

# 太湖蓝藻水华年度情势的预测方法研究

朱广伟<sup>1</sup>, 辛华荣<sup>2</sup>, 李 未<sup>1</sup>, 刘俊杰<sup>2</sup>, 邹 伟<sup>1</sup>, 秦伯强<sup>1</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖湖泊生态系统研究站, 江苏 南京 210008;

2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 基于太湖近20年蓝藻水华情势及相关环境因子的监测资料, 采用多元回归分析法, 构建了太湖春季(3—5月)、水华季(3—11月)蓝藻水华强度与冬季藻种情况、气象与水文因子、营养盐状况等环境因子的统计关系模型, 利用该模型能够有效实施太湖蓝藻水华季度及年度情势预测分析, 为类似湖库的蓝藻水华灾害防控提供技术支撑。

**关键词:** 太湖; 蓝藻水华; 风险预测; 多元回归模型

中图分类号: X82

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2022)09-0006-0005

## Study on forecast method of cyanobacterial bloom annual situation in Lake Taihu

ZHU Guangwei<sup>1</sup>, XIN Huarong<sup>2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, LIU Junjie<sup>2</sup>, ZOU Wei<sup>1</sup>, QIN Boqiang<sup>1</sup>

(1. Taihu Laboratory for Lake Ecosystem Research, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Based on the monitoring data of cyanobacterial bloom situation and related environmental factors in Lake Taihu in the past 20 years, using multiple regression analysis, the multiple statistical relationship between spring bloom intensity (March–May) or bloom–season’s bloom intensity (March–November) and the major control factors, such as winter phytoplankton condition, meteorological condition, hydrological condition and nutrient background, was built. The use of this model can effectively implement the seasonal and annual forecast and analysis of cyanobacterial blooms in Lake Taihu, and provide technical support for the prevention and control of cyanobacterial bloom disasters similar to lakes and reservoirs.

**Key words:** Lake Taihu; cyanobacterial bloom; risk forecast; multiple regression model

湖库型水源地常常面临蓝藻水华的危害, 水质安全受到严重威胁<sup>[1]</sup>。开发蓝藻水华预测预警技术并实施业务化运行对于水源地水质安全保障、大面积湖泛事件的预防具有重要的价值<sup>[2-4]</sup>。然而, 蓝藻水华的影响因素很多, 短期预报的精度相对较高<sup>[5]</sup>, 但季度预报或者年度预报等中长期的预报缺乏有效的工具, 成为蓝藻水华防控中的技术瓶颈。

美国国家海洋与大气管理局(NOAA)的Stumpf

等<sup>[6]</sup>2012年提出了用春季入流量及总磷负荷开展夏季蓝藻水华强度预测的方法, 通过MERIS卫星影响681 nm波段信号反演出蓝藻水华强度信息(CI), 2002—2011年10年的统计分析表明, CI值(0.64~14.18之间, 对应水华面积170~2 968 km<sup>2</sup>)与伊利湖主要入湖河道Maumee河3—6月来水量及6月TP负荷量相关, 可以用来预测8月的水华强度。由于伊利湖水体水质较好, 湖体磷浓度较低, 藻类生长的磷

收稿日期: 2022-03-20

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020004), 中国科学院野外站联盟项目(KFJ-SW-YW036)

作者简介: 朱广伟(1972—), 男, 研究员, 博士, 主要从事湖库有害藻类水华机制研究, E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn

限制明显,因此,该方法具有一定的可信度。此后,Stumpf等<sup>[7]</sup>又根据预测误差分析,修正了预测方法,用生物可利用磷(TBP)负荷代替TP负荷,预测精度有所提高,并发现了入湖负荷发生的具体月份、6月的温度等对预测精度产生较大的影响。密歇根大学水中心的Obenour等<sup>[8]</sup>发现由于TP与水华面积之间的非线性响应会导致预测精度不佳,并改用贝叶斯层次模型对预测模型进行了优化。

