

过去 40 年太湖剧烈的湖泊物理环境变化及其潜在生态环境意义^{*}

张运林^{**}, 秦伯强, 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: 过去 40 年, 全球气候变暖、辐射变暗和变亮、风速减弱、气候异常波动等自然环境变化以及筑坝建闸、岸堤硬化和调水引流等强烈人类活动势必会深刻改变太湖湖泊物理环境和过程, 驱动湖泊生态系统演化。基于历史文献、档案数据以及气象水文和透明度等长期观测数据, 本文系统梳理了太湖气温、水温、风速、水位和透明度等物理环境空间分布和长期变化特征, 探讨了气温和风速、水位和透明度相互协同作用机制及其潜在生态环境意义。受全球变化和城市化等影响, 过去 40 年太湖气温和水温呈现显著升高趋势, 而近地面风速则表现为持续下降, 湖泊增温和风速下降有利于藻类生长和蓝藻水华漂浮聚集, 某种程度上增加了蓝藻水华出现频次和集聚的面积。为防洪和满足流域日益增长的水资源需求, 闸坝管控和调水引流使太湖水位呈现缓慢增加趋势, 而入湖污染物增加和富营养化则造成水体透明度逐渐下降, 致使透明度与水位(水深)的比值明显降低, 减少了湖底可利用光强, 恶化水下光环境, 在一定程度上驱动了太湖水生植被和草型生态系统退化。湖泊物理环境长期变化逐渐拓展了太湖藻型生境空间而压缩了草型生境空间, 加剧了草型生态系统向藻型生态系统转化和增强了藻型生态系统的自我长期维持。太湖湖泊物理环境的显著变化也会部分抵消流域营养盐削减和湖体营养盐下降对藻类生物量和蓝藻水华的控制, 增加了太湖蓝藻水华防控和湖泊富营养化治理的难度。这意味着未来流域控源截污需要更加严格的标准, 而湖泊水位等物理环境的有效管控是应对藻华加剧和恢复草型生态系统的适应性管理策略。

关键词: 长期观测; 物理环境; 藻类水华; 水生植被; 湖泊增温; 水位; 透明度; 太湖

Long-term changes in physical environments and potential implications for the eco-environment of Lake Taihu in the past four decades^{*}

ZHANG Yunlin^{**}, QIN Boqiang & 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: The global environment has experienced rapid changes over the past four decades, including global climate warming, radiation dimming and brightening, wind stilling, and abnormal climate fluctuations. Meanwhile, strong human activities such as dam construction, bank hardening and water diversion and drainage have happened in Lake Taihu catchment. All these changes of natural environments and human activities have profoundly reshaped the physical environments and processes of Lake Taihu, which have further strongly driven the evolution of lake ecosystem structure and function. Based on historical literatures and documents, as well as long-term observations of meteorology, hydrology and Secchi disc depth (SDD), this study aims to systematically explore the spatial distribution and long-term change characteristics of physical environment in Lake Taihu, such as air temperature, water temperature, water level, wind speed and SDD. Meanwhile, we will elucidate the synergistic effects of air temperature and wind speed, water level and SDD and their potential ecological environmental significances for algal bloom outbreaks and aquatic macrophytes loss. Due to the global changes and rapid urbanization, the air temperature and water temperature of Lake Taihu have been increasing continuously in the past 40 years, while the wind speed near the ground has been decreasing continuously. Lake warming and decreasing wind speed facilitate the growth of algae and the floating accumulation of cyanobacteria bloom, which to some extent

^{*} 2020-04-30 收稿; 2020-05-23 收修改稿。

国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07203) 和国家自然科学基金项目 (41930760, 41621002, 41771514) 联合资助。

^{**} 通信作者; E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn.

increases the observation frequency and area of cyanobacteria bloom. In order to control the flood and meet the increasing demand of water resources in the basin, the water level of Lake Taihu is increasing slowly due to dam control and water diversion. However, the increase of pollutants entering the lake and the development of eutrophication gradually decrease SDD. Therefore, the significant decrease of the ratio of SDD to water level (water depth) was observed in Lake Taihu, which significantly decreased the available light intensity at the bottom of the lake, and deteriorate the underwater light environment. All these changes have resulted in the loss of aquatic macrophytes and greatly driven the degradation of macrophyte-dominated ecosystem in Lake Taihu. The long-term changes of lake physical environment have gradually expanded the algae habitat space of Lake Taihu, compressed the macrophyte habitat space, accelerated the shift from a clear macrophyte-dominated state to a turbid algal-dominated state, and enhanced the long-term maintenance of algal-dominated ecosystem. Therefore, our findings highlight the importance of long-term physical environment monitoring data for deeply understanding ecosystem response to global climate change and human activities. The profound changes in physical environment has also partially offset the control of algal biomass and cyanobacteria bloom caused by the reduction of nutrients in the basin and the decrease of nutrients in the lake, which will increase the difficulty of prevention and control of cyanobacteria bloom and lake eutrophication in Lake Taihu. This means that in the future, more strict standards are needed for controlling pollution and nutrients, and the effective control of lake physical environment such as water level is the adaptive management strategy to deal with the aggravation of algal bloom and the restoration of macrophyte-dominated ecosystem.

Keywords: Long-term observations; physical environment; algal bloom; aquatic macrophytes; lake warming; water level; Secchi disc depth; Lake Taihu

湖泊物理环境和过程包括水位和水量平衡、出入流等水文过程,光照和水温等光热过程以及波浪和潮流等水动力过程,是湖泊地形和岸线的主要塑造者以及湖泊化学过程、生物生态过程的基石,驱动湖泊环境和生态系统演化^[1-5]。但由于湖沼学的发展起源于生物学和生态学,被认为是生态学中最为成功的一门分支学科,其早期研究主要集中在空间小于 10 m²,时间短于 1 年甚至几个月的时空尺度上进行^[6],因此湖泊物理环境的影响范围和程度相对较小。加之早期的湖沼学家由于学科背景的局限性,其对湖泊物理环境的关注非常有限,研究也不够深入,致使物理湖泊学的发展较为迟缓,其在湖沼学中的作用和地位也远远不如物理海洋学在海洋科学中的地位。随着湖沼学研究空间的拓展和时间尺度的延长,湖泊物理环境的作用日渐凸显,也吸引了大量物理学背景的科学家进入湖沼学领域,拓展了湖沼学研究的内涵和范畴,使其逐渐发展成为一个综合性学科。

