

## 2018 年巢湖风浪特征分析\*

张怡辉\*\*, 胡维平, 彭兆亮

(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:** 基于实测数据, 利用验证良好的 SWAN 风浪模型开展了 2018 年巢湖风浪变化及分布特征研究. 巢湖 2018 年平均有效波高和波周期分别为 0.16 m 和 1.22 s, 整体春季风浪大, 秋季风浪小. 月均最大值出现在 4 月, 分别为 0.22 m 和 1.36 s, 月均最小值出现在 11 月, 分别为 0.11 m 和 1.06 s, 变化幅度分别为最大值的 52% 和 22%. 月均值整体中巢湖最大, 东巢湖次之, 西巢湖最小. 巢湖月最大有效波高和波周期主要出现在东巢湖或中巢湖, 各值月间差异显著, 最大变化幅度分别为最大值的 61% 和 27%. 不同湖区计算的月均有效波高和波周期较大值分布范围所占湖区的比例不同, 中巢湖与东巢湖较大, 西巢湖最小. 不同月份及湖区较大有效波高出现的时间占比是不一致的, 9—11 月份时间占比较小, 将有利于蓝藻水华的出现.

**关键词:** 风浪; 巢湖; 有效波高; 波周期

## The characteristics of wind waves in Lake Chaohu in 2018\*

ZHANG Yihui\*\*, HU Weiping & PENG Zhaoliang

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

**Abstract:** In this study, the wind-wave model SWAN was used to simulate the characteristics of variations and distributions of wind waves in Lake Chaohu for the year 2018. The model was calibrated and evaluated using observational data. Results suggest that the annual mean significant wave height and wave period of Lake Chaohu during 2018 were 0.16 m and 1.26 s, respectively. The wind wave was strong in spring and weak in autumn. The monthly mean values exhibit great variations. The largest monthly values of 0.22 m and 1.36 s were obtained in April, while these values were 0.11 m and 1.06 s in November, which were the lowest during 2018 and whose variation ranges were 52% and 22% of the maximum values, respectively. Among different lake basins, monthly mean wave height in the east basin and central basin were the highest, followed by the west basin. The highest value of monthly maximum significant wave height and wave period appeared in the east basin or the central basin. The values of monthly maximum significant wave height and wave period varied significantly during different months, whose variation ranges were 61% and 27% of the maximum values, respectively. The distribution ratio of the high values of monthly significant wave height and wave period computed by model in different lake zones were large in the east basin or central basin, but it was small in the west basin. The proportion of time when the high significant wave height appeared was different during different months in different lake zones, and it was small from September to November, which would be beneficial to the emergence of cyanobacteria blooms.

**Keywords:** Wind wave; Lake Chaohu; significant wave height; wave period

当风吹行于水体表面, 风能经过水气相互作用的传递产生风浪, 在浅水湖泊中, 风浪是表征湖泊水动力过程最为重要的因子. 国内外研究结果显示, 浅水湖泊风浪作用是沉积物再悬浮的最重要的驱动因素<sup>[1-8]</sup>, 而湖泊底泥再悬浮是影响和控制内源释放的关键物理过程<sup>[9-15]</sup>, 进而会对湖泊水质、水生态产生影响. 因此, 准确地分析湖泊的风浪分布与变化特征, 对于分析湖泊水质和藻类水华变化特征提供参考.

\* 2019-08-19 收稿; 2019-09-30 收修改稿.

国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07603-005) 资助.

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

风浪研究常用的研究手段有现成原位观测、室内物理模型和数值模拟手段。早期,一些学者<sup>[16-20]</sup>根据实测资料,通过数据分析,得出了一些重要的结论,但现场观测研究主要是基于局部观测点的观测数据得出经验公式,进而应用到全湖的风浪分布研究,这些结果为了解湖泊风浪要素的分布提供了依据,但是仅由部分观测点的数据而应用于全湖风浪特征分析时,因风浪的分布受区域边界、水深、风区长度等因素的影响,其结论是否适合整个浅水湖泊水域还有待研究。而室内物理模型试验则主要是应用在风浪与结构物相互作用的分析上。随着风浪模型发展的成熟和完善,数值模拟方法逐渐成为研究风浪发展和传播的主要手段。目前比较常用风浪模型是基于动谱平衡方程开发的第三代风浪模型,模型很好地考虑了风能输入、近岸风浪破碎、白浪耗散、底部摩擦等各种物理过程,可以很好地对大范围的不同区域风浪成长进行模拟和预测<sup>[21]</sup>。通过近30年的发展,涌现出了一系列比较先进的第三代风浪模型,其中比较有代表的有WAM模型<sup>[21]</sup>、WAVE-WATCH III模型<sup>[22]</sup>、TOMAWAC模型<sup>[23]</sup>以及SWAN模型<sup>[24]</sup>。WAM模型和WAVE-WATCH III模型主要用于计算大尺度深海海域风浪的生成及发展,对于近岸小尺度有限水深及浅水计算时效果比较差。SWAN模型由WAM模型改进而来,除了包含WAM模型中关于深水风浪的生成、耗散和四波相互作用外,增加了浅水风浪由于水深变浅导致的风浪破碎项、底部摩擦影响以及三波相互作用,提高了近岸浅水区域风浪的模拟精度。虽然现有成熟的风浪模式主要是针对海洋风浪开发的,但仍有一些学者将其应用于湖泊中,并得到了较好的结果<sup>[25-30]</sup>。李一平等<sup>[25]</sup>在太湖波浪观测的基础上,利用SWAN模型对太湖波浪进行数值模拟,研究了太湖波浪的主要影响因素,指出波高、波长、波周期等波浪参数在太湖的分布与风速、风向、水深等因素密切相关;许遐祯等<sup>[27]</sup>以空间均匀的风场为驱动,利用SWAN模式开展了太湖波浪成长模拟,分析了太湖波浪频率分布特征以及不同区域波浪对风时、风区、水深等因素的敏感性;王震等<sup>[28]</sup>利用SWAN模型开展了太湖自然风条件下不同湖区风浪季节变化特征研究,指出风速是导致风浪季节变化的主要因素,太湖风浪的时空分布特征是造成太湖水质参数、沉积物和水生植被空间分布差异的重要原因之一;Jin等<sup>[29]</sup>进行了SWAN模型在奥基乔比湖风浪模拟中的可靠性验证,结果显示模型可很好地再现湖泊中风浪的变化趋势与波动特征;作者也利用SWAN风浪模型开展了台风过境巢湖时对巢湖风浪大小与分布的影响研究。以上研究表明,SWAN风浪模型在分析湖泊风浪变化方面是可信的。

2018年7月和9月巢湖暴发了严重的蓝藻水华问题,最大暴发面积在7、9月明显高于2016和2017年,特别是9月份,是往年同期的2~5倍,影响巢湖氮磷浓度与藻类生长环境要素的影响因素众多,风浪也是其中的因素之一。一方面当风浪较小时,湖面平静,有利于藻类的聚集;另一方面,风浪较大时,风浪的扰动作用使得湖底底泥中的营养盐大量悬浮,使得水体中氮磷浓度增加,同时风浪的搅动作用使得藻类垂向混合,减小表层藻类的堆积。本文基于巢湖实测风浪资料验证了SWAN风浪模型,利用验证好的风浪模型开展2018年巢湖风浪分布和变化特征分析,探讨巢湖不同区域、不同时间风浪的分布特征,为更好地认识巢湖2018年蓝藻水华暴发提供参考。

