

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.06.008

变化风场下太湖表层湖流特征及其对蓝藻迁移的影响

丁文浩^{1,2},李 云^{1,2},徐世凯^{1,2},李 晶¹,赵金箫^{1,2},阮仕平¹,王 勇^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210029;
2. 水利部太湖流域水治理重点实验室,江苏 南京 210029)

摘要: 为了解太湖表层湖流对变化风场的响应特征,以及风场-表层流场对蓝藻迁移的影响,通过 GPS 粒子示踪器对表层湖流进行观测,结合观测期间风场的变化特征和遥感图像,分析了变化风场条件下太湖的表层湖流特征以及蓝藻水华的迁移聚集过程。结果表明:太湖风场是太湖表层流场的主要驱动力,但受到地形特征、岸线特征等因素的影响,不同水域表层流场对风场的响应并不完全一致;太湖风场影响下太湖表层湖流在空间上的广泛差异性是导致蓝藻迁移过程中在不同区域聚集程度不同的主导因素,也是区域性蓝藻水华暴发的重要原因之一。风场-表层流场-蓝藻迁移聚集过程是一个依次传导的响应系统,条件适宜风场影响下的流场是触发蓝藻水华短时间、大面积暴发的重要外部因素。

关键词: 太湖;风场;表层流;蓝藻迁移;GPS 粒子示踪器

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)06-0058-08

Characteristics of surface lake current and its effect on cyanobacteria migration in Lake Taihu under changing wind field

DING Wenhao^{1,2}, LI Yun^{1,2}, XU Shikai^{1,2}, LI Jing¹, ZHAO Jinxiao^{1,2}, RUAN Shiping¹, WANG Yong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering,
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Key Laboratory of Taihu Basin Water Resources Research and Management of Ministry of Water Resources,
Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to study the response characteristics of surface current to the changing wind field and the effect of wind field and surface current on the cyanobacteria migration in the Lake Taihu, systematic field observation was carried out. In this study, the surface current was observed by the GPS particle tracers, while the characteristics of surface current and the accumulation process of cyanobacteria blooms in the Lake Taihu under varying wind condition were analyzed by combining the variation characteristics of wind field and remote sensing map. The results show that the wind is the main driving force of surface current in the Lake Taihu. However, due to the influence of topographic characteristics, shoreline characteristics and et al, the response of surface current to the wind field in different water areas is not completely consistent. The surface currents of the Lake Taihu under the influence of wind field have wide spatial differences, which is the dominant factor leading to different concentrations of cyanobacteria in different areas during the migration process, and this phenomenon is one of the important reasons for the regional cyanobacteria bloom. The process of wind field, surface current and cyanobacteria migration and aggregation are a response system of successive conduction. The current field under the influence of suitable wind field is an important external factor to promote the large area of cyanobacteria blooms in a short time.

Key words: Lake Taihu; wind field; surface current; cyanobacteria migration; GPS particle tracer

20 世纪 60 年代到 21 世纪初,由富营养化引发的太湖水环境问题逐渐严峻^[1-2],蓝藻水华大面积暴

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(42001028, 41901282, 41971047);国家重点研发计划(2016YFC040150);博士后创新人才计划(BX20190155);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y119014, Y121007);江苏省水利科技项目(2021030, 2018001)
作者简介: 丁文浩(1990—),男,高级工程师,博士,主要从事环境水力学研究。E-mail: whding@nhri.cn
通信作者: 李云(1962—),男,正高级工程师,硕士,主要从事环境水力学研究。E-mail: yli@nhri.cn
引用本文: 丁文浩,李云,徐世凯,等.变化风场下太湖表层湖流特征及其对蓝藻迁移的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):58-65.
DING Wenhao, LI Yun, XU Shikai, et al. Characteristics of surface lake current and its effect on cyanobacteria migration in Lake Taihu under changing wind field[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(6): 58-65.

发^[3-4],湖泛问题加剧^[5-6]。2007 年 5 月无锡贡湖沙渚水源地的水安全事件^[7]引起了国内外的广泛关注。2007 年以来,随着太湖治理强度的增加,太湖水质整体得到改善^[8-9],但蓝藻水华暴发面积和暴发强度并未减小^[10-11]。根据 2017 年太湖健康状况报告,2017 年 5 月 10 日蓝藻水华面积超过 1 400 km²,为近 10 a 以来暴发面积最大的一次^[12]。在太湖蓝藻水华暴发问题得到有效解决之前,研究蓝藻迁移集聚规律可为有效预报蓝藻水华灾害提供科学支撑。

相关研究表明,蓝藻在水体中的漂浮状态受到风场^[13-20]、流场^[21]、波浪^[22-23]以及蓝藻本身结构性^[24-25]的共同作用,其中风场是蓝藻被动运动的动力来源。国内外学者广泛开展了关于风场对蓝藻漂浮状态影响的研究^[26],部分研究结果将临界风速作为判断蓝藻漂浮状态的依据。朱永春等^[13]认为,2~3 m/s 风速以下,水体表面蓝藻顺风向迁移堆积;范成新等^[14]认为,4 m/s 风速以下水体表层蓝藻发生大面积堆积,4 m/s 以上风速蓝藻在水体垂直方向均一分布;白晓华等^[15]通过试验,测得蓝藻漂浮水体表面的临界风速为 3.2 m/s。这些研究结果中得出的临界风速并不统一,但整体可归结为小风速条件下,蓝藻漂浮于水体表面,并随风迁移,大风速不利于蓝藻水平迁移。同时,现有研究多将风场与蓝藻漂移直接建立关系,而忽略了蓝藻迁移的重要载体——表层流。蓝藻多漂浮于水体表层,表层水体是蓝藻水华迁移聚集的关键载体,风场直接影响表层潮流流动,间接影响以表层潮流为载体的蓝藻的迁移聚集。

