

巢湖快速变化风浪场及其环境效应*

张怡辉**, 胡月敏, 彭兆亮, 胡维平, 朱金格

(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, 南京 210008)

摘要: 浅水湖泊风浪过程对于湖泊生态系统具有重要的意义. 基于巢湖风场、风浪和水环境参数同步高频观测结果, 详细分析了快速变化风浪下的风浪快速变化特征及其对湖泊水环境的影响特征. 浅水湖泊风浪的有效波高和平均波周期均随风速的快速变化有较好的同步响应规律. 在风速快速衰减阶段, 相较有效波高, 波周期有更好的稳定性. 湖泊水体 pH、水温、溶解氧会快速响应风浪的变化, 随着风浪强度增强, 对水体浊度、总磷浓度以及藻密度和生物量的扰动影响逐渐呈现. 强烈的风浪扰动引起水体浊度变化的滞后时间可达 3 d. 快速变化的风浪场下, 风浪的强烈扰动会改变水体固有的理化参数分布特征, 扰动藻类常规的水体分布规律, 风浪强度是造成差异的主要因子.

关键词: 风浪; 有效波高; 波周期; 巢湖; 水环境

Fast-changing wind waves and their environmental effects in Lake Chaohu*

Zhang Yihui**, Hu Yuemin, Peng Zhaoliang, Hu Weiping & Zhu Jing

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

Abstract: Wind waves in shallow lakes are of great significance to lake ecosystems. Based on the synchronous high-frequency observation data in Lake Chaohu, the fast-changing characteristics of wind waves and their impacts on the water environment were analyzed in detail. The significant wave height and the average period of wind waves had a good synchronous response with the wind speed. In the phase of wind speed fast decline, the wave period has better stability than the wave height. The pH, water temperature, and dissolved oxygen will respond quickly to the changes of wind waves. As the intensity of wind waves increasing, the disturbance of water turbidity and total phosphorus concentration gradually appeared. The lag time of water turbidity changes caused by strong wind waves disturbance could reach 3 d. Strong wind waves disturbance would change the inherent distribution characteristics of physical and chemical parameters and the regular distribution of algae under fast-changing wind waves, indicating that the intensity of wind waves is the primary factor causing this difference.

Keywords: Wind waves; significant wave height; wave period; Lake Chaohu; water environment

风吹行于水体表面, 经过水气相互作用的传递, 产生风浪和湖流, 其中大部分能量传递给了风浪^[1]. 水体垂向混合强度主要由湖流、风浪等决定, 其中波浪在水体上层混合中起着重要作用^[2]. 波浪运动可以将能量从波生运动向湍流运动传递, 引起强烈的水体垂向混合现象^[3-6]. 波浪引起的混合强度主要由风浪的强度决定^[7].

在浅水湖泊中, 风浪是湖泊水动力过程最为重要的部分, 是浅水湖泊沉积物再悬浮的驱动要素^[8-13]. 此外, 湖泊中蓝藻群体等颗粒物会受到以风浪主导的水动力垂向扰动作用^[14-17], 当风浪足够大时, 搅拌作用会使得水体中的藻类垂向混合, 改变藻类的垂直分布, 使得水体中藻类分布更加均匀, 降低藻类在水体表层聚集的可能性, 不易发生水华^[14-17]. 较小的风浪有利于水体中的藻类上浮和表层聚集, 形成水华^[18]. 而蓝藻水华

* 2021-06-09 收稿; 2021-09-07 收修改稿.

国家自然科学基金项目 (42007360, 42077426) 和中国科学院“一三五”重大突破项目 (NIGLAS2018GH02) 联合资助.

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

作为富营养化浅水湖泊的重要水环境问题之一^[19],不仅会导致水质恶化而影响服务功能(如饮用水安全、水产养殖等)^[20],还会消耗水体溶解氧,从而影响水生生态环境^[21].因此,风浪这一浅水湖泊重要水动力过程对于湖泊生态系统具有重要意义.

时间维度上,短期内风浪的快速变化将会对底泥悬浮、内源释放和水中浮游植物变化产生影响. Moreno-Ostos 等^[22]通过分析高频获取的风速和表层浮游植物生物量发现,浮游植物变化对风应力短期变化的快速响应尺度可以达到分钟级别. Zhu 等^[23]对太湖台风过程的观测发现,台风促进了底泥营养盐的释放和底栖浮游植物的悬浮,同时改变了水体的温度和分层,促进了有害微囊藻的生长,最终在台风过后小风浪时段蓝藻不断上浮至水面,导致蓝藻水华的大面积暴发. Qin 等^[24]通过遥感和在线观测表明,水动力条件是导致特殊风场(台风)过后蓝藻水华短期内出现的关键因素,随着台风过后风速逐渐减小,蓝藻水华面积呈逐渐扩大趋势. Wang 等^[25]建立了耦合流体力学和仿真模拟藻类迁移模型,模拟结果表明,风引起的垂直混合和藻类自身的浮力可以分别在几分钟和几小时内改变藻类的分布.由此可见,风浪短期内的快速变化可以对浅水湖泊短期的沉积物再悬浮和藻类水华形成产生至关重要的影响.

