 4 stations, and the difference of wind direction was expanded along with the decrease of wind speed. (b) The flow field in Taihu Lake had obvious characteristics of wind-generated flow. When the average wind speed was greater than 6.7 m/s, there was a counterclockwise circulation that appeared in the western lake area, and there was no obvious flow stratification during this period. When the average wind speed was less than 3.8 m/s, the circulation in the west faded away. However, the flow stratification was obviously developed, the current direction of each layer was relatively stable but different, and the compensation flow developed. (c) According to the observed data, the percentage of current speed less than 10 cm/s was more than 90%, and the current speed can reach 20 cm/s under strong wind conditions.

**Key words:** Taihu Lake; wind field; current speed; current direction; compensation current; acoustic doppler current profiler

**基金项目:** 国家重点研发计划(2017YFC0405205); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC008); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203); 国家自然科学基金(41661134036)

**作者简介:** 丁文浩(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事湖泊水动力模型研究。E-mail: whding@niglas.ac.cn

**通信作者:** 秦伯强, 研究员。E-mail: qinbq@niglas.ac.cn

**引用本文:** 丁文浩, 秦伯强, 吴挺峰, 等. 夏季风下的太湖风场-流场野外观测研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 102-108.  
DING Wenhao, QIN Boqiang, WU Tingfeng, et al. Study on Taihu lake's wind field and flow field under summer monsoon[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(2): 102-108.

太湖(湖心坐标:31.167°N, 120.151°E)位于长江三角洲地区,水位 3.0 m 时,水面面积为 2 338.1 km<sup>2</sup>,是我国第三大淡水湖<sup>[1]</sup>,也是一个典型的大型浅水湖泊。20 世纪末以来,太湖水体富营养化问题日渐突出,引起国内外学者的广泛关注<sup>[2-6]</sup>。研究表明,湖流引起的物质迁移,是影响水体富营养化在不同湖区分布的重要物理因素<sup>[7-9]</sup>。

多年来,国内外学者对太湖湖流进行了广泛研究,其中主要研究方式包括野外观测和数值模拟。1960 年,中国科学院南京地理与湖泊研究所主持了太湖野外调查,对太湖湖流进行了为期 25 d 的野外观测,最早获得夏季风下太湖水域的流场分布状况<sup>[10]</sup>。受野外观测条件限制,对太湖湖流的野外观测多集中在某一片区。1998 年,秦伯强等<sup>[11]</sup>利用声学多普勒测流剖面仪(ADCP)在梅梁湾湖进行长时间野外定点监测,掌握了夏季风下梅梁湾的湖流特征。2016 年,王建威等<sup>[12]</sup>对太湖风生流的垂向切变规律开展了观测研究。另外,国内诸多学者对太湖湖流展开了模拟研究<sup>[13-21]</sup>。但是针对全湖区域的实地观测尚未有开展。野外观测数据的不足,严重限制了人们对自然条件下太湖湖流的认知。

本文研究开展于 2015 年 7 月 14 日至 8 月 15 日,选取 6 个观测点(图 1)分别放置一台声学多普勒测流剖面仪(ADCP)进行三维流速的高频(30 min/次)测定,结合上方山(SFS)、太湖站(THZ)、平台山(PTS)和竺山湾(ZSW)气象站的风场数据,多方位观测气象场和流场,旨在研究太湖夏季风场特征,分析对应风场背景下的湖流特征,以及整个太湖夏季风与流场之间的关系。

