

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.06.016

太湖风生流垂向切变规律的原位观测

王建威¹, 李一平^{1,2}, 罗澍葱³, 戴淑君³

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:浅水湖泊垂向环流存在着上下层反向现象,为了探究太湖湖流垂向切变规律,用声学高频流速仪 ADV、ADP 及风向风速仪在梅梁湾进行了 9 d 的连续观测;基于获取的高频同步数据,利用概率统计方法,对各层流场在不同风向、不同风速以及持续同向风场影响下的切变率进行了统计分析,并研究了流场垂向分布特征。结果表明:5 月太湖梅梁湾在风向为 ESE、ES、E, 风速 2~5 m/s, 同向风场持续作用 10~11 h 时,流场基本达到稳定且切变率最大;表层流场(水下 50 cm)处,切变率最小,为 20%,底层流场(距水-土界面 7 cm)处,切变率最大达到 60%;流向改变的拐点出现在表层至中层,即水下 50~100 cm;风速、风向的出现频率,以及同向风场的持续时间决定了流场反向率大小,流场反向率决定了拐点的位置。

关键词:浅水湖泊;风生流;垂向切变;反向率;原位观测;太湖;梅梁湾

中图分类号:P343.3

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2016)06-0098-06

Field observation of vertical shear of wind-driven current in Taihu Lake

WANG Jianwei¹, LI Yiping^{1,2}, LUO Liancong³, DAI Shujun³

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Nanjing 210098, China;

3. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Reverse vertical circulations often exist in shallow lakes. In order to investigate the shear rules of the vertical circulation in Taihu Lake, field observations were conducted in Meiliang Bay for nine days using an acoustic Doppler velocimeter (ADV), an acoustic Doppler current profiler (ADP), and anemometers. The shear probabilities at different water depths, which were affected by different wind directions, wind speeds, and continued wind fields with the same direction, were analyzed based on the statistics of synchronous and high-frequency data of wind-driven currents. The characteristics of the vertical profile distribution of the flow field were also studied. The results show that, when the wind moved in the ESE, ES, and E directions at a speed ranging from 2 to 5 m/s and the wind fields moving in the same direction were active for 10 to 11 hours in Meiliang Bay in May, the flow field could be stable with the highest shear rate. The shear rate was lowest with the value of 20% in the surface layer (50 cm below the water surface), and highest when it had a value of 60% in the bottom layer (7 cm above the lakebed). The inflection point, where the flow direction changed, appeared between the surface layer and middle layer, i. e., 50 to 100 cm below the water surface. The occurrence frequencies of wind speed and wind direction, as well as the duration of wind fields with the same direction determined the reverse probability of the flow field, which determined the location of the inflection point.

Key words: shallow lakes; wind-driven currents; vertical shear; reverse probability; field observation; Taihu Lake; Meiliang Bay

基金项目:国家自然科学基金(51579071;51379061);中央高校基本科研业务专项(2014B07314)

作者简介:王建威(1991—),男,硕士研究生,研究方向为水环境系统规划与评价。E-mail:1403860485@qq.com

通信作者:李一平,教授。E-mail:liyiping@hhu.edu.cn

在地势平坦地区,重力流的影响微乎其微,风是影响流场特征的主要因素^[1]。风生流能够影响湖泊底泥的输移运动,特别是浅水湖泊由于单位体积的水体所占有的湖床面积更大,影响效果更为显著,而底泥引起的内源动态释放严重影响了湖泊的水质^[2],因此风生流的研究具有重要的科学意义。风生流包括平面环流和垂向环流。对于平面环流,众多学者借助数值模拟或者野外观测进行了研究,现有成果已较为成熟,如逢勇等^[3]用三维模式模拟了不同定常风作用下的太湖风生流;周媛媛等^[4]对不同季节盛行风场下各湖区湖流形态及季节与太湖水动力特征关系进行了模拟研究;Pickett 等^[5-6]根据 100 个系泊浮筒长期测量的结果,分别给出了北美五大湖(Lakes Superior、Michigan、Huron、Erie、Ontario)冬季、夏季和全年的平均环流。对于垂向环流,由于湖泊水浅的特点,即使在夏季也无明显的温度分层现象,因而风应力是主导因素。在风应力作用下,各层稳定状态的流场之间存在着切变,形成特定的环流结构^[7];李一平等^[8-9]曾在梅梁湾定点观测了三维湖流剖面特征,观察到了切变现象;Ko 等^[10]模拟结果表明动水压力组成对垂向流速剖面有一定的影响;胡维平等^[11-12]通过 σ 坐标下三维数值模型探讨了风应力、水面倾斜压强梯度力、湖底摩擦力三者对湖流垂直结构的影响,初步揭示了太湖湖流垂直结构形成的机理。总的来讲,国外对于垂向环流的研究主要集中在深水湖泊或海洋中,浅水湖泊涉及较少;国内虽然已观察到流场上下层反向现象,对太湖湖流垂直结构形成机理有过初步探讨,但半数以上都是采用建立数学模型的手段来模拟,而利用野外原位观测获取的数据进行风生流垂向切变特点的深入研究仍相对缺乏。

