

大型湖库滨岸带蓝藻水华堆积风险评估——以巢湖为例*

钱瑞^{1,2}, 彭福利³, 薛坤², 齐凌艳^{4,5}, 段洪涛², 邱银国², 陈青², 陈粉丽¹, 高俊峰², 黄佳聪^{2**}

(1: 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008)

(3: 中国环境监测总站, 北京 100012)

(4: 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 231003)

(5: 资源环境与地理信息工程安徽省工程技术研究中心, 芜湖 231003)

摘要: 淡水湖库富营养化与蓝藻水华是全球性的突出水环境问题, 尤其是滨岸带严重蓝藻水华堆积甚至造成了水体黑臭、威胁饮用水安全等严重危害, 科学评估滨岸带蓝藻水华堆积风险、精准识别蓝藻水华易堆积区域是水环境管理与研究中亟待解决的关键科学问题。本研究以我国长江中下游的大型浅水富营养化湖泊巢湖为研究对象, 依托流域水文与湖泊水动力模拟、遥感反演、GIS 空间分析等技术, 综合考虑藻类生物量、岸线形态、湖泊水动力、风速和风向等要素, 创新构建了蓝藻水华堆积风险评估指标体系, 量化评估了 2018—2019 年的巢湖滨岸带的蓝藻水华堆积风险, 并将滨岸带蓝藻水华堆积风险等级划分为 5 级 (I、II、III、IV、V), 绘制了蓝藻水华滨岸带堆积风险的空间分布, 识别了蓝藻水华的易堆积区域。评估结果表明: 巢湖滨岸带蓝藻水华堆积的高风险区域呈连续片状分布于西巢湖西岸与西北岸, 占巢湖沿岸区域的 12.1%, 是巢湖蓝藻水华应急处置管理的关键区域, 评估结果与调研结论总体一致。研发的蓝藻水华堆积风险评估方法可应用于其他大型富营养化湖库, 为蓝藻水华应急处置管理提供关键技术支撑。

关键词: 富营养化; 湖泊水动力; 蓝藻水华; 岸线; 应急处置; 巢湖

Assessing the risks of harmful algal bloom accumulation at littoral zone of large lakes and reservoirs: An example from Lake Chaohu*

Qian Rui^{1,2}, Peng Fuli³, Xue Kun², Qi Lingyan^{4,5}, Duan Hongtao², Qiu Yinguo², Chen Qing², Chen Fenli¹, Gao Junfeng² & Huang Jiacong^{2**}

(1: *College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, P.R.China*)

(2: *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(3: *China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, P.R.China*)

(4: *College of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 231003, P.R.China*)

(5: *Engineering Technology Research Center of Resources Environment and GIS, Wuhu 231003, P.R.China*)

Abstract: Eutrophication and harmful algal blooms (HABs) in freshwater lakes and reservoirs are severe global problems for aquatic ecosystems. In particular, severe HABs accumulation in the littoral zone is likely to cause hypoxia (black and odorous water), and thus threaten drinking water safety. Therefore, assessing the risks of HABs accumulation and accurately identifying the littoral zones that is prone to HABs accumulation are of particular importance for water management practice. This study took Lake Chaohu, a large shallow eutrophic lake in the middle and lower reaches of the Yangtze River in China as the study area. Based on

* 2021-03-01 收稿; 2021-05-06 收修修改稿。

中国科学院青年创新促进会项目 (2019313)、中国科学院战略性先导科技专项 A 类 (XDA23020201)、江苏省水利科技项目 (2019025, 2018003, 2020042, 2020032) 和安徽省自然科学基金青年项目 (1908085QD151) 联合资助。

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

the technological advances in hydrological and hydrodynamic modelling in the lake-watershed system, remote sensing monitoring, spatial analysis in GIS software, etc., we developed a novel risk assessment index for HABs accumulation by considering the factors of phytoplankton biomass, shoreline shape, hydrodynamic and wind conditions. The index was applied in Lake Chaohu to assess its risk of HABs accumulation during 2018–2019. The assessment results were divided into five levels from I to V, and were mapped to identify the area with a high risk of HABs accumulation. Our investigation results showed that the high-risk areas of HABs accumulation are mainly located in the western and northwest areas of Western Lake Chaohu, accounting for 12.1% of the littoral zone in Lake Chaohu. These areas should be highly concerned in the emergency management of HABs in Lake Chaohu. The assessment results were generally consistent with our survey findings. The developed risk index for HABs accumulation can be easily transferred to other large eutrophic lakes and reservoirs, and can well support the emergency management practice of HABs.

Keywords: Eutrophication; lake hydrodynamics; algal blooms; shoreline; emergency response; Lake Chaohu

淡水湖库富营养化造成的蓝藻水华频发是我国甚至世界关注的突出水环境问题,例如美国伊利湖^[1-2]、加拿大温尼伯湖^[3-4]以及我国的太湖^[5-6]、巢湖^[7-8]、滇池^[9-10]等湖泊都发生过严重蓝藻水华. 全球湖泊蓝藻水华研究显示:自 1980s 以来,全球 71 个大型湖泊(面积大于 100 km²)中,68% 湖泊的夏季蓝藻水华规模持续增长^[11]. 2007 年 5 月 29 日至 6 月初,我国太湖梅梁湾发生了严重蓝藻水华,引发了无锡饮用水危机,严重威胁无锡数百万居民的饮用水安全,引起了全国甚至全世界的高度关注^[12];2011 年,北美伊利湖暴发了史上最严重的蓝藻水华^[1],2014 年 8 月 1 日伊利湖西部蓝藻水华暴发导致水体藻毒素严重超标,引发了伊利湖沿岸的托莱多市(Toledo)的饮用水断供^[13]. 尽管全球各国高度重视湖库富营养化的科学防控,但大量湖泊蓝藻水华仍呈现频繁反复暴发的趋势^[2,5],与此同时,全球气候变化进一步加剧湖库富营养化^[14],可见蓝藻水华防控短期内很难取得显著成效,彻底解决蓝藻水华问题依然任重道远.

在我国大型富营养化湖泊中,巢湖蓝藻水华问题突出,与太湖、滇池并列我国富营养化重点治理的“三湖”^[15]. 巢湖蓝藻水华的现场调研与卫星遥感影像解译结果表明:近年来(2018–2020 年),巢湖滨岸带蓝藻水华堆积程度较严重的区域集中在巢湖西北岸、派河入湖口区域和巢湖南岸大周村区域,尤其是每年的夏、秋时段(6–10 月),湖滨带蓝藻水华暴发引发水体溶解氧大量消耗,甚至造成水生生物死亡,严重破坏湖泊生态系统平衡,进而引发水生生态系统退化等问题;尤其是蓝藻水华在滨岸带长时间大量堆积,可能引起水体发黑发臭,对周围居民生活产生了负面影响,阻碍了区域可持续发展^[16],是水环境管理亟待解决的现实问题^[17].