本文基于 GPS 追踪技术,利用载有 GPS 定位器的漂流装置实时观测漂流装置的地理位置,以实现表层潮流流速和流向的野外观测^[27-30]。在表层潮流观测期间,同步观测野外试验期间的风场变化,将风场变化与表层潮流数据进行耦合分析,解析表层潮流与风场之间的驱动关系;同时利用 MODIS 卫星影像,分析野外观测期间蓝藻水华时空分布规律,并构建风场-表层潮流-蓝藻迁移聚集之间的作用关系,为蓝藻水华灾害应急管理提供科学参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太湖(30°55′40″N~31°55′40″N,119°52′32″E~120°36′10″E)是我国重要的大型淡水湖泊,位于我国长江三角洲南翼的太湖平原上,如图 1 所示。在平均水位 3.0 m(吴淞基面)时,湖泊面积 2 427.8 km²,除去湖中 51 个岛屿面积 89.7 km²,实际水面面积为 2 338.1 km²,是我国第三大淡水湖。太湖南北长 68.5 km,东西平均宽 34.0 km,最宽处 56.0 km,平均水深 1.9 m,最大水深 2.6 m,容积 44.3 亿 m³,是一个典型的大型浅水湖泊^[31]。太湖是极其重要的饮用水水源地,在太湖东部和东南部分布有 9 座饮用水水源地,年引水量达 12.1 亿 m³^[12]。近年来,太湖蓝藻水华和湖泛问题严重影响了太湖湖泊生态系统的功能和周边地区的供水安全^[32-34]。

1.2 数据获取及分析处理

1.2.1 风场

风场数据通过 1 台便携式气象观测站观测获取,气象站的架设位置如图 1 所示。本次试验获取风场数据的时段为 2017 年 10 月 20 日至 11 月 5 日,每 5 min 记录 1 组数据,主要包括风速、风向、气温、气压、相对湿度等气象要素。根据研究需要选取观测期间的特征风场,研究特征风场背景下的表层流特征和蓝藻迁移集聚规律。

1.2.2 表层流场

表层流数据主要包括流速和流向,通过 GPS 粒子示踪器观测获取。GPS 粒子示踪器是一种置有 GPS 定位器的表层流跟踪器,高 30 cm,质量为 1.2 kg,外部结构呈纺锤状,下部宽阔较沉,上部细窄较轻,中空,通过配重使该装置整体密度稍小于水体。观测期间将 GPS 粒子示踪器整体淹没于水体中,顶端细窄部位在风浪较小的条件下基本与水面平齐,风浪较大的条件下会间歇性露出水面。由于上部露出水面部分在设计时采

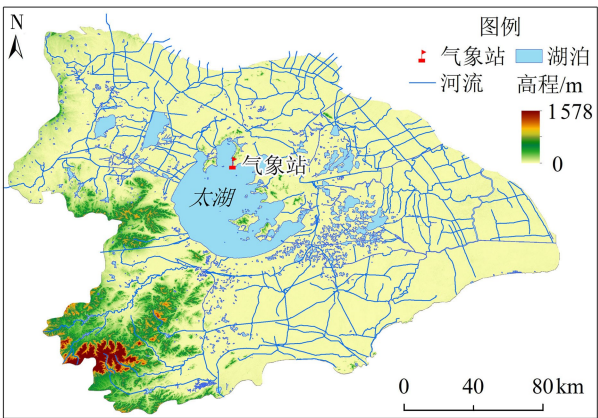


图 1 太湖流域及气象站分布
Fig.1 Lake Taihu Basin and distribution of meteorological station

用细窄形状,间歇性露出水面时风作用面积较小,因而在野外观测过程中受到风驱动的作用很小。同时,考虑 GPS 粒子示踪器的随水性,在该装置的中下部外围设置间断板,通过增加该装置与水体之间的接触面积达到较好的跟随效果。观测期间,将 GPS 粒子示踪器抛置在湖体中,打开 GPS 定位器,约 10 min 间隔记录 1 组经纬度坐标数据,通过观测到的系列经纬度坐标数据,计算两个点位之间的平均流速和流向,进而获取整个观测期的表层流流速和流向数据。

观测期间,分不同时间段在太湖不同水域共计抛洒了 30 个 GPS 粒子示踪器,每台 GPS 粒子示踪器跟踪记录了所在区域和时段内的表层湖流信息。根据研究需要,截取其中部分 GPS 粒子示踪器记录信息,作为研究表层湖流的基础数据。