鉴于上述原因,本研究在太湖选取典型湖区,搭建野外观测平台,对大气-水体界面风场、流场进行多频次的连续观测,获取相应的高时空序列参数,对流场在不同条件下的切变率以及流场垂向剖面分布特征进行研究,以期揭示大型浅水湖泊风生流垂向切变规律,为今后污染物的输移、富营养化的深入研究提供必要的基础。

1 观测仪器与方法

1.1 区域概况

太湖位于长江三角洲南缘,是我国第三大淡水湖。太湖水域面积 2 338 km²,南北长 68.5 km,东西宽 34 km,多年平均水深 1.89 m。太湖的风速变化范围 0~10 m/s,春夏季节平均风速 4.3 m/s,秋冬季节平均风速 0.9 m/s^[13]。梅梁湾系太湖北部一半封

闭的湖湾,南北长约 14 km,东西宽约 7 km,水面面积约 129 km²,平均水深 2.1 m,是无锡市主要旅游区及水源地。由于受入湖河道及沿岸污染源的影响,水质严重恶化,蓝藻水华连年发生,每年 5—10 月间持续不断,夏秋季节整个湾内滋生大量蓝藻水华。

于 2014 年 5 月 20—29 日在梅梁湾与湖区交界处拖山附近(31°23′34.29″N, 120°9′24.86″E)搭建的平台上进行了定点连续观测,监测点(图 1)北部为梅梁湾湖湾区,南部为开阔湖区。观测期间太湖处于高水位,监测点处的平均水深为 2.8 m。



图 1 太湖梅梁湾野外监测点位置

1.2 观测方案及仪器配置

风速、风向数据由固定于风浪观测支架上的 PH-II Handheld 手持式气象站和 PHWD 风向传感器获取,观测频率为 10 min 1 次,距离水面 5 m。将利用声学多普勒剖面流速仪 ADP Argonaut-XR(工作频率为 1500 kHz)固定于自制的平板框架上(探头向上)来获取剖面三维流速。ADP 盲区 50 cm,框架加上 ADP 自身长度 30 cm,即第一层监测点距离湖底 80 cm,水体由上至下分为 4 层:表层(距离泥床 230 cm)、中层(距离泥床 180 cm)、中下层(距离泥床 130 cm)、近底层(距离泥床 80 cm)。ADP 监测频率为 10 min 1 次。将单点声学高频流速仪 ADV Ocean(工作频率为 5 MHz)固定于距水-土界面 7 cm 处,获取单点三维流速序列,监测频率为 10 Hz。

1.3 数据处理

a. 风场数据的处理。由于部分观测时段风向数据的缺失,与中国科学院太湖湖泊生态系统研究站(31°25′15.60″N, 120°12′55.20″E)海平面以上 10 m 的自动风速风向记录仪测定的数据进行了比对校正,其监测频率为 10 min 1 个数据,最终采用的风速范围为 0.1~10.8 m/s。由于风速分布较广,故将所有风速值分为 10 个风速区间(0~1 m/s、1~2 m/s、2~3 m/s、3~4 m/s、4~5 m/s、5~6 m/s、6~7 m/s、7~8 m/s、8~9 m/s、>9 m/s,区间风速均为大于下限风速、小于或等于上限风速),统计风速和风向的频率分布。

b. 三维瞬时流速的处理。将 ADP 与 ADV Ocean 获取的流场流向分为 16 个方向,并与风向进行比较,差值大于 90°时,流场即携带了与风场反向的分量,此时可认为流场与风场存在反向的情况。