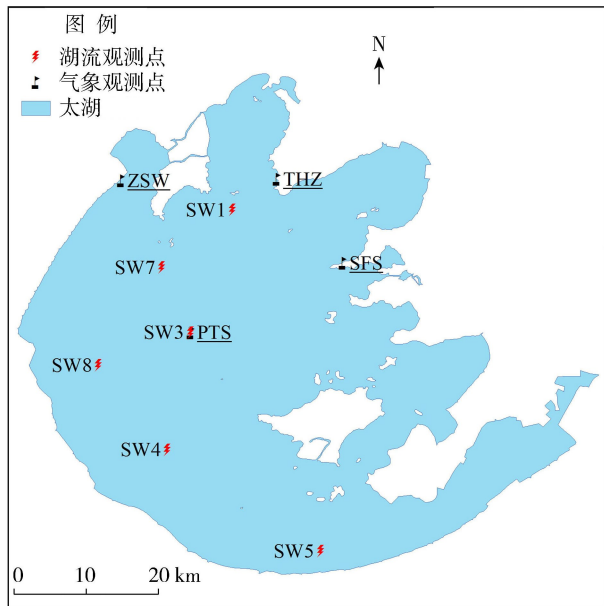


图 1 监测点位分布

Fig.1 Distribution of monitoring sites

## 1 数据来源与分析方法

### 1.1 数据获取与站点分布

在综合太湖形状、风场预估、以及前人对湖流研究等条件的基础上,进行观测点布置。采用型号为 Vaisala 气象变速器 WXT520 风速风向仪观测风场,采样频率为 5 min/次。采用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)观测流场,座底式观测,除去仪器高(17 cm)和盲区(30 cm),从底层至表层,每层 40 cm,设置 9 层(最终有效数据为 6 层,定义最下层为下层,下层向上第 3 层为中层,最上层为上层),采样频率 30 min/次。实现气象场和流场的定点、同步观测。

### 1.2 数据分析与处理

本文在数据分析方面主要采用风玫瑰图统计和时序风场、流场统计方法。对观测的风场、流场数据进行分级分方向处理。根据时序的相关性,通过同步角度差和方向差分析 4 个气象站点风场之间的相关性;同时,分析不同湖区湖流的上、中、下 3 层湖流的变化状态,以揭示观测期间全湖风场和流场的特征。利用以上分析结果,分级(主要以速度为标准)分析不同风场背景下各个湖区流场的响应状况,进而揭示整个观测期间的湖流状态。

## 2 结果与讨论

### 2.1 风场特征

由图 2 可知,观测期间的风场具有以南风为主导风向的夏季风特征,4 个气象站中偏南风分别占 72.94%、67.60%、77.5% 和 80.31%,其中东南风比率最大。SFS、THZ、ZSW、PTS 观测到 4 m/s 以上风速分别占 43.20%、30.69%、47.13% 和 47.84%,其中偏南风比率分别为 89.41%、73.50%、80.98% 和 93.49%。

分析 4 个气象站的风场时序数据可知,观测期间太湖周围风场分布具有区域相对均匀性和全局不均匀性。在风向方面,THZ、ZSW、PTS 这 3 个站点之间,出现风速越小风场越不均匀的变化趋势。当风速超过

4 m/s, 3 个地区出现风向偏差小于 22.5° 的概率在 75% 左右, 偏差小于 45° 的概率在 90% 左右, 表明这 3 个地区之间的风向具有一定程度不均匀性; 当风速小于 4 m/s 时, 不均匀性较为显著, 3 个地区出现风向偏差小于 22.5° 的概率下降到 65% 左右, 偏差小于 45° 的概率在 85% 左右, 其中 2 m/s 以下的部分分别占 40% 和 60%, 表明风速对风场的均匀性具有一定的影响。从另一方面, 风向之间差别在 67.5° 内的时段, 除风速小于 2 m/s, 其他风速条件下比率均高于 90%。另外, SFS 站的风向与上述 3 个站点的风向之间呈现出较为明显的偏离(图 3 虚线部分), 存在 20° 左右的固定偏差, 且随着风速增加角度偏差越大, 当地地形对这一现象具有一定的影响。当风向差逐渐扩大, SFS 与其他站点的差别比率逐渐缩小。以上规律表明, 在风向方面, 不同点位风场之间具有一定的均匀性, 在风速较小的情况下, 均匀性较差; 在风速超过 4 m/s 时, 局地地形会对风场产生固定性的影响, 如 SFS 站的风向偏离其他 3 个站点 22.5°~45°。