本文以巢湖为例,开展风场、风浪和水环境参数同步高频观测,获得了2018年8月第14号台风“摩羯”和第18号台风“温比亚”过境巢湖时的风浪和水环境变化情况,详细分析了台风过境巢湖时(大风速快速变化下)风浪演化规律及其对湖泊水环境的影响特征,为准确认识浅水湖泊中风浪和环境对快速变化风场的响应规律提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

巢湖(31°43'28"~31°25'28"N, 117°16'54"~117°51'46"E),面积约780 km²,平均水深约2.69 m,平均水位8.37 m,位于长江中下游,是我国第五大淡水湖.巢湖流域内平均风速强度为4.1 m/s,历史最大风速为34.0 m/s;冬季盛行东北、西北风,夏季盛行南风.

巢湖流域总面积为13486 km²,有13条主要支流直接流入,大部分集中在巢湖的西部,位于湖西南和西北的杭埠河和南淝河流量约占总入湖流量的68%,巢湖东部的裕西河是唯一的出湖河流(图1).巢湖具有供水、调节气候、维护生物多样性等生态服务功能,此外还是周边城市和农村地区1000多万人的独特饮用水源地,对巢湖流域的健康发展至关重要.近年来,巢湖因其特殊的重要性和富营养化问题而受到极大的关

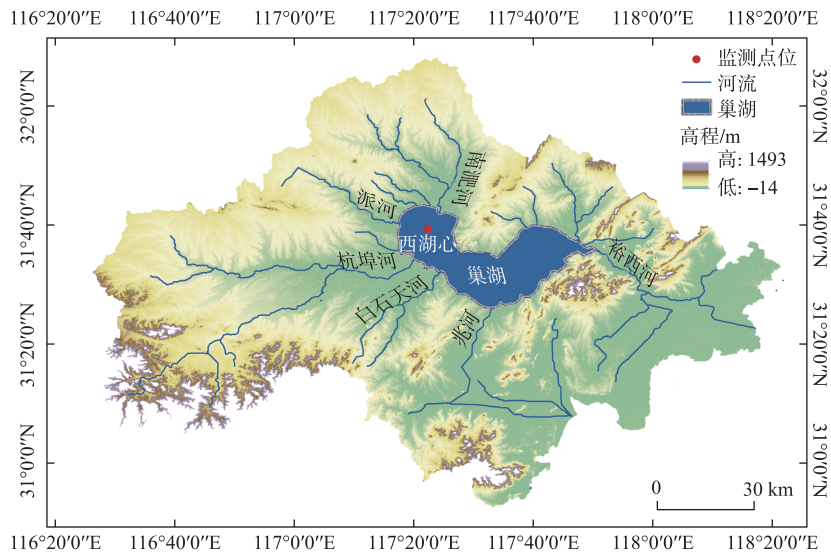


图1 巢湖流域及监测点位布置

Fig.1 Lake Chaohu Basin and monitoring station

注^[26]. 尽管为恢复巢湖水质付出了巨大努力(如入湖河流生态修复工程和当地污水处理能力改善工程),但2013年观测到的总氮和总磷浓度已恢复到2.5和0.15 mg/L,接近1980s的水质水平,2013年之后,总氮和总磷浓度没有大幅下降,尤其是在湖泊西部^[27].

1.2 观测时间

2018年8月,台风“摩羯”和“温比亚”经过巢湖流域,随之而来的大风、强降雨等气象过程在巢湖湖面上出现,剧烈的大风天气在巢湖引起很强的风浪过程,会对巢湖水环境与生态系统产生显著影响. 其中台风“摩羯”于8月13日12:00—15:00从巢湖东北部掠过,台风“温比亚”于8月17日16:00—21:00从巢湖南部掠过,其路径如图2所示.

1.3 气象监测和风浪观测

在巢湖西湖心中间3 m高平台上布置了监测点位(图1),观测指标为:风速、风向、降雨量、大气温度. 采用太阳能与蓄电池供电,可保证其长期稳定工作. 其中风速传感器分辨率为0.1 m/s,测量范围为0~60 m/s;风向传感器分辨率为1°,测量范围为0~359°. 每10 min记录1次2 min平均风速风向. 温度探头分辨率为0.1℃,测量范围为-50~80℃. 降雨传感器分辨率为0.2 mm,测量范围为0~999.9 mm. 数据时间间隔为10 min.

在西湖心中心监测点位(图1)布置波浪仪. 采用Valeport公司的Midas DWR(Directional Wave Recorder)波浪仪观测,该波浪仪具有高精度(0.04%)、高分辨率的特点(0.0025%),自带64 M闪存. 仪器布置于监测点位湖底,采样频率设置为4 Hz,一次采样数量为2048,记录8.4 min湖面波面过程,采样时间间隔为30 min,每次采集约720个风浪波面过程,可获得有效波高 H_s 、最大波高 H_{max} 、平均周期 T_{aver} 、谱峰周期 T_p 、谱峰波向 $P_{k,dir}$ 和平均波向 $Mean_dir$ 等波浪特征参数.

