

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*

李 未, 秦伯强, 张运林, 朱广伟

(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: 本文建立了一种富营养化浅水湖泊藻源性湖泛的短期数值预报方法. 选取表征藻源性湖泛的代表性指标叶绿素 a 和溶解氧浓度作为预测变量, 以天气预报中的风场为驱动力, 求解浅水湖泊三维水动力—水质耦合数值模型, 计算未来 3 d 浅水湖泊叶绿素 a 和溶解氧浓度的时空分布, 然后结合未来 3 d 的气象因子信息建立经验公式, 计算湖泛易发水域发生湖泛的概率, 并进一步确定湖泛发生位置和面积. 以太湖为例, 采用构建的方法于 2013—2014 年夏、秋季对太湖 7 段湖泛易发水域的湖泛发生概率及发生面积进行未来 3 d 的预测预报, 预报正确率在 80% 以上.

关键词: 藻源性湖泛; 数值模型; 短期预报; 浅水湖泊; 太湖

Numerical forecasting of short-term algae-induced black bloom in eutrophic shallow lake: A case study of Lake Taihu

LI Wei, QIN Boqiang, ZHANG Yunlin & ZHU Guangwei

(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 paper, an attempt to forecast the algae-induced black bloom in eutrophic shallow lake was documented. Taken chlorophyll-a concentration and dissolved oxygen concentration as the representative variables, a three-dimensional, coupled hydrodynamic-water quality numerical model was built. By combining calculation and prediction of the hydrological and meteorological scenarios over the ensuing 3 days, the dynamic distributions of algae concentration and dissolved oxygen concentration scenarios in Lake Taihu were simulated. Black Bloom probabilities were then predicted by a forecast empirical model that included the weight of algal biomass, dissolved oxygen concentration, wind velocity, and weather condition. If the probabilities were larger than 50%, the area of black bloom should be calculated. The model was applied to predict the occurrences of the black bloom of the next 3 days in Lake Taihu from April to September in 2013 and 2014. Independent evaluations from boat survey data showed that the accuracy of these bloom forecasts was more than 80%.

Keywords: Algae-induced black bloom; numerical model; short-term forecast; shallow lake; Lake Taihu

近 20 年来,我国长江中下游地区浅水湖泊水环境问题日趋严重,在夏、秋季由湖水富营养化引发的蓝藻水华暴发时有发生,严重影响水质景观,甚至危及供水安全. 由蓝藻水华引发的“湖泛”是指湖泊富营养化水体在藻类大量暴发、积聚和死亡后,在适宜的气象、水文条件下,与底泥中的有机物在缺氧和厌氧条件下产生生化反应,释放金属类和硫醚类等硫化物,形成褐黑色伴有恶臭的“黑水团”,从而导致水体水质迅速恶化,生态系统受到严重破坏的现象^[1].

以太湖为例,1990s 以来,太湖西部湖区、北部湖区曾多次发生湖泛^[2]. 2009—2014 年春、夏季,每年发生的湖泛次数分别为 11、4、5、10、6 和 3 次,持续时间 1~6 d 不等,其中最大湖泛面积可达 17 km²,严重影响太湖水

* 国家自然科学基金项目(41471401)、科技部国际科技合作与交流专项(2015DFG91980)、国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-010)和国家自然科学基金重点项目(41230744)联合资助. 2015-03-18 收稿; 2016-01-21 收修改稿. 李未(1980~),女,博士,助理研究员;E-mail: liwei@niglas.ac.cn.

生态系统,并威胁水源地的供水安全^[3-5]. 湖泛已经成为继蓝藻水华大面积暴发以后太湖又一重要环境灾害问题,引起政府部门和研究机构的高度重视. 目前国内外学者对于蓝藻水华的预测预警技术研究较多^[6-11],但是对于湖泛的研究,多停留在跟踪性观测湖泛过程和特性^[1-2,4-5,12-17],以及室内模拟湖泛的产生,研究湖泛致黑物质组成、产生机制、消除方式等机理方面^[18-24],真正在灾害发生之前,应用于湖泛预测预警实践,并定期发布湖泛预报的较少. 为了避免水危机事件的发生,保障富营养化湖泊饮用水的安全,有必要建立一个可操作性强、时效性强的预测预警方法,在夏、秋季实现对湖泛发生概率、发生区域及面积的短期动态预测.

本文基于确定性模型的思想,建立了一种藻源性湖泛的短期预报方法. 选取表征藻源性湖泛的代表性指标叶绿素(Chl.a)浓度和溶解氧(DO)浓度,建立湖泊三维水力-水质数值耦合模型;以未来3 d天气预报中的风场作为驱动力,实时计算未来3 d全湖Chl.a和DO浓度的时空分布,结合未来3 d的气象因子(风速、降雨等)信息建立经验公式,计算湖泛易发水域发生湖泛的概率,并进一步确定湖泛发生位置和面积. 利用此模型,在2013年和2014年4—10月期间对太湖藻源性湖泛进行每3 d一次的预测预报,并通过人工巡测数据对计算结果进行检验,检验结果显示此模型可以较好地实现藻源性湖泛的预测预警.