## 1 研究概况

### 1.1 研究区域

巢湖(30°25'28"~31°43'28"N, 117°16'54"~117°51'46"E)地处安徽省中部,常水位8.50 m(吴淞高程,下同)时水面面积769.60 km<sup>2</sup>,平均水深约2.79 m,流域面积1.35万 km<sup>2</sup>,是我国长江流域五大淡水湖之一。巢湖东西长54.50 km,南北宽15.10 km,最大宽度约21.00 km,巢湖的地形如图1所示。

### 1.2 风浪监测

风浪观测仪器采用WaveStar雷达测波仪,该仪器是一款高精度、非接触式风浪测量仪器,采用FMCW雷达测距原理,可以进行全天候测量。其测量原理为:传感器发射微波脉冲后在空气中传播,被水面反射的信号又被传感器接收,通过精确计算传播时间和数字信号处理技术,精确计算出传感器距离反射面的距离,由此获得湖面波动数据。波面数据通过仪器自身软件处理后可以获得观测点不同统计特征的波高(如有效波高、最大波高、平均波高等)和周期(如平均波周期、最大波周期)。仪器安装在西湖心的固定平台上(31°39'9.73"N, 117°22'21.17"E,图1),仪器距离水面5.5 m,风浪观测时间为2018年8月9日22:30—9月9日23:30,采样时间间隔为30 min,采样频率为4 Hz,每次采集波面数为2048(约为8.53 min波面过程),仪器单

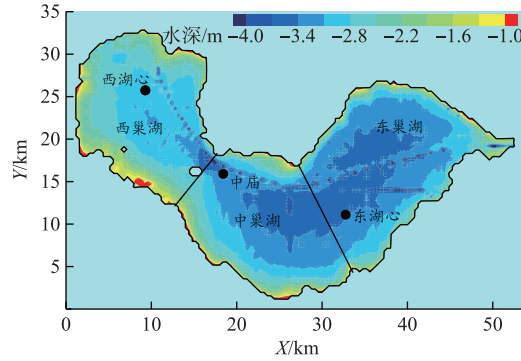


图1 巢湖地形及观测站位布置

(横坐标代表东西宽度,纵坐标代表南北宽度,颜色等值线代表水深等值线,黑色实心点代表监测点位)

Fig.1 The topography and monitoring sites in Lake Chaohu (Here horizontal ordinates represent the width in east-west direction, the longitudinal coordinates represent the width in north-south direction, the color isolines represent the water depth isolines, and the black solid dots represent monitoring sites)

次测量误差小于1 cm,平均测量误差小于1 mm,总计开展1个月风浪观测。

观测期间,由于连续阴雨天气导致太阳能供电中断会出现缺测值,同时剔除异常数值,共取得有效数据881条,有效波高平均值为0.27 m,平均波周期值为1.38 s;有效波高最大值为1.05 m,平均波周期最大值为2.68 s,出现时刻为2018年8月17日21:00,正值2018年第18号台风“温比亚”过境巢湖期间。

## 2 风浪模型

### 2.1 SWAN 模型简介

SWAN 风浪模式(Simulating Waves Nearshore)是适用于海岸和内陆水体的第三代风浪模型,由荷兰 Delft 大学土木工程系的 Booij 等<sup>[31]</sup>开发并由 SWAN 团队发展和完善。除了包含其他三代风浪模式(如 WAM<sup>[21]</sup>、WAVEWATCH<sup>[22]</sup>)中的风生成项、白浪耗散项、四波相互以及底部耗散项外,还增加了三波相互作用和浅水区域水深变浅引起的风浪破碎耗散影响。

由于流存在时,波谱能量密度不守恒,而波作用量谱守恒,因此 SWAN 风浪模式跟其他三代风浪模式相似,采用波作用量密度谱对风浪进行描述。波谱作用量密度谱的变化率可以用作用量平衡方程来表示:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot [(\vec{C}_g + \vec{V}) N] + \frac{\partial C_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{\text{tot}}}{\sigma} \quad (1)$$

式中, $N$ 为是波作用量密度谱, $N=S/\sigma$ , $S$ 为能量密度; $t$ 为时间; $\sigma$ 、 $\theta$ 为相对波频和波向; $C_\sigma$ 和 $C_\theta$ 为风浪在谱空间 $(\sigma, \theta)$ 的传播速度; $\vec{C}_g = \partial \sigma / \partial \vec{k}$ 为群速, $\vec{k}$ 为波数矢量; $\vec{V}$ 为外部流速矢量; $\nabla \cdot ()$ 为地理坐标水平梯度, $\nabla \cdot () = \partial () / \partial x + \partial () / \partial y$ 。公式(1)中,方程左边第1项代表波作用量密度在时间上的局地变化;第2项代表在空间的传播;第3项表示由于水深和流的变化引起的频移;第4项表示水深和流引起的折射;方程右边是源项,表示波能的产生、耗散和能量再分布等物理过程。

对于源项,通常包含以下几项:

$$S_{\text{tot}} = S_{\text{in}} + S_{\text{nl3}} + S_{\text{nl4}} + S_{\text{ds,w}} + S_{\text{ds,b}} + S_{\text{ds,br}} \quad (2)$$

式中, $S_{\text{in}}$ 为风能输入项, $S_{\text{nl3}}$ 为三波相互作用, $S_{\text{nl4}}$ 为四波相互作用, $S_{\text{ds,w}}$ 为白浪耗散项, $S_{\text{ds,b}}$ 为由于底部摩擦引起的耗散, $S_{\text{ds,br}}$ 为水深变浅引起的破碎导致的耗散项。风能向风浪的转换可以利用共振<sup>[32]</sup>和反馈<sup>[33]</sup>机制来阐述。其中共振机制主要作用在风浪生成的初始阶段,随时间线性增长;而反馈机制主要反应着波能随时间呈指数增长。其他诸如白浪耗散、四波相互、三波相互、水深变浅破碎及底摩擦耗散等源项的计算可参考 SWAN 技术手册<sup>[34]</sup>,这里不再赘述。

## 2.2 模型配置

此处建立东西长 54.4 km, 南北长 34 km 的巢湖模拟区域, 采用二维非恒定模型. 模型的空间分辨率为  $400\text{ m} \times 400\text{ m}$ , 计算时间步长取 5 min, 计算时间范围为 2018 年 1 月 1 日 00:00—12 月 31 日 23:00, 即 2018 一个完整年. 根据巢湖实测的周期范围, 拟定频率范围为 0.1~2.0 Hz, 分成 40 个频率段. 方向沿整个圆周方向均分为 36 份, 即方向分辨率为  $10^\circ$ . 模型物理过程中, 风输入考虑了线性增长和指数增长两部分, 线性增长采用 Caraler 和 Malanotte-Rizzoli 公式<sup>[35]</sup>, 增长部分采用 Yan 公式<sup>[36]</sup>. 底摩擦引起的消耗采用 JONSWAP 模型, 系数取 0.067. 浅水风浪破碎系数在计算时取其均值 0.73. 模型初始值为 0, 计算时采用冷启动方式. 由于入湖河道对巢湖风浪影响不大, 此处计算时不考虑入湖河流影响. 模型中考虑了浅水中三波相互作用, 其他采用默认值.