1.4 水质监测

水质数据来自国家地表水水质自动监测站,采用浮船式水站,该数据由中国环境监测总站实时在官方网站进行发布(<http://www.cnemc.cn/>). 本研究中监测点位位于西湖心(图1),水样取水口深度为0.5~1.0 m. 水温采用热电阻方法获得,pH通过玻璃电极法得到,溶解氧浓度通过荧光法获得,浊度利用光散射法获得,氨氮浓度通过水杨酸分光光度法获得,总磷浓度通过钼酸铵分光光度法获得,叶绿素 a 浓度和藻密度通过荧光法获得. 其中水温、pH、溶解氧、浊度、叶绿素 a 和藻密度的监测时间间隔为1 h,氨氮、总磷的监测时间间隔为4 h,由于总氮数据缺失,此处未分析总氮指标.

2 结果与讨论

2.1 风场变化规律

从台风过境期间西湖心湖面风场矢量变化情况(图3)可以看出,台风“摩羯”和“温比亚”过境时,均在监测点位湖面引起剧烈的风速变化. 其中台风“摩羯”于2018年8月13日12:40位于巢湖西北处,逆时针旋转风场在西湖心监测点位湖面引起了11.3 m/s的北西北大风,随着台风逐渐掠过巢湖向北运动,监测点位风速逐渐减小,风向逆时针逐渐转为南向和东南向;2018年8月17日15:00—24:00间,台风“温比亚”从巢湖东侧经巢湖南部地区行进到巢湖西侧,在监测点位湖面产生了风速超过18.6 m/s的大风,在此期间,风向由西北向顺时针转为东南向,湖面风场变化更为剧烈,风向呈现顺时针快速变化特征,与台风“摩羯”过境时的逆时针快速变化特征有显著区别.

2.2 波高变化规律

从台风“摩羯”过境期间西湖心监测点位处有效波高与风速的同步变化情况(图4)可以看出,有效波高随风速总体呈同步变化趋势,随着台风“摩羯”接近巢湖,风速逐渐增大,有效波高同步增大. 2018年8月13

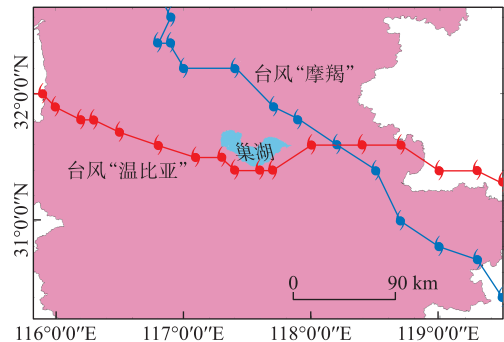


图2 台风“摩羯”与“温比亚”路径图

Fig.2 Path of Typhoon Yagi and Rumbia

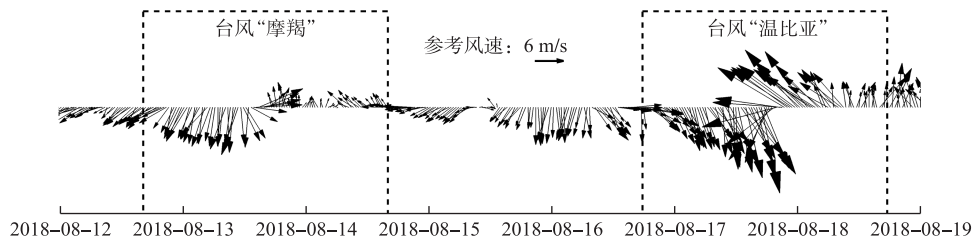


图 3 2018 年 8 月台风“摩羯”和“温比亚”过境巢湖期间气象观测站风矢量变化情况

Fig.3 Changes in wind vector at the monitoring station when Typhoon Yagi and Rumbia passed through Lake Chaohu in August of 2018

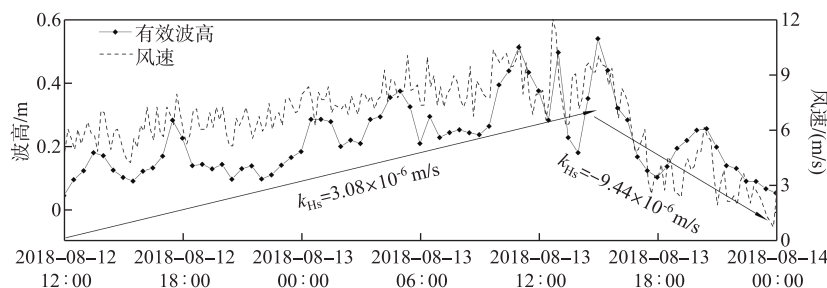


图 4 台风“摩羯”过境巢湖时监测点位有效波高同步风速变化情况 (k_{Hs} 为有效波高变化速率)

Fig.4 Synchronous changes in significant wave height and wind speed at the monitoring station when Typhoon Yagi passed through Lake Chaohu (k_{Hs} represents the change rate of the significant wave height)

日 12:40, 西湖心测点出现台风“摩羯”期间最大风速 (12 m/s), 随后风速开始逐渐减小, 但此时有效波高仍呈增大趋势, 2018 年 8 月 13 日 15:00 达到最大 (0.54 m), 即有效波高的增加时间较风速的递增时间滞后约 2 h. 随后, 台风“摩羯”逐渐远离巢湖, 风速与有效波高均快速衰减, 与台风接近前的增长阶段相比, 有效波高衰减速度约为增长速度的 3 倍, 风浪强度随着风速减弱快速衰减.