1.2.3 卫星遥感数据

从美国国家航空航天局(NASA)免费下载获得 MODIS L0 级产品(DN 值)作为遥感数据,利用 SeaDAS 6.4 将 L0 级数据进行辐射定标成星上辐射率。经过瑞利校正和吸收气体校正得到反射率数据,进而反演得到太湖水域叶绿素 a 浓度的空间分布数据。对数据进行初步分析,选取 2017 年 11 月 1 日和 2017 年 11 月 2 日两期遥感影像反演的叶绿素 a 浓度数据。

1.2.4 数据分析与处理

数据处理主要采用 Origin 数据分析软件、ArcGIS10.2 和 SeaDAS 6.4 数据处理软件。

2 结果与讨论

2.1 观测期风场特征

观测期 2017 年 10 月 19 日中下旬至 11 月初,为太湖地区秋冬季节轮换期。太湖地区气象条件受到冷暖气团交替控制,风场以西北风和东南风轮换为主要特征。根据观测的风场数据,观测期间主导西北风,其中北风、西北偏北风、西北风的比例占整个观测期的 38.93%,东风、东南偏东风、东南风、东南偏南风、南风的比例为 29.95%,东北风和西南风占比较少。从风速的角度来看,全历时平均风速 3.01 m/s,风速序列中位数为 2.72 m/s,低于太湖多年平均风速 3.75 m/s^[35]。观测期(2017 年 10 月 20 日至 11 月 5 日)太湖风场特征及变化状况见图 2。低风速条件有利于蓝藻漂浮于水体表面,并进行大规模迁移聚集^[15]。根据风场特征和研究需要,选取 2017 年 10 月 25—27 日风速、风向随时间变化较大和 2017 年 11 月 1—3 日风速、风向随时间变化相对均匀的两个时段风场,研究两种风场类型条件下太湖表层流特征及蓝藻迁移聚集过程。

2.2 风场与表层湖流的响应关系

2.2.1 非稳定风场下的表层湖流特征

大部分时间段,太湖风场具有空间不均匀性和时间不稳定性的特征,非均匀风场背景下表层湖流特征是太湖表层湖流的最基本特征。观测时段为 2017 年 10 月 25 日 3 时至 27 日 15 时,风向以 SEE、E、SE 为主导风向,采样数据占比 60.3%,其中 SEE 占比最高,为 28.1%。观测时段最大风速 5.99 m/s,平均风速 2.74 m/s,风速中位数 2.67 m/s,整体风速较小,风速高于 3.00 m/s 的比例为 42.1%,如图 3 所示。

从粒子漂移速度与风场(风速和风向)之间的关系可以看出,在风场相对稳定阶段,粒子漂移速度随时间逐渐增大,在风向发生改变时,漂移进程被迅速干扰,表现在漂移速度的急剧下降。这一现象表明,表层湖流的漂移过程受风向影响显著,在不稳定风向条件下,表层湖流漂移速度缓慢。为了直观描述这一过程,选取对应时段两个 GPS 粒子示踪器(9 号和 16 号粒子)漂移轨迹作为研究对象。观测期间,两个 GPS 粒子示踪器位于太湖北部贡湖湾湾口乌龟山附近,轨迹分别覆盖大致 3 km×3 km 的范围,如图 4 所示。

两个 GPS 粒子示踪器分别记录 374 组经纬度坐标数据,根据经纬度坐标,对漂流速度进行计算,流速结

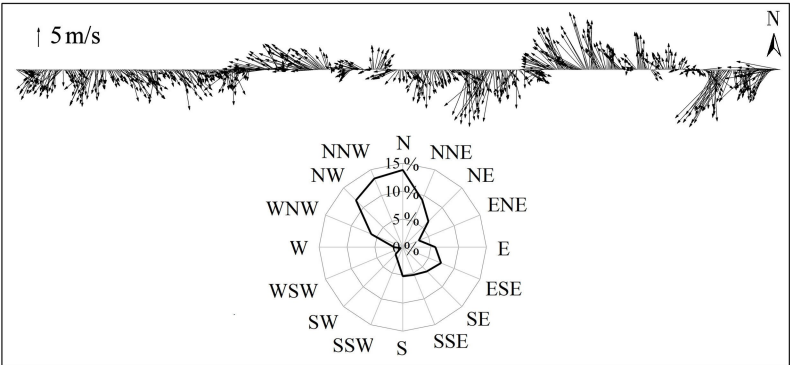


图 2 观测期风场特征及变化状况
Fig. 2 Characteristics and variation of wind field during observation period