收集整理了国家气象信息中心位于巢湖流域的合肥、巢湖、庐江 3 个气象站 2018 年 1—12 月逐小时观测资料, 将 3 个测站的风场数据求平均, 并插值到计算区域作为模型计算风场. 根据气象站监测结果显示, 2018 年巢湖流域海拔 34 m (观测站位平均高度) 处的风速大小平均值为 1.96 m/s, 最大风速为 8.07 m/s, 发生在 2018 年 8 月 17 日, 为台风“温比亚”过境期间, 图 2 为截取的 2018 年 8 月份三站平均的风矢量变化情况.

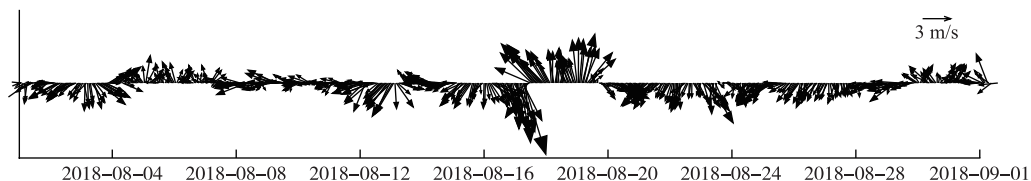


图 2 2018 年 8 月三站平均风矢量变化

Fig.2 Variation of averaged wind vectors at 3 monitoring sites in August of 2018

巢湖整体水位受防洪、航运、灌溉等任务控制较显著, 且受季节变化影响, 据资料统计显示, 巢湖年内水位变幅最小为 1.44 m (1966 年), 最大可达 6.48 m (1954 年). 水位的变化势必导致巢湖绝对水深的变化, 而水深是影响风浪形成和发展的重要因素之一, 因此计算长时间巢湖风浪情况时, 考虑水位波动的影响是十分必须的. 为此收集整理了巢湖周边塘西、槐林镇、巢湖闸 3 个水位站 2018 年逐时水位数据, 并取 3 个站的平均值作为水位值输入到 SWAN 模型中, 图 3 为三站平均的巢湖水位变化情况, 最高水位为 10.10 m (2018 年 8 月 20 日 11:00), 最低水位为 8.44 m (2018 年 4 月 13 日 10:00), 水位变化幅度为 1.66 m.

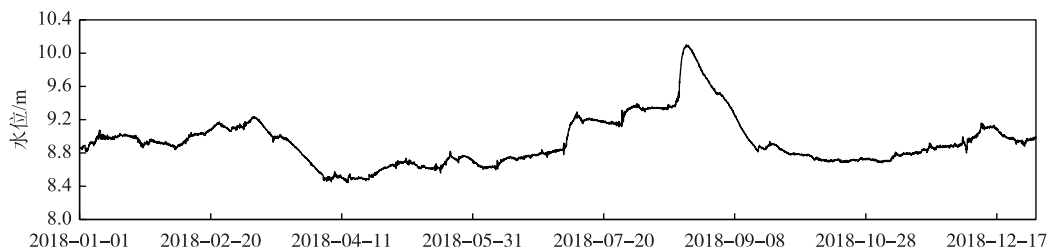


图 3 2018 年巢湖平均水位变化

Fig.3 Variation of average water levels at Lake Chaohu in 2018

## 2.3 模型验证

为了验证模型计算结果, 将观测站位的模拟计算结果与实测数据进行对比, 对比结果如图 4 所示. 由验证结果可以看出, 模拟值与实测值吻合良好, 有效波高相关系数为 0.76, 平均波周期相关系数为 0.60, 两者都呈现明显的相关性, 在个别时间由于受船行波、湖上作业等影响, 存在较大差别, 总体验证结果表明模拟值能较准确地反映出波高与周期随时间的变化情况. 模型验证时间为 2018 年 8 月 9 日—9 月 9 日, 该期间

风速值介于  $0.10 \sim 8.07 \text{ m/s}$  (2018 年最大风速), 风向介于  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 由此可见, 利用 SWAN 风浪模型可以模拟不同风速大小和风向下的巢湖风浪变化情况, 模拟的巢湖波高和周期能够很好地反映出巢湖的实际风浪情况, 因此可以采用 SWAN 风浪模型开展巢湖风浪特征的模拟研究与分析.

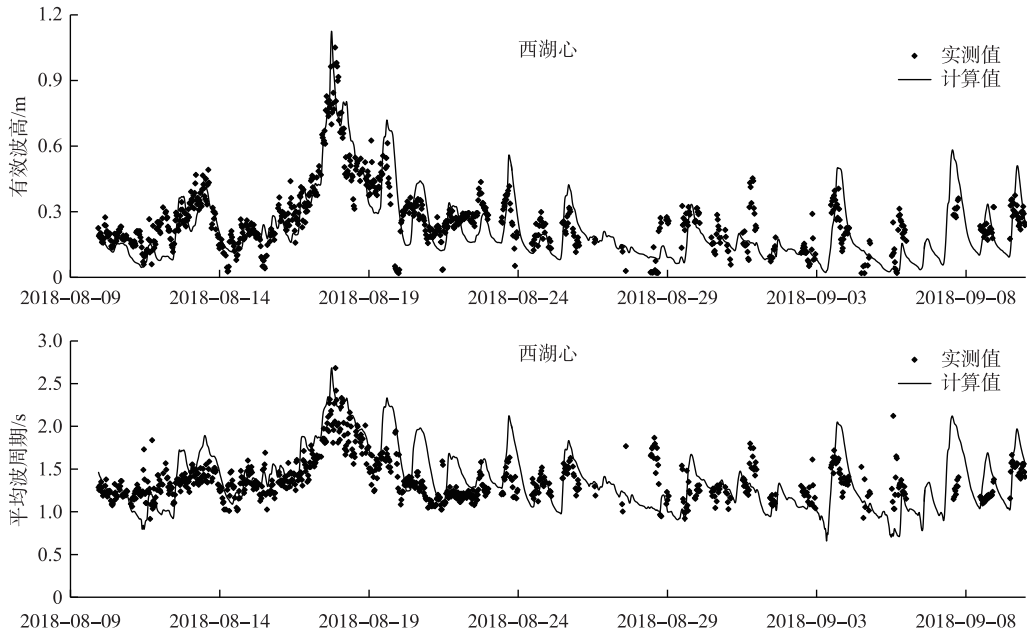


图 4 2018 年 8 月 9 日 22:30—9 月 9 日 23:30 期间风浪计算有效波高和平均波周期与实测值对比  
Fig.4 Comparison between the calculated values and the observation values of wave height and wave period during 22:30 August 9th and 23:30 September 9th of 2018

### 3 巢湖风浪特征

浅水湖泊在风浪作用下一方面可以引起底泥再悬浮和湖底内源释放, 严重影响湖泊的水质, 另一方面会导致水体垂向混合增加, 对藻类的垂向迁移产生影响, 风浪的强度、范围和时间决定了蓝藻水华的时空分布<sup>[37]</sup>. 风浪的有效波高、平均波周期是表征风浪强度的重要波要素, 其变化和分布情况对于我们分析风浪对巢湖的环境效应(如底泥悬浮、营养盐释放以及藻类水华等)至关重要.