从台风“温比亚”过境期间在西湖心监测点位处有效波高与风速的同步变化情况 (图 5) 可以看出, 与“摩羯”期间相似, 有效波高与风速呈同步变化趋势. 2018 年 8 月 17 日 17:00—19:30 期间, 台风“温比亚”中心位于巢湖南侧, 且最为接近巢湖, 由于台风具有中心附近风力较小的特点, 导致西湖心测点处风速在此期间有一突变 (突然减小后又恢复较大值, 见图 5 中黑色虚线椭圆框中) 规律, 相应地有效波高也在此期间出现突变现象. 随后台风“温比亚”中心开始远离巢湖, 受台风外围高风速影响, 测点处仍保持着高风速, 相应地有效波高呈现继续增加规律, 2018 年 8 月 17 日 20:30 达到最大值 (1.07 m). 随着台风“温比亚”越来越

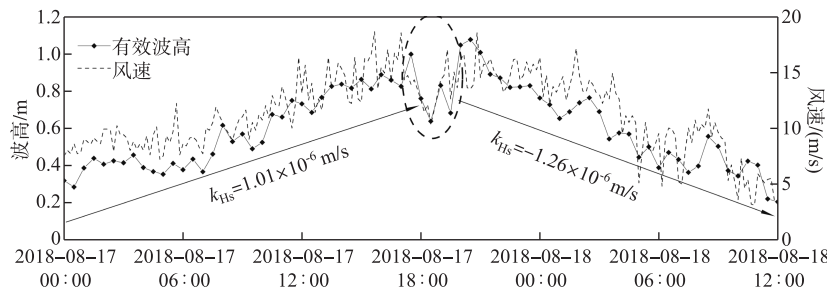


图 5 台风“温比亚”过境巢湖时监测点位有效波高同步风速变化情况 (k_{Hs} 为有效波高变化速率)

Fig.5 Synchronous changes in significant wave height and wind speed at monitoring station when Typhoon Rumbia passed through Lake Chaohu (k_{Hs} represents the change rate of the significant wave height)

远离巢湖和其本身强度减小,风速与有效波高均快速减小,与增长阶段相比,有效波高衰减速度为增长速度的 1.3 倍.

两场台风期间的有效波高变化情况表明,受台风引起的风速快速变化,风浪的有效波高随风速同步地快速变化,相较增长阶段,台风过境后,有效波高衰减速度较增长阶段的增长速度更大.

2.3 波周期变化规律

平均波周期反映了波浪能量在频率空间的平均分布情况. 图 6 为台风“摩羯”过境期间西湖心监测点位处风浪平均周期与风速的同步变化情况. 风速增长阶段,平均周期同步风速增大而逐渐变大,平均周期的增长时间较风速增长时间滞后约 3 h,最大值为 2.49 s. 随着台风“摩羯”远离巢湖和强度减小,风速快速衰减,平均波周期有所减小,衰减速度较增长速度有所增加,约为其 2.5 倍. 与增加阶段相比,风速快速衰减,但平均周期并未随风速的衰减快速衰减下去,较有效波高随风速衰减的强度也有所降低. 这是因为有效波高衰减更多地由总能量衰减决定,而周期的衰减受不同频率段能量衰减影响. 台风过境时能量的增加与衰减主要集中在低频区域,台风过境时增加的能量再次衰减时,低频部分能量只是部分衰减,并未像增加时那样快速完全耗散掉,虽然低频部分能量有部分保留下来,但总能量并没有增加多少,但低频保留部分的能量对平均周期变化的贡献则会显著体现,这反映在风浪要素上就表现为有效波高能快速衰减下去,而周期衰减略微缓慢.

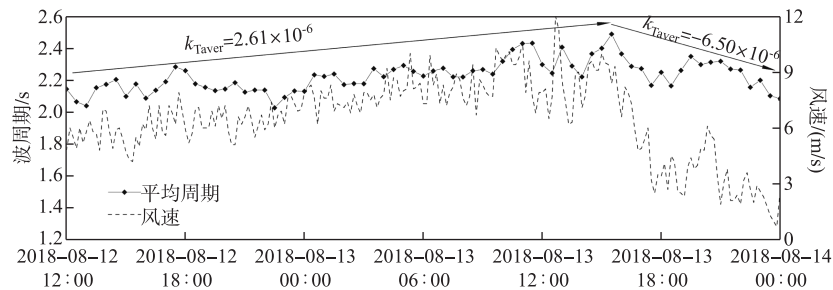


图 6 台风“摩羯”过境巢湖时监测点位平均周期(T_{aver})同步风速变化情况($k_{T_{\text{aver}}}$ 为平均周期变化速率)

Fig.6 Synchronous changes in the average period (T_{aver}) and wind speed at monitoring station when Typhoon Yagi passed through Lake Chaohu ($k_{T_{\text{aver}}}$ represents the change rate of the average period)

图 7 为台风“温比亚”过境期间西湖心监测点位风浪平均周期与风速的同步变化情况. 与台风“摩羯”期间的变化相似,平均周期($r=0.733$, $N=73$)与风速呈现明显的同步变化规律. 2018 年 8 月 17 日 17:00—19:30 期间,监测点位处风速的突变(突然减小后又恢复较大值,见图 7 中黑色虚线椭圆框内)引起了明显的平均周期突变过程. “温比亚”过境后,平均周期衰减速度与增长速度较为接近,整体与风速同步地衰减下去. 从变化趋势看,平均周期的增长时间较风速增长时间滞后约 1 h.