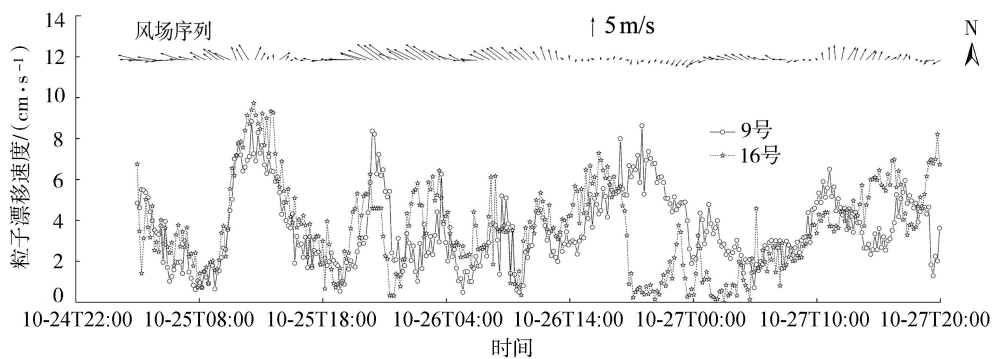


图 3 风场与粒子漂移速度

Fig. 3 Wind field and particle drift velocity

果如表 1 所示。

观测期间,GPS 粒子示踪器经历了若干次增速、减速过程,其中比较明显的增速过程是短时间稳定东南风影响下的粒子漂流期。在此期间,粒子漂流速度最高达到 9.73 cm/s 左右。在风向发生偏转的过程中,粒子对应做出了比较敏感的响应,表现在速度的降低和漂流方向的改变。整个漂流过程历时 65 h,粒子经过多次增速、减速和方向转变,在空间上仍维持在距离出发点不远的位置,即起始点至终点的距离分别为 1.31 km(9 号)和 1.57 km(16 号)。结果表明,在太湖风场不稳定的情况下,以表层潮流为载体的物质远距离输送能力很弱,表层水体大范围交换速率较差。

2.2.2 均匀风场过渡阶段表层潮流特征

2017 年 11 月 1 日 22 时前后,太湖风场出现了一次比较显著的减速和加速过程,多个 GPS 粒子示踪器轨迹记录到了流场的转变过程,为分析大空间范围内表层流场对风场的响应规律提供了科学依据。2017 年 11 月 1 日 8—16 时,太湖水域受稳定西南风控制,平均风速约 2.37 m/s;16 时至 17 时 20 分,受到短历时东南风的影响,平均风速为 2.33 m/s;17 时 20 分至 21 时 50 分为低风速阶段,时段平均风速 0.87 m/s;21 时 50 分风速变大,平均风速逐渐增加至 2.0 m/s 以上。各个风速区间特征如表 2 所示。分布在太湖北部梅梁湾口-贡湖湾附近的 29 号、42 号、45 号、56 号等 4 个 GPS 粒子示踪器记录了 2017 年 11 月 1 日 16 时至 2017 年 11 月 2 日 2 时这一时段的表层流漂流轨迹,如图 5 所示。风场变化历程和对应 GPS 粒子示踪器漂移速度如图 6 所示。

GPS 粒子示踪器开始记录漂流轨迹的时段为前期风场结束时(时段 1,11 月 1 日 16:00—17:20),风向由 SWS 过渡为 SES 的阶段,4 个 GPS 粒子示踪器对风场变化的响应有所差别,其中 45 号漂移速度增加,其他 GPS 粒子示踪器漂移速度变化不大;进入低风速且稳定的风场阶段(时段 2,11 月 1 日 17:20—21:50),4 个 GPS 粒子示踪器漂流速度均出现逐渐减小的过程,这是在前期漂移动能作用下的惯性前行;在 11 月 1 日 21:50—23:20 新风速段起始阶段(时段 3),4 个 GPS 粒子示踪器漂移速度降至最低,随风速增加获取新的动

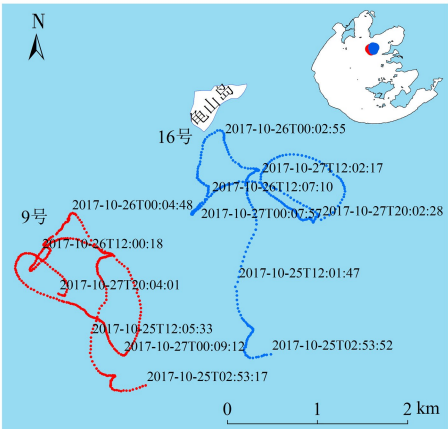


图 4 9 号粒子和 16 号粒子漂流轨迹

Fig. 4 Particle trajectories of No. 9 and No. 16

表 1 GPS 粒子示踪器观测期间漂流速度

Table 1 Drift velocity during the observation of GPS particle tracers

粒子	平均速度/ (cm·s ⁻¹)	最大速度/ (cm·s ⁻¹)	中位数/ (cm·s ⁻¹)
9 号	3.58	8.84	3.19
16 号	3.60	9.73	3.57

表 2 观测期间风场区间及历时

Table 2 Wind interval and duration during the observation

风场 区段	风场时段	风向	平均风速/ (m·s ⁻¹)	历时/ min
前期风场	11 月 1 日 8:00—16:00	SWS	2.37	480
	11 月 1 日 16:00—17:20	SES	2.33	80
观测期 风场	11 月 1 日 17:20—21:50	E	0.87	270
	11 月 1 日 21:50—23:20	E	2.47	90
	11 月 1 日 23:20—2 日 02:00	SE	1.98	170