我国湖沼学研究早期主要聚焦于长江中下游浅水湖泊调查和资源开发利用^[7-10],由于湖泊与河流水文交换频繁,加之水浅、湖面开阔,湖泊水动力扰动频繁且强烈,因此出入流、水动力扰动等湖泊物理过程变化特征及其生态环境效应备受关注,我国老一辈的湖沼学家对此做了大量的基础性工作^[8-9,11],发展了我国独具特色的浅水湖泊湖沼学。太湖,作为一个大型浅水湖泊,水-气、水-沉积物和水-生物界面间的物质循环和能量流动受湖泊物理环境和过程的强烈扰动和深刻影响,因此从 1990s 开始围绕太湖出入流、水动力扰动和光热过程等开展了大量研究^[12-17],可以说在我国湖泊物理环境研究中最系统和最深入。但是,过去数十年,全球出现气候变暖、辐射变暗和变亮、风速减弱、气候异常波动等一系列自然环境变化,而太湖流域还受到快速城市化、筑坝建闸、岸堤硬化和调水引流等强烈人类活动影响,这些必将深刻改变太湖湖泊物理环境和过程,直接或者间接影响湖泊生态系统结构、功能和服务。特别是 1980s 以来太湖水环境质量快速下降、蓝藻水华暴发日益频繁和严重、草型生态系统急剧退化等均与湖泊物理环境变化息息相关^[12,16,18-20]。但相比于湖泊富营养化和蓝藻水华等生态环境问题,物理湖泊学的研究和认识仍严重滞后,没有深入揭示变化环境下大型湖泊剧烈的物理环境变化过程,也导致湖泊化学和生物生态学的研究缺失了物理学的坚实支撑,因此迫切需要系统梳理太湖湖泊物理环境长期变化特征及其潜在生态环境意义。但鉴于本人的学科背景和知识积累,该文未涉及湖泊出入流等水文过程和波浪潮流等水动力过程,仅聚焦于湖泊气温、水温、风速、水位和透明度等物理环境(水位和风速某种程度上也可以部分反映出入流和水动力扰动)。本文是在前期的研究基础上^[12],补充更新了大量历史数据、文献档案资料以及最新的观测数据,将时间序列拓展到过去 40 年,试图阐明其长期变化特征、相互协同作用机理及其潜在的生态环境意义,提出变化环境下湖泊生态系统适应性的管理策略。

1 数据与资料

1.1 气象水文数据

通过中国气象数据共享网 (<http://cdc.nmic.cn>) 收集、整理太湖东山气象站 1980 年至今的逐日气象观测数据, 主要包括气温 (日最低、日最高、日平均)、风速风向 (平均风速、最大风速) 和降水等. 东山气象站位于太湖东南部的东山镇吴巷山村 (图 1), 远离城市影响, 属于“百年老站”, 能较为全面地反映全湖气象条件.

水温数据来自中国科学院太湖湖泊生态系统研究站 (简称太湖站, TLLER) (图 1) 逐日观测数据, 从 1992 年开始每天 8:00、14:00 和 20:00 在太湖站栈桥水域 THL2 站点进行 3 次水温观测, 日水温为 3 次观测的平均值; 1992 年之前的日水温数据来自日水温和日气温长期观测结果线性拟合函数的反推算值^[12].

逐日水位数据来自太湖站和江苏省水文水资源勘测局, 观测站点分别位于梅梁湾和洞庭西山. 从 1992 年开始在太湖站边水域安装水位计, 进行水位观测, 日均水位为 8:00、14:00 和 20:00 水位计记录数据的平均值. 1992 年之前的水位数据来自于江苏省水文水资源勘测局, 其洞庭西山逐日水位数据通过经验关系模型校正到与太湖站梅梁湾观测数据一致^[12].

1.2 透明度数据

1992 年之后逐月或者逐季节透明度数据来自太湖站布设在全湖的长期定位观测点 (图 1). 1992 年开始太湖站在太湖北部的梅梁湾和开敞水域布设 9 个站点 (THL00~THL08) 进行逐月观测; 1998 年开始在大浦口、小梅口、五里湖、贡湖湾以及东太湖各新增 1 个站点, 观测频次是每季度 1 次, 分别为 2、5、8 和 11 月, 代表冬、春、夏和秋季; 2005 年开始在全湖新增 19 个站点, 但原来的 THL02 站点由于离岸边太近被剔除, 因此全湖共 32 个定位观测点, 其中北部湖区的 THL00、THL01、THL03~THL08、THL10、THL13、THL14、THL16、THL17 和 THL32 站点为逐月观测, 其他站点为逐季节观测, 仍然是 2、5、8 和 11 月. 为对比太湖典型草、藻型湖区透明度长期变化趋势, 选择东太湖的 THL12 站点和贡湖湾的 THL13 站点代表草型湖区站点, 观测频次为逐季节, 观测时间段为 1998—2019 年; 选择梅梁湾及湖心开敞区的 THL01 和 THL03~THL08 站点代表藻型湖区站点, 观测频次为逐月, 观测时间段为 1992—2019 年.

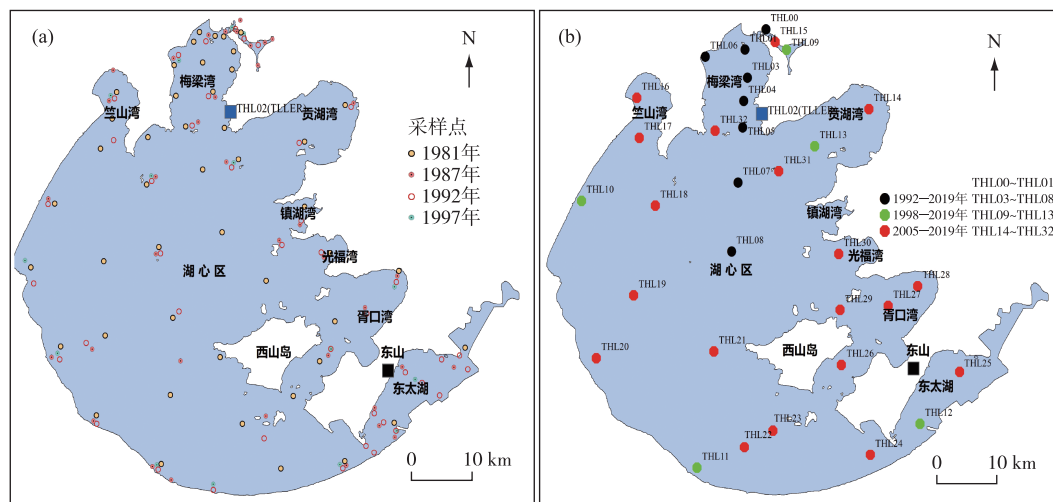


图 1 太湖 1981、1987、1992 和 1997 年历次采样站点(a)和 1992—2019 年长期定位观测站点(b)的空间分布以及气象和水文观测站位置

Fig.1 Spatial distribution of sampling sites of four historical investigations in 1981, 1987, 1992 and 1997 (a), long term specific sites from 1992 to 2019 (b), and the location of meteorological and hydrological observation stations