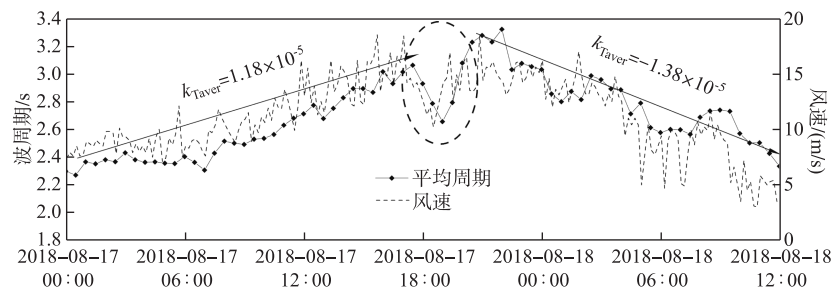


图 7 台风“温比亚”过境巢湖时监测点位平均周期(T_{aver})同步风速变化情况($k_{T_{\text{aver}}}$ 为平均周期变化速率)

Fig.7 Synchronous changes in the average period (T_{aver}) and wind speed at monitoring station when Typhoon Rumbia passed through Lake Chaohu ($k_{T_{\text{aver}}}$ represents the change rate of the average period)

与有效波高变化相似,台风期间风速的快速增长与衰减过程同样带来了平均周期的快速变化,但相较于有效波高随风速增长与衰减过程,平均周期更为稳定,尤其是衰减阶段,这种稳定性更为明显.

2.4 水环境对风浪变化的响应规律

台风“摩羯”和“温比亚”过境巢湖时监测点风浪与水环境同步变化情况如图 8 所示.

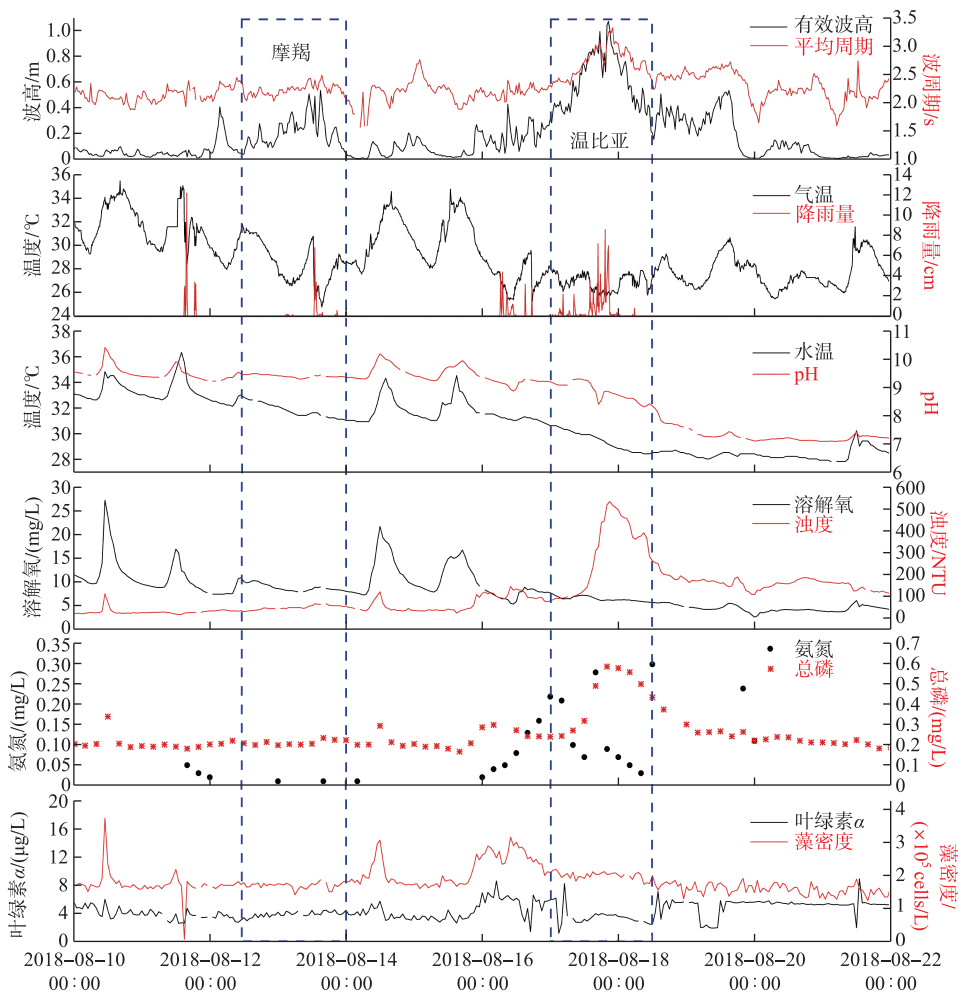


图 8 台风“摩羯”与“温比亚”过境巢湖前后有效波高、平均周期、气温、降雨量、水温、水体 pH、溶解氧、浊度、氨氮、总磷、叶绿素 *a* 以及藻密度同步变化情况

Fig.8 Synchronous changes in the significant wave height, average period, air temperature, rainfall, water temperature, pH, dissolved oxygen, turbidity, $\text{NH}_3\text{-N}$, TP, chlorophyll-*a* and algal density before and after Typhoon Yagi and Rumbia passing through Lake Chaohu