#### 3.1 有效波高变化及分布特征

根据 2018 年巢湖风浪有效波高计算结果, 分湖区进行统计, 图 5 为月平均有效波高和月最大有效波高月变化情况. 巢湖全湖 2018 年有效波高平均值为  $0.16 \text{ m}$ , 最大月平均有效波高出现在 4 月, 为  $0.22 \text{ m}$ , 最小值出现在 11 月, 为  $0.11 \text{ m}$ , 变化幅度为  $0.11 \text{ m}$ , 约为 4 月最大值的 52%, 月间差异明显; 月变化看, 2018 年月平均有效波高总体呈现春季(3、4 月)风浪大, 秋季(9、10、11 月)风浪小的特点. 分湖区来看, 整体中巢湖略大, 东巢湖次之, 西巢湖最小; 东巢湖、中巢湖、西巢湖 2018 年平均有效波高分别为  $0.16$ 、 $0.17$ 、 $0.15 \text{ m}$ , 最大值出现在 4 月, 分别为  $0.23$ 、 $0.23$ 、 $0.21 \text{ m}$ , 最小值出现在 11 月, 分别为  $0.11$ 、 $0.11$ 、 $0.10 \text{ m}$ , 不同湖区月均值随时间变化与整个巢湖变化规律一致. 而月最大有效波高随时间变化与月均值明显不同, 巢湖全湖 2018 年月最大有效波高最大值为  $1.28 \text{ m}$ , 出现在 1 月份的东巢湖, 最小值为  $0.50 \text{ m}$ , 出现在 11 月份的西巢湖; 整体看, 不同月份, 月最大有效波高主要出现在东巢湖或中巢湖(中巢湖与东巢湖交界处附近), 东巢湖与中巢湖值接近, 西巢湖最小; 月变化看, 东巢湖、中巢湖、西巢湖, 1 月份最大, 分别为  $1.28$ 、 $1.27$ 、 $1.18 \text{ m}$ , 其次为台风等大风天气频发的夏季(7、8 月), 秋季与月平均有效波高相似, 风浪较小, 其中 11 月份达到最小值, 分别为  $0.54$ 、 $0.54$ 、 $0.50 \text{ m}$ , 分别只有 1 月份最大值的 42%、42%、43%, 月变化差别显著, 总体看 9—12 月份巢湖月最

大有效波高处于一个较低值水平.

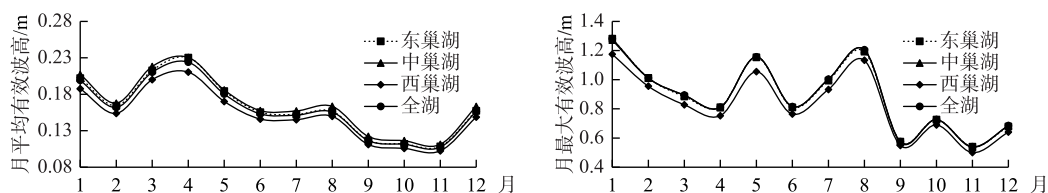


图 5 2018 年巢湖月平均有效波高和月最大有效波高变化情况

Fig.5 The change of monthly average significant wave height and monthly maximum significant wave height for Lake Chaohu in 2018

根据 2018 年巢湖风浪有效波高计算结果,图 6 为 2018 年月平均有效波高在巢湖的分布情况. 总体看,近岸受地形、水深、岸线遮蔽风的影响,月均有效波高值一般较小. 空间上各不同湖区月均有效波高的大值主要分布于湖心水域,西巢湖月均有效波最大值出现在西湖心水域,空间上较大值在西湖心附近水域呈椭圆形分布;西巢湖与中巢湖过渡区域由于受姥山岛以及岸线的影响,月均有效波高值一般略小于各湖区湖心水域波高值;中巢湖与东巢湖月均有效波高最大值一般出现在中巢湖与东巢湖连接处的湖心附近水域,空间上较大值在中巢湖与东巢湖的连通水域呈舌状分布. 时间上与图 5 中月平均有效波高随时间变化一致,4 月份整个巢湖月平均有效波高相较其他月份值均大,其中中巢湖和东巢湖大部分区域月平均有效波高较大,而西巢湖略小,其中东巢湖月平均有效波高大于 0.20、0.22、0.24 和 0.26 m 的面积为 234.08、198.24、132.32 和 8.64 km<sup>2</sup>,分别占到整个东巢湖面积的百分比为 85.51%、72.41%、48.33% 和 3.16%,可以看出超过 85% 以上的东巢湖区域 4 月月平均有效波高大于 0.20 m;中巢湖月平均有效波高大于 0.20、0.22、0.24 和 0.26 m 的面积为 196.16、166.56、107.52 和 10.56 km<sup>2</sup>,分别占到整个中巢湖面积的百分比为 86.64%、73.57%、47.49% 和 4.66%,可以看出超过 86% 以上的中巢湖区域 4 月月平均有效波高大于 0.20 m;而西巢湖月平均有效波高大于 0.20、0.22、0.24 和 0.26 m 的面积为 167.20、111.04、16.48 和 0 km<sup>2</sup>,分别占到整个西巢湖面积的百分比为 72.37%、48.06%、7.13% 和 0,西巢湖 4 月月均有效波高没有超过 0.26 m 的区域,其他超过 0.20、0.22、0.24 m 强度的有效波高分布区域占比也相较中巢湖与东巢湖明显偏小. 11 月份巢湖月平均有效波高相较其他月明显偏小,最大值只有 0.12 m,只占 4 月份月均有效波高最大值 0.26 m 的 47%,差别显著;不同湖区值分布与其他月份相似,中巢湖和东巢湖大部分区域月平均有效波高较大,而西巢湖略小;其中东巢湖月平均有效波高大于 0.06、0.08、0.10 和 0.12 m 的面积为 273.44、263.52、217.60 和 31.04 km<sup>2</sup>,分别占到整个东巢湖面积的百分比为 99.88%、96.26%、79.49% 和 11.34%,可以看出超过 79% 以上的东巢湖区域 11 月月平均有效波高大于 0.10 m;中巢湖月平均有效波高大于 0.06、0.08、0.10 和 0.12 m 的面积为 226.24、222.24、197.44 和 41.12 km<sup>2</sup>,分别占到整个中巢湖面积的百分比为 99.93%、98.16%、87.21% 和 18.16%,可以看出超过 87% 以上的中巢湖区域 11 月月平均有效波高大于 0.10 m;而西巢湖月平均有效波高大于 0.06、0.08、0.10 和 0.12 m 的面积为 229.92、218.08、156.48 和 0 km<sup>2</sup>,分别占到整个西巢湖面积的百分比为 99.52%、94.39%、67.73% 和 0,西巢湖 11 月月平均有效波高没有超过 0.12 m 的区域,其他 0.10、0.08 m 强度的有效波高分布区域占比也相较中巢湖与东巢湖明显偏小,超过 0.10 m 的区域只占到整个西巢湖的 68%,远小于中巢湖与东巢湖.