2 结果与讨论

2.1 风场分布特征

基于频率统计分析结果(图 2)可知,监测期间风速呈单峰状分布,然后向左右两侧递减。最大分布频率 21.5% 和次最大分布频率 19.8% 分别属于 3~4 m/s 和 2~3 m/s 风速区间,而 2~5 m/s 范围内的风速大小占据整个风场的 57% 以上。本次监测期间除了东北风,其他各方向的风场都观测到了,由图 3 可以看出监测期间内以东南风、东南东风、东风为主,出现频率依次递减,分别为 16.4%、14.8% 和 12.1%,其他风向风场所占的比例均在 10% 以下,这可能与观测期间受强风影响有关。已有资料^[14]表明,太湖 4—8 月以 ESE 风向为最多,次多风向为 SE,本次监测 SE 风向最多,ESE 风向次多,区别是文献^[14]是数月的统计结果,本文是数天的统计结果。统计监测期间风速及对应风向的频率分布,最常见的风速风向组合依次为风速 3~4 m/s 与风向 ESE、风速 2~3 m/s 与风向 E、风速 4~5 m/s 与风向 ESE。

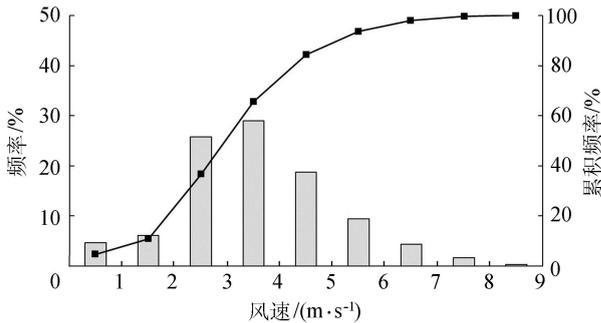


图 2 观测期间风速的统计频率

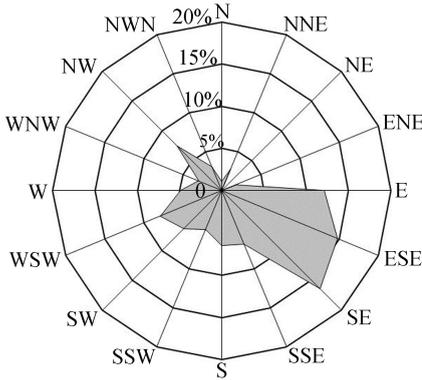


图 3 观测期间风向的频率分布

2.2 不同风场条件下各层流场反向率的确定

2.2.1 不同风向下各层流场反向率的确定

针对观测期间出现的 15 种风向,对各层流场在

不同风向下的反向情况进行统计分析,结果见表 1。可以发现,在 ENE 风场作用下,流场的反向率为 0 或者 100%,这主要是因为 ENE 风场出现的频率低、次数少、持续时间短,使流场的反向情况带有很强的偶然性,故以下的讨论均排除 ENE 风场。在 ESE、SE、E 风场作用下,流场的反向率普遍大于其他各风向影响下同深度流场的反向率。此外在各风向影响下,表层流场的反向率远小于中层流场的反向率,可以推测这是由于表层流场直接受到风场的驱动,使得表层流场更易于与风场同向。从中层到近底层,反向率不变,或者仅在小范围内变动,其变化幅度远小于从表层到中层流场反向率的变幅。从近底层到底层,在 N、NNE、W、NW、NWN 等风场的作用下,流场的反向率显著下降,而在 ESE、SE、SSE、S、SSW、SW、WSW 等风场的作用下,流场的反向率大幅上升。前者风向的出现频率均小于 5%,相应风场影响下的底部流场的反向率均小于 50%;后者风向的出现频率均大于 5%,相应风场影响下的底部流场的反向率均大于 50%,可以推测这是由于风能量在水中往下扩散的过程中,出现频率较低的风场风向不稳定,使得底层流场无法受到风场的持续作用,因为通常情况下某个风向在监测期间内出现频率越小,该风向短时间内能够持续出现的可能性越小。

表 1 在不同风向影响下流场反向率分布

风向	反向率/%				
	表层	中层	中下层	近底层	底层
N	14.29	28.57	28.57	28.57	0.00
NNE	40.00	60.00	53.33	60.00	41.67
ENE	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00
E	25.93	62.96	74.07	74.07	57.69
ESE	28.57	66.67	66.67	64.29	70.73
SE	13.33	60.00	73.33	53.33	66.67
SSE	20.00	70.00	60.00	30.00	88.89
S	12.50	33.93	33.93	58.93	84.91
SSW	2.86	17.14	25.71	34.29	75.86
SW	11.86	25.42	27.12	32.20	87.72
WSW	11.25	53.75	56.25	58.75	92.42
W	6.06	63.64	63.64	60.61	33.33
WNW	10.00	13.33	16.67	26.67	30.00
NW	1.20	24.10	31.33	31.33	20.90
NWN	2.94	17.65	29.41	26.47	11.11