为对比分析全湖透明度空间分布和长期变化趋势,还收集整理了 1981、1987、1991 和 1997 年 4 个典型年份的全湖透明度观测数据,主要来自中国科学院南京地理与湖泊研究所历史档案资料和已出版文献数据^[21-24],分别为 1981 年 9 月全湖 45 个站点、1987 年 7 月全湖 35 个站点、1991 年 8 月 41 个站点和 1997 年 7 月 15 个站点(图 1),基本上代表太湖夏季透明度空间分布,时间间隔为 4~7 年。1997 年之后选择太湖站夏季 8 月份长期定位观测数据以反映其空间变化并与历史观测数据进行比较,典型年份为 2005、2010、2015 和 2019 年,时间间隔为 4~5 年。

1.3 统计分析

采用 SPSS 20 软件对数据进行统计分析,包括计算其平均值、线性拟合等,当显著性水平值低于 0.05 时表明显著相关,低于 0.01 时表明极显著相关。利用 ArcGIS 软件进行透明度空间分布插值图绘制。

2 结果

2.1 气温、水温 and 风速长期变化

受全球气候变暖和太湖流域快速城市化引起的热岛效应等影响,过去 40 年太湖的气温和水温显著上升(图 2),最高、最低和平均气温增温率分别为 0.535、0.508 和 0.511℃/10 年,最高气温的增温率略高于最低和平均气温。50 cm 处平均水温增温率与平均气温接近,为 0.514℃/10 年,40 年内平均水温增温 2.0℃,增加了 11.6%。但气温和水温增温均表现为明显的季节差异,在藻类萌发和蓝藻水华易发的春季(3—5 月)增温更为明显,平均气温和平均水温的增温率分别高达 0.699 和 0.702℃/10 年,40 年内增加了 2.8℃。

与此同时,受全球大气停滞和太湖周边城市高大楼群建设影响,太湖地区年平均风速呈现持续下降趋势(图 2)。相比较而言,最大风速的下降速度要明显大于平均风速,各自的线性下降斜率分别为每 10 年 0.41 m/s 和每 10 年 0.27 m/s,过去 40 年太湖地区年平均风速下降了 1.06 m/s,降低了 29.6%。相比于平均水温 40 年内增加 11.6%,平均风速的下降更为明显,线性相关的决定系数也更高,表明统计检验更显著、变化趋势更明显(图 2)。

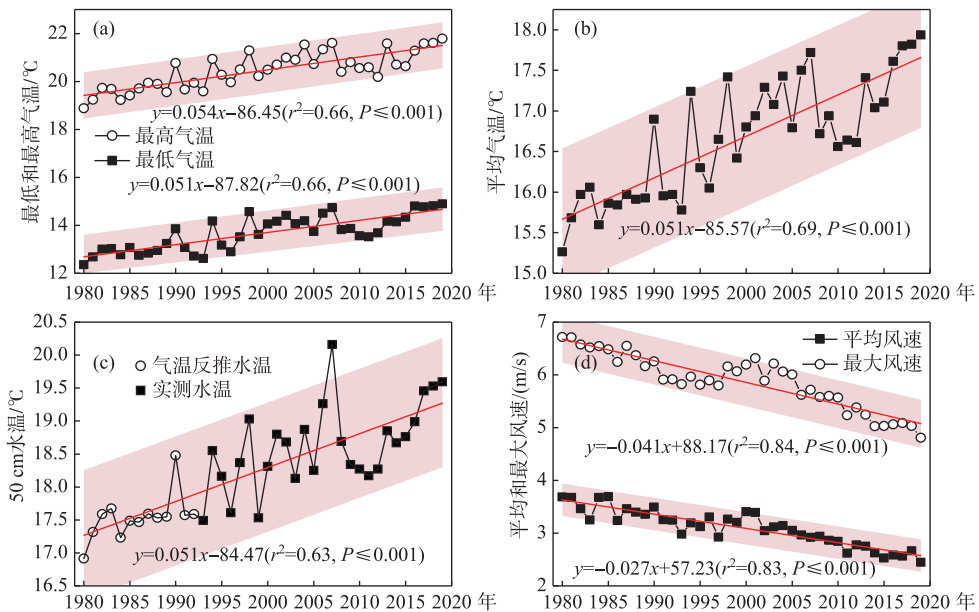


图 2 1980—2019 年太湖年最高和最低气温(a)、平均气温(b)、水温(c)和风速(d)的长期变化趋势

Fig.2 Long term trend of yearly maximum and minimum air temperature (a), mean air temperature (b), water temperature (c) and wind speed (d) in Lake Taihu from 1980 to 2019

2.2 水位长期变化

长期逐日水位观测显示,过去 40 年太湖年平均水位呈缓慢增加趋势(图 3),约增加了 0.25 m,增加率约为 8.7%,但考虑到太湖平均水深只有 1.9 m,年平均水位上升了 0.25 m 已是非常显著,相当于平均水深增加了 13.2%。同步观测显示流域长期降水没有显示明显增加趋势,并且年降水量与年平均水位线性相关的决定系数不是非常高($r^2=0.17$, $P<0.01$),但在流域特大洪水年,强降水往往对应高水位,如 1999 年和 2016 年,而在极端干旱年并没有出现极端低水位,如 2003 年和 2013 年,说明太湖的年平均水位除了受流域降水控制外,很大程度上受人工闸坝管控和调水引流的影响。1986—2017 年太湖出、入湖水量变化分析表明,由于调水引流影响,1990s 后期入湖水量突变增加,多年平均年入湖总水量突变后较突变前增加了 29.66 亿 m^3 ^[25]。而江苏省水利厅 2019 年和 2020 年最新数据表明,2019 年 10 月—2020 年 1 月,太湖实施了跨年度调水引流,常熟枢纽累计引长江水 13.6 亿 m^3 ,望亭立交枢纽入湖 6.97 亿 m^3 ^①。

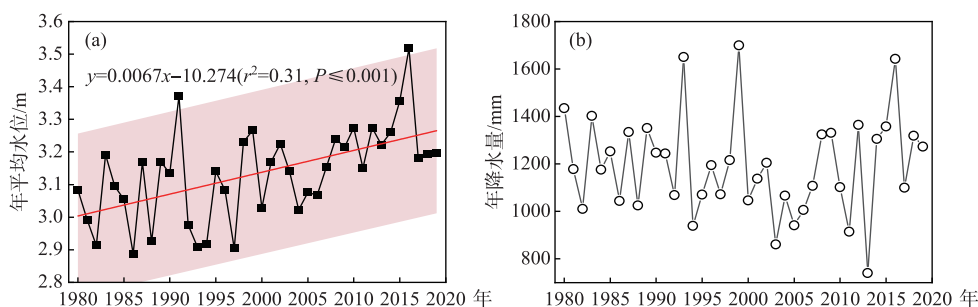


图 3 1980—2019 年太湖年平均水位(a)和年降水量(b)的长期变化

Fig.3 Long term variations of yearly mean water level (a) and total precipitation (b) of Lake Taihu from 1980 to 2019