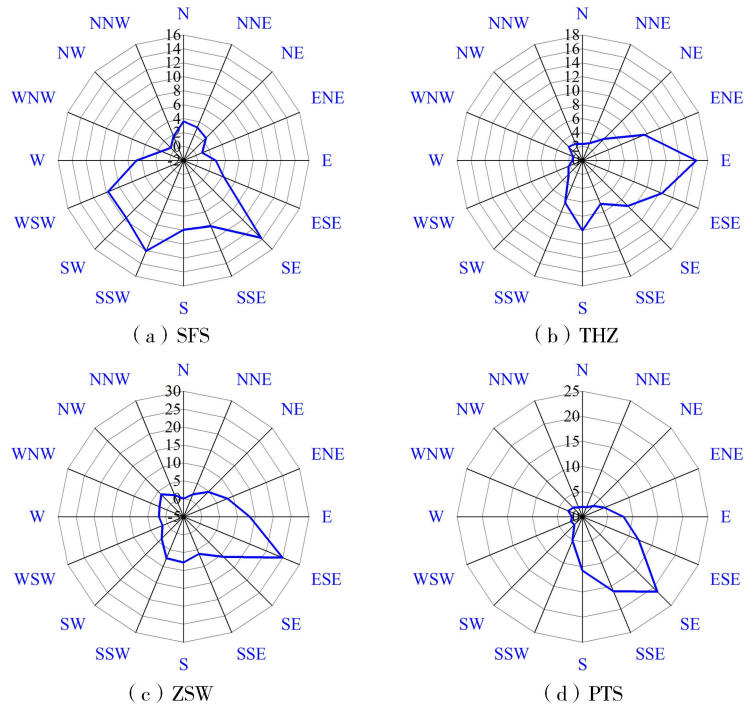


图 2 4 个气象站的风玫瑰图

Fig. 2 Wind roses from 4 meteorological stations

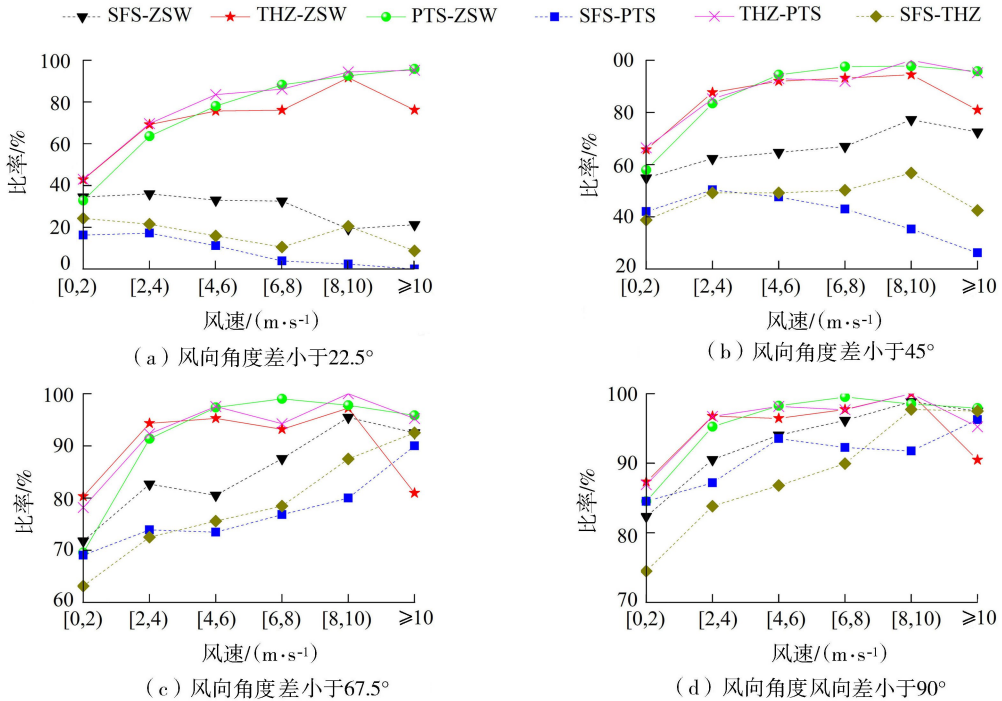


图 3 同时刻站点间风向角度差比率

Fig. 3 Rate of wind direction differences between stations at the same time

### 2.2 流场特征

6 个观测点位流速小于 10 cm/s 的整体比率在 90% 以上, 上层流速大于 10 cm/s 的比率较高(5% 以上)。各个点位及其对应的不同水层流速的分布不尽相同: SW1 流速大于 10 cm/s 的比率相对较大, 且上层比率最大; SW3 上、中、下层流速分布比较均匀; SW4 和 SW5 上层流速大于 10 cm/s 的比率较大, 上层与中、下层有