龚春生等^[15]通过二维有限元数学模型,研究了玄武湖在 4 m/s 风速 6 种风向下稳定风生湖流特征,结果显示流场对不同风向的响应不同;Razmi 等^[16]通过设置多种风向、相同风速的定常风研究了大型湖泊中开敞式湖湾湖流结构对不同风场的响应,结果表明风向发生小角度改变,湖流结构即发生明显变化。已有的研究主要是基于数值模拟,仅设定了几个有限的同风速不同风向的背景值,虽然能

够得到不同风向对稳定风生流流态影响不同的结论,但高频实测风向数据的缺失,使已有研究缺乏对某一特定风向下稳定流场出现频率的研究成果。此外从表1可以看出,风向(WSW)出现频率小对应的底层流场反向率大与风向(E)出现频率大对应的底层流场反向率小这两种情况也是存在的,前者可能是短期内偶然持续出现的风场,后者可能是长周期内多次分散出现的风场。可见主导风向下流场的反向现象最明显,即风向的出现频率越大,流场发生切变的概率越大。

2.2.2 同向风场不同持续时间内各层流场反向率的确定

流场的转向与当时整个太湖风生流的稳定性有关,也就是与风向改变前一刻的风向持续时间有关。受限于风情(风向和风力)的发生频率和持续时间等不可控因素,本次观测期间并没有出现同一风场在不同时间段内持续出现的理想情况,已观测到的为持续1~2h的S和E风场、2~3h的WSW风场、3~4h的NWN风场、4~5h的S风场、5~6h的WSW风场、7~8h的SW风场、10~11h的ESE风场。不同风向的风场在经历不同持续时间之后的变幅不同,对流场的影响不同,为了便于比较,计算了流向变幅与风向变幅的比值,比值越接近于0,风场的改变对流向的影响越小。由表2可知,经历相同持续时间(1~2h)的不同风场(S和E)后,当风向发生改变时,不同深度流场的变化程度不同,可能是风向的不同导致风区长度不同,传播的能量不同。在同向风WSW持续作用不同的时间(2~3h、5~6h)后,风向的改变对流场的影响后者明显小于前者,这主要是同向风场长时间的作用使流场的运动情况趋于稳定,流场相对于风场的变化发生滞后效应。在经历10~11h的ESE风场持续作用后,风向发生改变时各层流场变化并不剧烈,这也是流场达到稳定而对风场产生的滞后效应。

表2 不同持续时间风向改变时流向与风向的变幅比

风场变化 前持续时间/h	风场变化 前风向	变幅比/%				
		表层	中层	中下层	近底层	底层
1~2	S	0.20	0.54	0.37	0.47	0.01
1~2	E	0.97	1.36	1.19	6.30	0.59
2~3	WSW	14.42	6.44	7.49	12.03	0.49
3~4	NWN	1.46	4.87	7.6	13.84	4.57
4~5	S	0.73	10.63	0.06	0.63	0.32
5~6	WSW	0.55	3.04	3.46	0.28	0.74
7~8	SW	0.07	0.40	0.08	0.32	0.03
10~11	ESE	0.21	0.10	0.14	0.60	0.00

对2014年5月28日22:20至29日9:40、ESE

单向风场持续作用10~11h内各层流场的反向情况进行统计分析,结果如表3所示。由表3可知,表层流场在ESE风场持续作用的10h内,始终没有出现明显的反向现象。当持续时间小于3h时,从中层到底层流场既出现了流场反向率随时间增大的情况,也有反向率随时间减小的情况,说明这段时间内各层流场流向较为紊乱;当持续时间大于3h后,各层流场反向率的增幅都超过了10%,流场的反向经历了一个突变的过程;当续时间为4~10h时,中层到底层流场的反向率都随时间不断增加,相邻时段内增幅不等,但都不大于10%,流场的反向经历一个平缓增长的过程;当风场的持续时间大于10h后,中层、中下层、近底层流场的反向情况趋于稳定,而底层流场的反向率仍在增大。马巍等^[17]在研究滇池水动力特性时认为持续的同向风场作用下,刮风时间至少是湖水表面摆动期的1/4,风生湖流形态才会达到稳定,若继续不断刮风,便会形成补偿流;逢勇等^[18]利用水动力学方程对太湖表面的定振波进行计算得到定振波周期约为7.5h,结合本文研究可以发现与滇池不同的是太湖湖流达到稳定至少需要一个湖水表面摆动期,不同深度的流场达到稳定的时间不一样,表层流场一直处于与风场同向的状态,中层、中下层、近底层流场达到稳定的时间为10h,而底层流场至少需要11h才能稳定。