气候因子对水华强度的影响较大。2007年以来,太湖是水污染治理投入巨大,但是蓝藻水华强度在2016年之后反而增大,与冬春季增温等气候因子密切相关<sup>[9]</sup>。上海交通大学的周韞韬等<sup>[10]</sup>通过对我国东海海岸带有害蓝藻水华(HABs)发生规律进行分析,提出可以利用表层水体的无机磷含量、地区降雨量及年度表层海温对年度HABs发生频次进行预测。美国威斯康辛大学Beal等<sup>[11]</sup>以Mendota湖为例,开发了提前2月预测未来蓝藻水华强度的模型,综合考虑了营养盐和气候因子,包括入湖水量、磷负荷、漂浮蓝藻指数及全球海面水温等信息。

张虎军等<sup>[12]</sup>基于2012—2020年太湖蓝藻水华面积变化,构建了采用湖体自动监测浮标1月水温、电导率及实验室分析的1月BOD和3月水体TN质量浓度统计预测水华强度。朱广伟等<sup>[13]</sup>则基于太湖湖泊生态系统研究站2005—2019年太湖蓝藻水华监测信息,构建了基于冬春季水温、年度降雨量及冬春季TN为变量因子的统计预测模型。这些模型在一定程度上实现了太湖蓝藻水华中长期预测,但是模型的理论基础不清,特别是关于氮的解释难以令人满意。因此,本文以太湖2005—2021年的蓝藻水华遥感监测及太湖湖泊生态系统研究站的相关环境因子观测为基础,提出了1种预测因子更为全面的太湖蓝藻水华中长期预测模型,以期类似湖库的蓝藻水华风险防控提供科技支撑。

## 1 数据来源及预测方法构建

### 1.1 数据来源

2004年12月至2022年2月太湖水体浮游植物Chl-a、太湖逐日水温(WT)、采样点月水深(WD)、水体TN、TP数据均来自中国科学院太湖湖泊生态系统研究站的生态系统观测数据库;MODIS遥感影像来自美国NASA的Goddard Space Flight Center Web网站。

### 1.2 预测方法构建

首先构建了蓝藻水华强度(Bloom Intensity, BI)

这一参数。太湖BI值采用文献[13]中的方法构建,以季度为单位进行计算。该算法包含2个方面的信息:(1)利用MODIS遥感反演获得的太湖蓝藻水华面积 $A_{BI}$ ,基于冬、春、夏、秋4个季度的可获得反演的水华面积进行季度平均,自2004年12月1日至2022年2月28日,共获得具有统计意义的遥感反演影像1 882 d,面积介于0.1~1 216.7 km<sup>2</sup>之间,平均值为170.8 km<sup>2</sup>,按照冬季(12月—翌年2月)、春季(3—5月)、夏季(6—8月)及秋季(9—11月)分段统计,获得各个季度的 $A_{BI}$ 值;(2)太湖湖泊生态系统研究站每季度一次(每年2月、5月、8月、11月采样,分别代表冬、春、夏、秋)的全湖32个点位水柱3层混合样测定的浮游植物叶绿素a浓度。而某季度的BI值是该季度的 $A_{BI}$ 与Chl-a之积与统计期间最大积(出现在2017年秋季)的比值。