较大分异;SW7 的 3 层水流速度比率差异较大,上层流速大于 10 cm/s 的比率高于中层,中层高于下层,同时大于 10 cm/s 流速的比率均较大;SW8 出现下层流速大于 10 cm/s 的比率大于上、中层的情况,但比率均比较小,最大比率不到 3%。

在流向方面,如图 4 所示,各站点可分为有稳定主导流向 (SW1、SW5) 和主导流向不明显 (SW3、SW4、SW7、SW8) 2 种类型。有稳定主导流向的站点中,SW1 主导东向流 (SE、ESE、E、ENE、NE),上、中、下层东向流比率分别为 58.8%、57.4%、56.0%,上、中、下层主导流向相对一致;SW5 主导北向流 (NW、NNW、N、NNE、NE),上、中、下层北向流比率分别为 54.0%、62.5%、59.7%,上层北偏东,中、下层北偏西。主导流向不明显的站点中,SW3 上、下层主流向不一致,上层主导西北向 (NW、WNW,22.4%) 和东向流 (E、ENE、ESE,25.2%),下层主导西北向 (WNW、NW、NNW,28.1%) 和西南向 (SW、SSW,23.3%);SW4 上层以东南向 (SSE、SE、ESE,30.2%) 为主,中、下层以西北向为主 (NNW、NW、W、WNW,中层:35.5%,下层:42.4%),上层与中、下层湖流差异比较明显;SW7 上层以东北向 (NNE、NE、ENE,27.5%) 和西南向 (SW、WSW,18.2%) 流为主,下层以东南向 (E、ESE,16.8%) 和北向 (N、NNE、NNW,24.9%) 为主,中层作为过渡层,以西向 (SW、W、WSW,24.3%) 和北向 (N、NNE,22.4%) 为主;SW8 上层流场较弱,流向不稳,中、下层流场发育,流速超过上层湖流,流向以向西北向 (中层:50.5%,下层:50.0%) 为主。