2.3 透明度空间分布和长期变化

相比于气温、水温、风速和水位等气象水文条件,太湖水体透明度存在非常大的空间异质性,单个站点不足以反映其空间差异和长期变化趋势,因此我们基于已有可用的透明度观测资料,从 1980—2020 年每 4~10 年典型年份透明度空间分布和 1992 年以来典型藻型和草型湖区透明度逐年长期变化两方面进行分析。

2.3.1 典型年份透明度空间分布 过去 40 年多个时段典型年份透明度空间分布显示,太湖水体透明度大体呈现西部及湖心开敞水域最低,北面梅梁湾、竺山湾次之,东南部贡湖湾、光福湾、胥口湾和东太湖最高;时间序列上呈现明显下降趋势,8 个典型时段的夏季全湖平均值分别为 0.74、0.88、0.78、0.85、0.43、0.58、0.44、0.29 m(图 4)。特别是相比于 1980s、1990s,2010 年后透明度已有显著下降,并且空间上东南部湖湾与西部开敞水域和北面湖湾的差异越来越小,全湖趋于均质化,反映不同湖区透明度下降的速率存在很大差异,贡湖湾、光福湾、胥口湾和东太湖等东南部湖湾下降最明显,由 1980s、1990s 的 1.2~1.5 m 下降到现在的 0.4~0.6 m,其中最开始下降的是贡湖湾,约在 2000 年,其次是光福湾和胥口湾,最后是东太湖。

2.3.2 典型草、藻型湖区透明度逐年长期变化 由于太湖是大型富营养化浅水湖泊,风浪扰动频繁而剧烈,加之蓝藻频发,因此水体浑浊、透明度低,特别是北面的梅梁湾、湖心和西南部开敞区等藻型湖区水体透明度就更低了。即便如此,1992 年以来的长期定位观测显示,无论是草型湖区还是藻型湖区,水体透明度均呈现显著下降趋势。整体而言,由于梅梁湾、大太湖等藻型湖区本身水体透明度就很低,在 0.4 m 左右,因此其下降速度较慢,1992—2019 年间的 28 年降低了 24.6%;而相比于藻型湖区,贡湖湾和东太湖等草型湖区水体透明度降低得更为显著,下降斜率为藻型湖区的 5 倍,1998—2019 年间的 22 年降低了 62.2%(图 5)。

① 江苏省太湖水污染防治委员会第十三次全体(扩大)会议暨太湖安全度夏应急防控工作会议,2020 年 4 月。

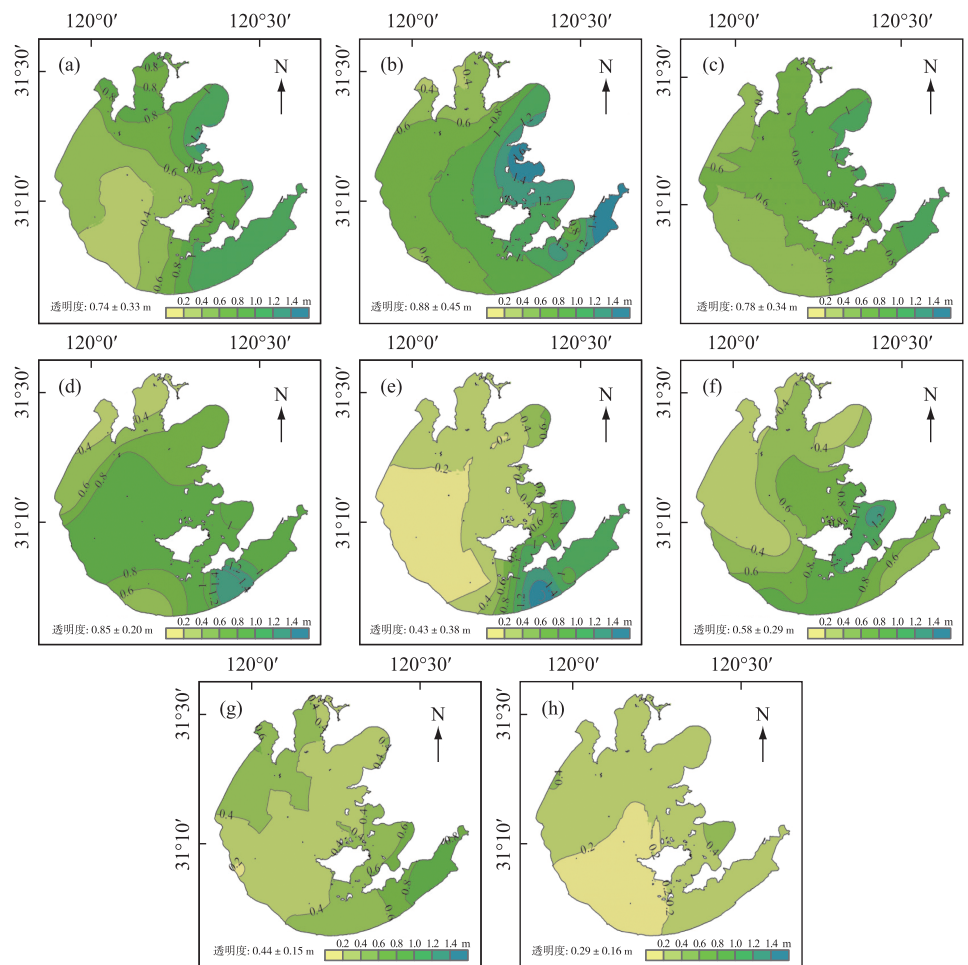


图 4 太湖历次历史采样以及长期定位观测典型年份夏季透明度空间分布^[21-24]:
(a)1981 年 9 月;(b)1987 年 7 月;(c)1991 年 6 月;(d)1997 年 7 月;
(e)2005 年 8 月;(f)2010 年 8 月;(g)2015 年 8 月;(h)2019 年 8 月

Fig.4 Spatial distribution of Secchi disc depth in Lake Taihu in summer of typical years including four historical investigations from 1981 to 1997 and long term specific-site observation from 2005 to 2019^[21-24]:
(a) September 1981; (b) July 1987; (c) June 1991; (d) July 1997; (e) August 2005;
(f) August 2010; (g) August 2015; (h) August 2019

3 讨论

3.1 湖泊增温和风速下降加剧藻华暴发

目前,全球气候变暖已经是无可争辩的事实,只是在不同区域、不同季节气候变暖的速率和幅度,各温室气体对气候变暖的贡献份额等方面存在一些不确定性. 由于气温升高,相伴随的湖库水温也呈现明显增加,基于实地观测和卫星遥感监测的全球 246 个湖库表层水温研究结果显示,1985—2009 年夏季表层水温呈现明显上升趋势,平均增温率为 0.34℃/10 年^[26]. 另外,多个湖库长期观测显示,过去数十年内表层和底层水温均存在不同程度的上升,增温幅度从 0.10℃/10 年到 0.84℃/10 年不等^[27]. 与国际上同类研究相比,过去 40 年太湖湖水的增温率为 0.514℃/10 年,超过全球大多数湖库,说明其深受全球气候变暖的影响.