其次,采用多元统计回归的方法,从当年冬季结束时(每年的2月底)可获得的气象、水文、营养盐等信息中遴选信息,构建当年春季(3—5月)及整个水华季(3—11月)BI值与环境信息之间的能够经得起显著性检验的统计关系方程。在信息筛选时,综合考虑如下几方面的信息:(1)当年冬季的藻种情况,用冬季蓝藻水华强度指数 $I_{B,win}$ 表征;(2)春季即将开始时的湖体营养盐状况,以2月调查获得的全湖蓝藻水华生长的氮限制区面积或磷限制区面积占全湖水面面积的比值表征,即参考许海等<sup>[14]</sup>2015年太湖试验结果,TP低于0.05 mg/L时开始对藻类生长产生影响,TN 0.80 mg/L时开始对藻类生长产生影响,以2月太湖站监测32个点位TN、TP插值后,TP受限或TN受限交集的湖面面积占太湖总面积之比,记为 $L_{N, Feb}$ ;(3)反映冬季藻类复苏条件的能量信息逐日水温平均值( $T_{W, win}$ );(4)反映冬季外源补给强度及水草萌发条件的信息,2月采样点平均水深( $D_{W, Feb}$ )。此外,其他相关信息,如冬季平均风速、水体透明度等,经逐步回归分析及遴选,保留了上述4个指标。基于2004年12月1日至2022年2月28日期间采集的相关数据,获得春季水华强度 $I_{B, spr}$ 及水华季水华强度指数 $I_{B, bloom}$ 的预测公式如下:

$$I_{B, spr} = 0.116T_{W, win} + 0.616D_{W, Feb} + 5.351I_{B, win} - 0.854L_{N, Feb} - 2.073 \quad (R^2 = 0.57, P = 0.006) \quad (2)$$

$$I_{B, bloom} = 0.066T_{W, win} + 0.311D_{W, Feb} + 3.777I_{B, win} - 0.781L_{N, Feb} - 0.929 \quad (R^2 = 0.60, P = 0.019) \quad (3)$$

通过模型计算值与实测值比对, $BI_{spr}$ 的预测公式及 $BI_{bloom}$ 的预测公式均达到显著相关,可以开展太湖蓝藻水华的预测分析。

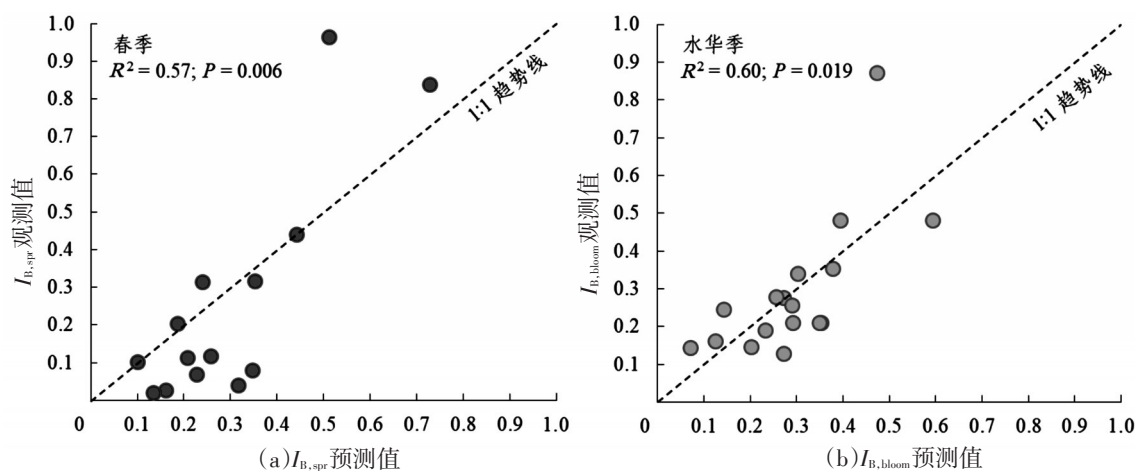


图1 蓝藻水华强度多元统计相关模型预测与实测值关系

## 2 数据分析及2022年藻情预测应用

### 2.1 关键环境因子的长期变化特征

2005—2022年太湖冬季水温、2月水深、冬季水华强度及2月营养盐限制面积变化如图2。从图2可以看出,在影响年度藻情的4中环境要素中,既有利于水华控制的,又有不利于水华控制的。冬季平均温度  $T_{W, win}$  而言,2022年为8.63℃。尽管低于2020年、2021年及2017年,但是也是在2005年以来18年中第4高,有利于冬季藻种的快速启动增殖过程。从冬季蓝藻水华指数看,2022年冬季为0.043,

