

太湖藻源性“湖泛”形成机制的气象因素分析

王成林¹, 张咏², 张宁红², 钱新³, 孔繁翔⁴

(1. 解放军理工大学气象学院, 南京 211101; 2. 江苏省环境监测中心, 南京 210036; 3. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093; 4. 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:将蓝藻水华引发的太湖水域黑臭水团现象称为藻源性“湖泛”, 并将其形成过程分为藻源形成、厌氧反应产物“泛”起、黑臭水团聚积 3 个阶段。针对 2007 年 5 月和 2008 年 5 月 2 次藻源性“湖泛”形成过程中气象要素演变共同特征, 结合水动力模型研究发现, 适宜的气象条件提供了必要的热力与动力环境, 是诱发“湖泛”形成的必要因素之一。第 1 阶段持续 3 d 以上高温、微风、风向基本一致的气象条件, 有利于藻华在湖岸局部地区大量聚集、死亡、下沉、腐烂, 发生厌氧反应, 构成“湖泛”发生的物质基础; 第 2 阶段冷空气过境, 气温迅速降低、风速短时增大、持续 1 d 以上时间风向偏转接近 180°, 有利于厌氧反应产物“泛”至水表, 形成黑臭水团, 构成“湖泛”形成的触发机制; 第 3 阶段持续高温、微风, 有利于黑臭水团在水面较长时间存在, 构成“湖泛”形成的维持机制。基于气象因素的可预报性, 此研究为实现太湖“湖泛”的早期预警与防治提供了理论依据。

关键词:“湖泛”; 太湖; 蓝藻水华; 热力与动力机制; 气象因素

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)02-0401-08

Analysis of Meteorological Factors of Forming Feculent and Anaerobic Water Aggregation Induced by Algal Bloom in Taihu Lake

WANG Cheng-lin¹, ZHANG Yong², ZHANG Ning-hong², QIAN Xin³, KONG Fan-xiang⁴

(1. Institute of Meteorology, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing 211101, China; 2. Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing 210036, China; 3. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 4. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The water quality pollution problem about feculent and anaerobic water aggregation (FAWA) induced by algal bloom in Taihu Lake, which is often called ‘hufan’ in Chinese, was studied. Its forming process is divided into 3 phases, i. e., material elements forming of FAWA, anaerobic products to be brought to the water surface and the maintaining of FAWA in the water surface. The conventional observational data from Wuxi meteorological station was analyzed. The result shows that there are similar meteorological characteristics of two FAWA phenomena in Taihu Lake in May, 2007 and May, 2008. A numerical simulation was performed to prove the analysis results. It indicates that propitious meteorological condition is one of the necessary forming factors of FAWA, which provides thermal and dynamical environment for FAWA. During the first phase, the weather conditions, such as high air temperature, gentle breeze and nearly invariable wind direction, maintain for more than 3 days and cause algal bloom to aggregate, then die, sink and anaerobic decay near lake bank. All these provide the precondition for FAWA. During the second phase, when the cold air mass passes across the Taihu basin, almost counter-direction wind, which maintains for more than 1 day with higher speed and lower air temperature, makes anaerobic products to be brought to the water surface by uplifted current. This is the trigger mechanism of FAWA. During the last phase, continual high air temperature and gentle breeze is favorable for FAWA in the water surface. Because meteorological factors are predictable, this research provides a way and basis for the further study of warning and controlling approaches of FAWA.

Key words: feculent and anaerobic water aggregation (FAWA); Taihu Lake; algal bloom; thermal and dynamical mechanism; meteorological factors

自 20 世纪 90 年代起, 太湖湖西水域、梅梁湖、贡湖曾多次出现“湖泛”现象。所谓“湖泛”, 是太湖流域人们流传的一种水污染现象, 目前尚无统一的术语。陆桂华^[1]等将“湖泛”(亦称黑水团或污水团)定义为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, 释放硫化

物、甲烷和二甲基三硫等硫醚类物质, 形成褐黑色伴

收稿日期: 2010-03-23; 修订日期: 2010-08-10

基金项目: 解放军理工大学基础理论研究基金项目(2008009); 江苏省环保厅重点科研项目(2008010); 江苏省环境监测科研基金项目(0919); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2008CB418003); 国家自然科学基金项目(40805046/D0508)

作者简介: 王成林(1977~), 男, 博士, 主要研究方向为大气环境、水环境模拟, E-mail: chenglinwang@126.com

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.2007年5月底无锡南泉水厂附近出现黑臭污水团(即“湖泛”^[1]),严重影响无锡市太湖饮用水水源地水质,造成无锡市的供水危机,使无锡市近200万人口生活受到影响.“湖泛”已成为继蓝藻水华大面积暴发发现象后又一类太湖灾害性问题.确定“湖泛”成因、采取针对性措施防控“湖泛”发生,已成为当前太湖水污染防治工作的一项紧迫任务.