与气温和水温上升不同,大量的地表长期观测研究显示,自 1960 年以来,全球中低纬地区地表风速持

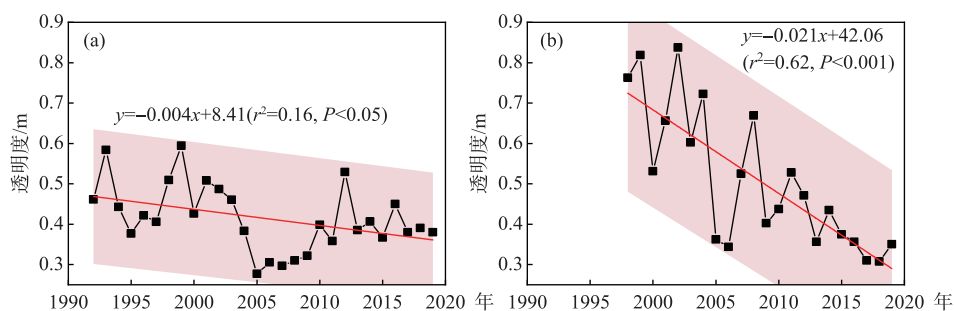


图 5 1992—2019 年太湖典型藻型(a)和草型(b)湖区透明度的长期变化趋势

Fig.5 Long-term trends of the yearly mean Secchi disc depth in the phytoplankton-dominated (a) and macrophyte-dominated (b) regions from 1992 to 2019

续下降,即所谓的全球静止(global stilling)和大气静止(atmospheric stilling)^[28-29],太湖的观测结果进一步证实了这一全球现象.与已有研究相比,1980—2019 年过去 40 年太湖地区平均风速下降的速率是每 10 年降低 0.27 m/s,这个值要远高于全国平均值,全国 2425 个气象站 1956—2014 年观测到风速下降的平均值为每 10 年降低 0.124 m/s^[30].另外,最近也有研究表明,全球地表风速从 2010 年开始快速反弹,并已在短短 8 年间恢复到 1980 年左右的水平.最近的增长速度是 2010 年以前下降速度的 3 倍,其中北美、欧洲和亚洲 3 个区域增长最为显著^[31].但太湖的研究结果并没有观测到这一反弹现象,相反无论是最大风速还是平均风速仍然在持续下降中,2010—2019 年平均风速线性下降的斜率甚至明显超过 1980—2009 年(每 10 年分别降低 0.30 和 0.22 m/s),2019 年相比于 2010 年风速下降了 16% 左右.

上述分析表明,影响藻类生长和蓝藻水华漂浮聚集的气象条件已发生了根本性的变化.已有的研究发现高温和低风速条件更有利于蓝藻生长、长期维持和藻华漂浮堆积^[3,18,32-34],气温和水温的显著上升以及风速的持续降低造成蓝藻水华易发的气象指数(气温高于 25℃,风速低于 3.0 m/s 的累积天数)显著增加^[12],由 1980 年的约 22 d 增加到了 2019 年的约 55 d,增幅高达 150%;而气温与风速比值则显著增加(图 6),高温静风环境越来越明显和频繁.基于 MODIS 卫星影像数据监测的晴空条件下太湖逐日蓝藻水华面积显示,在藻华形成气象指数高值年份往往对应非常严重的蓝藻水华暴发,如 2007 和 2017 年,特别是 2017 年藻华形成气象指数高达 65 d,显著高于其他年份,对应于 2017 年太湖蓝藻水华面积出现历史最高值,年平均面积为 284 km²,最大面积为 1582 km²,几乎覆盖太湖除东南少数湖湾以外的所有区域^[35-36].

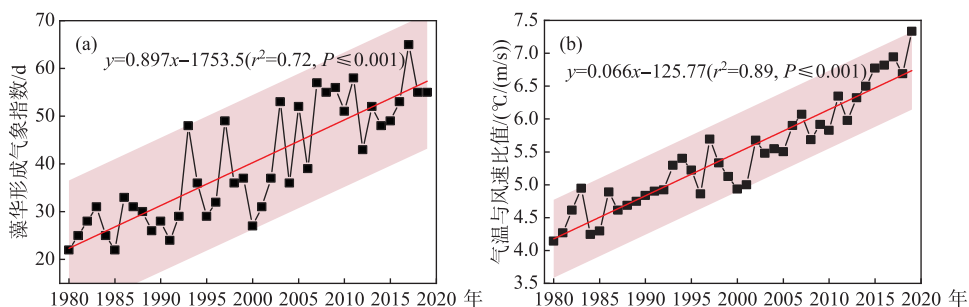


图 6 1980—2019 年太湖藻华形成气象指数以及气温与风速比值的长期变化趋势

Fig.6 Long-term trends of meteorological index of algal blooms and yearly mean ratio of air temperature to wind speed in Lake Taihu from 1980 to 2019

自 2007 年无锡太湖蓝藻水华引发饮用水危机事件后,太湖已经历了 10 多年的高强度治理,水体氮、磷营养盐浓度呈现不同程度的下降趋势,但当前氮、磷营养盐浓度仍然没有降低到明显限制藻类快速生长的阈值以下^[35,37-39].在较高的营养盐水平下,已有的长期定位观测和遥感监测研究均表明,太湖藻类生物量、

蓝藻水华面积、暴发频率、暴发开始和结束时间等指标与气温和水温呈正比,即温度越高蓝藻水华暴发越频繁,暴发开始时间越早,温度的升高不仅促进蓝藻生长,还提高了其与其他藻的竞争优势,改变特定种浮游植物物候过程,如微囊藻物候过程的变化导致在冬季也经常观测到较大面积的蓝藻水华^[32-33,36,40-42]。与此同时,蓝藻水华面积和开始暴发时间与风速呈反比,即风速越低越容易形成水华^[32,43]。对于太湖这类大型浅水湖泊而言,风速决定了蓝藻水华的垂直分布,风速超过 6 m/s 时,水柱中蓝藻混合均匀,不产生水华,而当风速低于 3 m/s 时,蓝藻开始分层,表明易于漂浮聚集大量水华^[44-45]。因此,明显增温和持续风速下降引起湖泊物理环境变化的综合效应强化了有利于水华蓝藻生长、漂浮和聚集的藻型生境,导致藻类快速异常增值和蓝藻水华长期维持。