### 3.2 波周期变化及分布特征

根据 2018 年巢湖风浪有效波高计算结果,分湖区进行统计,图 7 为月平均波周期和月最大波周期随月变化情况(此处波周期为不同湖区平均波周期 T1 的平均值). 巢湖全湖 2018 年平均波周期为 1.22 s,最大月平均波周期出现在 4 月,为 1.36 s,最小值出现在 11 月份,为 1.06 s,变化幅度为 0.30 s,为 4 月份最大值的 22% 左右,可以看出变化幅度不及有效波高显著;从月变化来看,与有效波高变化趋势相似,春季(3—5 月)风浪周期较大,秋季(9—11 月)风浪周期小. 分湖区来看,平均波周期整体中巢湖值最大,东巢湖次之,西巢湖最小;东巢湖 2018 年月平均波周期平均值为 1.23 s,最大值出现在 4 月份,为 1.39 s,最小值出现在 11 月



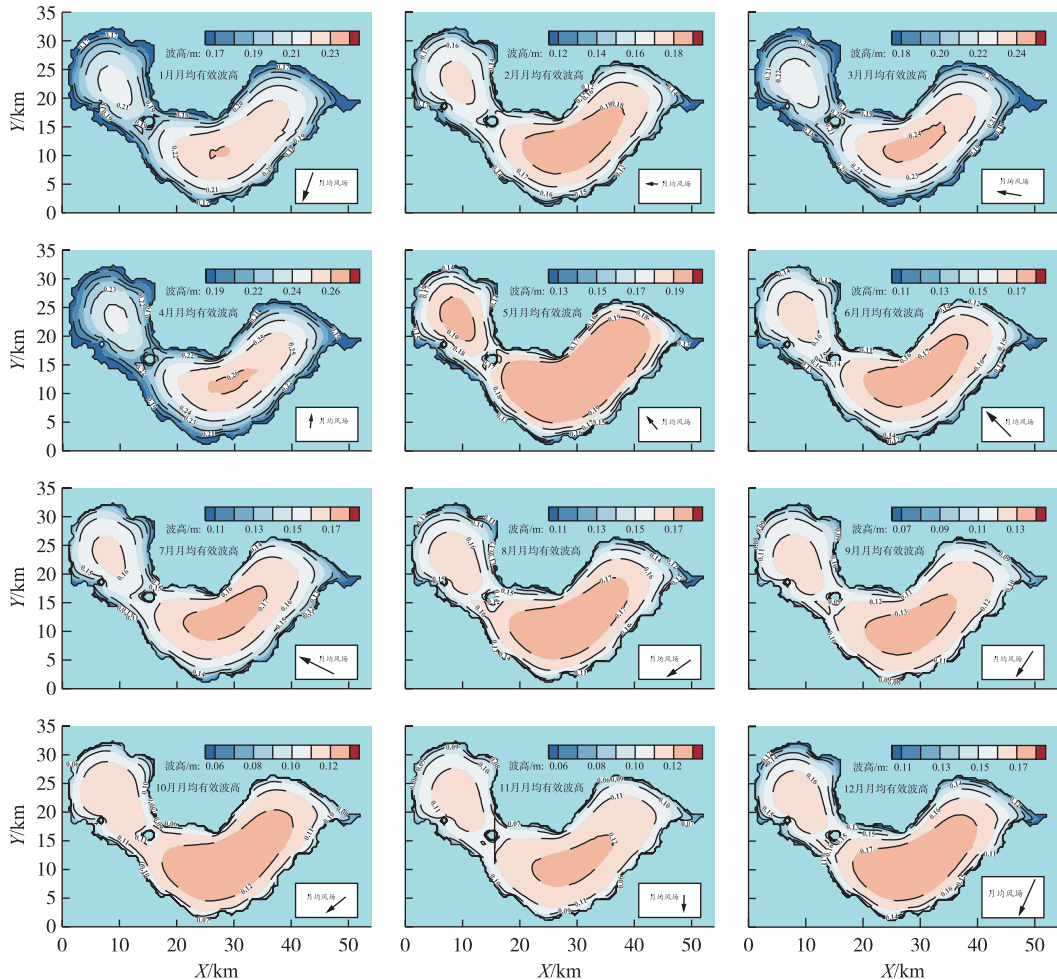


图 6 2018 年巢湖月平均有效波高分布

Fig.6 Spatial distribution of monthly average significant wave height for Lake Chaohu in 2018

份,为 1.05 s,月变化幅度为最大值的 25%;中巢湖 2018 年月平均波周期平均值为 1.26 s,比东巢湖略大,最大值出现在 3 月份,为 1.39 s,最小值出现在 11 月份,为 1.09 s,月变化幅度为最大值的 21%;西巢湖 2018 年月平均波周期平均值为 1.19 s,最大值出现在 3 月份,为 1.32 s,最小值出现在 11 月份,为 1.04 s,比东巢湖和中巢湖值偏小,月变化幅度为最大值的 21%。不同湖区月均值随时间变化与整个巢湖变化规律相似,但具体较大值出现月份略有差异。而月最大波周期随时间变化与月均值变化规律不同,巢湖全湖 2018 年月最大波周期最大值为 2.85 s,出现在 8 月份的中巢湖,最小值为 2.00 s,出现在 11 月份的西巢湖;整体上看,不同月份,月最大波周期主要出现在东巢湖或中巢湖,东巢湖和中巢湖较大,西巢湖最小;整体秋季较小,夏季普遍较大,冬末(1—2 月)也会出现较大值,月变化差异显著,但比有效波高月变化差异减小。

根据 2018 年巢湖风浪有效波高计算结果,图 8 为 2018 年不同月份月平均波周期在巢湖的分布情况。总体看,空间分布上,受近岸地形、水深的影响,月平均波周期最大值一般出现在远离近岸的水域,结合月均风矢量变化情况可知,月均波周期在巢湖不同湖区的分布范围受风向的影响显著,各不同湖区月均波周期的大值主要分布于湖心偏下风向的水域。时间上与图 7 中月平均波周期随时间变化一致,4 月份整个巢湖月平均波周期相较其他月份值大,中巢湖和东巢湖大部分区域月平均波周期较大,而西巢湖波周期略小,月平均波周期最大值为 1.46 s,出现在东巢湖靠近中巢湖的湖心水域;其中东巢湖月平均波周期大于 1.30 s 的面

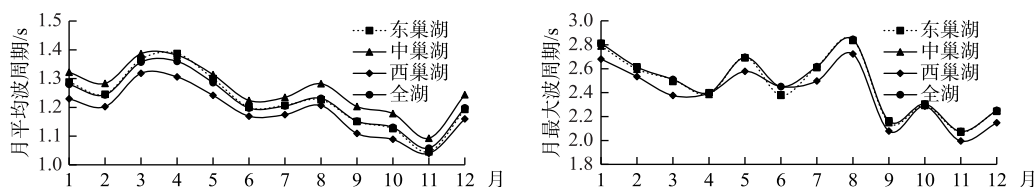


图 7 2018 年巢湖月平均波周期和月最大波周期变化情况

Fig.7 The change of monthly average wave period and monthly maximum wave period for Lake Chaohu in 2018