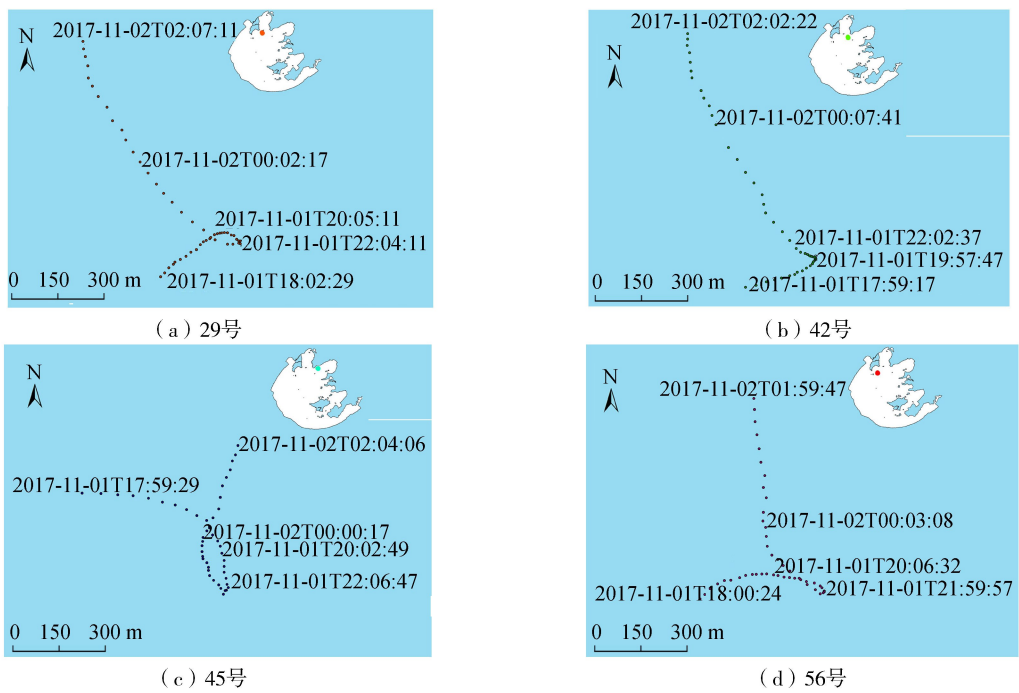


图5 GPS 粒子示踪器漂流轨迹
Fig.5 GPS particle drift trajectory

能, 漂移速度逐渐增加, 并在新阶段风场(时段4, 11月1日23:20至2日02:00)影响下逐渐达到稳定的漂移速度。不同粒子在各个阶段风场影响下的漂移特征如图7所示。

观测期间, 分布在不同区域的 GPS 粒子示踪器在漂移速度方面表现出较大差异, 位于梅梁湾湾口的 29 号和 42 号较为一致, 平均漂移速度分别为 3.63 cm/s 和 3.70 cm/s; 位于贡湖湾的 45 号平均漂移速度最大, 为 6.46cm/s, 最大漂移速度达到 8.45 cm/s; 位于月亮湾附近的 56 号平均漂移速度为 4.05 cm/s。由此可见, 表层流的主要驱动力是风场, 但在空间分布方面, 受到除风场之外因素的影响, 根据 GPS 粒子示踪器分布的范围和运行期及前期的气象条件, 前期风场作用下的湖流、地形、岸线等都是影响表层湖流的重要外界因素。因而, 表层流场是一个由风场为单因素主导, 前期风场影响下的湖流、水域地形、水域岸线等多因素共同作用的结果。

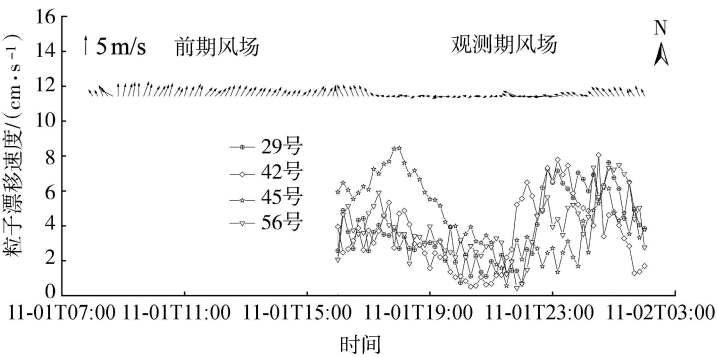


图6 特征风场下 GPS 粒子示踪器漂移速度
Fig.6 GPS particle drift velocity in characteristic wind field

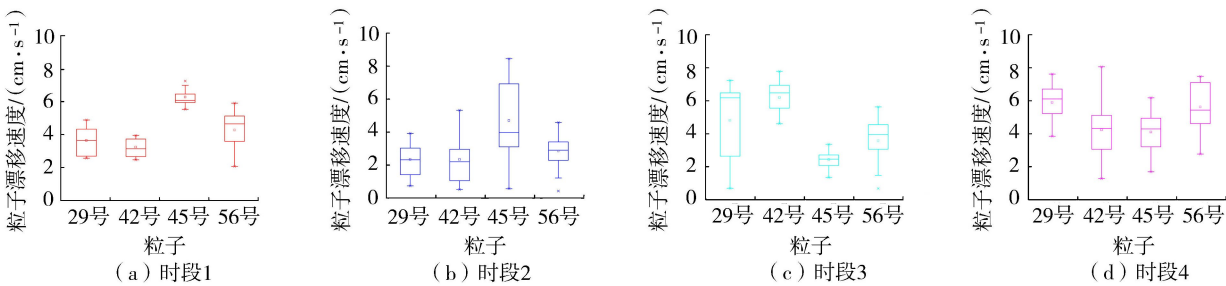


图7 各时段风场 GPS 粒子示踪器漂移速度特征
Fig.7 Drift velocity characteristics of GPS particle tracers at different stages