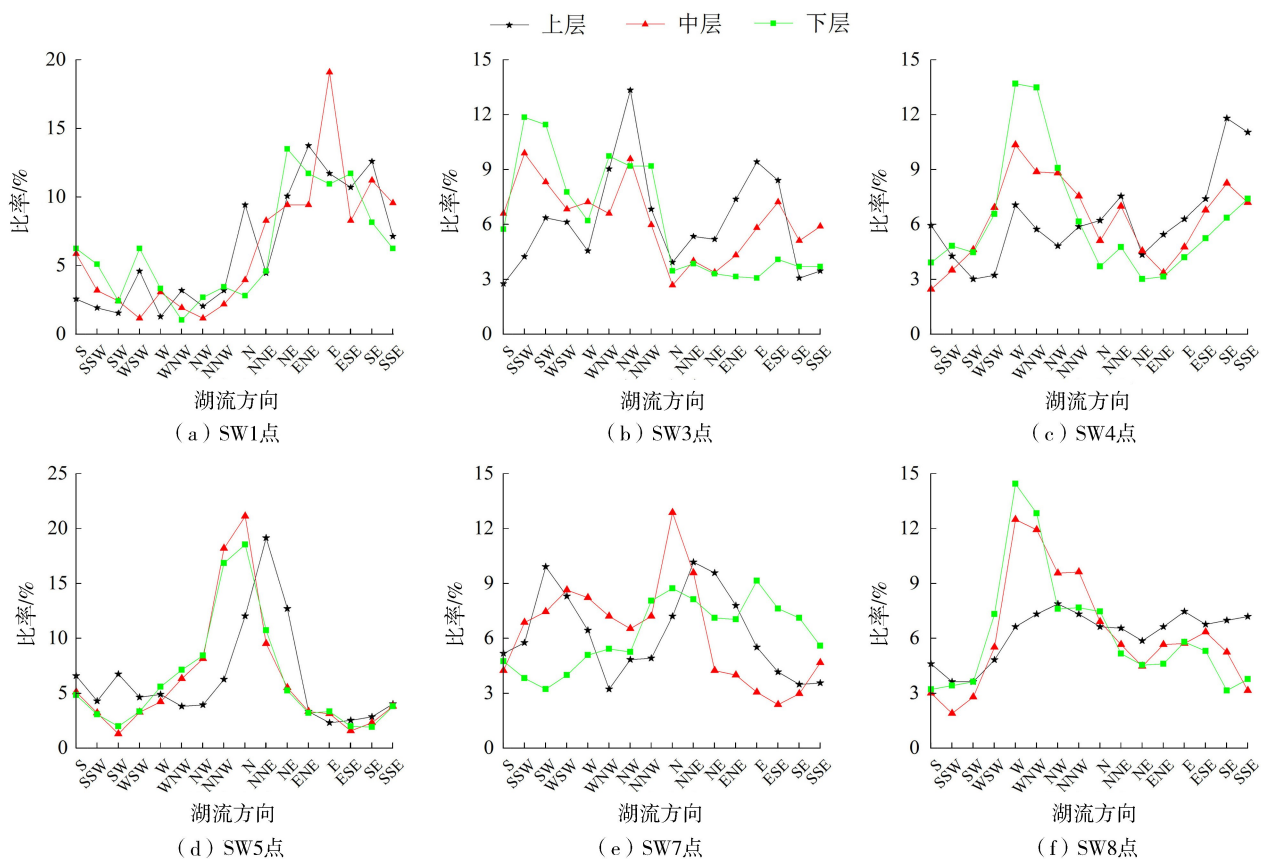


图 4 观测时段内各点位的不同分层流向比率

Fig. 4 Rates of wind directions in different layers from different stations

### 2.3 风场与流场之间的关系

#### 2.3.1 特征风场的选取与分析

根据风速和风向的特征,分别选取 7 月 20—22 日、8 月 1—3 日、8 月 7—9 日 3 段 3 日连续相对稳定风场,作为低风速、中风速和高风速的代表,研究不同风速的稳定风场下,风场与湖流之间的作用关系。3 个时段中 4 气象站点的风速、风向状况如图 5 所示。

根据 3 个气象时段的特征,分析了它们的参数特征,见表 1。

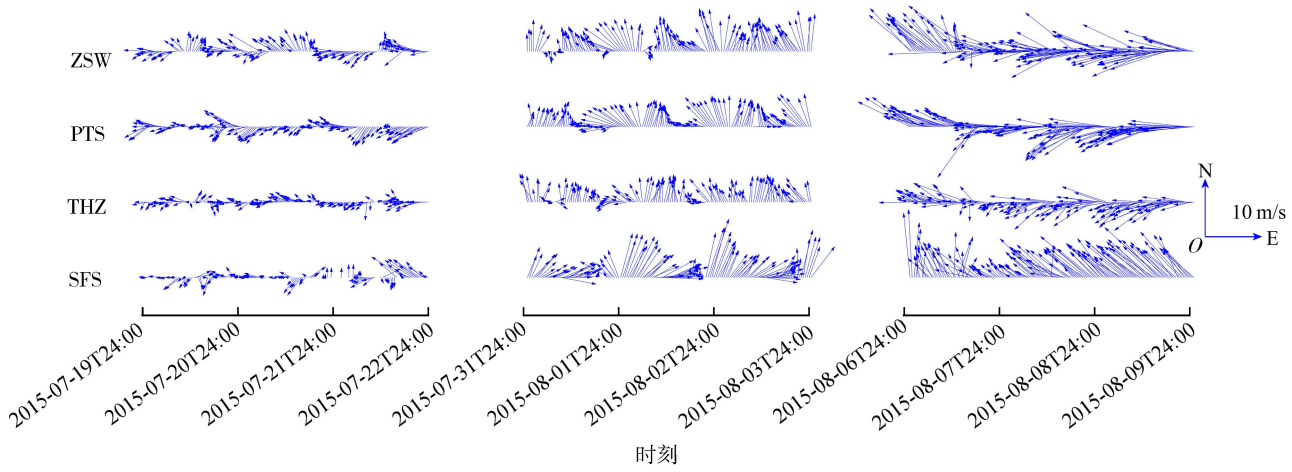


图 5 观测期间典型时段风场

Fig. 5 Wind conditions during three typical periods of monitoring stage

2.3.2 特征风场下的湖流特征

考虑风场直接作用在水体表面,对上层水流影响较大,选取 3 个特征风场背景下的上层流速,分析风场对湖流作用。由图 6 可知,各站点上层流速比率过程线随着风速增加,比率峰值逐渐偏向大流速段。如 SW3,低风速阶段,湖流流速比率随着流速增加而逐渐减小,比率峰值出现在 0~2 cm/s 流速段;中风速阶段,湖流流速比率随着流速增加先增加后逐渐减小,其比率峰值出现在 2~4 cm/s 流速段;在高风速阶段,湖流流速比率随流速增加先增加后减小,比率峰值出现在 6~8 cm/s 流速段。这表明上层流速随着风速的增加,高流速的湖流比率增加,即风速的加大,直接导致上层流速增加。