积为 252.64 km<sup>2</sup>, 占到整个东巢湖面积的 92.29%; 中巢湖月平均波周期大于 1.30 s 的面积为 201.28 km<sup>2</sup>, 占到整个中巢湖面积的 88.90%; 而西巢湖月平均波周期大于 1.30 s 的面积为 150.24 km<sup>2</sup>, 只占到整个西巢湖面积的 65.03%, 而且西巢湖 4 月份月均波周期没有超过 1.45 s, 超过 1.40 s 的区域也仅占到 0.07%, 明显比东巢湖和中巢湖偏低。11 月份月平均波周期相较于其他月份明显偏小, 最大值为 1.12 s, 约为 4 月份月均波周期最大值的 77%, 且受风向影响, 较大值主要分布于巢湖不同湖区的南部水域, 其中中巢湖较大值的分布范围明显比东巢湖和西巢湖都大; 东巢湖月平均波周期大于 1.00 s 的面积为 242.72 km<sup>2</sup>, 占到整个东巢湖面积的 88.66%; 中巢湖月平均波周期大于 1.00 s 的面积为 219.20 km<sup>2</sup>, 占到整个中巢湖面积的 96.82%, 月均波周

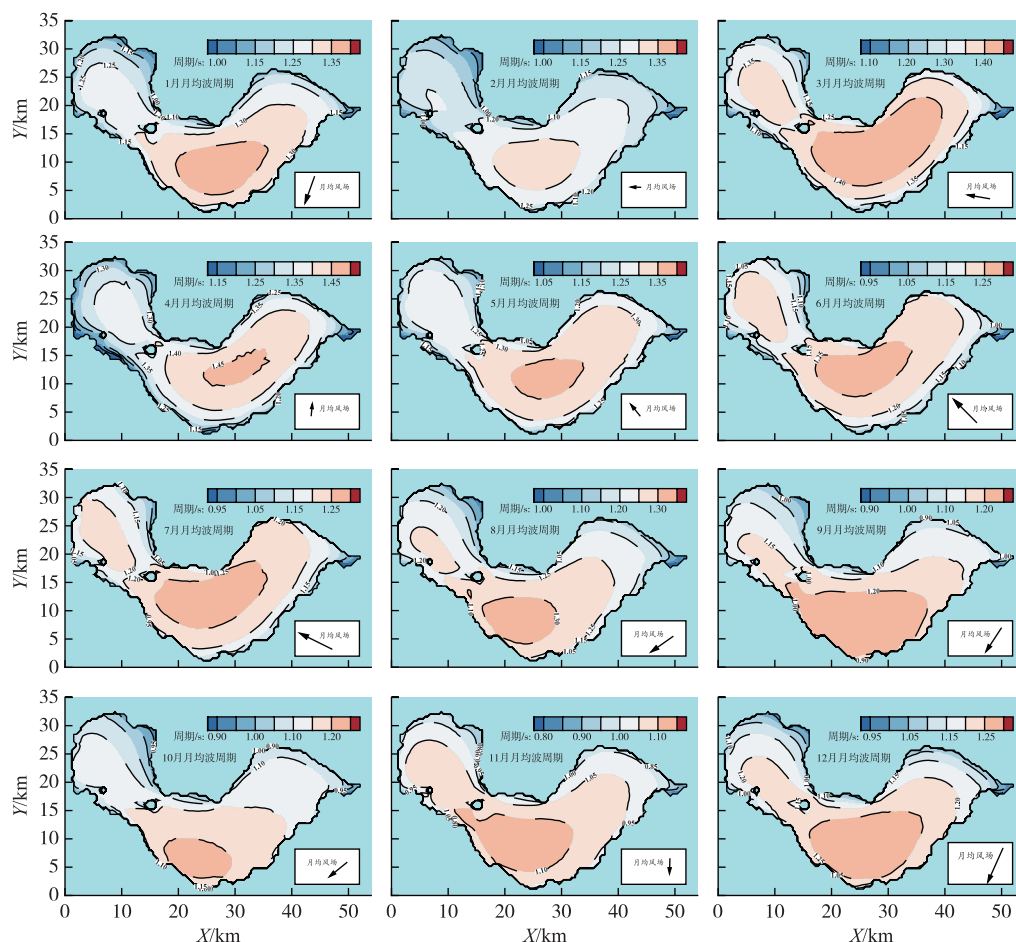


图 8 2018 年巢湖月平均波周期分布

Fig.8 Spatial distribution of monthly average wave period for Lake Chaohu in 2018



期大于 1.05 s 的区域占比已超过 90%,且一半以上的中巢湖水域月均波周期大于 1.10 s;而西巢湖月均波周期大于 1.00 s 的面积为 186.56 km<sup>2</sup>,只占到整个西巢湖面积的 80.75%,大于 1.10 s 的面积只占整个西巢湖的 2.42%,可以看出不同级别的波周期分布区域占比相比较东巢湖和中巢湖都显著降低.

4 讨论

风浪是湖泊重要的水动力因子,风浪作用会导致水体垂向混合增加,进一步对藻类的垂向迁移产生影响,根据研究,风浪的强度、范围和时间决定了蓝藻水华的时空分布<sup>[37]</sup>. 在藻类生物量一定的条件下,风浪将是决定湖泊蓝藻水华“暴发”与否和程度的关键因子<sup>[38]</sup>. 根据太湖蓝藻研究结果,当风浪波高<6.2 cm 时,蓝藻以水平迁移为主,并在主要风向的下风向处堆积,有利于蓝藻的积聚和蓝藻水华的形成;当波高>6.2 cm 时,蓝藻以垂直迁移为主,不利于蓝藻水华的形成和暴发<sup>[37,39]</sup>. 虽然关于巢湖蓝藻水华暴发与风浪的关系研究还比较少,但同样作为浅水湖泊,势必会有相似的影响规律,差别可能存在于风浪强度的界定上.

根据前述分析,计算出巢湖 2018 年平均有效波高为 0.16 m,我们以 0.16 m 为强度界限,定义平均有效波高超过 0.16 m 的时间占比(即占每个月总时间的百分比)为参数  $H_{st}$ ,最大有效波高超过 0.16 m 的时间占比(即占每个月总时间的百分比)为  $H_{mr}$ ,统计 2018 年每个月不同湖区  $H_{st}$  和  $H_{mr}$ ,如表 1 所示. 可以看出,不同月份及湖区有效波高超过 0.16 m 的时间占比是不一致的,总体看 9—11 月份时间占比最小,全湖按月平均有效波高计算的时间占比只有 28.47%、27.82%、27.78%,即使按月最大有效波高计算也只有不到 33%,表明 9—11 月份巢湖风浪强度(有效波高)较小,因此将有利于蓝藻水华的出现,不同湖区看,西巢湖最小,中巢湖与东巢湖接近,因此西巢湖蓝藻水华出现的概率将会更高,这与巢湖蓝藻水华覆盖面积的遥感信息相匹配. 根据遥感数据解译,2018 年 9 月巢湖蓝藻水华暴发情况较为严重,共启动了 3 次红色预警,共发生 5 次面积大于 100 km<sup>2</sup>的水华,2 次超 300 km<sup>2</sup>的蓝藻水华都位于巢湖西北部和中部,即有效波高较小的水域. 由此我们可以推测,在其他条件适宜的条件下,6—8 月份较大有效波高的时间占比也比较低,也易产生蓝藻水华,其中西巢湖产生的概率更高;由于 3—4 月接近一半的时间有效波高值大于 0.16 m,因此不易产生蓝藻水华;而 12—2 月份由于温度较低,藻类处于休眠状态,且超过 40% 以上的时间月最大有效高值大于 0.16 m,因此也很少会产生蓝藻水华.