2.3 变化风场背景下的蓝藻迁移聚集规律

在相关的研究中,对于风场影响下蓝藻迁移聚集的研究多集中在太湖局部区域,获取各自试验中的临界风速(白晓华等^[15]3.2 m/s,Wu 等^[19]6.0 m/s,郭西亚等^[23]4.0 m/s),各个研究成果之间略有出入。根据前文分析,不同湖区表层湖流对风场的响应具有不一致性,而表层湖流是蓝藻迁移聚集的重要载体,即在湖流影响下蓝藻水华迁移聚集过程在空间上有所不同。因而,蓝藻能否漂浮于水体表面的临界风速,要根据表层湖流对风场响应的关系来确定,蓝藻漂浮于水体表层对应临界风速在不同湖区会存在相应的差异。

图 8 为 2017 年 11 月 1 日和 2 日蓝藻水华分布遥感解译影像,两张遥感解译影像对应的背景风场为南风为主导风向,如图 9 所示。对比图 8 可以看出,2 d 内蓝藻分布轮廓基本相似,但在梅梁湾、月亮湾、湖西水域,蓝藻水华出现明显的北移。为了量化蓝藻迁移聚集与风场-表层流之间的关系,引入同期的 GPS 粒子示踪器漂流轨迹数据,如图 8 所示,构建风场-表层湖流-蓝藻迁移聚集之间的关系。

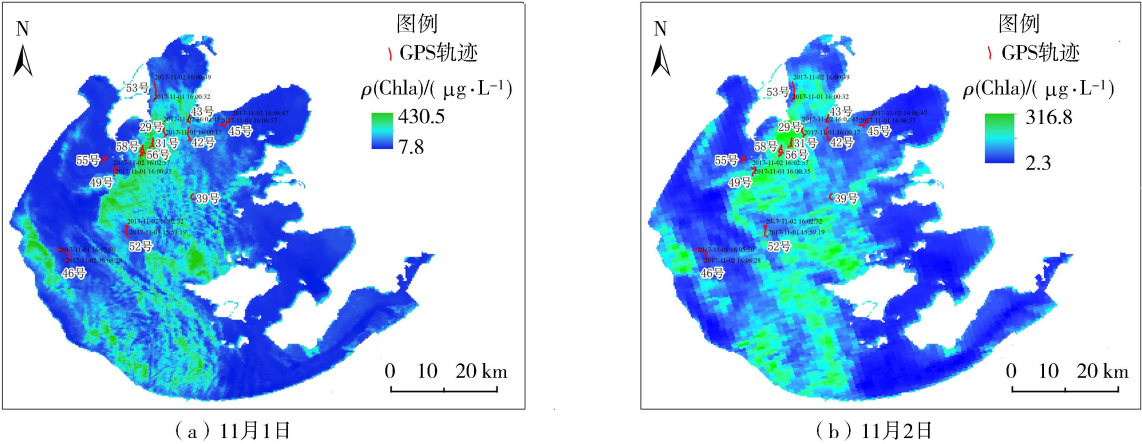


图 8 蓝藻水华分布
Fig.8 Distribution map of cyanobacterial blooms

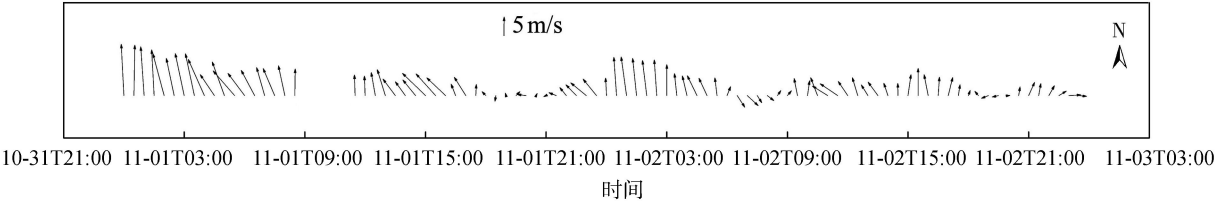


图 9 时段风场
Fig.9 Period wind field

观测期间,主导风向为南风,平均风速 2.46 m/s,最大风速 6.69 m/s。11 月 2 日蓝藻水华面积 1 420 km²,相比于11 月 1 日的 1 320 km²增加 100 km²。本次观测期间尽管部分时段风速超过 5 m/s,但整体上有利于蓝藻水华上浮,且有利于蓝藻随风场和表层流场迁移。

根据 13 个 GPS 粒子示踪器轨迹,计算起点和终点之间的距离。13 个粒子平均起点和终点距离为 2 072.8 m,其中距离最远的是位于梅梁湾水域的 53 号,漂移 3 675.4 m;13 个 GPS 粒子示踪器平均漂移历程为 3 096.6 m,其中漂移历程最长的是位于太湖西部的 46 号,漂移总距离 4 238.9 m,如图 10 所示。在遥感图像中,梅梁湾蓝藻水华前沿移动距离约 4 km,在移动方向一致的条件下,与位于梅梁湾的 53 号 GPS 粒子示踪器