为缓解巢湖蓝藻水华暴发造成的严重危害,中央/地方政府针对巢湖蓝藻水华的滨岸带堆积这一突出问题做出了大量努力,蓝藻水华应急处置管理工作也日益完善,包括已经实施的深井、藻水分离港、藻水分离船等应急处置措施,其中 4 个深井和 4 个藻水分离港分布于巢湖西北岸,4 艘藻水分离船分布于东巢湖,还包括自制磁捕船、民间打捞船和曝气船等处置规模较小的措施. 上述措施对缓解蓝藻水华沿岸堆积造成的负面效应具有重要价值. 然而现有研究集中在蓝藻水华风险危害,包括现状监测^[8,18]、模拟预测^[6-7,19]、风险评估^[20-22]等,上述研究能够监测/预测蓝藻水华暴发面积与强度,分析蓝藻水华形成机理,评估其危害等,但尚缺乏针对湖库滨岸带蓝藻水华堆积风险的量化研究. 本文依托流域水文与湖泊水动力模拟、遥感反演、GIS 空间分析等技术,综合考虑藻类生物量、岸线形态、湖泊水动力、风速风向等要素,构建了蓝藻水华堆积风险评估指标体系,量化评估了巢湖滨岸带的蓝藻水华堆积风险,绘制了蓝藻水华滨岸带堆积风险的空间分布,识别了蓝藻水华的易堆积区域,为蓝藻水华应急处置管理提供了关键技术支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域

巢湖(面积 768 km²,平均水深 2.7 m)是我国大型浅水富营养化湖泊,位于长江中下游巢湖流域(面积 13555 km²)中心位置(图 1),主要包括 6 条入湖河流(杭埠河、白石天河、兆河、柘皋河、南淝河和派河),以及 1 条连接长江的出湖河流(裕溪河),水体滞留时间为 207 d^[7]. 巢湖是沿湖地区工农业生产和人民生活用水的重要水源. 但 1980s 以来,巢湖流域人口快速增长和经济迅速发展,比如合肥在过去 40 年间,人口增长了 9 倍^[23],高强度的人类活动导致了巢湖入湖氮、磷大幅增加以及水体富营养化、蓝藻水华(主要为微囊藻

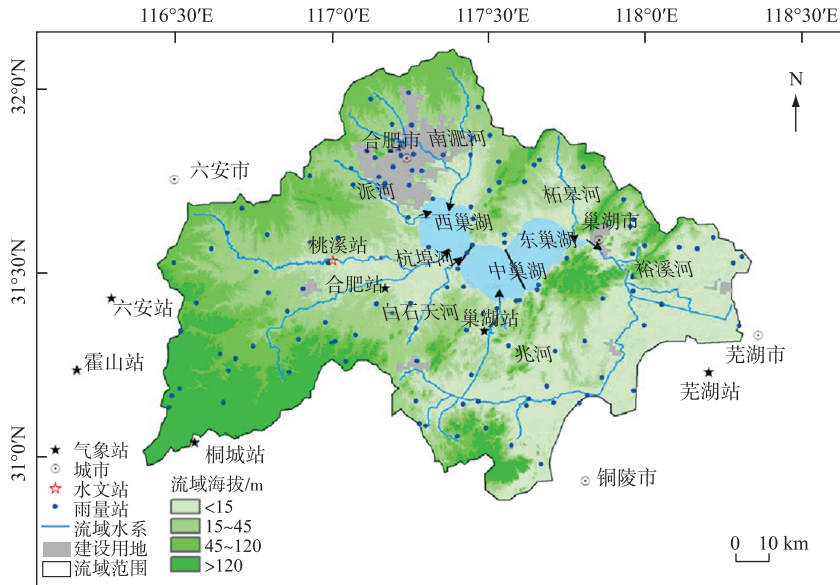


图1 巢湖流域及其气象与水文监测点位

Fig.1 Location of Lake Chaohu Watershed, and its weather and hydrological stations

水华)与水质恶化等突出水环境问题^[24].

1.2 数据

本研究收集了巢湖及其流域的土地利用、水文、气象和藻类生物量等数据(2018—2019年).其中,土地利用数据来自2015年MODIS遥感影像(<http://www.gscloud.cn/>),用于流域水文模拟时识别土地利用类型的输入数据;逐日水文数据为河流流量,来自巢湖流域的桃溪水文站,用于率定流域水文模拟巢湖流域6条入湖河流流量的准确性;逐日气象数据(降水、气温、湿度、风速、风向、日照时长和相对湿度)来自巢湖流域的6个气象站和130个雨量站,气象站和雨量站的数据分别来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)和合肥水旱情信息网(<http://sq.hfswj.net:8000/>),用于流域水文模拟的驱动数据;藻类生物量采用叶绿素a浓度表征,数据来自120幅无云的MODIS遥感影像反演结果.

1.3 方法

本研究以2018—2019年为研究时段,结合大型湖泊蓝藻水华的形成与聚集规律,选择蓝藻水华指数、动力指数、风向指数与岸线复杂度用于蓝藻水华滨岸带堆积风险评估,并识别蓝藻水华的易堆积区域.评估方法的关键技术环节详述见图2.

1.3.1 数据处理 本文采用Python编程语言完成数据前期处理,采用ENVI完成遥感影像反演,采用ArcGIS完成栅格与矢量数据处理,主要工作包括130个雨量站与6个气象站的站点数据筛选分类,以及逐日气象数据处理;采用Python编程语言统计不同风向的下风向区域,计算网格单元(1000 m×1000 m)的岸线分形维数.

1.3.2 流域水文模拟 流域水文模拟旨在模拟巢湖6条主要入湖河流(图1)的逐日流量,为湖泊水动力模拟提供精细化的边界条件,采用栅格化的新安江模型完成^[7].新安江模型是概念性二维半分布式水文模型^[25],广泛应用于我国湿润、半湿润地区的降雨径流模拟^[26],模型包括蒸散发模块、径流产生模块、径流分离模块和径流路径模块4个模块.其中蒸散发模块是基于Penman-Monteith方法开发的^[27],径流产生模块使用场容量的抛物线描述了流域异质性,径流分离模块将总径流分为3个部分:地表径流、内流径流和地下水径流,径流路径模块使用曼宁方程通过一维运动波函数描述了陆上和河道的径流流动.