台风过程常伴有大雨降雨,“摩羯”与“温比亚”过境时,均在监测点监测到了强降雨和降温过程,台风过程时,常规的气温波动过程(早上 4:00—8:00 气温最低,下午 12:00—17:00 气温最高)遭到破坏. “摩羯”虽然强度较小,但由于经过监测点的时间为 12:00—15:00 之间,直接破坏了监测点当天的高温历程,温度骤降约 6℃,同时伴有大的降雨过程,而后随着“摩羯”远离,气温波动过程和幅度快速恢复到常规日变化特征,“摩羯”带来的气象影响快速消散;“温比亚”过境巢湖时间为 8 月 17 日 16:00—22:00,过境前 1 日(8 月 16 日)巢湖已经经历了一个强降雨过程,日温度波动现象已减弱,待强度较大的“温比亚”过境时,大风和强降

雨过程加上常规的日内低温阶段,使得监测点气温保持在低位(25~26℃),待“温比亚”远离,低温过程仍继续保持,并持续到了8月18日10:00,而后日内气温波动现象开始恢复,但升温强度较原有强度明显降低(约3℃),直到8月19日后“温比亚”的影响才消散,表明“温比亚”的气象影响可持续2 d以上。

“摩羯”过境时,水体pH、水温、溶解氧日内波动特征均消失,受气温下降和大风浪水体混合作用,水温由33℃逐渐下降至31.1℃,呈单边下降趋势,pH(平均值为9.39)和溶解氧浓度(平均值为8.76 mg/L)则维持在波动的低位附近,浊度则由低位的27.7 NTU略升高至64.7 NTU,氨氮、总磷以及藻密度和叶绿素 a 浓度未见异常变化。“温比亚”过境时,相较“摩羯”强度更大,不仅扰乱了水体pH、水温和溶解氧的日内波动特征,还导致pH由9.19降至8.33,水温由30.6℃降至28.4℃,两者均下降显著;溶解氧浓度由7.58 mg/L缓慢下降至5.49 mg/L,由于强烈的风浪扰动导致沉积物悬浮,浊度由77.5 NTU升高至535.2 NTU,后略下降至261.9 NTU,呈现显著升高现象;同时总磷浓度由0.241 mg/L显著升至0.589 mg/L。“温比亚”过境后,随着波高的降低,总磷快速回落至初始状态,但浊度回落至过境前1倍以上(>165 NTU)后保持稳定,且该状态持续至台风过境后3 d。而由于风浪强烈混合引起藻类垂向混合,致使过境前高浓度(藻密度:315990 cells/L,叶绿素 a :8.67 $\mu\text{g/L}$)的藻类快速降低至较小状态(藻密度:156994 cells/L,叶绿素 a :2.56 $\mu\text{g/L}$),并维持在低位状态。氨氮浓度在“温比亚”过境前后有一快速增加而后减少的变化过程,但并未同步于有效波高的快速变化。根据风浪强度与水体上表层藻密度的同步变化(图8)可以进一步说明,强烈的风浪过程使得浅水湖泊水体充分混合,从而抑制藻类在表面堆积^[28-29],当表面发生堆积时,大风浪过程可以快速地消除藻类表面聚集现象,从而避免藻类水华的暴发。对比“摩羯”与“温比亚”的影响可以发现,对于由水表面突变进而向水体内部递进的因子(水温、溶解氧浓度),两场台风过程时均有明显的影响显现(水温均下降了2℃,溶解氧浓度均降低约2.0 mg/L)。而对于由湖底突变进而向水体内部递进的因子(浊度、总磷浓度),则在“温比亚”过境时有较明显的呈现(浊度升高约7倍,总磷浓度升高2倍以上),而“摩羯”期间该影响不显著。这可能是因为本研究的所有环境因子参数均为上层0.5~1.0 m深处数据,从两场台风过程中上层水体浊度的变化可以推断,由于“摩羯”强度小,由湖底再悬浮过程导致的环境变化未能较大程度地到达水体表面,因此未呈现出显著变化,而“温比亚”强度较大,引起的湖底沉积物再悬浮导致的浊度和总磷浓度升高已显著传递到水体表面,因此呈现出显著变化。此外,风向、降雨等过程不同也是引起双方差异的因素(图9)。由此表明巢湖水环境也呈现明显的三维特征,分析时需要考虑沿水深垂向分布情况。