1 数据来源与处理

在湖泛易发水域设定监测点位,对气象参数和水环境参数进行测定,为湖泛预报提供基础数据. 基于对太湖湖泛易发水域的认识^[1-2],分别在湖西、竺山湾、梅梁湾、贡湖湾以及湖东水源地5个湖区设置24个监测点(图1). 在每一点位处,采用多参数水质仪(YSI 6600-V2)(Yellow Spring Instruments, USA)测定Chl.a浓度、DO浓度、DO饱和度等水质参数,采用塞氏盘法测定水体透明度,并即时测定气温、风速、风向、水温等指标. 采集表层水样(10~30 cm深度)1 L,用于实验室内氮、磷营养盐和溶解性有机碳等指标的测定,样品的分析按照《湖泊生态系统观测方法》进行^[25].

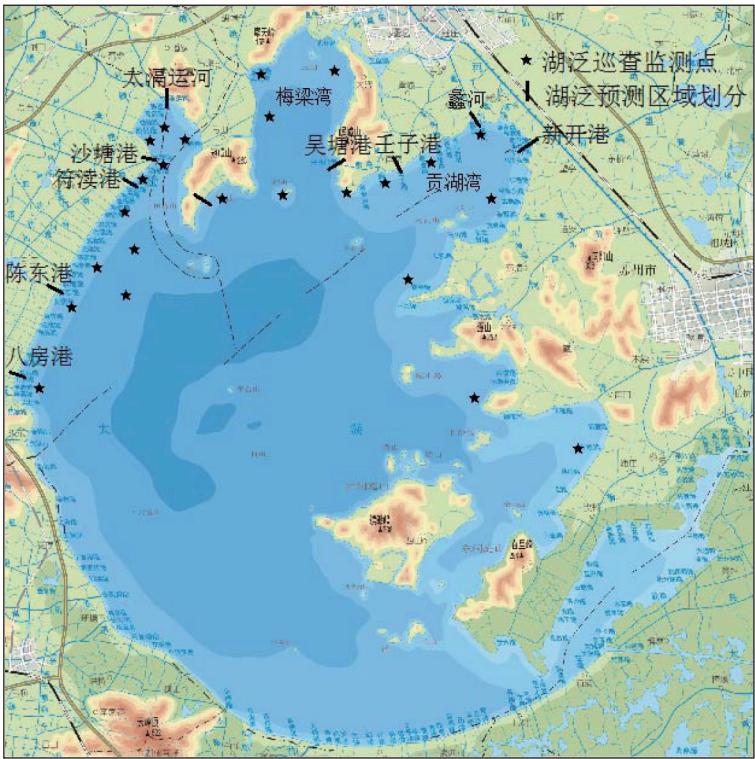


图1 太湖湖泛巡查监测点位分布及重点预测区域的划分

Fig.1 The monitoring sites and division of main forecasting regions of black bloom in Lake Taihu

利用空间网格划分和插值技术,将在监测点测定的水环境参数插值到全湖.根据对太湖湖泛易发水域地形的现场测定,将全湖划分为 6353 个计算网格(图 2).其中作为湖泛易发水域需要重点关注的西部湖区和北部湖区,网格分辨率 ≈ 300 m,其余水域网格分辨率 ≈ 1000 m.采用反距离权重插值算法^[11]将 24 个监测点位的水环境参数值插值到全湖 6353 个计算网格上,得到 Chl.a、DO 以及营养盐浓度等指标的全湖初始分布.

2 藻源性湖泛短期预报方法

选取表征藻源性湖泛的代表性指标 Chl.a 和 DO 浓度,依据其与物理因子、生化因子(风场、流场、水温、光强、营养盐)的相互作用关系,建立湖泊三维水动力-水质数值耦合模型,计算未来 3 d 浅水湖泊 Chl.a 和 DO 浓度的时空分布;结合气象参数建立概率经验公式,计算未来 3 d 湖泛易发水域发生湖泛的概率,对于发生湖泛概率较大的区域,进一步确定发生湖泛的位置和面积.

2.1 水动力模型

在 σ 坐标下,描述浅水湖泊水流运动的三维水动力守恒模型方程组为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial \sigma} - fvD = & -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gD}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' \right) + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial x} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[2A_m D \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_m D \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial v^2 D}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial \sigma} + fuD = & -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gD}{\rho_0} \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' \right) + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial y} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[A_m D \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2A_m D \frac{\partial v}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中, u 、 v 、 w 分别为沿 x 、 y 、 σ 方向的流速分量(m/s); ζ 为水位(m); $D=h+\zeta$,为全水深(m); ρ 为密度(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2); f 为柯氏力系数; A_m 和 K_m 分别为水平和垂向紊动粘性系数.