实际上气候变化等引起的气温上升和风速下降对浮游植物生长和物候过程以及蓝藻水华的显著影响不光发生在太湖,全世界都观测到类似现象。许多研究表明,由于浮游植物对温度的高度敏感性,在全球气候变暖背景下,浮游植物物候提前的速度要显著快于陆地植被,例如在北极由于气候变暖引起的冰盖融化造成 1997—2009 年浮游植物最大藻华出现的时间提前了 50 d^[46],研究表明当前全球湖库蓝藻水华呈现加剧态势^[47-48]。

3.2 水位上升和透明度降低加速草型生态系统退化

随着区域社会经济高速发展,太湖周边的无锡、苏州、湖州等城市和上海市对太湖水资源需求大幅增加。如湖州从 2014 年起开始从太湖取水,一期规模为 20 万 t/d,未来将增加到 40 万 t/d;上海“引湖入浦”,2016 年底上海启用以太浦河为水源的金泽水库水源地,取水规模为 351 万 t/d,每年通过太浦河调引东太湖大量清水,且取水需求仍在加大。太湖水资源供需矛盾日渐凸显,为保证水资源特别是冬、春枯水季水资源量供应充足,从长江沿江各口门大量的调水引流使得江苏境内入湖水量明显增加^[25],造成太湖水位被人为逐步抬升,1980—2019 年太湖年平均水位上升了 0.25 m,增幅为 8.7%。由于沉水植物一般生长在水深较浅、透明度较高的水域^[19,21-22],太湖水位显著上升(意味着水深增加)和冬、春季长期高水位运行,导致湖泊底部可利用光显著下降,水生植被特别是生活在湖泊底部的沉水植被很难获取足够的光照进行光合作用,从而生长发育被极大地限制,适宜沉水植物生长的水域范围进一步缩减,水生植物和草型生态系统退化加速^[19]。

太湖地区风速呈现持续下降趋势,理论上对于大型浅水湖泊而言,风速下降会减弱水动力扰动和沉积物再悬浮物,某种程度上会降低水柱中悬浮物浓度进而提高水体透明度。但遗憾的是无论藻型湖区还是草型湖区,太湖水体透明度不但没有提高反而呈现出显著下降的趋势(图 4,图 5)。究其原因,对于梅梁湾、竺山湾和开敞水域等藻型湖区,由于藻类生物量的明显上升以及蓝藻水华出现频次和持续时间增加,藻类生长与水华暴发的遮蔽效应导致这些水域水体透明度显著下降^[49]。而对于贡湖湾、胥口湾、东太湖等东南部湖湾等草型湖区,透明度降低受富营养化加重、蓝藻水华入侵和水生植被退化等多重因素的综合影响。一方面营养盐上升引起藻类生物量的增加,蓝藻水华入侵本身就会降低草型湖区水体透明度;另一方面,营养盐升高和水位上升造成草型生境恶化,日益严重的蓝藻水华加剧了藻华对草型湖区的入侵和藻型生境的扩张,致使这些水域水生植被呈现快速退化趋势,水生植被的退化降低了其对底泥的固化作用,加剧了这些水域的沉积物再悬浮,进而造成水体透明度的显著降低。而透明度降低再叠加水位明显上升,造成透明度与水位(水深)的比值显著降低(图 7),特别是草型湖区 1998—2019 年透明度与水位(水深)的比值降低了 43.5%,导致湖泊底部可利用光显著下降,水生植被特别是生活在湖泊底部的沉水植被很难获取足够光照进行光合作用,从而导致其生长发育被极大地限制。之前许多研究均表明,透明度、水位及其比值是导致水生植被覆盖度降低和退化的最重要环境因子^[19-20,50-52]。而水生植被的退化反过来又降低了底泥的固化,加剧了沉积物再悬浮,恶化了水下光环境,形成恶性循环。近几年的监测和研究表明,受营养盐盐升高、蓝藻水华入侵、底泥清淤和水草收割等人工管理、水位抬升和 2016 年洪水年超高水位长期维持等多重因素影响,太湖东南部湖湾特别是东太湖水生植物急剧退化^[18-19,52]①,湖泊生境已逐步由草型生境向藻型生境转化,驱动着湖泊生态系统从“清水草型”向“浊水藻型”演替(图 8),生态系统服务功能呈现显著退化趋势。

① 秦伯强,张运林,高光等. 太湖水生植被恢复与良性生态系统重构的对策与建议. 国家水体污染控制与治理科技重大专项管理办公室成果专报,2019 年 9 月。

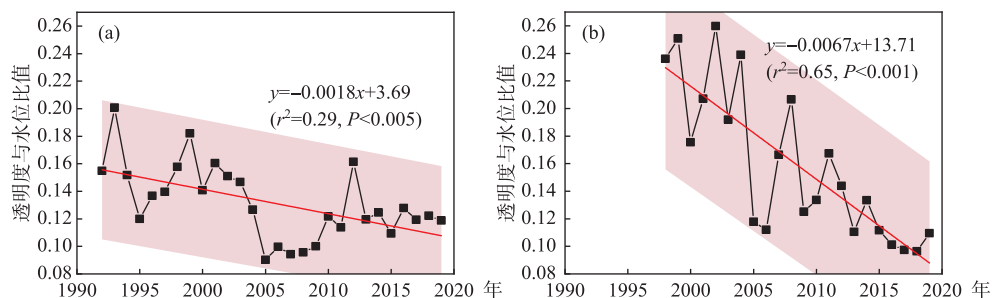


图 7 1992—2019 年典型藻型(a)和草型(b)湖区透明度与水位比值年均值的长期变化趋势

Fig.7 Long-term trends of the yearly mean ratio of Secchi disc depth to water level in the phytoplankton-dominated (a) and macrophyte-dominated (b) regions from 1992 to 2019

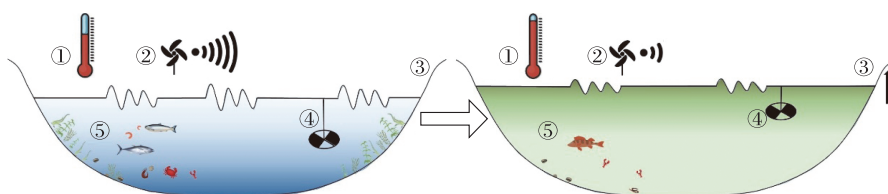


图 8 太湖湖泊物理环境变化驱动草型生态系统退化示意图

(①气温升高;②风速下降;③水位上升;④透明度下降;⑤草型生态系统演替为藻型生态系统)

Fig.8 Direct and indirect effects of lake physical environment changes on the degradation of macrophyte-dominated ecosystem of Lake Taihu

(①Climate warming; ②Decreasing wind speed; ③Increasing water level; ④Decreasing Secchi disc depth; ⑤A shift from a clear macrophyte-dominated state to a turbid algal-dominated state)