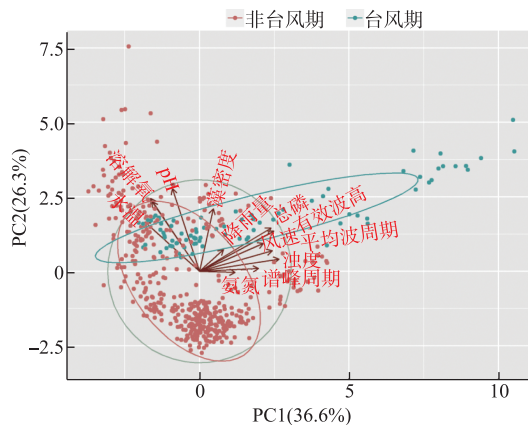


图9 巢湖台风过境期间和非台风期间营养盐、气象因子和风浪因子的主成分分析结果(时间跨度为2018-08-09 12:00至08-31 23:00,其中箭头表示各因子,圆点代表样点)

Fig.9 Principal component analysis results of nutrients, meteorological parameters, and wind wave parameters during the typhoon periods and non-typhoon periods in Lake Chaohu (The time range was from 2018-08-09 12:00 to 08-31 23:00, where the arrows represent the parameters, and the dots represent sampling sites)

经检验得出, KMO 值为 0.752, 且 Bartlett 检验的 P 值小于 0.0001, 说明原始数据之间有较强的相关关系, 可以进行主成分分析, 如图 9 所示. 前两个主成分分别解释了 36.6% 和 26.3% 的环境因子变异性. PC1 与浊度(0.864)、总磷(0.778)、风速(0.694)、降雨量(0.261)、有效波高(0.808)和平均波周期(0.791)呈正相关, 反映了台风期间高风速导致的风浪要素(波高、周期)变化对水质有重要影响, 引起了巢湖的理化特性变化, 结合图 8, 可以看出台风期间当风浪达到一定强度时, 其扰动会引起水体浊度增加, 总磷浓度上升. PC1 与水温(-0.533)、溶解氧(-0.516)和气温(-0.595)呈负相关, 台风期间降雨增加和气温降低, 加上风浪的强烈扰动导致水温降低, 进而引起溶解氧和 pH 下降. PC2 与水温(0.798)、pH(0.902)、溶解氧(0.762)、气温(0.539)和藻密度(0.684)呈正相关. 这说明常规气象条件下, 巢湖在无强风浪扰动情况下, 水温、气温和藻密度关系密切, 表明温度是影响藻类生长的关键因子之一. 台风期间和常规气象环境期间环境因子存在明显的差异, 强烈的风浪混合改变了水体固有的理化参数分布特征, 扰动了藻类常规的水体分布规律, 风浪强度的快速变化是造成这些差异的主要因子.

3 结论

本文基于实测手段, 开展了台风“摩羯”和“温比亚”过境大型浅水湖泊巢湖时风浪和水环境同步高频观测, 结果表明风浪要素(波高和周期)可快速响应风场的快速变化. 风速衰减阶段, 有效波高衰减速度较增长阶段的增长速度更大, 而平均周期则表现得更为稳定.

水环境因子会快速响应风浪的快速变化过程, 风浪强度越大, 这种响应程度越显著. 极强的风浪扰动会引起水体浊度增加, 总磷浓度上升, 藻类的强烈垂向混合, 进而导致特定深度处叶绿素 a 浓度降低. 风浪强度越大, 引起水体浊度变化的持续时间越长. 台风期间伴随着水温降低, 会引起溶解氧浓度和 pH 下降. 强风浪环境下, 风浪强度的快速变化会打破水体固有的理化参数变化规律, 而风浪强度大小是影响水体环境因子变化差异大小的主要因子.

致谢: 感谢本研究团队王岩、崔健在野外观测中给予的帮助.

4 参考文献

- [1] Wüest A, Lorke A. Small-scale hydrodynamics in lakes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2003, **35**(35): 373-412. DOI: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161220.
- [2] Mellor G. The three-dimensional current and surface wave equations. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, **33**(9): 1978-1989. DOI: 10.1175/JPO2794.1.
- [3] Babanin A, Haus B. On the existence of water turbulence induced by nonbreaking surface waves. *Journal of Physical Oceanography*, 2009, **39**(10): 2675-2679. DOI: 10.1175/2009JPO4202.1.
- [4] Dai D, Qiao F, Sulisz W *et al.* An experiment on the nonbreaking surface-wave-induced vertical mixing. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, **40**(9): 2180-2188. DOI: 10.1175/2010JPO4378.1.
- [5] Huang C, Qiao F. Wave-turbulence interaction and its induced mixing in the upper ocean. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**(C04026): 1-12. DOI: 10.1029/2009JC005853.
- [6] Qiao F, Yuan Y, Deng J *et al.* Wave-turbulence interaction-induced vertical mixing and its effects in ocean and climate models. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2016, **374**(2065): 20150201. DOI: 10.1098/rsta.2015.0201.
- [7] Qiao F, Yuan Y, Yang Y *et al.* Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(11): L11303. DOI: 10.1029/2004GL019824.
- [8] Sheng YP, Lick W. The transport and resuspension of sediments in a shallow lake. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1979, **84**(C4): 1809-1826. DOI: 10.1029/JC084iC04p01809.
- [9] Bailey MC, Hamilton DP. Wind induced sediment resuspension: a lake-wide model. *Ecological Modelling*, 1997, **99**(2/3): 217-228. DOI: 10.1016/S0304-3800(97)01955-8.
- [10] Havens KE, Schelske CL. The importance of considering biological processes when setting total maximum daily loads (TMDL) for phosphorus in shallow lakes and reservoirs. *Environmental Pollution*, 2001, **113**(1): 1-9. DOI: 10.1016/S0269-7491(00)00235-9.