表3 在同向持续风场影响下流场反向率分布

ESE风场 持续时间/h	反向率/%				
	表层	中层	中下层	近底层	底层
1	0.00	16.67	50.00	50.00	33.33
2	0.00	9.09	27.27	27.27	18.18
3	0.00	11.76	23.53	17.65	23.53
4	0.00	30.43	39.13	39.13	34.78
5	0.00	34.48	41.38	48.28	34.48
6	0.00	40.00	48.57	57.14	45.71
7	0.00	48.78	56.10	63.41	53.66
8	0.00	51.11	57.78	66.67	57.78
9	0.00	54.90	62.75	69.59	62.75
10	0.00	57.89	65.45	70.69	68.45
11	0.00	58.14	66.67	70.33	73.07

2.2.3 风向风速综合影响下各层流场反向率的确定

结合表1并考虑观测期间风速及对应风向的频率分布,可计算出不同风速影响下流场反向率如表4所示。从风速上看使各层流场反向率达到最大的风速区间是3~4m/s,其次为2~3m/s与4~5m/s,即在2~5m/s这一风速区间影响下流场的反向率远大于其他各风速区间影响下同深度流场的反向率。需特别指出的是若把风向考虑进来,只有当风速在2~5m/s范围内,同时风向为SE、ESE、E时才能满足各层流场反向率同时达到最大的要求。从

垂向上看流场总反向率随水深变化呈现近似的正相关趋势,由表层的 20.04% 增加到底层的 62.19%, 增大了约 2 倍。

表 4 在不同风速影响下结合风场出现频率的流场反向率分布 %

风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	反向率/%				
	表层	中层	中下层	近底层	底层
0~1	1.45	3.13	3.32	2.74	3.27
1~2	2.35	4.96	5.35	4.65	5.43
2~3	2.95	9.15	10.09	9.6	11.76
3~4	4.95	9.84	10.73	10.38	11.86
4~5	2.89	7.97	8.67	8.42	11.41
5~6	2.13	6.06	6.55	6.18	7.54
6~7	1.47	3.87	4.27	3.71	4.32
7~8	1.15	3.38	3.63	2.88	3.9
8~9	0.41	1.34	1.41	1.02	1.54
>9	0.29	0.99	1.05	0.79	1.17
总反向率	20.04	50.69	55.09	50.38	62.19

基于 2.2.1 小节及本节统计结果可知,风向和风速的出现频率是影响太湖梅梁湾地区流场切变大小的两个关键因子。可通过直接比较主导风向 ESE、SE、E 与主要风速 2~5 m/s 对流场反向的贡献率来确定最主要的影响因子。由表 5 可知,主导风向与主要风速对流场切变的贡献率并没有随着水深的变化出现较大的波动,基本稳定在 50% 左右。只是在表层流场处,主要风速对流场切变的贡献略微占优,而底层流场处,主导风向的贡献略微占优,在其他深度两者对流场切变的贡献相当。韩红娟等^[19]研究认为水深存在显著水平变化的湖区,湖流结构对风速的变化响应较为敏感;而本文结果表明

表 5 主导风向与主要风速对流场反向的贡献率

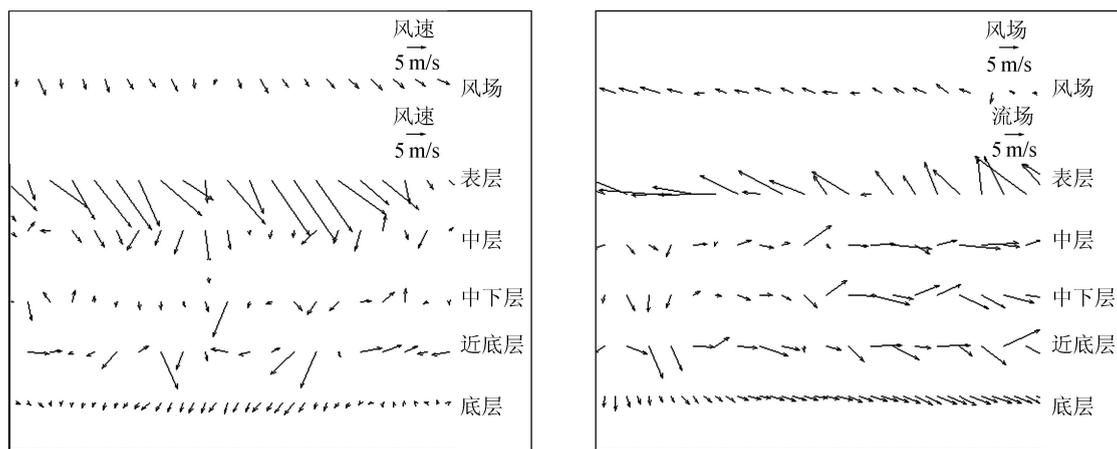
比较因子	贡献率/%				
	表层	中层	中下层	近底层	底层
主导风向	47.16	53.88	56	54.01	56.33
主要风速	53.84	53.19	53.53	56.37	45.62