模型网格大小为500 m,时间步长为1 d,模拟时段为2017—2019年,其中2017年为预热期;模型关键

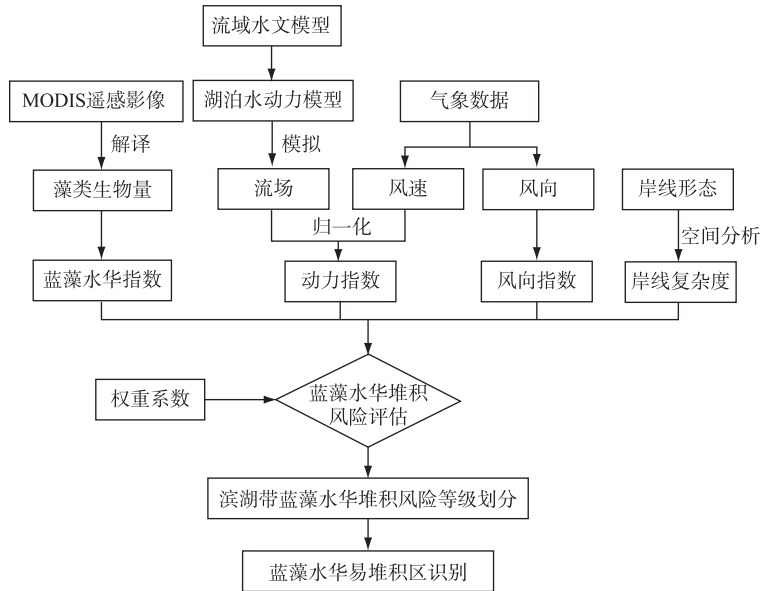


图2 巢湖滨岸带蓝藻水华堆积风险评估技术路线

Fig.2 Risk assessment of harmful algal blooms accumulation in littoral zone of Lake Chaohu

参数取值,及其在研究区的校验结果可参考已发表文献^[7].

1.3.3 湖泊水动力模拟 湖泊水动力模型旨在模拟巢湖水动力条件,采用 EFDC 模型开展^[7]. EFDC 是美国弗吉尼亚海洋研究所 Hamrick 博士开发的^[28],广泛应用于河流、水库、湖泊、湿地、河口等水体,应用领域集中于环境评价、方案决策、总量分配和环境预警平台等,基于 EFDC 模型的巢湖水动力模拟精度已得到验证^[29].

巢湖水动力模型采用 1000 m×1000 m 的网格单元^[30],垂直方向分为 2 层,底部粗糙度高度设定为 0.02 m,时间步长为 200 s;模型气象数据采用距离巢湖最近的气象站点(巢湖站,见图 1)数据,该气象站距巢湖 3.9 km;边界条件包括 6 条入湖河流和 1 条出湖河流流量(图 1).模型关键参数取值及其在研究区的校验结果可参考已有文献^[7].

1.3.4 滨岸带蓝藻水华的堆积风险评估与易堆积区域识别 以巢湖滨岸带为蓝藻水华堆积风险评估区域,综合考虑巢湖藻类生物量、水动力、风速、风向、岸线形态等要素,采用数据标准化等方法,分别计算巢湖滨岸带蓝藻水华指数、动力指数、风向指数和岸线复杂度,上述指数的选取理由与计算方法详述如下:

1) 蓝藻水华指数:水体藻类越多,形成蓝藻水华的概率越大,蓝藻水华漂移受岸线阻挡则容易产生堆积.叶绿素 *a* 浓度是表征藻类的指标^[8,31],因此选取蓝藻水华易暴发时期(4—10 月)无云/少云的 MODIS 遥感影像,采用大型浅水湖泊叶绿素 *a* 反演算法^[32],获取藻类空间分布,再归一化处理计算巢湖滨岸带蓝藻水华指数,主要公式为:

$$R^{CHL} = \sum_{i=1}^N S_i / N \quad (1)$$

$$R_j^{CHL*} = (R_j^{CHL} - R_{Min}^{CHL}) / (R_{Max}^{CHL} - R_{Min}^{CHL}) \quad (2)$$

公式(1)用于计算巢湖水体 2018—2019 年 4—10 月期间的叶绿素 *a* 平均浓度,其中 R^{CHL} 为叶绿素 *a* 平均浓度, S_i 为日期 *i* 的叶绿素 *a* 浓度, N 为 2018—2019 年 4—10 月无云/少云的 MODIS 遥感影像数量 ($N=120$);公式(2)用于计算巢湖滨岸带网格的蓝藻水华指数,其中 R_j^{CHL*} 为巢湖滨岸带网格 *j* 的蓝藻水华指数, R_j^{CHL} 为网格 *j* 的叶绿素 *a* 浓度, R_{Min}^{CHL} 和 R_{Max}^{CHL} 分别为所有滨岸带网格的叶绿素 *a* 浓度最小值和最大值. R_j^{CHL*} 的取值范围为 0~1,数值越大,表明该网格藻类越多,蓝藻水华堆积风险越大.

2) 动力指数:动力指数包括水动力(水体流速)与风力(风速)条件. 湖泊水动力越弱,即水体流速越慢,蓝藻水华越容易在水体表层漂浮并堆积;水流速度越快,水体扰动能力越强,蓝藻水华也更不容易聚集堆积. 与水动力条件相似,风力条件也是决定蓝藻水华堆积的重要环境因素,已有研究表明:当风速大于 4 m/s 时,藻类基本垂向均匀分布在水体,难以在水体表层形成蓝藻水华^[33],而当风速低于 3 m/s 时,蓝藻水华极易漂浮在水体表层^[34],也更容易在滨岸带堆积. 根据上述机理研究成果,动力指数采用以下公式计算:

$$R^M = \sum_{i=1}^N (WS_i \cdot WV_i) / N \quad (3)$$

$$R_j^{M*} = 1 - (R_j^M - R_{\min}^M) / (R_{\max}^M - R_{\min}^M) \quad (4)$$

公式(3)用于计算 2018—2019 年 4—10 月期间的平均动力强度(R^M),采用水体流速与风速乘积表征;其中 WS_i 为日期 i 的风速, WV_i 为日期 i 的水体流速,通过巢湖水动力模型模拟获取, N 为流速与风速的时间序列数量($N=428$);公式(4)采用数据归一化方法计算巢湖滨岸带网格的动力指数,其中 R_j^{M*} 为网格 j 的动力指数, R_{\min}^M 和 R_{\max}^M 为所有滨岸带网格单元年均动力强度的最小值和最大值. R_j^{M*} 的取值范围为 0~1,数值越大,表明该网格动力条件越弱,蓝藻水华越容易堆积,堆积风险越大.

3) 风向指数:风向是蓝藻水华堆积的重要影响因素之一,由于蓝藻水华漂浮在水体表面,因此极易在下风向的滨岸带区域堆积;根据上述规律,将 2018—2019 年 4—10 月的逐日风向划分为 8 类,即北风、东北风、东风、东南风、南风、南西风、西风和西北风,每一类风向对应不同的下风向滨岸带区域,并据此计算风向指数,公式为:

$$R_i^{WD*} = (R_i^{WD} - R_{\min}^{WD}) / (R_{\max}^{WD} - R_{\min}^{WD}) \quad (5)$$

公式(5)采用数据归一化方法计算巢湖滨岸带网格的风向指数,其中 R_i^{WD*} 为滨岸带网格 i 的风向指数, R_i^{WD} 为网格 i 位于下风向区域的累积天数(2018—2019 年 4—10 月), R_{\min}^{WD} 和 R_{\max}^{WD} 分别为所有滨岸带网格单元中位于下风向区域的累积天数最小值和最大值. R_i^{WD*} 的取值范围为 0~1,数值越大,表明该网格位于下风向区域的频次越多,蓝藻水华堆积风险也越大.