- [11] Fan CX, Zhang L, Qu WC. Lake sediment resuspension and caused phosphate release-a simulation study. *Journal of Environmental Sciences*, 2001, **13**(4): 406-410.
- [12] Qin BQ, Hu WP, Gao G *et al.* Dynamic mechanism of sediment suspension in Taihu Lake and conceptual model of internal source release. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(17): 1822-1831. [秦伯强, 胡维平, 高光等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式. 科学通报, 2003, **48**(17): 1822-1831.]
- [13] Luo L, Qin B, Hu W *et al.* Sediment re-suspension under different hydrodynamic disturbances in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2004, **16**(3): 273-276. DOI: 10.18307/2004.0313. [罗淑葱, 秦伯强, 胡维平等. 不同水动力扰动下太湖沉积物的悬浮特征. 湖泊科学, 2004, **16**(3): 273-276.]
- [14] George DG, Heaney SI. Factors influencing the spatial distribution of phytoplankton in a small productive lake. *Journal of Ecology*, 1978, **66**(1): 133-155. DOI: 10.2307/2259185.
- [15] Serra T, Vidal J, Casamitjana X *et al.* The role of surface vertical mixing in phytoplankton distribution in a stratified reservoir. *Limnology and Oceanography*, 2007, **52**(2): 620-634. DOI: 10.4319/lo.2007.52.2.0620.
- [16] Moreno-Ostos E, Cruz-Pizarro L, Basanta A *et al.* The influence of wind-induced mixing on the vertical distribution of buoyant and sinking phytoplankton species. *Aquatic Ecology*, 2009, **43**(2): 271-284. DOI: 10.1007/s10452-008-9167-x.
- [17] Blottière L, Rossi M, Madricardo F *et al.* Modeling the role of wind and warming on *Microcystis aeruginosa* blooms in shallow lakes with different trophic status. *Theoretical Ecology*, 2014, **7**(1): 35-52. DOI: 10.1007/s12080-013-0196-2.
- [18] Zhang M, Duan H, Shi X *et al.* Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: Implications for future climate change. *Water Research*, 2012, **46**(2): 442-452. DOI: 10.1016/j.watres.2011.11.013.
- [19] Huisman J, Matthijs H, Visser P eds. Harmful cyanobacteria. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2005.
- [20] Qin B, Zhu G, Gao G *et al.* A drinking water crisis in Lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management. *Environmental Management*, 2010, **45**(1): 105-112. DOI: 10.1007/s00267-009-9393-6.
- [21] Ma Z, Xie P, Chen J *et al.* Microcystis blooms influencing volatile organic compounds concentrations in Lake Taihu. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2013, **22**: 95-102. DOI: 10.1080/10643389.2012.671750.
- [22] Moreno-Ostos E, Cruz-Pizarro L, Basanta A *et al.* The influence of wind-induced mixing on the vertical distribution of buoyant and sinking phytoplankton species. *Aquatic Ecology*, 2009, **43**(2): 271-284. DOI: 10.1007/s10452-008-9167-x.
- [23] Zhu M, Paerl HW, Zhu G *et al.* The role of tropical cyclones in stimulating cyanobacterial (*Microcystis* spp.) blooms in hypertrophic Lake Taihu, China. *Harmful Algae*, 2014, **39**: 310-321. DOI: 10.1016/j.hal.2014.09.003.
- [24] Qin B, Li W, Zhu G *et al.* Cyanobacterial bloom management through integrated monitoring and forecasting in large shallow eutrophic Lake Taihu (China). *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **287**: 356-363. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.01.047.
- [25] Wang C, Feng T, Wang P *et al.* Understanding the transport feature of bloom-forming *Microcystis* in a large shallow lake: A new combined hydrodynamic and spatially explicit agent-based modelling approach. *Ecological Modelling*, 2017, **343**: 25-38. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2016.10.017.
- [26] Tong Y, Xu X, Zhang S *et al.* Establishment of season-specific nutrient thresholds and analyses of the effects of nutrient management in eutrophic lakes through statistical machine learning. *Journal of Hydrology*, 2019, **578**: 124079. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124079.
- [27] Yang C, Yang P, Geng J *et al.* Sediment internal nutrient loading in the most polluted area of a shallow eutrophic lake (Lake Chaohu, China) and its contribution to lake eutrophication. *Environmental Pollution*, 2020, **262**: 114292. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114292.
- [28] Hunter PD, Tyler AN, Willby NJ *et al.* The spatial dynamics of vertical migration by *Microcystis aeruginosa* in a eutrophic shallow lake: a case study using high spatial resolution time-series airborne remote sensing. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(6): 2391-2406. DOI: 10.4319/lo.2008.53.6.2391.
- [29] Vidal J, Rigosi A, Hoyer A *et al.* Spatial distribution of phytoplankton cells in small elongated lakes subject to weak diurnal wind forcing. *Aquatic Sciences*, 2014, **76**(1): 83-99. DOI: 10.1007/s00027-013-0316-5.