在水深变化不大的湖区,湖流结构对风速仍有响应,只是局限于表层流场。

风场对流场切变情况的影响可归纳如下:表层流场,即水面以下 50 cm 范围内,主要风速对流场切变的贡献略大于主导风向,流场仅小规模发生切变,切变率 20% 左右;中层、中下层、近底层的流场,从水表以下 50~200 cm,主导风向对流场切变的贡献略微占优,流场发生中等规模切变,切变率 50% 左右;底层流场,水-土界面以上 7 cm 范围内,主导风向对流场切变的贡献占绝对优势,流场的切变规模达到最大,切变率达到 60%。

2.3 流场垂向剖面分布特征及拐点位置的确定

选取风速在 2~5 m/s 范围(风速的主要分布区间)内,以 NWN、NW 为主和 ESE 为主(主导风向之一)的两个几乎完全相反风向的时间段来研究水体剖面流场分布。在图 4 的两个时段中,表层水体的流速明显大于下面 4 层,这是由于太湖是盆状地形(大面积小水深),流场主要驱动力为风力,表层水体直接受到风场拖曳力作用获得较大的能量,能量在往下层传递过程中发生衰减。在监测期间,表层水体的流向与风向基本一致。除了表层水体外,其余各层流场与风场的对应关系并不明显,甚至出现完全反向的情况。比如在 2014 年 5 月 25 日 21:00—24:00,可以看到流向在垂直方向上的切变,流向由表层的 ES 转变为中层的 WS;而在 2014 年 5 月 29 日 3:00—6:00,流向由表层处的 NWN 转变为中层的 E,流向几乎完全反向,因此可以推断切变层深度,即流向的拐点出现在水下 50~100 cm。在前文分析中,风向风速综合影响下,表层流场的反向率仅为 20%,而中层流场的反向率突增到 50%,因此拐点的位置在反向率的差异上也有所体现。井爱芹等^[20]利用 MITgem 正压模型模拟了洪泽湖在理想定常风应力作用下的湖水流动情况,结果表明从水



(a) 2014年5月25日21:00—24:00

(b) 2014年5月29日3:00—6:00

图 4 风场与三维流速剖面的关系

表面到水下 60 cm,流向与风向基本一致;在水下 60 ~ 90 cm,流向变得不稳定;在水下 90 ~ 200 cm,属于逆风场方向的回流。由于分层高度及分层层数不一致,并爱芹等^[20]的模拟成果与本文结果虽略有差别,但基本上是一致的,因此本文获得的流场垂向分布及拐点位置在浅水湖泊中有一定的合理性与普适性。

3 结 论

a. 5月太湖梅梁湾在风向 ESE、ES、E,风速 2 ~ 5 m/s 时,同向风场持续作用 10 ~ 11 h,流场基本达到稳定且反向率最大。

b. 不同深度流场达到稳定的时间不一样,同向风场持续作用 10 h,中层、中下层、近底层流场能够达到稳定,同向风场至少持续作用 11 h,底层流场能够达到稳定。

c. 在表层流场,仅发生小规模切变,切变率为 20%,主要风速对流场切变的贡献大于主导风向。从中层到底层,流场发生中等规模切变,切变率至少达到了 50%,主导风向对流场切变的贡献占优。

d. 从水深方向上来看,表层水体的流向与风向基本一致,其余各层流场与风场的对应关系并不明显,甚至出现完全反向的情况,流向改变的拐点出现在表层至中层,即水下 50 ~ 100 cm。风速、风向的出现频率,以及同向风场的持续时间决定了流场反向率大小,流场反向率决定了拐点的位置。

参考文献:

[1] 陈友媛,胡广鑫,杨世迎,等. 北方浅水湖泊冬季结冰对风生流的影响[J]. 水科学进展,2012,23(6):837-843. (CHEN Youyuan, HU Guangxin, YANG Shiyong, et al. Study on wind-driven flow under the influence of water freezing in winter in a northern shallow lake[J]. Advances in Water Science,2012,23(6):837-843. (in Chinese))

[2] BAILEY M C, HAMILTON D P. Wind induced sediment resuspension: a lake-wide model [J]. Ecological Modelling,1997,99(2/3): 217-228.