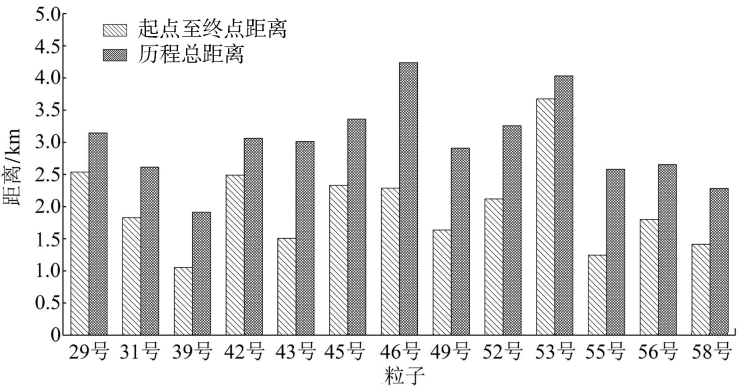


图 10 GPS 粒子示踪器漂流距离
Fig.10 Drift distance of GPS particle tracers

起点、终点距离相近;位于湖心区的蓝藻水华斑块北移距离约 2.54 km,与同一区域同步漂移的 52 号 GPS 粒子示踪器起点、终点距离相近。由此可见,表层湖流漂流方向和漂流距离均与蓝藻斑块漂移方向和距离相近。同时,研究结果表明,在太湖的不同区域,表层流流速的不一致性广泛存在,作为蓝藻水华的重要载体,表层流漂移速度的不同是导致蓝藻在不同湖区堆积聚集程度不同的重要影响因素,也即区域性蓝藻水华暴发的重要原因之一。根据两幅遥感图像的轮廓图比对分析,前 1 日蓝藻低浓度区在次日暴发蓝藻水华的主要原因即是高浓度藻区蓝藻的迁入。

3 结 论

- a. 风场是影响表层湖流的主导因素,太湖不同空间位置特有的地形特征、岸线特征等诸多因素共同影响表层湖流的最终表现形式。
- b. 太湖不同区域表层湖流对风场的响应具有广泛的差异性,主要体现在不同湖区表层湖流漂移速度和方向的不同,这种差异是导致蓝藻在不同湖区堆积聚集程度不同的重要影响因素,也即区域性蓝藻水华暴发的重要原因之一。
- c. 风场-表层流场-蓝藻迁移聚集过程是一个依次传导的响应系统,条件适宜的风场是触发蓝藻水华短时间内大面积暴发的重要外部因素。

参考文献:

[1] 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))

[2] PAERL H W,XU H,MCCARTHY M J,et al. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China):the need for a dual nutrient (N & P) management strategy[J]. Water Research,2011,45(5):1973-1983.

[3] 朱喜,李贵宝,王圣瑞. 太湖蓝藻暴发的治理[J]. 水资源保护,2020,36(6):106-111. (ZHU Xi,LI Guibao,WANG Shengrui. Treatment of blue algae outbreak in Taihu Lake[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):106-111. (in Chinese))

[4] 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.

[5] 辛华荣,朱广伟,王雪松,等. 2009—2018 年太湖湖泛强度变化及其影响因素[J]. 环境科学,2020,41(11):4914-4923. (XIN Huarong,ZHU Guangwei,WANG Xuesong,et al. Variation and driving factors of black water event intensity in Lake Taihu during 2009 to 2018[J]. Environmental Science,2020,41(11):4914-4923. (in Chinese))

[6] 陈荷生. 太湖宜兴近岸水域"湖泛"现象初析[J]. 水利水电科技进展,2011,31(4):33-37. (CHEN Hesheng. Black water aggregation in Yixing inshore water area of Taihu Lake[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(4):33-37. (in Chinese))

[7] 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,2011,451:105-112.

[8] 张莉,樊祥科,郑浩,等. 水质标识指数法在太湖渔业生态环境评价中的应用[J]. 水产养殖,2016,37(1):35-40. (ZHANG Li,FAN Xiangke,ZHENG Hao,et al. Application of water quality identification index method in water quality evaluation of Lake Taihu[J]. Journal of Aquaculture,2016,37(1):35-40. (in Chinese))

[9] 朱伟,谈永琴,王若辰,等. 太湖典型区 2010—2017 年间水质变化趋势及异常分析[J]. 湖泊科学,2018,30(2):296-305. (ZHU Wei,TAN Yongqin,WANG Ruochen,et al. The trend of water quality variation and analysis in typical area of Lake Taihu, 2010—2017[J]. Journal of Lake Sciences,2018,30(2):296-305. (in Chinese))

[10] SHI Kun,ZHANG Yunlin,ZHOU Yongqiang,et al. Long-term MODIS observations of cyanobacterial dynamics in Lake Taihu: responses to nutrient enrichment and meteorological factors[J]. Scientific Reports,2017,7:40326.

[11] 李蓓,李勇涛,蔡梅. 基于数据挖掘的太湖蓝藻生长水环境关键因子研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):506-513. (LI Bei,LI Yongtao,CAI Mei. Research on key factors of water environment for cyanobacteria growth in Taihu Lake based on data mining[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):506-513. (in Chinese))

[12] 太湖健康状况报告[R]. 上海:水利部太湖流域管理局,2018.