在18年中排第3高,低于2008年和2017年,与  $T_{W, win}$  反映的情况类似。因此,从两种冬季藻情和复苏条件看,2022年蓝藻水华的强度可能偏大。

而影响太湖蓝藻水华强度的另外两项环境因素略则有利于蓝藻水华的控制。从2月全湖水深看,2022年处于中等,明显低于2016年、2018年、2019年等,在过去18年中排第7(图2)。值得关注的是尽管  $D_{W, Feb}$  处于中等水平,但是还是略高于2021年。而另一项因素:2月份全湖藻类生长受限面积占比  $L_{N, Feb}$  则在过去18年中处于最高。考虑到2021年在温度偏高的情况下,总体藻情偏弱,与

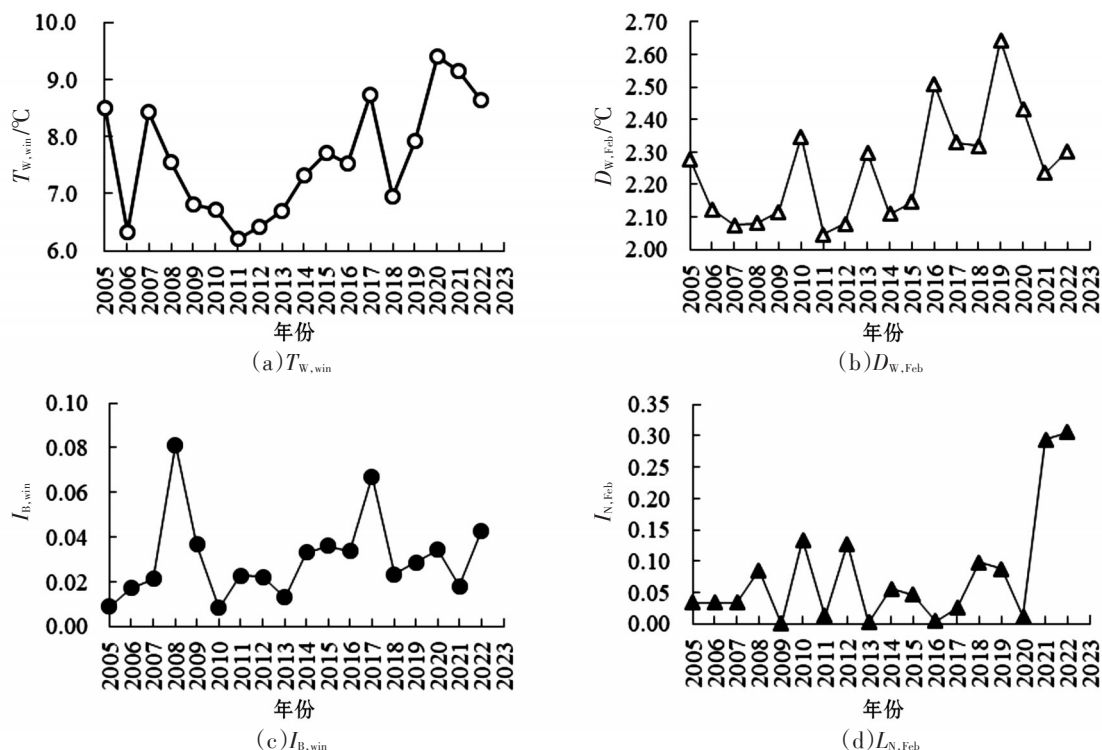


图2 影响太湖年度蓝藻水华强度的4种主要因素多年变化情况



2021年春季藻类生长受限可能有关。2022年的受限面积最大的情况,可能意味着2022年的藻情强度仍可能受到营养盐的限制。

## 2.2 2022年太湖年度藻情预测

根据式2~3,以及图2中的年初冬末环境信息,预测2022年年度蓝藻水华强度如图3。

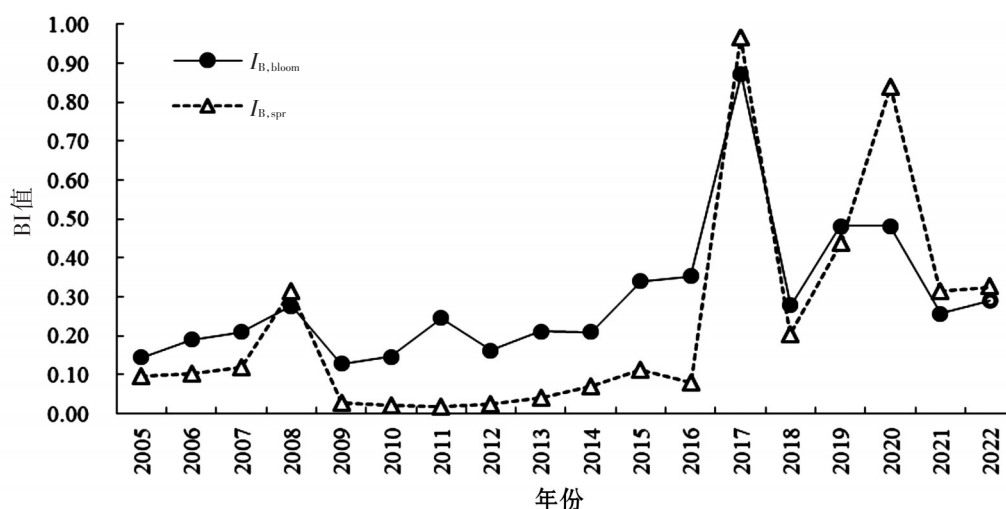


图3 太湖2005年以来春季及水华季蓝藻水华强度变化及2022年预测值

这个水华季的水华强度指数 $I_{B,bloom}$ 看,2005—2021年均值为0.29,其中2017—2021年的5年均值为0.47,而2022年的预测值为0.29。与过去17年均值相当,弱于过去5年均值,而会强于2021年( $I_{B,bloom}$ 为0.26)。