采用无结构网格下的有限体积模型对控制方程进行求解.求解区域平面采用无结构网格(三角形)剖分,使计算边界更加精确地拟合岸界;垂直方向采用 σ 坐标转换,使整个水域具有相同的垂向分层数.控制方程为时均化的 N-S 方程与封闭它的湍流闭合子模型^[26],离散方法采用有限体积思想,所有物理变量设置在三角单元的中心.采用内、外模分离技术^[27-28]对控制方程组的在每一个三角单元上的积分形式进行数值求解,先求解二维外模式获得自由表面和垂向平均流速,其中外模式的时间离散采用牛顿向前差分格式,空间离散采用二阶精度的 Roe 型数值通量^[29]和一阶精度的分片常数逼近重构方式;再求解三维内模式获得三维流场,其中时间离散采用牛顿向前差分格式,空间对流项采用二阶精度的迎风格式,垂直扩散项采用显式格式.由于内外模时间步长不同,在计算过程中必须在每一个内模步长中进行外、内模流场的一致性检验.

2.2 水质模型

在水动力要素影响下,水质参数浓度的输运方程为:

$$\frac{\partial DC}{\partial t} + \frac{\partial DuC}{\partial x} + \frac{\partial DvC}{\partial y} + \frac{\partial \omega C}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H D \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) + S_K \quad (4)$$

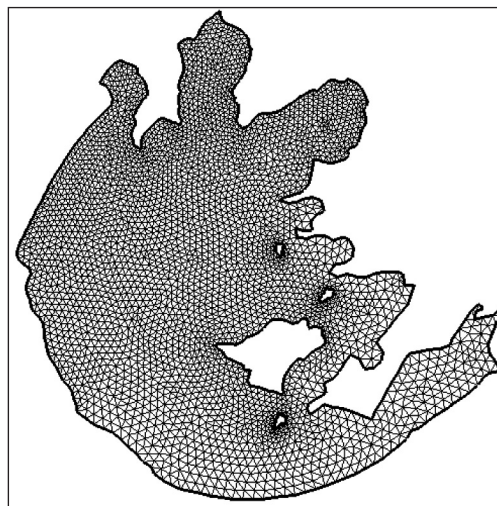


图 2 太湖湖泛预测模型空间网格划分

Fig.2 Unstructured meshes for Lake Taihu

式中, C 代表物质浓度. 当 C 为叶绿素 a 浓度时, 动力反应项 S_k 分别考虑藻类的生长、死亡和沉降作用. 当 C 为溶解氧浓度时, 动力反应项 S_k 分别考虑大气富氧、水体中光合作用对溶解氧的增加以及水生植物呼吸作用、生物降解、硝化反应耗氧和底泥需氧量对溶解氧的减少作用. 其中各项反应的具体表达形式与相关参数的取值参见文献[30-32]. 水质参数输运模型的求解过程采取与水动力模型内模式相同的离散方式.

2009—2011 年, 应用此水动力—水质耦合数值模型, 对太湖夏、秋季西、北湖区蓝藻水华在未来 3 d 的发生区域和发生概率进行预测, 平均预测精度达到 80% 以上^[11], 不仅为此水动力—水质耦合模型中相关参数的率定提供了较好的验证, 也为太湖的日常管理提供了有利的科学依据.

2.3 模型驱动力

驱动水动力—水质耦合模型运行的外力作用主要为未来 3 d 的风应力(V_x 、 V_y), V_x 、 V_y 分别为 x 、 y 方向上的风速(m/s), 可在中国天气网(<http://www.weather.com.cn/html/weather/101190201.shtml>)上进行查询.

2.4 湖泛发生概率经验公式

除了预测未来 3 d Chl.a 和 DO 浓度的分布动态以外, 在特定敏感水域(取水口、旅游区等), 对湖泛出现的概率及强度预测也十分重要. 由于藻源性湖泛的发生不仅需要较高的藻类生物量作为物质基础, 还需要较低的风速(≤ 2.6 m/s)、较高的气温(25°C 以上)和较少的降雨(连续 5~7 d 均为晴朗无降水)等适宜的气象条件作为触发因子, 而且 DO 浓度(≤ 2.0 mg/L)作为联系湖泊水文、理化和生物过程的关键因子, 是湖泛形成和消散的核心因素^[33-34]. 因此在湖泛的短期预报中, 选取在实际观测中较易获取的水体中藻类浓度、DO 浓度以及风速、降雨等气象因子, 形成夏季藻源性湖泛的概率经验公式:

$$F = f_1(N1_t) \cdot f_2(V) \cdot f_3(R) \cdot f_4(N2_t) \tag{5}$$

且 4 种因子的概率赋值分别按表 1 进行. 其中, $f_1(N1_t)$ 为由 t 时刻藻类数量引起的概率, $f_2(V)$ 为由风速条件引起的概率, $f_3(R)$ 为由降雨条件引起的概率, $f_4(N2_t)$ 为由 t 时刻 DO 浓度引起的概率. 在全湖每个计算网格上利用此概率预报模型, 可以得到全湖湖泛发生的概率分布.