4) 岸线复杂度:岸线形态对蓝藻水华堆积也有很大影响,平整岸线对蓝藻水华是不易堆积的,复杂岸线通常会使得蓝藻水华产生堆积;通过获取高精度的巢湖遥感影像图,使用简化后的盒计数法来定量计算岸线形态^[35],即画边长为 r 的正方形将岸线栅格图覆盖,通过计算岸线分形维数并结合专家意见对岸线复杂度进行归一化后再划分^[36-37],计算公式为:

$$R^{SL} = \left| \frac{\ln N}{\ln r} + C \right| \quad (6)$$

$$R_i^{SL*} = (R_i^{SL} - R_{\min}^{SL}) / (R_{\max}^{SL} - R_{\min}^{SL}) \quad (7)$$

公式(6)用于计算巢湖岸线分形维数,其中, R^{SL} 为岸线分形维数,用于表征岸线的复杂度, N 为岸线像元数量, C 为常数;公式(7)用于计算巢湖滨岸带网格的岸线复杂度, R_i^{SL*} 为岸线复杂度, R_i^{SL} 为网格 i 的岸线复杂程度, R_{\min}^{SL} 和 R_{\max}^{SL} 分别为所有巢湖滨岸带网格的岸线分形维数的最小值和最大值. R_i^{SL*} 的取值范围为 0~1,数值越大,表示该网格的岸线越复杂,蓝藻水华堆积风险越大.

根据 4 个风险指数(蓝藻水华指数、动力指数、风向指数和岸线复杂度)的计算结果,采用以下公式计算滨岸带网格单元蓝藻水华堆积的综合风险指数:

$$R_i = \sum_{x=1}^n R_i^x \cdot w_x \quad (8)$$

式中, R_i 为网格 i 的综合风险指数, R_i^x 为网格 i 的风险指数 x , w_x 为风险指数 x 的权重系数, n 为风险指数数量($n=4$). 根据各指数对巢湖滨岸带蓝藻水华堆积的影响程度,结合专家与管理建议,确定巢湖滨岸带蓝藻水华堆积风险评估的权重系数,蓝藻水华、动力、风向和岸线复杂度权重均为 0.25^[36-37].

根据蓝藻水华指数、动力指数、风向指数和岸线复杂度 4 个指标计算的综合风险指数,将综合风险指数值归一化处理之后,以数值大小确定风险等级,并将风险等级划分为 I~V 级(表 1).

表 1 巢湖滨岸带蓝藻水华堆积评估标准

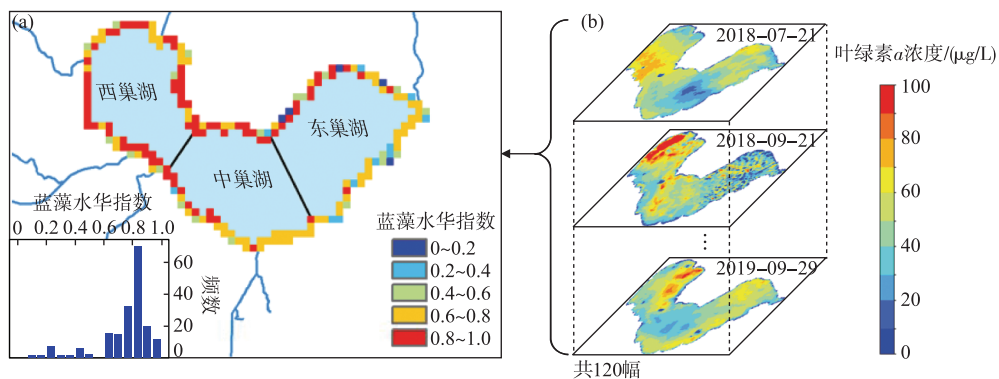
Tab.1 Evaluation criteria of harmful algal blooms accumulation at littoral zone of Lake Chaohu

指数	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
动力指数	(0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1.0]
风向指数	(0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1.0]
岸线复杂度	(0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1.0]
蓝藻水华指数	(0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1.0]

2 结果与分析

2.1 蓝藻水华指数

巢湖滨岸带风险评估区域中,蓝藻水华指数存在显著空间差异,总体呈现西部较高(指数均值 >0.6),东部较低(指数均值 <0.6) (图 3b)。从 3 幅具有巢湖整体典型分布状况的叶绿素 *a* 浓度分布(图 3a)可以看出,巢湖的西北部叶绿素 *a* 浓度较高(叶绿素 *a* 浓度年均大于 $36 \mu\text{g/L}$)。蓝藻水华指数高值网格(指数 >0.8)主要分布于西巢湖滨岸带和东巢湖西北岸,其中西巢湖滨岸带高值网格的可能原因是南淝河等河流输入了大量的氮、磷污染物,促进了藻类生长^[7];而东巢湖西北岸高值网格的可能原因:一是东巢湖营养盐水平较高、中西巢湖蓝藻水华漂浮至东巢湖西北岸^[38],二是藻类演替为微囊藻,2018 年以前 6—10 月东中巢湖的优势藻类为鱼腥藻且生物量较低^[39],但微囊藻在高温下生长快速,更易上浮和聚集形成蓝藻水华^[38]。东巢湖北岸部分网格值与巢湖东南岸的网格值较低,可能是由于巢湖东南岸是在夏季盛行风(东风/东南风)上风向,蓝藻水华不易在此区域长时间停留^[40]。

图 3 巢湖年均叶绿素 *a* 浓度分布(a)与滨岸带蓝藻水华指数(b)Fig.3 Distribution of annual average chlorophyll-*a* concentration (a) and littoral harmful algal blooms index (b) in Lake Chaohu

2.2 动力指数

巢湖滨岸带风险评估区域中,动力风险指数变化差异明显(图 4a),在杭埠河、南淝河、柘皋河、白石天河、兆河与派河入湖口区域的网格值较低之外,其他沿岸区域均为高值网格(指数大于 0.8)。此结果与 2018—2019 年 4—10 月巢湖总体水动力强弱分布(图 4b)较为一致,高网格值区域的水体流速也相应较弱,入湖口区域水量交换显著,流速较快,水动力强度也较高,因而蓝藻水华堆积风险较低。巢湖 4—10 月风速数据分析结果(图 4c)表明:2018 年,平均风速超过 4 m/s 的时间仅有 1 d,平均风速低于 3 m/s 的时间达 192 d;2019 年,平均风速超过 4 m/s 的时间有 10 d,平均风速低于 3 m/s 的时间有 178 d,可见蓝藻水华漂浮表面的时间远大于垂向均匀分布的时间,滨岸带蓝藻水华发生堆积概率也大幅提高。巢湖湖面风速变化幅度较大,风速到达峰值后,通常在一段时间内可持续减弱,强风速条件下无法造成滨岸带蓝藻水华堆积,但可能造成蓝藻水华向岸线靠近,导致后续低风速条件下的滨岸带蓝藻水华堆积。