尽管从预测结果看,2022年的藻情只是略强于2021年,在2016年以来的强水华期中属于中等偏轻,但是绝不能掉以轻心。引起大规模疯长(异常增殖)并容易在湖水表面聚积、随风漂移堆积的蓝藻种属,是一些生命周期不长、半个月左右生物量即可发生极大改变的自养型光合作用生物,这就导致冬末的环境条件主要影响的是年度水华的蓝藻水华的种源情况,而后期具体藻情的发展,则与春、夏季的天气情况关系密切。因此,一方面,根据中国气象局国家气候中心对2022年的气温预测,无论是2022年春季,还是夏秋季节,太湖流域2022年的气温预测较历史平均值偏高 $0.5^{\circ}\text{C}$ 。由于近5年太湖流域总体处于偏暖时期,因此较历史平均值偏高 $0.5^{\circ}\text{C}$ ,可以认为与近几年的情况相当。如果按此预测,则不会对前面的预测结果产生大的影响。另一方面,近年来异常天气事件频次增高<sup>[15]</sup>,总体而言是对太湖蓝藻水华强度有促进作用的。相较于硅藻、绿藻等,易于形成水华的蓝藻种属,如微囊藻和鱼

腥藻,均属于更适宜于恶劣环境条件,如高温、低光、风浪扰动、低营养等。而异常天气的增多,往往有利于有害蓝藻种属的快速占优<sup>[16]</sup>,对后期藻类的发展产生影响。如,2022年2月下旬以来,持续高温晴热,降水量很少,太湖南部湖区已经出现近百平方公里的鱼腥藻水华。现场调查的情况看,太湖大部分湖区,特别是南部太湖,能见到明显表层水华条带,优势属为鱼腥藻。如果后期仍然持续高温晴热,将对2022年的藻情产生重大影响。因此,对太湖后期的藻情还应高度关注、充分准备。