国内外有关“湖泛”的研究并不多见,其形成的动力和热力机制尚不清楚.孔繁翔^[2,3]、陆桂华等^[1]研究了2007年和2008年的“湖泛”现象,一致认为持续的高温和相对较弱的风场有利于藻类的生长,相对稳定的风场导致藻类在太湖西北沿岸大量堆积,气温持续升高促进藻类死亡和不完全分解,以上气象条件有利于“湖泛”发生.然而,蓝藻水华在湖湾或岸边浅水区大量聚集并不一定引发“湖泛”.20世纪90代后期至今,几乎每年太湖都发生较大面积蓝藻水华,大量藻华常常在湖湾、浅水区聚集,但并不是每次都形成“湖泛”现象.因此,“湖泛”现象的形成必定还存在其特定的外界诱因和触发机制,使得藻类死亡后的不完全降解产物进入水体和水表,形成黑臭水团.

本研究利用气象常规观测数据,并结合水动力模型,分析“湖泛”发生各个阶段的气象条件特征,从气温和风场2个方面解释“湖泛”形成的热力和动力机制,揭示其形成的外界诱因和触发机制,以期为太湖“湖泛”的早期预警提供可预报性因子,实现“湖泛”的早期防控.

1 材料与方法

1.1 “湖泛”个例选择

虽然太湖水域多次出现“湖泛”现象,但是“湖泛”发生期间相应的气象、水文、水质监测数据很缺乏.因此,根据已有的记载和已获得的气象、遥感数据,选择2007年5月与2008年5月太湖水域“湖泛”进行研究.

卫星遥感图表明2007年5月19日、27日在梅梁湾、贡湖湾都存在较大面积蓝藻水华^[4].另外,根据江苏省环境监测中心提供的2008年5月19日卫星遥感图(图1)可以看出,在西北太湖有大面积蓝藻水华,主要集中在竹山湾、宜兴沿岸水域.因此,这2次“湖泛”发生前,附近水域都出现了大面积的蓝藻水华.大量的藻华在湖湾、沿岸等浅水区大量堆

积,腐烂沉降,在适当的气象和水文条件下,与水底陆源污染物混合在一起发生强烈厌氧反应,其反应的产物进入水体及水表,形成黑臭污水团^[1-3].这种太湖水污染现象与人们流传的“湖泛”^[4]及“泛塘”^[5]有所区别,本研究将这种主要由蓝藻水华引发的水污染现象称为藻源性“湖泛”(简称“湖泛”).

1.2 气象资料选择

2007年5月与2008年5月太湖水域“湖泛”形成的时间可能早于观测记录时间.观测记录表明,2007年5月28日晚,无锡贡湖湾口南泉水厂发生污水团进入水厂取水口恶化水源水质事件^[2].谢平^[4]认为此污水团可能是在外界风场和“引江济太”的吞吐流共同作用下,由贡湖湾沿岸迁移至南泉水厂取水口附近开阔水域的.由此可见,污水团并不是2007年5月28日在南泉水厂附近形成的,而是在此之前异地形成的,此后在外界条件作用下迁移至此.陆桂华等^[1]指出2008年5月26日无锡宜兴近岸水域出现了“湖泛”现象,而江苏省环境监测中心工作人员和宜兴附近渔民证实在此之前5月19日宜兴沿岸附近已经出现了黑臭污水团,这与图1中蓝藻遥感信息空洞位置是一致的.由此可以证实,2008年5月19日宜兴大浦口附近出现了“湖泛”现象.

根据上述2次“湖泛”发生的时间,本研究分别选择2007年5月18日00:00(世界时,下同)~5月29日21:00、2008年5月13日00:00~5月24日21:00这2个时段无锡气象观测站(站号为58354)实测的气象3要素(包括气温、风速、风向)进行分析,以期得到“湖泛”发生前后气象要素随时间演变的共同特征.这3个要素每日观测时间为00:00、03:00、06:00、09:00、12:00、15:00、18:00、21:00,每日共计8次.

1.3 水动力模型选择及设置

为了揭示气象因素对“湖泛”形成的影响,本研究选择了水动力数值模式ELCOM2.2^[6,7],利用上述2008年5月“湖泛”发生前后的气象条件驱动该模型,模拟了“湖泛”发生时水体的热力和动力过程.