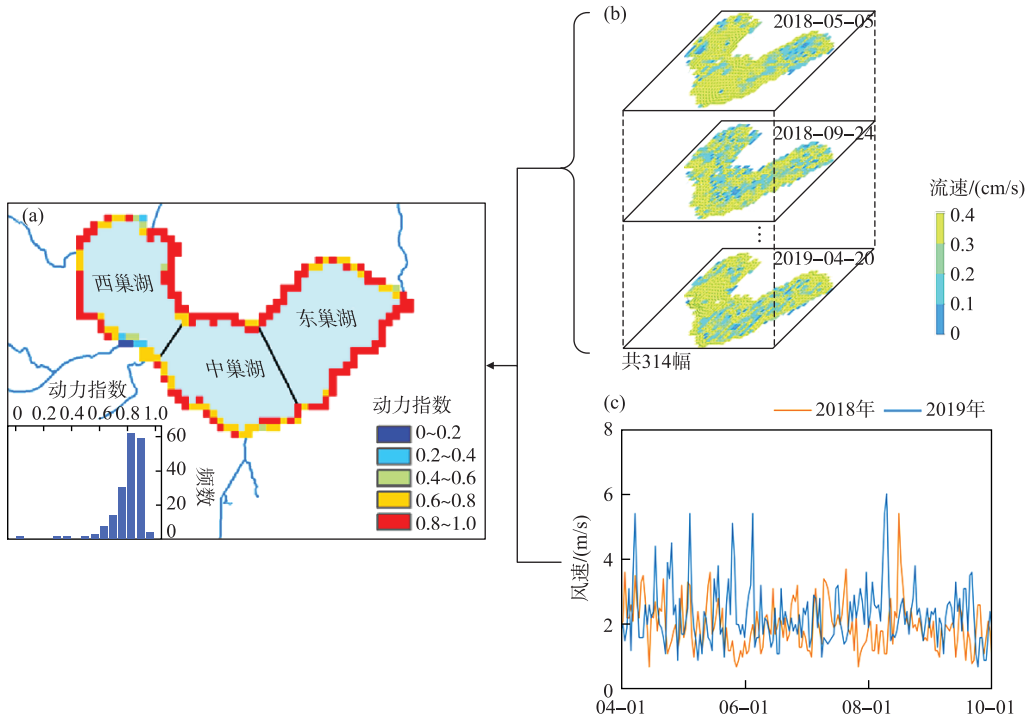


图4 巢湖 2018—2019 年(4—10 月)逐日风速(a)、水动力条件(b)与滨岸带动力指数(c)

Fig.4 Daily wind speed (a), hydrodynamic conditions (b) and littoral motion index (c) from April to October during 2018–2019 in Lake Chaohu

2.3 风向指数

巢湖滨岸带风险评估区域中,风向风险指数分布较分散,但是巢湖西岸总体网格值显著高于巢湖其余滨岸带,呈连续带状分布(图 5a). 巢湖湖面 4—10 月期间 8 类风向中频次最高为东风与西风,分别为 154 和 113 次(图 5b),这也是近年来西巢湖滨岸带蓝藻水华堆积严重以及中巢湖与东巢湖湖面蓝藻水华暴发程度加重的重要因素之一. 巢湖湖面频次最高的 3 类风向的风分别冲击岸线之后以网格统计,其叠加之后几乎覆盖整个巢湖滨岸带,大面积与带状连续分布的高值网格西巢湖滨岸带是重点关注的区域(图 5c). 结合图 3a 所示,巢湖中总体叶绿素 a 浓度在西部和中部的值较高,很大程度上是受到巢湖湖面东风与西风影响,符合西巢湖与东巢湖叶绿素 a 浓度较高的现状. 西巢湖滨岸带风向指数网格值高与风力大小(图 4a)的密切联系极大程度上影响滨岸带蓝藻水华堆积概率,2018—2019 年 4—10 月东风时间为 154 d,但其平均风速超过 4 m/s 的时间只有 4 d,而低风速盛行风(东风/东南风)有利于蓝藻水华在西部滨岸带堆积,因此,西巢湖滨岸带出现了风向指数的系列高值网格(指数>0.6).

2.4 岸线复杂度

巢湖滨岸带风险评估区域中,东巢湖东南岸与西巢湖西北岸的岸线形态较复杂,其他滨岸带岸线形态较平整(图 6a). 本文采用盒计数法定量分析岸线形态,两个网格分别代表平整岸线与复杂岸线,采用岸线分形维数(岸线复杂度)评估其形态复杂程度(图 6b~c). 岸线复杂度的中高值网格(指数>0.6)连续分布于西巢湖西北岸和东巢湖东南岸,同时零星分布于中巢湖忠庙区域的滨岸带. 结合现场调研结果,西巢湖西岸与北岸的陆域土地利用组成较为复杂,向湖体延伸的岸线较多,塘西河入湖口位置和派河入湖口位置附近存在数量较多、形态复杂的水上岸线,在东风及弱风速条件下,是蓝藻水华在该滨岸带堆积的有利条件. 2020 年夏季,巢湖水位上涨,滨岸带挺水植物改变了岸线形态,导致部分原本平整的岸线发生改变,进而出现蓝藻水华堆积现象.

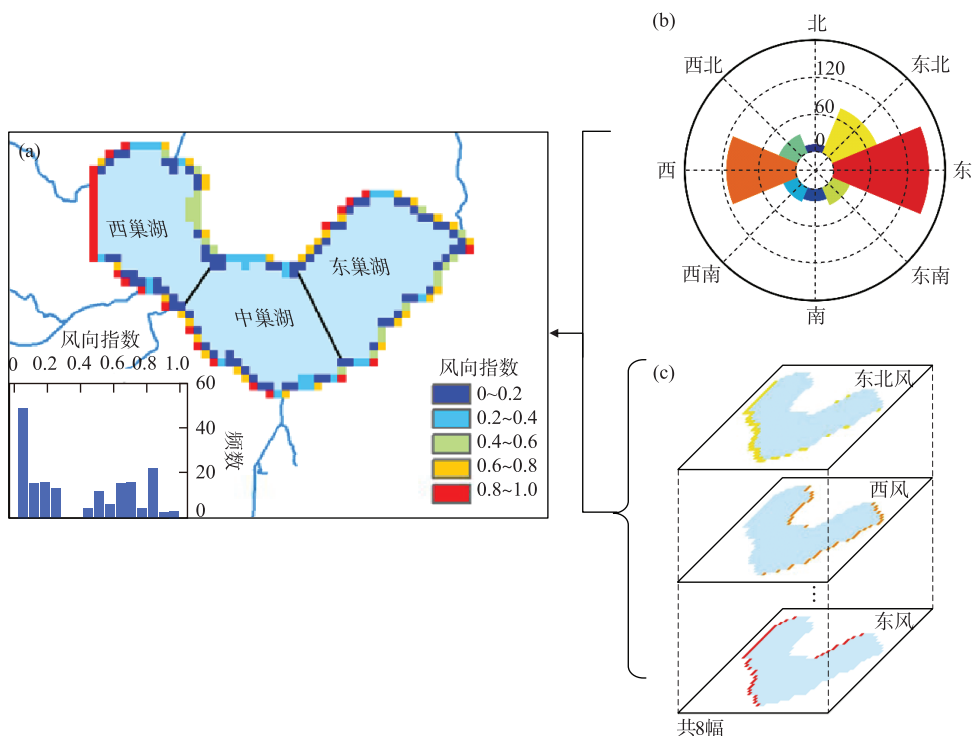


图5 巢湖2018—2019年(4—10月)风向频数(a,b)和滨岸带风向指数(c)