[3] 逢勇,濮培民. 太湖风生流三维数值模拟试验[J]. 地理学报,1996,51(4):322-328. (PANG Yong, PU Peimin. Numerical simulation of three-dimensional wind-driven current in Taihu Lake[J]. Acta Geographica Sinica,1996,51(4):322-328. (in Chinese))

[4] 周媛媛,刘晓东,华祖林,等. 太湖风生流动力时空差异特征研究[J]. 环境保护科学,2015,41(1):51-56. (ZHOU Yuanyuan, LIU Xiaodong, HUA Zuling, et al. Study of the temporal and spatial differences of hydrodynamic characteristics of wind-induced current in Taihu Lake[J]. Environmental Protection Science,2015,

41(1):51-56. (in Chinese))

[5] PICKETT R L. The observed winter circulation of Lake Ontario [J]. Journal of Physical Oceanography, 1977, 7 (1):152-156.

[6] BELETSKY D, SAYLOR J H, SCHWAB D J. Mean circulation in the great lakes [J]. Journal of Great Lakes Research,1999,25(1): 78-93.

[7] 华祖林,顾莉,褚克坚,等. 用于模拟浅水湖泊风生垂向环流作用下沉积物再悬浮的装置及方法:102879176 [P]. 2013-01-16.

[8] 李一平. 太湖水体透明度影响因子实验及模型研究 [D]. 南京:河海大学,2006.

[9] 罗淑葱. 太湖水动力学及其环境效应研究 [D]. 南京:中国科学院南京地理与湖泊研究所,2004.

[10] KOYIGIT M B, FALCONER R A. Three-dimensional numerical modelling of wind-driven circulation in a homogeneous lake [J]. Advances in Water Resources, 2004,27(12):1167-1178.

[11] 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))

[12] 胡维平,濮培民,秦伯强. 太湖水动力学三维数值试验研究(2):典型风场风生流的数值计算[J]. 湖泊科学,1998,10(4):26-34. (HU Weiping, PU Peimin, QIN Boqiang. A three-dimensional numerical simulation on the dynamics in Taihu Lake, China (II): the typical wind-driven current and its divergence [J]. Journal of Lake Sciences,1998,10(4):26-34. (in Chinese))

[13] 钱昊钟. 风场对太湖叶绿素 a 空间分布的影响规律研究 [D]. 南京:南京信息工程大学,2012.

[14] 陆鸿宾,魏桂玲. 太湖的风效应 [J]. 气象科学,1989,9(3):291-301. (LU Hongbin, WEI Guiling. Wind effect of Taihu Lake [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 1989, 9 (3):291-301. (in Chinese))

[15] 龚春生,姚琪,赵棣华. 玄武湖风生流数值模拟研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(1):72-75. (GONG Chunsheng, YAO Qi, ZHAO Dihua. Numerical simulation of wind-driven current in Xuanwu Lake [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33 (1):72-75. (in Chinese))

[16] RAZMI A M, BARRY D A, BAKHTYAR R, et al. Current variability in a wide and open lacustrine embayment in Lake Geneva (Switzerland) [J]. Journal of Great Lakes Research,2013,39(3):455-465.

(下转第 116 页)