模式中太湖地形如图2所示,水平网格距为1 km,垂直网格距为15 cm,最大深度3.5 m.计算时间步长取为5 min,选取底部摩擦系数为0.005,横向扩散系数为 $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$,纵向扩散系数为 $1.0 \text{ m}^2/\text{s}$;初始为静水,无出入流^[8];模式上边界气象条件为“湖泛”发生时的气压、风速、风向、气温、相对湿度

(由实测露点温度计算得到)、云量、24 h 累计降水。

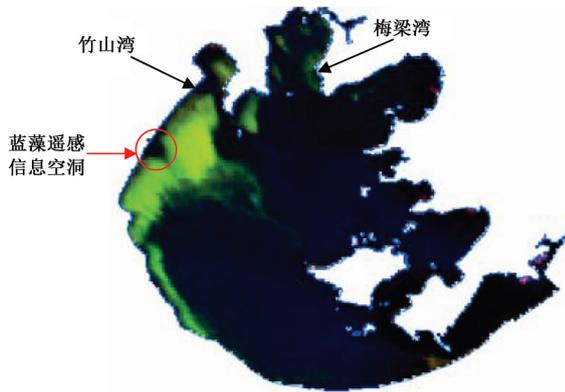


图1 太湖蓝藻水华卫星遥感图(2008年5月19日)
Fig. 1 Satellite imagery of algal bloom in Taihu Lake
on May 19, 2008

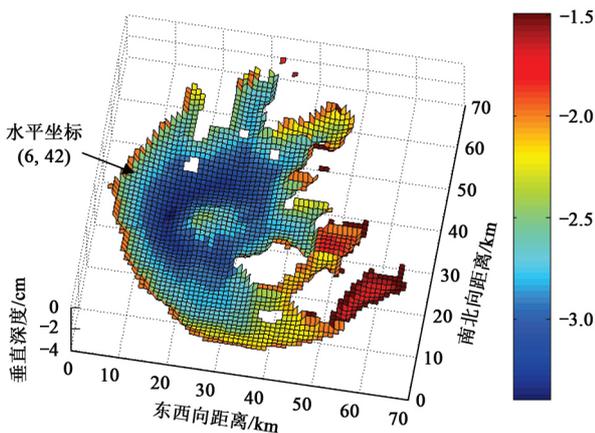


图2 模式太湖地形
Fig. 2 Landscape of Taihu Lake in numerical model

2 结果与讨论

2.1 “湖泛”形成的3个阶段及其特征

根据陆桂华等给出的“湖泛”定义以及上述2007年5月与2008年5月2次“湖泛”的形成特点,将其形成过程分为3个阶段。

第一,藻源形成阶段。在这一阶段湖湾及岸边浅水区原位生长的藻华与迁移至此的藻华大量堆积,腐烂沉降,在适当的气象和水文条件下,与水底陆源污染物混合在一起发生强烈厌氧反应。这为“湖泛”的形成提供了物质基础。

第二,厌氧反应产物“泛”起阶段。在这一阶段厌氧反应产生的黑臭物质在适当的气象和水文条件触发下,从水底“泛”至水体及水表。这为“湖泛”的形成提供了触发机制。

第三,黑臭水团聚积阶段。在这一阶段已经“泛”至水面的黑臭物质在适当的气象和水文条件下,形成较大面积黑臭水团。此黑臭水团甚至较长时间存在并发生迁移。这为“湖泛”的形成提供了维持机制。