表 1 2018 年巢湖不同湖区有效波高超过 0.16 m 的时间占比统计\*  
Tab.1 The time proportion of significant wave height which exceeds 0.16 m in different lake zones of Lake Chaohu in 2018

时间	类别	东巢湖	中巢湖	西巢湖	全巢湖	时间	类别	东巢湖	中巢湖	西巢湖	全巢湖
1 月	$H_{st}/\%$	44.09	44.89	43.28	44.22	7 月	$H_{st}/\%$	37.23	38.17	36.56	37.77
	$H_{mr}/\%$	47.72	47.98	45.97	47.98		$H_{mr}/\%$	40.99	41.13	39.52	41.26
2 月	$H_{st}/\%$	39.58	41.07	37.35	39.58	8 月	$H_{st}/\%$	35.75	37.1	34.01	36.02
	$H_{mr}/\%$	44.79	44.64	42.56	44.79		$H_{mr}/\%$	41.26	41.67	39.52	41.67
3 月	$H_{st}/\%$	57.8	58.74	56.32	57.12	9 月	$H_{st}/\%$	28.33	29.03	27.08	28.47
	$H_{mr}/\%$	63.71	63.71	61.69	63.98		$H_{mr}/\%$	32.78	32.5	30.97	32.78
4 月	$H_{st}/\%$	54.72	55.14	52.36	54.44	10 月	$H_{st}/\%$	27.55	29.44	25.67	27.82
	$H_{mr}/\%$	60.56	60.28	57.64	60.69		$H_{mr}/\%$	31.85	31.72	30.38	31.99
5 月	$H_{st}/\%$	45.7	47.31	43.55	45.43	11 月	$H_{st}/\%$	27.22	28.06	25.83	27.78
	$H_{mr}/\%$	50.67	50.67	48.79	50.67		$H_{mr}/\%$	31.25	31.11	29.31	31.25
6 月	$H_{st}/\%$	36.94	37.64	34.72	36.94	12 月	$H_{st}/\%$	37.01	37.01	35.13	36.07
	$H_{mr}/\%$	41.39	41.39	39.86	41.53		$H_{mr}/\%$	40.38	40.38	38.76	40.65

\* 东巢湖、中巢湖、西巢湖平均水深分别为 3.07、2.92、2.54 m.

5 结论

本文基于实测数据,验证了 SWAN 风浪模型在巢湖风浪模拟的适用性,利用验证好的风浪模型,开展了

2018年巢湖风浪变化及分布特征,得到以下结论:

1) 本文设置的SWAN模型可以很好地模拟巢湖风浪参数(有效波高和平均波周期)随时间的变化情况,可以用于巢湖风浪特征的模拟研究。

2) 巢湖全湖2018年月平均有效波高为0.16 m,不同月份间差异明显,4月最大为0.22 m,11月最小为0.11 m,月变化幅度为0.11 m,约为最大值的52%;整体中巢湖略大,东巢湖次之,西巢湖值最小。月最大有效波高主要出现在东巢湖或中巢湖,巢湖全湖2018年月最大有效波高最大值为1.28 m,出现在1月份的东巢湖,最小值为0.50 m,出现在11月份的西巢湖,变化幅度为0.78 m,约为最大值的61%。巢湖整体春季风浪较大,秋季风浪较小,月间变化差异显著。近岸月均有效波高值一般较小,较大值在西湖区附近水域呈椭圆形分布,在中巢湖与东巢湖的连通水域呈舌状分布;不同月份较大值在不同湖区的分布范围比例,西巢湖最小,中巢湖最大。

3) 巢湖全湖2018年平均波周期为1.22 s,4月最大(为1.36 s),11月最小(为1.06 s),月变化幅度为0.30 s,约为最大值的22%左右,月间变化差异不及有效波高显著;整体中巢湖值最大,东巢湖值次之,西巢湖值最小,不同湖区月变化幅度分别为最大值的25%、21%、21%。巢湖全湖2018年月最大波周期最大值为2.85 s,出现在8月份的中巢湖,最小值为2.00 s,出现在1月份的西巢湖,不同湖区变化规律及幅度相似,约为最大值的27%,也不及有效波高月间差异显著。空间分布上,月均波周期在巢湖不同湖区的分布范围受风向的影响显著,各不同湖区月均波周期的大值主要分布于湖心偏下风向的水域;不同湖区较大值的分布范围比例,中巢湖与东巢湖较大,西巢湖最小。

4) 不同月份及湖区较大有效波高出现的时间占比是不一致的,总体看9—11月份时间占比最小,表明9—11月份巢湖风浪强度(有效波高)较小,因此将有利于蓝藻水华的出现;6—8月份较大有效波高的时间占比次之,也易产生蓝藻水华;3—4月较大有效波高时间占比较大,不易产生蓝藻水华;不同湖区看,西巢湖最小,中巢湖与东巢湖接近,因此西巢湖蓝藻水华出现的概率将会更高。

致谢:感谢本研究团队(王岩、郭西亚、崔健)在野外观测中给予的帮助。

## 6 参考文献

- [1] Sheng YP, Lick W. The transport and resuspension of sediments in a shallow lake. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1979, **84**(C4): 1809-1826. DOI: 10.1029/JC084iC04p01809.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Qin BQ, Fan CX. Exploration of conceptual model of nutrient release from inner source in large shallow lake. *China Environmental Science*, 2002, **22**(2): 150-153. [秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨. 中国环境科学, 2002, **22**(2): 150-153.]
- [6] 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.]
- [7] Luo LC, Qin BQ. Comparison between wave effects and current effects on sediment resuspension in Lake Taihu. *Hydrology*, 2003, **23**(3): 1-4. [罗激葱, 秦伯强. 太湖波浪与潮流对沉积物再悬浮不同影响的研究. 水文, 2003, **23**(3): 1-4.]
- [8] Luo LC, Qin BQ, Hu WP *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. [罗激葱, 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.]
- [9] Mihelčić G, Šurija B, Juračić M *et al.* History of the accumulation of trace metals in sediments of the saline Rogoznica