表 1 Chl.a 浓度、DO 浓度、风速、降雨与湖泛发生概率
Tab.1 The probability values of black blooms caused by Chl.a concentration,
DO concentration, wind speed and rainfall

Chl.a/($\mu\text{g/L}$)	$f(N1_t)$	风力(风速/(m/s))	$f(V)$	降雨	$f(R)$	DO/(mg/L)	$f(N2_t)$
>60.0	1.0	1~2 级(0.3~3.3)	1.0	晴、多云	1.0	1.0	1.0
50.0	0.9	3 级(3.4~5.4)	0.9	阴、小雨	0.9	2.0	0.8
40.0	0.8	4 级(5.5~7.9)	0.8	阵雨、雷阵雨	0.8	4.0	0.6
20.0	0.6	5 级(8.0~10.7)	0.7	中雨	0.7	6.0	0.4
10.0	0.4	5 级以上(>10.8)	0.5	大、暴雨	0	8.0	0

2.5 湖泛发生位置和面积的确定

将太湖中容易发生湖泛的竺山湾及西部沿岸带离岸 2 km 范围水域分成 4 段: 太滬运河到沙塘港为第 1 段(太滬沙塘段), 沙塘港到符渚港为第 2 段(沙塘符渚段), 符渚港到陈东港为第 3 段(符渚陈东段), 陈东港到八房港为第 4 段(陈东八房段); 将贡湖湾北面取水口沿岸带离岸 2 km 范围分成 2 段: 吴塘门港到壬子港为第 5 段(吴塘壬子段), 蠡河到新开港为第 6 段(蠡河新开段); 将梅梁湾沿岸带作为第 7 段(图 1).

按照公式(5)所述的概率预报模型计算每区段水域内所覆盖的计算网格上湖泛发生的概率, 如果该区段存在概率大于 50% 的网格, 则预报该段水域发生湖泛; 该区段内概率大于 50% 的网格面积之和, 即发生湖泛的面积.

3 结果

2013 和 2014 年 4—10 月, 每周周一和周四利用所建立的太湖藻源性湖泛短期数值预测模型对太湖湖泛的发生进行预测预报, 预测内容包括未来 3 d 全太湖 Chl.a 和 DO 浓度的空间分布, 7 段湖泛易发水域内湖泛发生的概率及面积. 将预报结果制作成湖泛监测预警半月报(图 3), 发送至湖泊各级管理部门共 82 期.

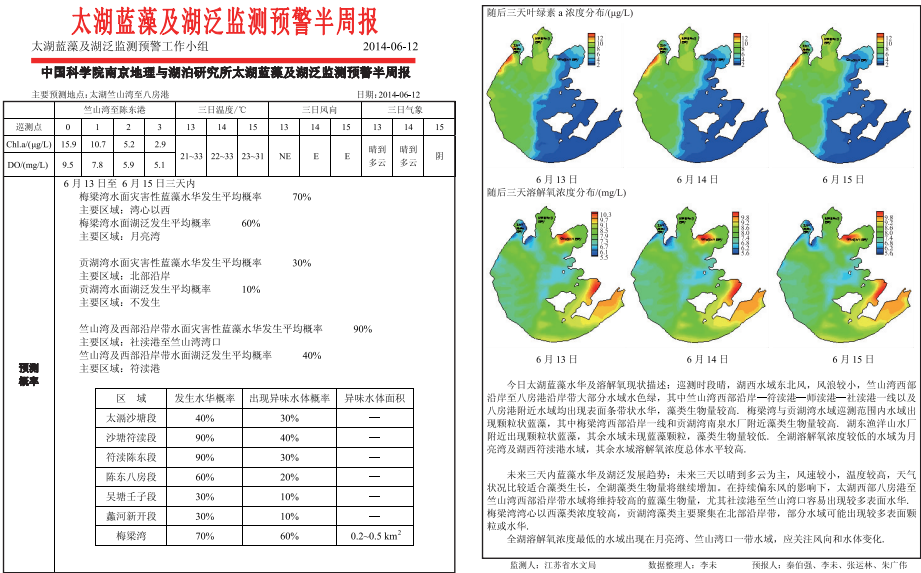


图3 太湖蓝藻及湖泛监测预警半周格式

Fig.3 Semiweekly monitoring and forecast for the cyanobacteria and black bloom in Lake Taihu

以2014年6月12日为例,对预报的计算过程进行如下说明:
为了给6月13—15日的湖泛预报提供基础数据,并对太湖各重点湖区的水质及湖泛发生情况有全面的掌握,在6月12日驾驶巡查快艇,先后至巡查点位进行现场观察和测量,并按前述反距离权重插值算法将在监测点测定的水环境参数插值到全湖作为数值模型的初始条件(图4)。根据中国天气网上显示的天气预报,6月13、14和15日蒲福风向风级分别为东北风2级、东风2级和东风2级。将初始数据与风场驱动力数据分别带入水动力—水质耦合模型进行计算,得到未来3d全湖每个计算网格内Chl.a和DO浓度随时间变化的数值(图3),即得到了全湖的时空分布(图4)。