Fig.5 Wind direction frequency (a, b) and littoral wind direction index (c) from April to October during 2018–2019 in Lake Chaohu

2.5 综合风险

滨岸带蓝藻水华堆积风险评估结果(图7)表明:蓝藻水华堆积综合风险指数总体呈现为西高、东低、北高、南低的空间格局。西巢湖北岸与西岸等区域的叶绿素 a 浓度高(4—10月叶绿素 a 浓度均值 $>30\ \mu\text{g/L}$),在盛行风东南风、弱动力扰动条件下,蓝藻水华极易在上述区域堆积,蓝藻水华堆积的综合风险等级均为V级,占滨岸带总面积的12.1%,是蓝藻水华堆积风险管控的重点区域。

蓝藻水华堆积的综合风险等级为IV级区域较大(占滨岸带总面积的25.6%),表明在适宜的气象与水文条件下,全湖较多区域存在蓝藻水华堆积风险:一方面,这些区域叶绿素 a 浓度较高;另一方面,2018年以来,巢湖藻类群落更替为以微囊藻为主,微囊藻具有容易聚集、上浮和抗风浪等特征,也是藻类水华聚集与堆积的有利条件^[38]。上述区域需要在日常管理中重视,提前预防蓝藻水华严重堆积。

III级蓝藻水华堆积综合风险区域最多,占滨岸带总面积的42.4%,其分布区域较为广泛,散布于整个巢湖沿岸。III级区域的影响因素存在着区域性差异,体现在:西巢湖北岸部分区域内叶绿素 a 浓度较高(年平均叶绿素 a 浓度 $>25\ \mu\text{g/L}$),同时受区域内动力较弱和岸线形态较复杂影响;西巢湖西南岸、中巢湖南岸和东巢湖东北岸区域内叶绿素 a 浓度较高(年平均叶绿素 a 浓度 $>27\ \mu\text{g/L}$),同时受到区域内动力扰动较弱影响;而东巢湖西北岸部分区域内叶绿素 a 浓度较高(年平均叶绿素 a 浓度 $>21\ \mu\text{g/L}$),同时受常年主导东风影响。

I和II级蓝藻水华堆积综合风险区域集中在西巢湖南岸和东巢湖南岸,占滨岸带总面积的19.9%。该区域叶绿素 a 浓度低,岸线平整、动力扰动强、不在盛行风的下风向区域,蓝藻水华堆积风险较低。

基于巢湖滨岸带蓝藻水华堆积综合风险指数将滨岸带蓝藻水华堆积风险划分为高、中 and 低3类,并提出相应的巢湖滨岸带蓝藻水华堆积防控建议(表2)。

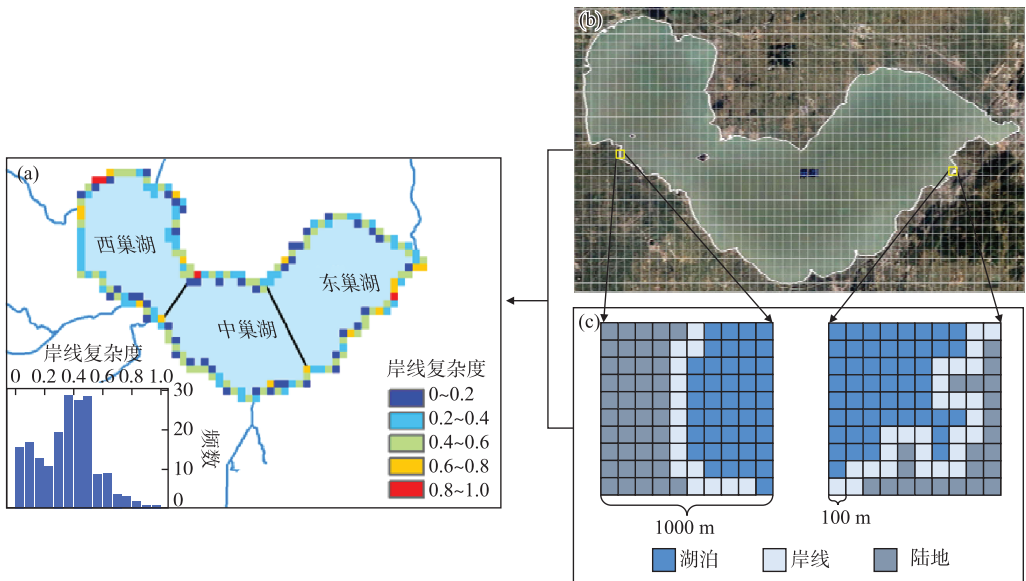


图 6 巢湖岸线分布(a,b)与复杂度(c)

Fig.6 Shoreline distribution (a,b) and complexity (c) of Lake Chaohu

2.6 滨岸带蓝藻水华堆积风险评估方法的不确定性

本研究以巢湖为研究对象,构建了适用于大型富营养化湖库的滨岸带蓝藻水华堆积风险的评估方法,但方法有待进一步完善:

1)评价过程存在系数的主观确定,包括权重系数和指数分级等.目前,科学上尚无公认的权重系数计算/指数分级方法,原因是评价案例差异大,大多需要结合专家意见确定,难以实现完全客观的确定.根据已有研究,在缺乏充分科学依据的条件下,一般采用等权系数法和等指数分级法.上述系数/权重的确定直接影响了评估结果,未来可依托风险评估方法的发展,以及长时间多源监测数据的支撑,进一步量化研究上述关键参数的确定,提高权重系数的可信度. 2)蓝藻水华生物量采用MODIS遥感影像解译的叶绿素a浓度表征,缺点是空间分辨率低,难以精准识别滨岸带的局部小范围区域,同时遥感光学数据受天气影响太大,在云量较大条件下,基本无法获取水体蓝藻水华的信息.2018—2019年4—10月的有效数据仅100多幅,且时间序列不连续;局部重点关注区域的藻类生物量难以与周围像元精细区分.未来可进一步融合自动监测、高分辨率遥感影像等多源数据,进一步提升藻类生物量时空分布的准确度.

3)未考虑芦苇等挺水植被等对蓝藻水华堆积的影响.一方面,岸线形态是由矢量数据转化为栅格数据,本研究栅格单元大小为100 m×100 m,无法精细体现滨岸带挺水植被(芦苇等)的局部小斑块分布;另一方面,芦苇等挺水植物对蓝藻水华堆积的影响尚缺乏机理过程研究与关键参数确定,因此暂不在本研究中考虑.