- Lake (Croatia). *Science of the Total Environment*, 1996, **182** (1/2/3): 105-115. DOI: 10.1016/0048-9697(95)05058-2.
- [10] Pejrup M, Valeur J, Jensen A. Vertical fluxes of particulate matter in Aarhus Bight, Denmark. *Continental Shelf Research*, 1996, **16**(8): 1047-1064. DOI: 10.1016/0278-4343(95)00044-5.
- [11] van der Loeff MMR, Boudreau BP. The effect of resuspension on chemical exchanges at the sediment-water interface in the deep sea—A modelling and natural radiotracer approach. *Journal of Marine Systems*, 1997, **11**(3/4): 305-342. DOI: 10.1016/S0924-7963(96)00128-5.
- [12] Matthai C, Birch GF, Jenkinson A *et al.* Physical resuspension and vertical mixing of sediments on a high energy continental margin (Sydney, Australia). *Journal of Environmental Radioactivity*, 2001, **52**(1): 67-89. DOI: 10.1016/S0265-931X(00)00104-1.
- [13] Luettich RA Jr, Harleman DRF, Somlyódy L. Dynamic behavior of suspended sediment concentrations in a shallow lake perturbed by episodic wind events. *Limnology and Oceanography*, 1990, **35**(5): 1050-1067. DOI: 10.4319/lo.1990.35.5.1050.
- [14] Søndergaard M, Jensen JP, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 2003, **506/507/508/509**(1/2/3): 135-145. DOI: 10.1023/b:hydr.0000008611.12704.dd.
- [15] Brázdková M, Hejzlar J, Nedoma J. Phosphorus uptake by suspended and settling seston in a stratified reservoir. *Hydrobiologia*, 2003, **504**(1/2/3): 39-49. DOI: 10.1023/b:hydr.0000008506.29287.11.
- [16] Qiao SL, Du JM, Chen GP *et al.* Calculation method and characteristics of wind - wave in lake. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1996, (3): 189-197. [乔树梁, 杜金曼, 陈国平等. 湖泊风浪特性及风浪要素的计算. 水利水运科学研究, 1996, (3): 189-197.]
- [17] Pang Y, Pu PM, Hu WP *et al.* Analysis of the wind wave spectrum character in the north bank of Taihu Lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1996, **27**(5): 531-537. [逢勇, 濮培民, 胡维平等. 太湖北岸风浪谱的特征分析. 海洋与湖沼, 1996, **27**(5): 531-537.]
- [18] Luo LC, Qin BQ, Hu WP *et al.* Wave characteristics in Lake Taihu. *Journal of Hydrodynamics*, 2004, **19**(5): 664-670. [罗激葱, 秦伯强, 胡维平等. 太湖波动特征分析. 水动力学研究与进展: A 辑, 2004, **19**(5): 664-670.]
- [19] Hu WP, Hu CH, Zhang FB *et al.* On the empirical wind-wave height model in northern Lake Taihu, China. *J Lake Sci*, 2005, **17**(1): 41-46. DOI: 10.18307/2005.0107. [胡维平, 胡春华, 张发兵等. 太湖北部风浪波高计算模式观测分析. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 41-46.]
- [20] Fan CX ed. Environmental geochemistry and eutrophication of lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Beijing: Science Press, 2007. [范成新. 长江中下游湖泊环境地球化学与富营养化. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [21] Group TW. The WAM model—A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 1988, **18**(12): 1775-1810. DOI: 10.1175/1520-0485(1988)0181775:twmtgo>2.0.co;2.
- [22] Tolman HL. A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents. *Journal of Physical Oceanography*, 1991, **21**(6): 782-797. DOI: 10.1175/1520-0485(1991)0210782:atgmfw>2.0.co;2.
- [23] Benoit M, Marcos F, Becq F. Development of a third generation shallow-water wave model with unstructured spatial meshing. Proceedings 25th International Conference on Coastal Engineering. Orlando, Florida, United States: ASCE, 1996: 465-478.
- [24] Booij N, Ris RC, Holthuijsen LH. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, **104**(C4): 7649-7666. DOI: 10.1029/98jc02622.
- [25] Li YP, Pang Y, Liu XP *et al.* Numerical modeling of waves in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2008, **20**(1): 117-122. DOI: 10.18307/2008.0118. [李一平, 逢勇, 刘兴平等. 太湖波浪数值模拟. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 117-122.]
- [26] Tao RY. Analysis of wave characteristic and application on wave simulation with wind fields in Lake Taihu [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012. [陶蓉茵. 不同风场条件下太湖波浪数值模拟的研究及其应用[学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.]
- [27] Xu XZ, Tao RY, Zhao QH *et al.* Wave characteristics and sensitivity analysis of the wind field in a large shallow lake—Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2013, **25**(1): 55-64. DOI: 10.18307/2013.0108. [许遐祯, 陶蓉茵, 赵巧华等. 大型浅水湖泊太湖波浪特征及其对风场的敏感性分析. 湖泊科学, 2013, **25**(1): 55-64.]

- [28] Wang Z, Wu TF, Zou H *et al.* Changes in seasonal characteristics of wind and wave in different regions of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2016, **28**(1): 217-224. DOI: 10.18307/2016.0125. [王震, 吴挺峰, 邹华等. 太湖不同湖区风浪的季节变化特征. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 217-224.]
- [29] Jin KR, Ji ZG. Calibration and verification of a spectral wind-wave model for Lake Okeechobee. *Ocean Engineering*, 2001, **28**(5): 571-584. DOI: 10.1016/s0029-8018(00)00009-3.
- [30] Graf M, Sprenger M, Lohmann U *et al.* Evaluating the suitability of the *Swan*/COSMO-2 model system to simulate short-crested surface waves for a narrow lake with complex bathymetry. *Meteorologische Zeitschrift*, 2013, **22**(3): 257-272. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0442.
- [31] Booij N, Ris RC, Holthuijsen LH. A third-generation wave model for coastal regions; 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, **104**(C4): 7649-7666. DOI: 10.1029/98jc02622.
- [32] Phillips OM. On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of Fluid Mechanics*, 1957, **2**(5): 417. DOI: 10.1017/s0022112057000233.
- [33] Miles JW. On the generation of surface waves by shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 1957, **3**(2): 185. DOI: 10.1017/s0022112057000567.
- [34] SWAN Team. SWAN Cycle III version 40.51 user manual. Delft University of Technology. The Netherlands: Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section, 2006.
- [35] Cavaleri L, Rizzoli PM. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1981, **86**(C11): 10961. DOI: 10.1029/jc086ic11p10961.
- [36] Yan L ed. An improved wind input source term for third generation ocean wave modelling. De Bilt, 1987.
- [37] Cao HS, Kong FX, Luo LC *et al.* Effects of wind and wind-induced waves on vertical phytoplankton distribution and surface blooms of *Microcystis aeruginosa* in Lake Taihu. *Journal of Freshwater Ecology*, 2006, **21**(2): 231-238. DOI: 10.1080/02705060.2006.9664991.
- [38] Qin BQ, Yang GJ, Ma JR *et al.* Dynamics of variability and mechanism of harmful cyanobacteria bloom in Lake Taihu, China. *Chinese Science Bulletin*, 2016, **61**(7): 759-770. DOI: 10.1360/N972015-00400. [秦伯强, 杨桂军, 马健荣等. 太湖蓝藻水华“暴发”的动态特征及其机制. 科学通报, 2016, **61**(7): 759-770.]
- [39] Wu TF, Qin BQ, Zhu GW *et al.* Dynamics of cyanobacterial bloom formation during short-term hydrodynamic fluctuation in a large shallow, eutrophic, and wind-exposed Lake Taihu, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(12): 8546-8556. DOI: 10.1007/s11356-013-1812-9.