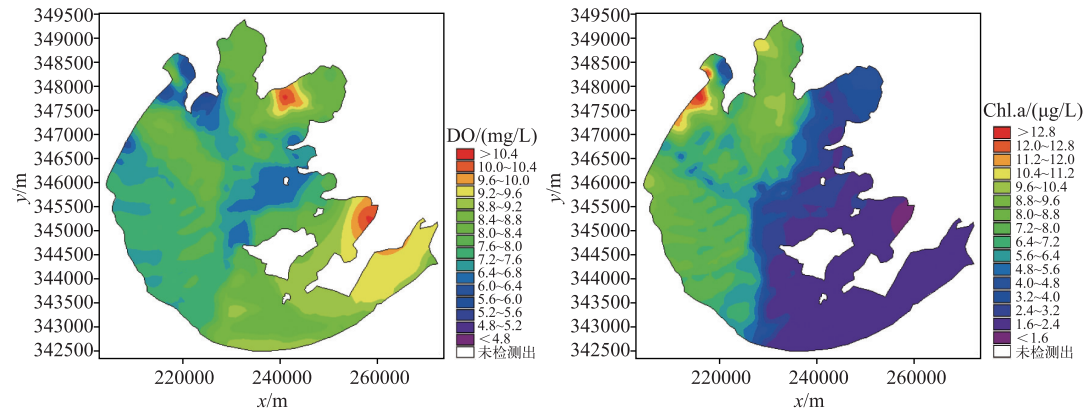


图4 2014年6月12日太湖Chl.a和DO浓度的全湖插值分布

Fig.4 Distribution of Chl.a and DO concentrations in Lake Taihu on 12 June, 2014

根据天气预报,6月13—15日风速为2级,天气分别为晴到多云、晴到多云、阴,对照表1, $f(V) = 1.0$, $f(R)_{\max} = 1.0$;若对于第*i*号网格, $Chl.a_i = 25.2 \mu g/L$, $DO_i = 1.5 mg/L$,则 $f(N1_i) = 0.6$, $f(N2_i) = 1.0$,利用公式(5),第*i*号网格发生湖泛的概率 $F = f_1(N1_i) \cdot f_2(V) \cdot f_3(R) \cdot f_4(N2_i) = 0.6$ 。

在 6353 个网格上分别运用公式(5),即可得到全太湖发生湖泛的概率分布(图 5),根据太湖湖泛易发水域区段的划分,可以看出在梅梁湾区段中存在网格发生湖泛的概率为 60%,因此预报梅梁湾在未来 3 d 发生湖泛. 进一步,概率大于 50%的网格范围为 5~10 个,按照一个网格面积为 $0.3\times0.3/2=0.045\text{ km}^2$ 计算,未来 3 d 发生湖泛的面积为 $0.2\sim0.5\text{ km}^2$.

根据计算分析结果形成 6 月 13—15 日的太湖蓝藻及湖泛监测预警半周报(图 3),在半周报中,明确指出在梅梁湾水域段发生异味水体的概率为 60%,发生异味水体面积约为 $0.2\sim0.5\text{ km}^2$. 根据 6 月 13 日的人工巡查结果,确实在月亮湾灵山码头附近发生异味水体,实际发生面积为 0.4 km^2 .

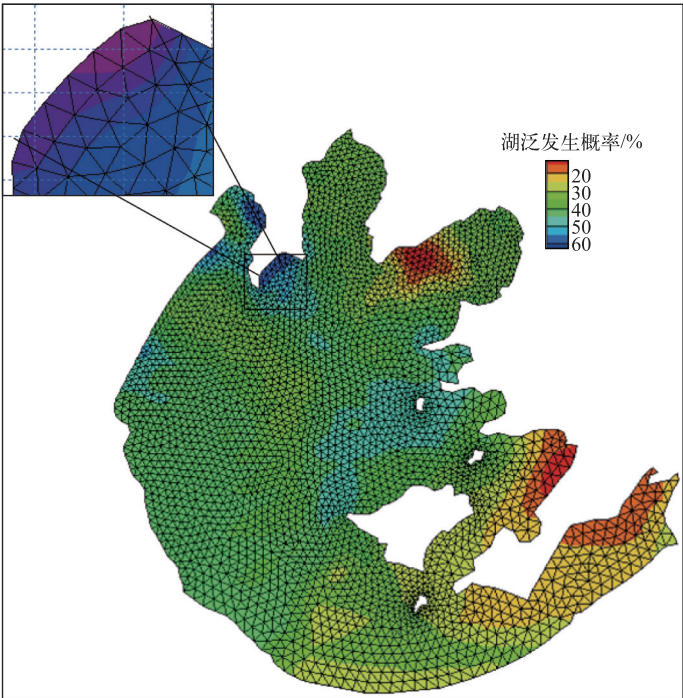


图 5 太湖 2014 年 6 月 13 日湖泛发生概率分布及湖泛发生面积的确定
Fig.5 Probability of occurrence and the forecasting area of black bloom in Lake Taihu on 13 June, 2014

利用每天的人工巡测数据对 2013—2014 年 82 期湖泛预报结果进行评估(表 2),7 段湖泛易发水域预报正确率均在 80% 以上,说明此模型可以较好地应用于太湖湖泛的预警预测.