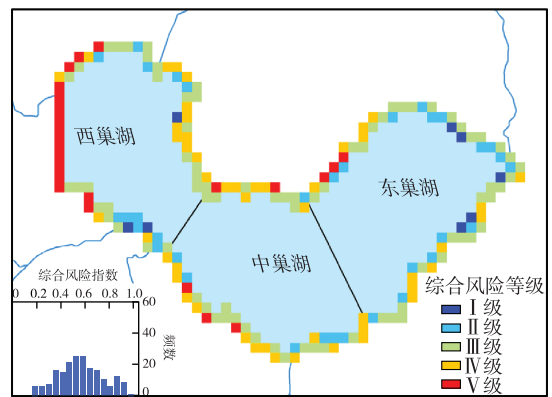


图 7 巢湖滨岸带蓝藻水华堆积的综合风险等级分布

Fig.7 Distribution of comprehensive risk levels of harmful algal blooms accumulation in littoral zone of Lake Chaohu

表 2 巢湖滨岸带蓝藻水华堆积防控建议

Tab.2 Potential strategies to alleviate harmful algal blooms accumulation at littoral zone of Lake Chaohu

综合风险指数	风险	建议
I	低风险	实施定期监测
II		
III	中风险	在定期监测基础上,适当配置应急打捞和应急处置措施
IV		
V	高风险	1. 建立蓝藻水华天空地监测、预测预警和应急处置协作平台 ^[38,41] 2. 根据预测预警信息,科学配置打捞和搅拌曝气、高效除藻除臭装置等设备 ^[38]

3 结论与展望

本研究以巢湖为研究对象,针对滨岸带蓝藻水华堆积这一突出水环境问题,开展了滨岸带蓝藻水华的堆积风险评估,相关结论如下:

1) 创新发展了适用于大型湖库的滨岸带蓝藻水华堆积风险评估方法;该方法是以流域水文与湖泊水动力模拟、遥感反演、GIS 空间分析等为技术支撑,综合考虑了影响蓝藻水华聚集与堆积的关键要素(藻类生物量、岸线形态、湖泊水动力、风速和风向等),构建了蓝藻水华堆积风险评估指标体系,可为滨岸带蓝藻水华堆积提供量化的风险评估,方法可应用于其他大型富营养化湖库。

2) 初步评估了 2018—2019 年的巢湖滨岸带的蓝藻水华堆积风险。评估结果表明:巢湖蓝藻水华堆积综合风险指数总体呈现为西高、东低、北高、南低的空间格局,其中,高风险区域(V 级)主要分布于西巢湖西岸与西北岸,占滨岸带总面积的 12.1%,具有叶绿素 *a* 浓度高、动力条件弱、位于下风向区域等特征,是蓝藻水华堆积风险管控的重点区域;中风险区域(III 与 IV 级)面积大,分别占滨岸带总面积的 42.4% 和 25.6%,存在蓝藻水华堆积风险;低风险区域(I 与 II 级)主要分布在西巢湖东北岸和巢湖南岸,面积积极小,仅占滨岸带总面积的 19.9%。

3) 发展的蓝藻水华堆积风险评估方法是蓝藻水华应急处置的关键技术:基础研究构建的蓝藻水华堆积风险评估方法,通过进一步与蓝藻水华预测模型、气象预报模式耦合,可实现蓝藻水华堆积风险的预测结果,动态识别蓝藻水华的易堆积滨岸带区域,为富营养化湖库蓝藻水华应急处置实时提供重点关注区域等信息,进而提前布局针对性的应急处置措施。

4 参考文献

- [1] Michalak AM, Anderson EJ, Beletsky D *et al.* Record-setting algal bloom in Lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future conditions. *PNAS*, 2013, **110** (16): 6448-6452. DOI: 10.1073/pnas.1216006110.
- [2] Watson SB, Miller C, Arhonditsis G *et al.* The re-eutrophication of Lake Erie: Harmful algal blooms and hypoxia. *Harmful Algae*, 2016, **56**: 44-66. DOI: 10.1016/j.hal.2016.04.010.
- [3] Ulrich AE, Malley DF, Watts PD. Lake Winnipeg Basin: Advocacy, challenges and progress for sustainable phosphorus and eutrophication control. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 1030-1039. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.106.
- [4] Schindler DW, Hecky RE, McCullough GK. The rapid eutrophication of Lake Winnipeg: Greening under global change. *Journal of Great Lakes Research*, 2012, **38**: 6-13. DOI: 10.1016/j.jglr.2012.04.003.
- [5] Qin BQ, Paerl HW, Brookes JD *et al.* Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10-years (2007–2017) efforts. *Science Bulletin*, 2019, **64**(6): 354-356. DOI: 10.1016/j.scib.2019.02.008.
- [6] Huang JC, Gao JF, Hörmann G. Hydrodynamic-phytoplankton model for short-term forecasts of phytoplankton in Lake Taihu, China. *Limnologia*, 2012, **42**(1): 7-18. DOI: 10.1016/j.limno.2011.06.003.
- [7] Huang JC, Zhang YJ, Huang Q *et al.* When and where to reduce nutrient for controlling harmful algal blooms in large eutrophic lake Chaohu, China?. *Ecological Indicators*, 2018, **89**: 808-817. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.01.056.