- 重金属健康风险评价[J]. 中国农学通报, 2012, 28(23): 242-247. (WEN Haiwei, LYU Cong, WANG Tianye, et al. Health risk assessment of heavy metal in rural drinking groundwater in Shenyang, China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(23): 242-247. (in Chinese))
- [23] 郭杏妹, 李宁, 康园, 等. 佛山市农村饮用水中重金属的健康风险评价[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2014, 35(1): 21-25. (GUO Xingmei, LI Ning, KANG Yuan, et al. The health risk evaluation of heavy metals via rural surface water source in Foshan [J]. Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition), 2014, 35(1): 21-25. (in Chinese))
- [24] 郭占景, 范尉尉, 陈风格, 等. 河北省某市农村地区集中式供水水质及健康风险分析[J]. 环境与职业医学, 2014, 31(12): 953-956. (GUO Zhanjing, FAN Weiwei, CHEN Fengge, et al. Drinking water quality of centralized water supply and health risk assessment in rural areas of a city of Hebei Province [J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2014, 31(12): 953-956. (in Chinese))
- [25] 郭占景, 范尉尉, 陈风格, 等. 石家庄市农村饮用水重金属健康风险评价[J]. 环境卫生学杂志, 2014, 4(1): 17-21. (GUO Zhanjing, FAN Weiwei, CHEN Fengge, et al. Health risk assessment for heavy metals in rural drinking water in Shijiazhuang City [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2014, 4(1): 17-21. (in Chinese))
- [26] United States Environment Protection Agency (USEPA). Proposed guidelines for carcinogen risk assessment [R]. Washington D C: USEPA, 1996.
- [27] United States Environment Protection Agency (USEPA). Health effects assessment summary tables [R]. Washington D C: USEPA, 1999.
- [28] United States Environment Protection Agency (USEPA). Risk assessment issue papers [R]. Washington D C: USEPA, Superfund Technical Support Center, National Center for Environmental Assessment (NCEA), 2000.
- [29] 中华人民共和国卫生部和国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准(GB 5749—2006) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [30] 国家技术监督局. 中华人民共和国国家标准: 地下水质量标准(GB/T 14848-93) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [31] United States Environment Protection Agency (USEPA). Exposure factors hand book [R]. Washington D C: USEPA, 1997.
- [32] 王铁军, 查学芳, 熊威娜, 等. 贵州遵义高坪水源地岩溶地下水重金属污染健康风险初步评价[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 46-50. (WANG Tiejun, ZHA Xuefang, XIONG Weina, et al. Primary study of health risk assessment of heavy metals in karst groundwater in Gaoping area in Zunyi City, Guizhou Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(1): 46-50. (in Chinese))
- [33] 车飞. 辽宁省沈抚污灌区多介质重金属污染的人体健康风险评价[D]. 北京: 中国环境科学研究院. 2009.
- [34] 黄艳红, 常薇, 何振宇. 武汉市农村地区地下水健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(10): 892-894. (HUANG Yanhong, CHANG Wei, HE Zhenyu. Health risk assessment of rural groundwater in Wuhan, Hubei [J]. Journal of Environment and Health, 2010, 27(10): 892-894. (in Chinese))
- [35] 何健飞, 王国彬, 赖婧. 清远市某工业区农村饮用水重金属健康风险评价[J]. 中国卫生检验杂志, 2014, 24(23): 3460-3462. (HE Jianfei, WANG Guobin, LAI Jing. Health risk assessment of heavy metal in rural drinking water in a certain industrial zone of Qingyuan City [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2014, 24(23): 3460-3462. (in Chinese))
- [36] 杨莉霞, 王琳, 姜朴, 等. 淮河流域某地区地下水污染健康风险评价[J]. 环境化学, 2011, 30(9): 1599-1603. (YANG Lixia, WANG Lin, JIANG Pu, et al. Health risk assessment of pollution in groundwater of Huaihe river basin [J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(9): 1599-1603. (in Chinese))
- (收稿日期: 2015-12-03 编辑: 王芳)
-
- (上接第 103 页)
- [17] 马巍, 浦承松, 罗佳翠, 等. 滇池水动力特性及其对北岸蓝藻堆积驱动影响[J]. 水利学报, 2013, 44(增刊1): 22-27. (MA Wei, PU Chengsong, LUO Jiacui, et al. Hydrodynamic characteristics of Dianchi Lake and its influence on accumulation of blue-green algae in Dianchi Lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(sup1): 22-27. (in Chinese))
- [18] 逢勇, 濮培民. 太湖表面定振波的数值计算和最大熵谱分析[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(2): 157-162. (PANG Yong, PU Peimin. Numerical computation and maximum entropy analysis of the surface seiche in Taihu Lake [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1996, 27(2): 157-162. (in Chinese))
- [19] 韩红娟, 胡维平, 晋义泉. 风速变化对竹湖流场结构影响的数值试验[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(6): 567-576. (HAN Hongjuan, HU Weiping, JIN Yiquan. Numerical experiments on influence of wind speed on current in lake [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2008, 39(6): 567-576. (in Chinese))
- [20] 井爱芹, 马寨璞. 洪泽湖风生流三维数值模拟[C]//朱德祥. 第二十届全国水动力学研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 2006: 678-686.
- (收稿日期: 2016-03-15 编辑: 熊水斌)