表 2 2013—2014 年湖泛预报精度统计
Tab.2 The evaluation of the black blooms forecast in Lake Taihu during 2013 and 2014

预报水域	2013 年			2014 年			2 年平均 精度/%
	可检验天数/d	正确天数/d	位置精度/%	可检验天数/d	正确天数/d	位置精度/%	
太湖沙塘	95	95	100	96	75	78.1	89.1
沙塘符渚	95	92	96.8	96	63	65.6	81.2
符渚陈东	95	93	97.9	96	81	84.4	91.2
陈东八房	95	92	96.8	96	78	81.3	89.1
吴塘壬子	84	75	89.3	107	107	100	94.7
蠡河新开	84	75	89.3	107	107	100	94.7
梅梁湾	87	73	83.9	109	93	85.3	84.6

4 讨论

太湖湖泛的发生是水文、气象、环境化学、微生物等多因素综合作用的结果。由于人们对于湖泛的研究起步较晚,目前对于太湖这样浅水型大水面湖泊发生的湖泛还仅仅处于及时发现、跟踪监测、积累资料和初步研究机理的阶段,对于湖泛的发生发展机制还缺乏足够的科学认识,也无疑制约了湖泛预测预警的发展。在此阶段,选取可以表征藻源性湖泛的关键性因子 Chl.a 和 DO 浓度,采取水动力—水质耦合数值模型与概率经验模型相结合的方法,对湖泊发生湖泛的概率、区域以及面积进行短期的动态预测,并向有关部门定期发布预警报告,对于实现湖泛的早期防控具有很强的实用性和实效性。

近年来,随着原位高频率自动观测技术的迅速发展,利用各种成熟的气象、水文、水质和水环境探头,以越来越精细的时间刻度,同步收集风速风向、温度、气压、降雨、波浪、大气辐射、DO 浓度、Chl.a 浓度、藻蓝素浓度、悬浮物浓度、pH 值等各种监测指标的高频时间序列数据集。这一技术可以捕捉湖泛发生、发展及消亡的全过程,使得确定湖泛的成因和触发机制成为可能,反之也必将促进预测预警模型的发展和完善。

5 结论

本文建立了一种富营养化浅水湖泊藻源性湖泛的短期数值预报方法,包括:在浅水湖泊湖泛易发水域设定若干监测点,对气象参数和水环境参数进行测定;利用空间网格划分和插值算法,将监测点的水环境参数插值到全湖,其空间分布作为水质数值模型的初始条件;以未来 3 d 风场时空分布作为模型外部应力,驱动三维水动力—水质数值模型进行运算,得到未来 3 d 浅水湖泊 Chl.a 和 DO 浓度的时空分布;利用 Chl.a 和 DO 浓度的时空分布,结合气象参数建立概率经验公式,计算未来 3 d 湖泛易发水域发生湖泛的概率;对于发生湖泛概率较大的区域,进一步确定发生湖泛的位置和面积。在 2013 和 2014 年夏、秋季,利用此方法对太湖 7 段湖泛易发水域湖泛的发生进行未来 3 d 的预测预报,7 段水域预报正确率均在 80% 以上,说明此模型可以较好地应用于太湖湖泛的预警预测。