表 1 特征时段的风场参数

Table 1 Features of wind fields during typical periods

时间段	平均风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	最大风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	平均风向
7 月 20—22 日	2.3	5.83	ES
8 月 1—3 日	3.8	7.70	S
8 月 7—9 日	6.7	12.00	E

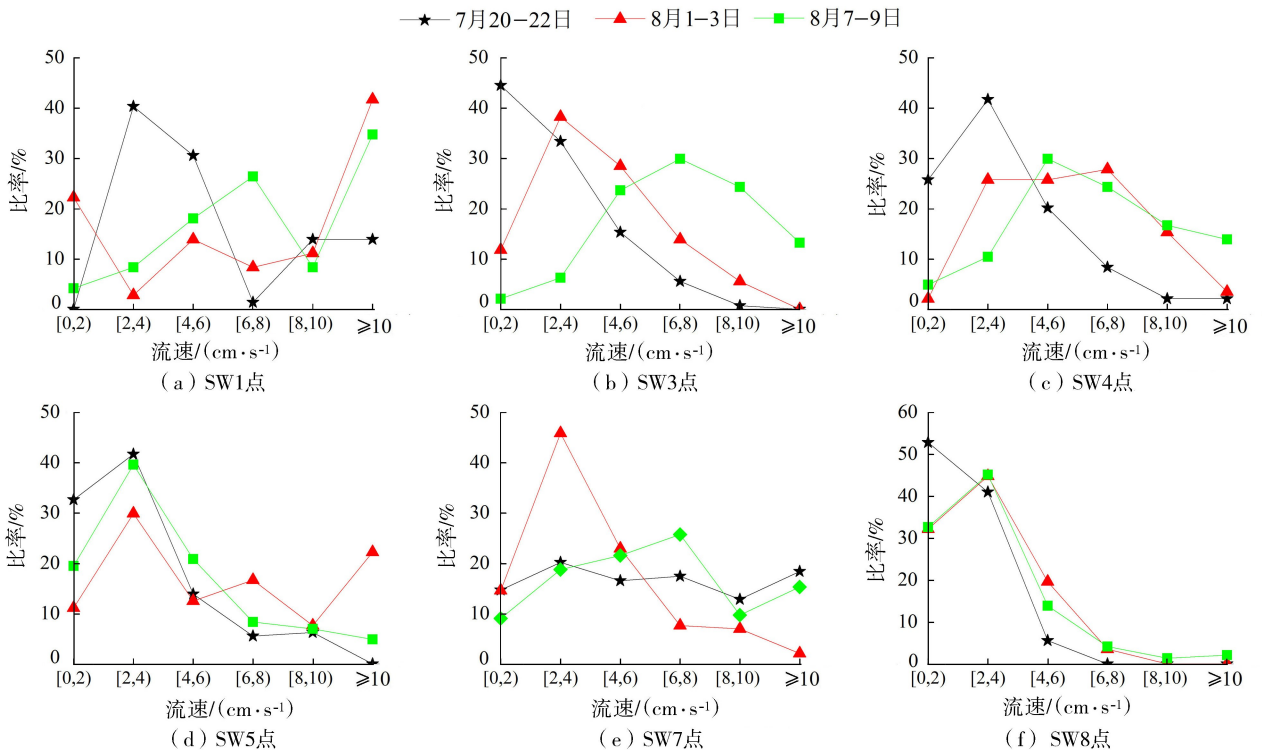


图 6 不同风场下上层湖流流速比率分布

Fig. 6 Rate distribution of velocity in upper layers of different stations

综合各个站点不同风场下的湖流状况,可以看出湖流的分布与风场的变化有关。风速较大的情况下,西部湖区形成较为稳定的逆时针环流;风速较小的情况下,西部环流不明显,多出现上下分层的湖流,在站点SW4、SW3和SW7表现明显。