4 结论与展望

太湖能为流域经济社会发展提供包括水资源供应、粮食生产、防洪抗旱、气候调节和旅游休闲等多种水生生态服务功能,2007 年太湖饮用水危机事件敲响了流域污染治理的警钟. 10 多年来,国家和地方各级政府持续地加大太湖综合治理力度,提出了一系列具体的治理方案和有效措施,连续 12 年实现了国务院提出的“确保饮用水安全、确保不发生大面积湖泛”治太目标. 客观而言,目前太湖治理已经取得了阶段性的重要成果,部分水质指标与 2007 年相比已有明显改善. 然而太湖湖泊增温、风速下降、水位上升和透明度降低等湖泊物理环境的显著变化逐步形成有利于藻类生长和蓝藻水华暴发而不利于水生植被生长发育的生境条件,逐渐拓展了藻型生境空间而压缩了草型生境空间,驱动藻型生态系统扩张和草型生态系统退化. 而这种湖泊物理环境的变化反过来还会抵消流域营养盐削减和湖体营养盐下降对藻类生物量和蓝藻水华的控制作用,增加了太湖蓝藻水华防控和湖泊富营养化治理的难度. 这意味着未来流域控源截污需要更加严格的标准并要坚持更长时间,才可能在湖泊蓝藻水华控制上产生显著效应. 因此,未来迫切需要加强变化环境下气象水文与营养盐对蓝藻水华暴发和水生植被退化之间的协同作用机理研究,明晰各自贡献,厘清湖泊生态系统的响应与适应模式,提出在全球气候变化背景下太湖营养盐削减和蓝藻水华控制的适应性管理对策.

位于洪泛平原的太湖由于长期大量营养物质沉积,湖泊营养本底重建显示太湖早在 1980s 之前就已处于中营养—中富营养化状态,总磷浓度为 $0.04 \sim 0.05 \text{ mg/L}$ ^[53],1965 年太湖综合调查初步报告也显示当时全湖磷酸根浓度主要在 $0.01 \sim 0.05 \text{ mg/L}$ 之间,但极大值可达 0.28 mg/L ^[8];而太湖在受到强烈人类活动影响之前没有呈现富营养化态势和严重的蓝藻水华,主要得益于大量的湿地与水生植被的发育^[22]. 为了改善和优化太湖草型生境,促进太湖东南部湖区(贡湖湾、胥口湾、光福湾、东太湖等)草型生态系统的恢复,有效遏制

生态系统退化趋势,除了更严格的流域控源截污有效削减营养盐输入之外,必须合理调配太湖水资源供应方案,实施精细化的年内水位变化管理,营造有利于水生植被生长和恢复的物理环境:特别是在春季水生植被生长发育的关键时期,通过人为手段适当降低水位(建议保持 3.10 m 以下),以满足水生植被萌发所需的水下光照条件;同时辅以消浪措施减少风浪扰动,进而提高透明度,促进水生植被自然生长。同时,选择水深较浅、营养盐浓度较低、藻类水华侵入较少的东部湖湾开展水生植物恢复。通过持续地对太湖水位年内变化进行精细化管理和调控,在保障水资源供应量的基础上促进生境改善和草型生态系统重建,辅以水生植被恢复工程建设,有效遏制底泥沉积物营养盐释放和蓝藻水华暴发。

致谢:刘森、孙晓和邵晋涵帮忙绘图,太湖湖泊生态系统研究站提供水温、水位和透明度等长期定位观测数据,江苏省水文水资源勘测局提供部分水位数据,在此一并表示感谢!

5 参考文献

- [1] Spigel RH, Priscu JC, Obryk MK *et al.* The physical limnology of a permanently ice-covered and chemically stratified antarctic lake using high resolution spatial data from an autonomous underwater vehicle. *Limnology and Oceanography*, 2018, **63**(3): 1234-1252.
- [2] Imberger J, Patterson JC. Physical limnology. *Advances in Applied Mechanics*, 1990, **27**: 303-475.
- [3] Joehnk KD, Huisman J, Sharples J *et al.* Summer heatwaves promote blooms of harmful cyanobacteria. *Global Change Biology*, 2008, **14**(3): 495-512.
- [4] Karlsson J, Byström P, Ask J *et al.* Light limitation of nutrient-poor lake ecosystems. *Nature*, 2009, **460**(7254): 506-509.
- [5] Winder M, Schindler DE. Climatic effects on the phenology of lake processes. *Global Change Biology*, 2004, **10**(11): 1844-1856.
- [6] Kalff J ed. *Limnology: Inland water ecosystems*. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [7] Rao QZ. Lake investigation in Hubei Province. *Chinese Science Bulletin*, 1954, **5**(10): 71-77. [饶钦止. 湖北省湖泊调查. 科学通报, 1954, **5**(10): 71-77.]
- [8] Nanjing Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences ed. Preliminary report on comprehensive survey of Lake Taihu. Beijing: Science Press, 1965. [中国科学院南京地理研究所. 太湖综合调查初步报告. 北京: 科学出版社, 1965.]
- [9] Shi CX. Thirty years in limnology in People's Republic of China. *Acta Geographic Sinica*, 1979, **34**(3): 213-223. [施成熙. 湖泊科学研究三十年与展望. 地理学报, 1979, **34**(3): 213-223.]
- [10] Shi CX, Wang XC, Dou HS *et al* eds. Lake records of Jiangsu Province. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1982. [施成熙, 汪宪臣, 窦鸿身等. 江苏省湖泊志. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982.]
- [11] Pu PM, Tu QY, Wang SM. Research progress of limnology in China. *J Lake Sci*, 1989, **1**(1): 1-11. DOI: 10.18307/1989.0101. [璞培民, 屠清瑛, 王苏民. 中国湖泊学研究进展. 湖泊科学, 1989, **1**(1): 1-11.]
- [12] Zhang Y, Qin B, Zhu G *et al.* Profound changes in the physical environment of Lake Taihu from 25 years of long-term observations: Implications for algal bloom outbreaks and aquatic macrophyte loss. *Water Resources Research*, 2018, **54**(7): 4319-4311.
- [13] Qin B, Xu P, Wu Q *et al.* Environmental issues of Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 3-14.
- [14] Qin B, Hu W, Gao G *et al.* Dynamics of sediment resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(1): 54-64.
- [15] Zhang Y, Zhang B, Ma R *et al.* Optically active substances and their contributions to the underwater light climate in Lake Taihu, a large shallow lake in China. *Fundamental and Applied Limnology*, 2007, **170**(1): 11-19.
- [16] Qin BQ. A review and prospect about the aquatic environment studies in Taihu Lake. *J Lake Sci*, 1998, **10**(4): 1-9. DOI: 10.18307/1998.0401. [秦伯强. 太湖水环境面临的主要问题、研究动态与初步进展. 湖泊科学, 1998, **10**(4): 1-9.]
- [17] Qin BQ. Progress and prospect on the eco-environmental research of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2009, **21**(4): 445-455. DOI: 10.18307/2009.0401. [秦伯强. 太湖生态与环境若干问题的研究进展及其展望. 湖泊科学, 2009, **21**(4): 445-455.]