- [8] Duan HT, Tao M, Loisel SA *et al.* MODIS observations of cyanobacterial risks in a eutrophic lake: Implications for long-term safety evaluation in drinking-water source. *Water Research*, 2017, **122**: 455-470. DOI: 10.1016/j.watres.2017.06.022.
- [9] Wu Z, Liu Y, Liang ZY *et al.* Internal cycling, not external loading, decides the nutrient limitation in eutrophic lake: A dynamic model with temporal Bayesian hierarchical inference. *Water Research*, 2017, **116**: 231-240. DOI: 10.1016/j.watres.2017.03.039.
- [10] Wang JH, Yang C, He LQS *et al.* Meteorological factors and water quality changes of Plateau Lake Dianchi in China (1990-2015) and their joint influences on cyanobacterial blooms. *Science of the Total Environment*, 2019, **665**: 406-418. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.010.
- [11] Ho JC, Michalak AM, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature*, 2019, **574**(7780): 667-670. DOI: 10.1038/s41586-019-1648-7.
- [12] Qin BQ, Wang XD, Tang XM *et al.* Drinking water crisis caused by eutrophication and cyanobacterial bloom in lake Taihu: Cause and measurement. *Advances in Earth Science*, 2007, **22**(9): 896-906. [秦伯强, 王小冬, 汤祥明等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策. 地球科学进展, 2007, **22**(9): 896-906.]
- [13] Steffen MM, Davis TW, McKay RML *et al.* Ecophysiological examination of the lake Erie *Microcystis* bloom in 2014: Linkages between biology and the water supply shutdown of Toledo, OH. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(12): 6745-6755. DOI: 10.1021/acs.est.7b00856.
- [14] Sinha E, Michalak AM, Balaji V. Eutrophication will increase during the 21st century as a result of precipitation changes. *Science*, 2017, **357**(6349): 405-408. DOI: 10.1126/science.aan2409.
- [15] General Office of the State Council. Notice of the General Office of the State Council Transmitting the Opinions of the State Environmental Protection Administration and other Departments on Strengthening the Water Environmental Protection of Key Lakes. *Gazette of the State Council of the People's Republic of China*, 2008, (5): 5-7. [国务院办公厅. 国务院办公厅转发环保总局等部门关于加强重点湖泊水环境保护工作意见的通知. 中华人民共和国国务院公报, 2008, (5): 5-7.]
- [16] Yin FC, Zhang ZY. Survey of Chaohu lake eutrophication research. *J Lake Sci*, 2003, **15**(4): 377-384. DOI: 10.18307/2003.0413. [殷福才, 张之源. 巢湖富营养化研究进展. 湖泊科学, 2003, **15**(4): 377-384.]
- [17] Li YX, Rao BQ, Wang ZC *et al.* Spatial-temporal distribution of phytoplankton in bloom-accumulation area in Lake Chaohu. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(S2): 25-31. [李印霞, 饶本强, 汪志聪等. 巢湖藻华易堆积区蓝藻时空分布的研究. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(S2): 25-31.]
- [18] Huang JC, Zhang YJ, Arhonditsis GB *et al.* The magnitude and drivers of harmful algal blooms in China's lakes and reservoirs: A national-scale characterization. *Water Research*, 2020, **181**: 115902. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115902.
- [19] Shan K, Shang MS, Zhou BT *et al.* Application of Bayesian network including *Microcystis* morphospecies for microcystin risk assessment in three cyanobacterial bloom-plagued lakes, China. *Harmful Algae*, 2019, **83**: 14-24. DOI: 10.1016/j.hal.2019.01.005.
- [20] Liu JT, Yang YS, Gao JF *et al.* Comprehensive evaluation method of cyanobacteria bloom hazard in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2011, **23**(3): 334-338. DOI: 10.18307/2011.0304. [刘聚涛, 杨永生, 高俊峰等. 太湖蓝藻水华灾害灾情评估方法初探. 湖泊科学, 2011, **23**(3): 334-338.]
- [21] Liu JT, Yang YS, Jiang JH *et al.* Risk evaluation method of cyanobacteria bloom hazard in Taihu Lake. *China Environmental Science*, 2011, **31**(3): 498-503. [刘聚涛, 杨永生, 姜加虎等. 太湖蓝藻水华灾害风险分区评估方法研究. 中国环境科学, 2011, **31**(3): 498-503.]
- [22] Liu Y, Yang S, Liu XF. Ecological risk assessment of *Microcystis* blooms in Erhai Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, **42**(5): 1066-1074. DOI: 10.7541/2018.131. [刘毅, 杨劼, 刘晓峰. 洱海微囊藻水华的水生态风险评估研究. 水生生物学报, 2018, **42**(5): 1066-1074.]
- [23] Hefei Bureau of Statistics ed. Hefei statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2019. [合肥市统计局. 合肥统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2019.]
- [24] Zhang M, Kong FX. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu (1984-2013). *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 791-798. DOI: 10.18307/2015.0505. [张民, 孔繁翔. 巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略(1984—2013年). 湖泊科学, 2015, **27**(5): 791-798.]

- [25] Zhao RJ. The Xinanjiang model applied in China. *Journal of Hydrology*, 1992, **135**(1/2/3/4): 371-381. DOI: 10.1016/0022-1694(92)90096-E.
- [26] Anderson MG, McDonnell JJ. Encyclopedia of Hydrological Sciences (Anderson/Hydro) || Rainfall-Runoff Models for Real-Time Forecasting, 2005.
- [27] Allan R, Pereira L, Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, 1998.
- [28] Hamrick JM. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code; Theoretical and computational aspect. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, 1992.
- [29] Huang JC, Yan RH, Gao JF *et al.* Modeling the impacts of water transfer on water transport pattern in Lake Chao, China. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 271-279. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.06.074.
- [30] Huang JC, Gao JF, Xu Y *et al.* Towards better environmental software for spatio-temporal ecological models: Lessons from developing an intelligent system supporting phytoplankton prediction in lakes. *Ecological Informatics*, 2015, **25**: 49-56. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2014.11.005.
- [31] Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color I. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**(4): 709-722. DOI: 10.4319/lo.1977.22.4.0709.
- [32] Qi L, Hu CM, Visser PM *et al.* Diurnal changes of cyanobacteria blooms in Taihu Lake as derived from GOCI observations. *Limnology and Oceanography*, 2018, **63**(4): 1711-1726. DOI: 10.1002/lno.10802.
- [33] 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.
- [34] Zhang M, Kong FX, Wu XD *et al.* Different photochemical responses of phytoplankters from the large shallow Taihu Lake of subtropical China in relation to light and mixing. *Hydrobiologia*, 2008, **603**(1): 267-278. DOI: 10.1007/s10750-008-9277-4.
- [35] Kolmogorov AN, Levin V, Hunt JCR *et al.* The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1991, **434**(1890): 9-13. DOI: 10.1098/rspa.1991.0075.
- [36] Liu XQ, Chen J, Chen FJ *et al.* Scale sensitivity experiments of precipitation neighborhood ensemble probability method. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2020, **44**(2): 282-296. [刘雪晴, 陈静, 陈法敬等. 降水邻域集合概率方法尺度敏感性试验. 大气科学, 2020, **44**(2): 282-296.]
- [37] Zhang XZ, Li XX, Xu XC *et al.* Ensemble projection of climate change scenarios of China in the 21st century based on the preferred climate models. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(9): 17-30. DOI: 10.11821/dlxb201709002. [张学珍, 李侠祥, 徐新创等. 基于模式优选的 21 世纪中国气候变化情景集合预估. 地理学报, 2017, **72**(9): 17-30.]
- [38] Zhang M, Shi XL, Yang Z *et al.* The variation of water quality from 2012 to 2018 in Lake Chaohu and the mitigating strategy on cyanobacterial blooms. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 11-20. DOI: 10.18307/2020.0102. [张民, 史小丽, 阳振等. 2012—2018 年巢湖水质变化趋势分析和蓝藻防控建议. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 11-20.]
- [39] Zhang M, Zhang YC, Yang Z *et al.* Spatial and seasonal shifts in bloom-forming cyanobacteria in Lake Chaohu; Patterns and driving factors. *Phycological Research*, 2016, **64**(1): 44-55. DOI: 10.1111/pre.12112.
- [40] Tang XX, Shen M, Duan HT. Temporal and spatial distribution of algal blooms in Lake Chaohu, 2000-2015. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 276-284. DOI: 10.18307/2017.0203. [唐晓先, 沈明, 段洪涛. 巢湖蓝藻水华时空分布(2000—2015 年). 湖泊科学, 2017, **29**(2): 276-284.]
- [41] Duan HT, Wan NS, Qiu YG *et al.* Discussions and practices on the framework of monitoring system in eutrophic lakes and reservoirs. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1396-1405. DOI: 10.18307/2020.0513. [段洪涛, 万能胜, 邱银国等. 富营养化湖库天空地一体化监控平台系统设计与实践. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1396-1405.]