[13] 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[J]. 湖泊科学,1997,9(2):152-158. (ZHU Yongchun,CAI Qiming. The dynamic research of the influence of wind field on the migration of algae in Lake Taihu [J]. Journal of Lake

- Sciences,1997,9(2):152-158. (in Chinese))
- [14] 范成新,陈宇炜. 夏季盛行风对太湖北部藻类水华分布的影响[J]. 上海环境科学,1998,17(8):4-6. (FAN Chengxin, CHEN Yuwei. Effects of prevailing wind in summer on distribution of algae bloom in Lake Taihu[J]. Shanghai Environmental Sciences,1998,17(8):4-6. (in Chinese))
- [15] 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 Lake Taihu in 2004 summer[J]. Environmental Science,2005,26(6):57-60. (in Chinese))
- [16] SMALL F L. Effect of wind on the distribution of chlorophyll a in clear lake,Iowa[J]. Limnology & Oceanography,1963,8(4):426-432.
- [17] PODSETCHINE V,SCHERNEWSKI G. The influence of spatial wind inhomogeneity on flow patterns in a small lake[J]. Water Research,1999,33(12):3348-3356.
- [18] MARC R,FEIJO C,NAVARRO E,et al. Interaction between wind-induced seiches and convective cooling governs algal distribution in a canyon-shaped reservoir[J]. Freshwater Biology,2007,52(7):1336-1352.
- [19] WU Xiaodong,KONG Fanxiang,CHEN Yuwei,et al. Horizontal distribution and transport processes of bloom-forming Microcystis in a large shallow lake (Taihu,China)[J]. Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters,2010,40(1):8-15.
- [20] 舒叶华,高晨晨. 太湖风生流及污染物输移扩散数值模拟[J]. 水资源保护,2021,37(2):121-127. (SHU Yehua,GAO Chenchen. Numerical simulation of wind-driven current and pollutant transport and diffusion in Taihu Lake[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):121-127. (in Chinese))
- [21] 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 & Pollution Research,2013,20(12):8546-8556.
- [22] CAO Huansheng,KONG Fanxiang,LUO Liancong,et al. Effects of wind and wind-induced waves on vertical phytoplankton distribution and surface blooms of microcystis aeruginosa in Lake Taihu[J]. Journal of Freshwater Ecology,2006,21(2):231-238.
- [23] 郭西亚,张杰,罗婧,等. 水华藻斑漂移速度时变特征研究[J]. 中国环境科学,2019,39(1):306-313. (GUO Xiya,ZHANG Jie,LUO Jing,et al. Study on horizontal drifting velocity characteristics over time-varying of algal patches[J]. China Environmental Science,2019,39(1):306-313. (in Chinses))
- [24] WALSBY A E,HAYES P K,BOJE R,et al. The selective advantage of buoyancy provided by gas vesicles for planktonic cyanobacteria in the Baltic Sea[J]. New Phytologist,1997,136(3):407-417.
- [25] BELENKY M,MEYERS R,HERZFELD J. Subunit structure of gas vesicles;a MALDI-TOF mass spectrometry study[J]. Biophysical Journal,2004,86:499-505.
- [26] 吴娟,朱跃龙,金松,等. 三种机器学习模型在太湖藻华面积预测中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):542-551. (WU Juan,ZHU Yuelong,JIN Song,et al. Area prediction of cyanobacterial blooms based on three machine learning methods in Taihu Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(6):542-551. (in Chinese))
- [27] DAVIS R E. Drifter observations of coastal surface currents during CODE:the method and descriptive view[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,1985,90(C3):4741-4755.
- [28] POULAIN P M. Drifter observations of surface circulation in the Adriatic Sea between December 1994 and March 1996[J]. Journal of Marine Systems,1999,20(1/2/3/4):231-253.
- [29] POULAIN P M,MENNA M,MAURI E. Surface geostrophic circulation of the Mediterranean Sea derived from drifter and satellite altimeter data[J]. Journal of Physical Oceanography,2012,42(6):973-990.
- [30] BAO Min,GUAN Weibing,YANG Yang,et al. Drifting trajectories of green algae in the western Yellow Sea during the spring and summer of 2012[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science,2015,163:9-16.
- [31] 黄漪平. 太湖水环境及其污染控制[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [32] 吕振霖. 太湖水环境综合治理的实践与思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(2):123-128. (LYU Zhenlin. Practice and thoughts on comprehensive treatment of water pollution in Taihu Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2012,40(2):123-128. (in Chinese))
- [33] 吴庆龙,谢平,杨柳燕,等. 湖泊蓝藻水华生态灾害形成机理及防治的基础研究[J]. 地球科学进展,2008,23(11):1115-1123. (WU Qinglong,XIE Ping,YANG Liuyan,et al. Ecological consequences of cyanobacterial bloom in lakes and their countermeasures[J]. Advances in Earth Science,2008,23(11):1115-1123. (in Chinese))
- [34] 陆桂华,马倩. 太湖水域"湖泛"及其成因研究[J]. 水科学进展,2009,20(3):438-442. (LU Guihua,MA Qian. Analysis on the causes of forming black water cluster in Lake Taihu[J]. Advances in Water Science,2009,20(3):438-442. (in Chinese))
- [35] HU Weiping. A review of the models for Lake Taihu and their application in lake environmental management[J]. Ecological Modelling,2016,319:9-20.