- [18] Zhang M, Yang Z, Shi XL. Expansion and drivers of cyanobacterial blooms in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(2): 336-344. DOI: 10.18307/2019.0203. [张民, 阳振, 史小丽. 太湖蓝藻水华的扩张与驱动因素. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 336-344.]
- [19] Zhang Y, Liu X, Qin B *et al.* Aquatic vegetation in response to increased eutrophication and degraded light climate in eastern Lake Taihu implications for lake ecological restoration. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 23867. DOI: 10.1038/srep23867.
- [20] Zhao D, Jiang H, Cai Y *et al.* Artificial regulation of water level and its effect on aquatic macrophyte distribution in Taihu Lake. *PLoS ONE*, 2012, **7**(9): e44836. DOI: 10.1371/journal.pone.0044836.
- [21] Sun SC, Wang YP eds. Lake Taihu. Beijing: Ocean Press, 1993 [孙顺才, 黄漪平. 太湖. 北京: 海洋出版社, 1993.]
- [22] Taihu Basin Authority of the Ministry of Water Resources, Nanjing Institute of Geography and Limnology (CAS) eds. Ecological environment maps of Lake Taihu. Beijing: Science Press, 2000. [水利部太湖流域管理局, 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖生态环境地图集. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [23] Research Group of Taihu Lake Environmental Quality. Investigation on environmental quality of Lake Taihu. *Journal of Shanghai Normal University: Natural Sciences*, 1982: 1-194. [太湖环境质量研究课题协作组. 太湖环境质量调查研究. 上海师范大学学报: 自然科学版, 1982: 1-194.]
- [24] Huang YP ed. Water environment of Lake Taihu and pollution control. Beijing: Science Press, 2001. [黄漪平. 太湖水环境及其污染控制. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [25] Ji HP, Wu HY, Wu J. Variation of inflow and outflow of Lake Taihu in 1986–2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1525-1533. DOI: 10.18307/2019.0612. [季海萍, 吴浩云, 吴娟. 1986—2017年太湖出、入湖水量变化分析. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1525-1533.]
- [26] O'Reilly CM, Sharma S, Gray DK *et al.* Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(24): 10773-10781.
- [27] Zhang YL. The effect of climate warming on lake thermal and dissolved oxygen stratifications: a review. *Advances in Water Science*, 2015, **26**(1): 130-139. [张运林. 气候变暖对湖泊热力及溶解氧分层影响研究进展. 水科学进展, 2015, **26**(1): 130-139.]
- [28] Vautard R, Cattiaux J, Yiou P *et al.* Northern hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. *Nature Geoscience*, 2010, **3**(11): 756-761.
- [29] Woolway RI, Merchant CJ, Van Den Hoek J *et al.* Northern hemisphere atmospheric stilling accelerates lake thermal responses to a warming world. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(21): 11983-11992.
- [31] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z *et al.* Changes in wind speed over China during 1956–2004. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, **99**(3/4): 421-430.
- [30] Zeng Z, Ziegler AD, Searchinger T *et al.* A reversal in global terrestrial stilling and its implications for wind energy production. *Nature Climate Change*, 2019, **9**(12): 979-985.
- [32] Zhang Y, Shi K, Liu J *et al.* Meteorological and hydrological conditions driving the formation and disappearance of black blooms, an ecological disaster phenomena of eutrophication and algal blooms. *Science of the Total Environment*, 2016, **569/570**: 1517-1529.
- [33] 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.
- [34] Paerl HW, Paul VJ. Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water Research*, 2012, **46**: 1349-1363.
- [35] Qin B, 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.
- [36] Shi K, Zhang Y, Zhang Y *et al.* Phenology of phytoplankton blooms in a trophic lake observed from long-term MODIS data. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(5): 2324-2331.
- [37] Xu H, Paerl HW, Qin B *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [38] Xu H, Paerl HW, Qin B *et al.* Determining critical nutrient thresholds needed to control harmful cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(2): 1051-1059.
- [39] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al.* Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern

- region of Lake Taihu, China, 2005–2017. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 279-295. DOI: 10.18307/2018.0201. [朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 2005—2017 年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 279-295.]
- [40] Deng J, Qin B, Paerl HW *et al.* Earlier and warmer springs increase cyanobacterial (*Microcystis* spp.) blooms in subtropical Lake Taihu, China. *Freshwater Biology*, 2014, **59**(5): 1076-1085.
- [41] Shi K, Zhang Y, Zhou Y *et al.* Long-term modis observations of cyanobacterial dynamics in Lake Taihu: Responses to nutrient enrichment and meteorological factors. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 40326. DOI: 10.1038/srep40326.
- [42] Duan H, Ma R, Xu X *et al.* Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(10): 3522-3528.
- [43] Wu T, Qin B, Brookes JD *et al.* The influence of changes in wind patterns on the areal extension of surface cyanobacterial blooms in a large shallow lake in China. *Science of the Total Environment*, 2015, **518**: 24-30.
- [44] 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.
- [45] Wu T, Qin B, Zhu G *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.
- [46] Kahru M, Brotas V, Manzanosarabia M *et al.* Are phytoplankton blooms occurring earlier in the Arctic. *Global Change Biology*, 2015, **17**(4): 1733-1739.
- [47] Ho JC, Michalak AM, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature*, 2019, **574**(7780): 667-670.
- [48] Huisman J, Codd GA, Paerl HW *et al.* Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, **16**(8): 471-483.
- [49] Shi K, Zhang Y, Zhu G *et al.* Deteriorating water clarity in shallow waters: Evidence from long term MODIS and *in-situ* observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, **68**(1): 287-297.
- [50] Silva TSF, Melack JM, Novo EMLM. Responses of aquatic macrophyte cover and productivity to flooding variability on the Amazon floodplain. *Global Change Biology*, 2013, **19**(11): 3379-3389.
- [51] O'Farrell I, Izaguirre I, Chaparro G *et al.* Water level as the main driver of the alternation between a free-floating plant and a phytoplankton dominated state: A long-term study in a floodplain lake. *Aquatic Sciences*, 2011, **73**(2): 275-287.
- [52] Luo JH, Pu RL, Duan HT *et al.* Evaluating the influences of harvesting activity and eutrophication on loss of aquatic vegetations in Taihu Lake, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, **87**: 102038.
- [53] Dong XH, Bennion H, Battarbee R *et al.* Tracking eutrophication in Taihu Lake using the diatom record: Potential and problems. *Journal of Paleolimnology*, 2008, **40**(1): 413-429.