观测数据分析出的结果,反映了太湖实际流场分布状态。多数时间,太湖风场风力较小且不稳定,无以形成稳定环流,这在一定程度上增加了湖泊内部流场的复杂性,为确定各个湖区湖流运动状态增加了难度。从另一个角度看,在低风速条件下,虽然无法形成稳定环流,但在某些区域上层流相对稳定,在时段平均风速低于 $2.0\text{ m/s}$ 的小风情况下,蓝藻更容易在水体表面积聚<sup>[22]</sup>,上层湖流的流动状态,对于蓝藻堆积区的预测具有重要作用。在时段平均风速为中高风速条件下,蓝藻在表层的积聚效应不明显,并随稳定湖流迁移,使蓝藻进行重新分布。因而,风场在弱风与强风之间转变的阶段是蓝藻重新分布的关键时期,后期的风速、风向对于蓝藻堆积区域的形成具有关键性的作用。

### 3 结 论

a. 太湖风场的分布具有不均匀性,表现在风向偏差和风速偏差,这种不均匀性随着风速变小而更加显著。

b. 流场方面,太湖在多数时间流速小于 $10\text{ cm/s}$ (本研究比率超过90%)。

c. 流场在不同风场下变化较大,风生流特征显著。在风速的不同阶段,湖流流速以及湖流分布均差别较大。在低风速(时段平均风速小于 $3.8\text{ m/s}$ )情况下,上、下层湖流流速、流向分异显著,在高风速(时段平均风速大于 $6.7\text{ m/s}$ )情况下,西部湖区发展为逆时针环流,流向分异较小。

#### 参考文献:

- [1] QIN Boqiang. Lake Taihu, China: dynamics and environmental change[M]. Berlin: Springer, 2008: 1-66.
- [2] QIN Boqiang, ZHU Guangwei, GAO Guang, et al. A drinking water crisis in Lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management[J]. Environmental Management, 2010, 45(1): 105-112.
- [3] WU Tingfeng, QIN Boqiang, ZHU Guangwei, et al. Dynamics of cyanobacterial bloom formation during short-term hydrodynamic fluctuation in a large shallow, eutrophic, and wind-exposed Lake Taihu, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(12): 8546-8556.
- [4] PAERL W H, XU Hai, HALL S N, et al. Controlling cyanobacterial blooms in hypertrophic Lake Taihu, China: will nitrogen reductions cause replacement of non-N<sub>2</sub> fixing by N<sub>2</sub> fixing taxa? [J]. PloS One, 2014, 9(11): 113-123.
- [5] 谢艾玲,徐枫,向龙,等. 环太湖主要入湖河流污染负荷量对太湖水质的影响及趋势分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):391-397. (XIE Ailing, XU Feng, XIANG Long, et al. Trend analysis for pollutant load of major rivers around Taihu Lake and its impact on water quality in Taihu Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 391-397. (in Chinese))
- [6] 燕文明,刘凌,钱宝,等. 浅水湖泊表层沉积物粒度垂向分布及其水动力表征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(4):345-349. (YAN Wenming, LIU Ling, QIAN Bao, et al. Vertical distribution of particle size and hydrodynamic characterization of surface sediments in shallow lakes[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(4): 345-349. (in Chinese))
- [7] 姜家虎,焦春萌,黄群,等. 太湖大浦口湖区湖流特征分析[J]. 海洋湖沼通报,1991(2):16-22. (JIANG Jiahu, JIAO Chunmeng, HUANG Qun, et al. A study on character of water current dapu mouth region of Lake Taihu[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1991(2): 16-22. (in Chinese))
- [8] WONG K T M, LEE H W J, HARRISON J P. Forecasting of environmental risk maps of coastal algal blooms[J]. Harmful Algae, 2009, 8(3): 407-420.
- [9] LI Wei, QIN Boqiang, ZHU Guangwei. Forecasting short-term cyanobacterial blooms in Lake Taihu, China, using a coupled hydrodynamic-algal biomass model[J]. Ecohydrology, 2014, 7(2): 794-802.
- [10] 黄漪平,汪宪枢,张立,等. 太湖综合调查初步报告[M]. 北京:科学出版社,1965: 20-24.
- [11] 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[J]. 湖泊科学,2000, 12(4):327-334. (QIN Boqiang, HU Weiping, CHEN Weimin, et al. Studies on the hydrodynamic processes and related factors in Meiliang Bay, Northern Taihu Lake, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2000, 12(4): 327-334. (in Chinese))