## 3 结 语

尽管大型湖泊蓝藻水华的年度情势多变,受气象情势的影响甚大,但是,由于蓝藻水华的发生、发展具有连续性,从湖泊冬末春初的环境信息能够捕捉到年度水华强度的蛛丝马迹,实施年度情势预报。本文基于太湖2005年以来的蓝藻水华情势分析,构建了基于冬季水温、水深、水华强度及营养盐条件的多元统计模型预测春季及水华季总体水华强度,模型的相关性较好,能为蓝藻水华防控提供参考信息。

基于本文构建的预测模型,尝试预测了2022年度蓝藻水华强度。初步预测结果认为2022年度蓝

藻水华的强度属于中等,弱于过去5年平均情况,但高于2021年的强度。由于未来气象情势变化对蓝藻水华强度会产生更直接的影响,国家气候中心预测2022年总体气温较多年均值偏高0.5℃,且近年来异常天气发生频次增高,因此,仍不能排除后期天气异常导致更强水华的出现。在太湖蓝藻水华防控中,建议密切关注天气和藻情,及早启动调水,充分做好水厂和湖体蓝藻综合防控与应急处置准备,确保城市供水安全。

#### 参考文献:

- [1] QIN B, ZHU G, GAO G, et al. A drinking water crisis in Lake Taihu, China: Linkage to climatic variability and lake management[J]. *Environmental Management*, 2010, 45(1): 105–112.
- [2] QIN B, LI W, ZHU G, et al. Cyanobacterial bloom management through integrated monitoring and forecasting in large shallow eutrophic Lake Taihu (China) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015(287): 356–363.
- [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.
- [4] 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.
- [5] LI W, QIN B, ZHU G. Forecasting short-term cyanobacterial blooms in Lake Taihu, China, using a coupled hydrodynamic–algal biomass model [J]. *Ecohydrology*, 2014(7): 794–802.
- [6] STUMPF R P, WYNNE T T, BAKER D B, et al. Inter-annual variability of cyanobacterial blooms in Lake Erie [J]. *PLoS One*, 2012, 7(8): e42444.
- [7] STUMPF R P, JOHNSON L T, WAYNE T T, et al. Forecasting annual cyanobacterial bloom biomass to inform management decisions in Lake Erie [J]. *Journal of Great Lake Research*, 2016(42): 1176–1183.
- [8] OBENOUR D R, GRONEWOLD A D, STOW C A, et al. Using a Bayesian hierarchical model to improve Lake Erie cyanobacteria bloom forecasts [J]. *Water Resource Research*, 2014(50): 7847–7860.
- [9] SHI K, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. Phenology of phytoplankton blooms in a trophic lake observed from long-term MODIS data [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019(53): 2324–2331.
- [10] ZHOU Y, YAN W, WEI W. Effect of sea surface temperature and precipitation on annual frequency of harmful algal blooms in the East China Sea over the past decades [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 270(2): 116224.1–116224.6.
- [11] BEAL M R W, O’REILLY B, HIETPAS K R, et al. Development of a sub-seasonal cyanobacteria prediction model by leveraging local and global scale predictors [J]. *Harmful Algae*, 2021(108): 102100.
- [12] 张虎军, 宋挺, 朱冰川, 等. 太湖蓝藻水华暴发程度年度预测[J]. *中国环境监测*, 2022, 38(1): 157–164.
- [13] 朱广伟, 施坤, 李未, 等. 太湖蓝藻水华的年度情势预测方法探讨[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1421–1431.
- [14] XU H, PAERL H W, QIN B, et al. Determining critical nutrient thresholds needed to control harmful cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015(49): 1051–1059.
- [15] ZHANG Y, SHI K, ZHOU Y, et al. Monitoring the river plume induced by heavy rainfall events in large, shallow, Lake Taihu using MODIS 250 m imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016(173): 109–121.
- [16] HUANG Q, LI N, LI L. Long-term trend of heat waves and potential effects on phytoplankton blooms in Lake Qiandaohu, a key drinking water reservoir [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(48): 68448–68459.