6 参考文献

- [1] Lu Guihua, Ma Qian. Analysis on the causes of forming black water cluster in Taihu Lake. *Advances in Water Science*, 2009, **20**(3): 438-442 (in Chinese with English abstract). [陆桂华, 马倩. 太湖水域“湖泛”及其成因研究. 水科学进展, 2009, **20**(3): 438-442.]
- [2] Lu Guihua, Ma Qian. Monitoring and analysis “Black Water Aggregation” in Lake Taihu, 2009. *J Lake Sci*, 2010, **22**(4): 481-487 (in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2010.0402. [陆桂华, 马倩. 2009 年太湖水域“湖泛”监测与分析. 湖泊科学, 2010, **22**(4): 481-487.]
- [3] Yang M, Yu J, Li Z *et al.* Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes. *Science*, 2008, **319**(5860): 158.
- [4] Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences. On the cause of cyanophyta bloom and pollution in water intake area and emergency measures in Meiliang Bay, Lake Taihu in 2007. *J Lake Sci*, 2007, **19**(4): 357-358 (in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2007.0401. [中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 357-358.]
- [5] Chen Hesheng. Black water aggregation in Yixing inshore water area of Lake Taihu. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2011, **31**(4): 33-37 (in Chinese with English abstract). [陈荷生. 太湖宜兴近岸水域“湖泛”现象初析. 水利水电科技进展, 2011, **31**(4): 33-37.]
- [6] Sarkar R, Chattopadhyay J. Occurrence of planktonic blooms under environmental fluctuations and its possible control mechanism-mathematical models and experimental observations. *Journal of Theoretical Biology*, 2003, **224**: 501-516.
- [7] Hu W, Jørgensen S, Zhang F. A vertical-compressed three dimensional ecological model in Lake Taihu, China. *Ecological Modelling*, 2006, **190**: 367-398.
- [8] Kong Fanxiang, Ma Ruhong, Gao Junfeng *et al.* The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2009, **21**(3): 314-328 (in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2009.0302. [孔繁祥, 马荣华, 高俊峰等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 314-328.]

- [9] Gong Shaoqi, Huang Jiazhu, Li Yunmei *et al.* The time series of chlorophyll-a content in Lake Taihu. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, **39**(6): 591-598(in Chinese with English abstract). [龚绍琦, 黄家柱, 李云梅等. 应用时间序列分析法对太湖叶绿素-a 含量的动态研究. 海洋与湖沼, 2008, **39**(6): 591-598.]
- [10] Sivapragasam C, Muttill N, Muthukumar S *et al.* Prediction of algal blooms using genetic programming. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **60**: 1849-1855.
- [11] Li W, Qin B, Zhu G. Forecasting short-term cyanobacterial blooms in Lake Taihu, China, using a coupled hydrodynamic-algal biomass model. *Ecohydrology*, 2014, **7**: 794-802.
- [12] Liu Guofeng, Zhong Jicheng, He Jun *et al.* Effects of black spots of dead-cyanobacterial mats on Fe-S-P cycling in sediments of Zhushan Bay, Lake Taihu. *Environmental Science*, 2009, **30**(9): 2520-2526(in Chinese with English abstract). [刘国锋, 钟继承, 何俊等. 太湖竺山湾藻华黑水团区沉积物中 Fe、S、P 的含量及其形态变化. 环境科学, 2009, **30**(9): 2520-2526.]
- [13] Dai Xuanli, Tang Jiafeng, Zhang Linzhi. Analysis of component and source of malodorous of the lake-flooding. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2010, **2**(3): 39-41(in Chinese with English abstract). DOI 10.3969/20100310. [戴玄吏, 汤佳峰, 章霖之. “湖泛”恶臭物质分析及来源浅析. 环境监控与预警, 2010, **2**(3): 39-41.]
- [14] Wang Chenglin, Zhang Ninghong, Zhang Yong *et al.* The research on warning of black water cluster in Taihu Lake based on meteorological factors. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2010, **2**(5): 1-4(in Chinese with English abstract). DOI 10.3969/20100501. [王成林, 张宁红, 张咏等. 基于气象条件的太湖湖泛预警研究. 环境监控与预警, 2010, **2**(5): 1-4.]
- [15] Wang Chenglin, Zhang Yong, Zhang Ninghong *et al.* Analysis of meteorological factors of forming feculent and anaerobic water aggregation induced by algal bloom in Taihu Lake. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 401-408(in Chinese with English abstract). [王成林, 张咏, 张宁红等. 太湖藻源性“湖泛”形成机制的气象因素分析. 环境科学, 2011, **32**(2): 401-408.]
- [16] Liu Guofeng, He Jun, Fan Chengxin *et al.* Environment effects of algae-caused black spots: impacts on Fe-Mn-S cycles in water-sediment interface. *Environmental Science*, 2010, **31**(11): 2652-2660(in Chinese with English abstract). [刘国锋, 何俊, 范成新等. 藻源性黑水团环境效应: 对水-沉积物界面处 Fe、Mn、S 循环影响. 环境科学, 2010, **31**(11): 2652-2660.]
- [17] Liu Guofeng, Shen Qiushi, Zhang Lei *et al.* Environment effects of algae-caused black spots: Driving effects on the N, P changes in the water-sediment interface. *Environmental Science*, 2010, **31**(12): 2917-2924(in Chinese with English abstract). [刘国锋, 申秋实, 张雷等. 藻源性黑水团环境效应: 对水-沉积物界面氮磷变化的驱动作用. 环境科学, 2010, **31**(12): 2917-2924.]
- [18] Sheng Dong, Xu Zhaoan, Gao Yi. Cause and impact analysis of black water cluster in Taihu Lake. *Water Resources Protection*, 2010, **26**(3): 41-44(in Chinese with English abstract). DOI 10.3969/20100311. [盛东, 徐兆安, 高怡. 太湖湖区“黑水团”成因及危害分析. 水资源保护, 2010, **26**(3): 41-44.]
- [19] Shen Qiushi, Shao Shiguang, Wang Zhaode *et al.* Simulation of black bloom in Moon Bay of Lake Taihu and physical and chemical responses of water and sediment. *Advances in Water Science*, 2011, **22**(5): 710-719(in Chinese with English abstract). [申秋实, 邵世光, 王兆德等. 太湖月亮湾湖泛发生过程模拟及水土物化性质的响应. 水科学进展, 2011, **22**(5): 710-719.]
- [20] Shen Qiushi, Shao Shiguang, Wang Zhaode *et al.* Fade and recovery process of algae-induced black bloom in Lake Taihu under different wind conditions. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(12): 1060-1066(in Chinese with English abstract). DOI 10.1360/972011-745. [申秋实, 邵世光, 王兆德等. 风浪条件下太湖藻源性“湖泛”的消退及其水体恢复进程. 科学通报, 2012, **57**(12): 1060-1066.]
- [21] Cai Ping, Wu Yuchen, Liu Xin *et al.* The contribution of sediment and algal to the formation of black bloom and their potential to supply the black substance in waters in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2015, **27**(4): 575-582(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2015.0403. [蔡萍, 吴雨琛, 刘新等. 底泥和藻体对太湖湖泛的诱发及水体致黑物的供应潜力. 湖泊科学, 2015, **27**(4): 575-582.]
- [22] Shen Qiushi, Fan Chengxin. Identification of black suspended particles in the algae-induced black bloom water column. *J Lake Sci*, 2015, **27**(4): 591-598(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2015.0405. [申秋实, 范成新. 藻源性湖泛水体显黑颗粒的元素形态分析与鉴定. 湖泊科学, 2015, **27**(4): 591-598.]