- [12] 王建威,李一平,罗淑葱,等.太湖风生流垂向切变规律的原位观测[J].水资源保护,2016,32(6):98-103. (WANG Jianwei, LI Yiping, LUO Liancong, et al. Field observation of vertical shear of wind-driven current in Taihu Lake[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6):98-103. (in Chinese))
- [13] 逢勇,濮培民.大气-水耦合模式下三维太湖湖流场研究[J].湖泊科学,1996,8(2):97-102. (PANG Yong, PU Peimin. Numerical study of wind-driven current in taihu lake with the air-water coupling model[J]. Journal of Lake Sciences, 1996, 8(2):97-102. (in Chinese))
- [14] 胡维平,濮培民,秦伯强.太湖水动力学三维数值试验研究:1.风生流和风涌增减水的三维数值模拟[J].湖泊科学,1998,10(4):17-25. (HU Weiping, PU Peimin, QIN Boqiang. A three-dimensional numerical simulation on the dynamics in Taihu Lake, China (I): the water level and the current during the 9711 typhoon process[J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(4):17-25. (in Chinese))
- [15] 罗淑葱,秦伯强.基于三维浅水模式的太湖水动力数值试验-盛行风作用下的太湖流场特征[J].水动力学研究与进展,2003,18(6):686-691. (LUO Liancong, QIN Boqiang. Numerical simulation based on a three-dimensional shallow-water hydrodynamic model in Lake Taihu-Current circulations in Lake Taihu with prevailing wind-forcing [J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(6):686-691. (in Chinese))
- [16] 李一平,逢勇,刘兴平.太湖湖流对波浪的影响机制研究[J].水利学报,2007,38(增刊1):308-311. (LI Yiping, PANG Yong, LIU Xingping. Study on the influence mechanism about current to wave in Lake Taihu [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(Sup1):308-311. (in Chinese))
- [17] 吴挺峰,朱广伟,秦伯强,等.前期风场控制的太湖北部湖湾水动力及对蓝藻水华影响[J].湖泊科学,2012,24(3):409-415. (WU Tingfeng, ZHU Guangwei, QIN Boqiang, et al. Prior wind field induced hydrodynamics and its influence on cyanobacterial bloom in northern bays of Lake Taihu, China [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(3):409-415 (in Chinese))
- [18] 李未,秦伯强,张运林,等.富营养化浅水湖泊藻源性湖泛的短期数值预报方法:以太湖为例[J].湖泊科学,2016,28(4):701-709. (LI Wei, QIN Boqiang, ZHANG Yunlin, et al. Numerical forecasting of short-term algae-induced black bloom in eutrophic shallow lake: a case study of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(4):701-709. (in Chinese))
- [19] 郝文彬,唐春燕,滑磊,等.引江济太调水工程对太湖水动力的调控效果[J].河海大学学报(自然科学版),2012,40(2):129-133. (HAO Wenbin, TANG Chunyan, HUA Lei, et al. Effects of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on hydrodynamic regulation of Taihu Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(2):129-133. (in Chinese))
- [20] 姜龙,李一平,王文才,等.太湖波浪特征参数反演计算[J].水资源保护,2018,34(3):68-74. (JIANG Long, LI Yiping, WANG Wencai, et al. Inversion calculation of wave characteristics parameters in Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3):68-74. (in Chinese))
- [21] LIU Xiaodong, LI Lingqi, WANG Peng, et al. Numerical simulation of wind-driven circulation and pollutant transport in Taihu Lake based on a quadtree grid [J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(2):108-114.
- [22] 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[J].环境科学,2005,26(6):57-60. (BAI Xiaohua, HU Weiping, HU Zhixin, et al. Importation of wind-driven drift of mat-like algae bloom into Meiliang Bay of Taihu Lake in 2004 summer [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2005, 26(6):57-60. (in Chinese))

(收稿日期:2018-11-20 编辑:刘晓艳)