- [23] Shang Jingge, He Wei, Shao Shiguang *et al.* Effects of sediment capping to eliminate simulated alage-caused black bloom in eutrophic lakes. *J Lake Sci*, 2015, **27**(4): 599-606(in Chinese with English abstract). DOI 10. 18307/2015. 0406. 商景阁, 何伟, 邵世光等. 底泥覆盖对浅水湖泊藻源性湖泛的控制模拟. 湖泊科学, 2015, **27**(4): 599-606.
- [24] He Wei, Chen Yiquan, Gu Chunxin *et al.* Effects of plow-tillage on the prevention and control of algae-caused black bloom. *J Lake Sci*, 2015, **27**(4): 607-615(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2015. 0407. [何伟, 陈煜权, 顾春新等. 表层底泥翻耕对太湖藻源性湖泛的预控作用. 湖泊科学, 2015, **27**(4): 607-615.]
- [25] Chen Weimin ed. Observation methods of lake ecosystem. Beijing: China Environmental Science Press, 2004; 259(in Chinese). [陈伟民. 湖泊生态系统观测方法. 北京: 中国环境科学出版社, 2004; 259.]
- [26] Mellor G, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1982, **20**: 851-875.
- [27] Simons T. Verification of numerical models of Lake Ontario, Part I. Circulation in spring and early summer. *Journal of Physical Oceanography*, 1974, **4**: 507-523.
- [28] Madala RV, Piacsek SA. A semi-implicit numerical model for baroclinic oceans. *Journal of Computational Physics*, 1977, **23**: 167-178.
- [29] Roe P. Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes. *Journal of Computational Physics*, 1981, **43**: 357-372.
- [30] Ambrose RB, Wool TA, Martin JL. The water quality analysis simulation program, WASP5, part A: model documentation. Athens, Georgia: Environmental Research Laboratory Office of Research and development U. S. Environmental Protection Agency, 1993.
- [31] Wu Qiong. Numerical study on the character of ecological dynamics of large shallow lakes[Dissertation]. Nanjing: Hohai University, 2007(in Chinese with English abstract). [吴琼. 大型浅水湖泊生态动力学特性的数值研究[学位论文]. 南京: 河海大学, 2007.]
- [32] Zheng L, Chen C, Zhang F. Development of water quality model in the Satilla River estuary, Georgia. *Ecological Modeling*, 2004, **178**: 457-482.
- [33] Fan Chengxin. Progress and prospect in formation of black bloom in Lake Taihu: A review. *J Lake Sci*, 2015, **27**(4): 553-566(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2015.0401. [范成新. 太湖湖泛形成研究进展与展望. 湖泊科学, 2015, **27**(4): 553-566.]
- [34] Xing Peng, Hu Wanting, Wu Yufan *et al.* Major progress in microbial ecology of hypoxia in the shallow eutrophic lakes. *J Lake Sci*, 2015, **27**(4): 567-574(in Chinese with English abstract). DOI 10. 18307/2015.0402. [邢鹏, 胡万婷, 吴瑜凡等. 浅水湖泊湖泛(黑水团)中的微生物生态学研究进展. 湖泊科学, 2015, **27**(4): 567-574.]