2.2 “湖泛”形成机制的气象因素分析

2.2.1 藻源形成阶段

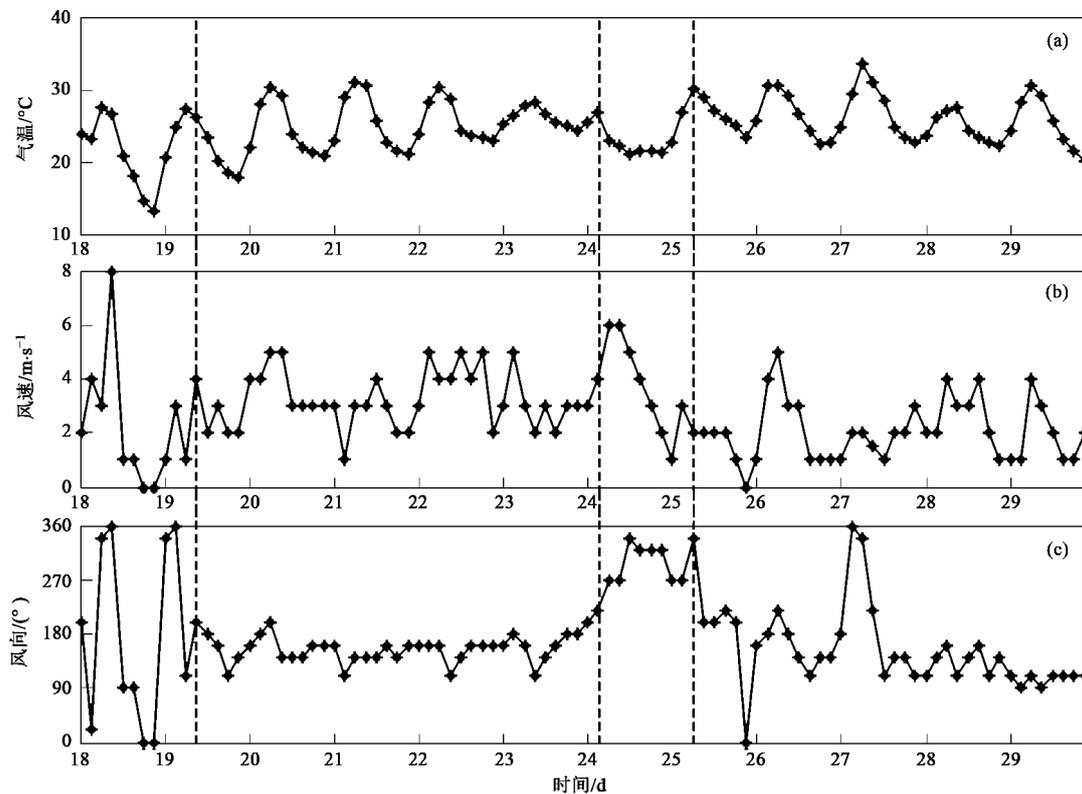
对应图3中2007年5月19日06:00~24日03:00和图4中2008年5月14日09:00~17日21:00为这2次“湖泛”的藻源形成阶段。由表1可知,此阶段持续时间都超过72 h (>3 d),平均气温都>20℃,最高气温都高于30℃,平均风速<4 m/s,平均风向都为东南风(150°左右),风向平均绝对偏差都小于20°。所以,在藻源形成阶段气象要素演变的共同特征为:气温持续较高、风速较小、风向基本一致。

吴晓东^[9]、孔繁翔^[3,10]等研究发现高温、强光照的条件有利于蓝藻生长;孙小静^[11]、尤本胜^[12]等研究发现小风浪有利于蓝藻生长或漂浮,而大风浪对其生长或漂浮不利。所以,较长时间维持高温、微风气象条件是蓝藻水华大面积暴发的主要外因之一。在太湖富营养化程度没有得到有效控制的情况下^[13-15],上述2007年5月和2008年5月“湖泛”发生前的藻源形成阶段,高温(平均气温>20℃)、微风(平均风速<4 m/s)气象条件维持时间>72 h,有助于蓝藻水华大面积暴发。其次,蓝藻水华在风向一致(风向平均绝对偏差<20°)的东南风长时间驱动下,在下风向西北太湖沿岸浅水区域大量堆积(以平均流速10 cm/s计算^[16],72 h水平移动距离可达25.92 km)。高温也有利于大量堆积的藻华死亡、下沉、腐烂,发生厌氧反应。再次,在长时间一致风向驱动下,为了维持与风应力相平衡,水体会在下风向岸边堆积,形成沿岸流和下沉流。此下沉流也有利于蓝藻下沉,再加上长时间微风、高温使得垂直方向上水体扰动较小、水体层结稳定(表层温度高于底层温度)。所以,这3种原因共同使得大量蓝藻较长时间维持在水底不发生再悬浮,在陆源污染物的共同作用下发生强烈厌氧反应,在水底形成大量黑臭物质。

由此可见,蓝藻水华大面积形成与“湖泛”藻源形成的气象条件有所不同,前者只是持续高温、微风,而后者还需要风向持续保持一致。

2.2.2 厌氧反应产物“泛”起阶段

对应图3中2007年5月24日06:00~25日06:00和图4中2008年5月18日00:00~19日



风向中静风为 0° , 东风为 90° , 南风为 180° , 西风为 270° , 北风为 360° , 下同

图3 2007年5月“湖泛”发生前后气象要素随时间的变化

Fig. 3 Temporal variation of meteorological elements during FAWA in May, 2007

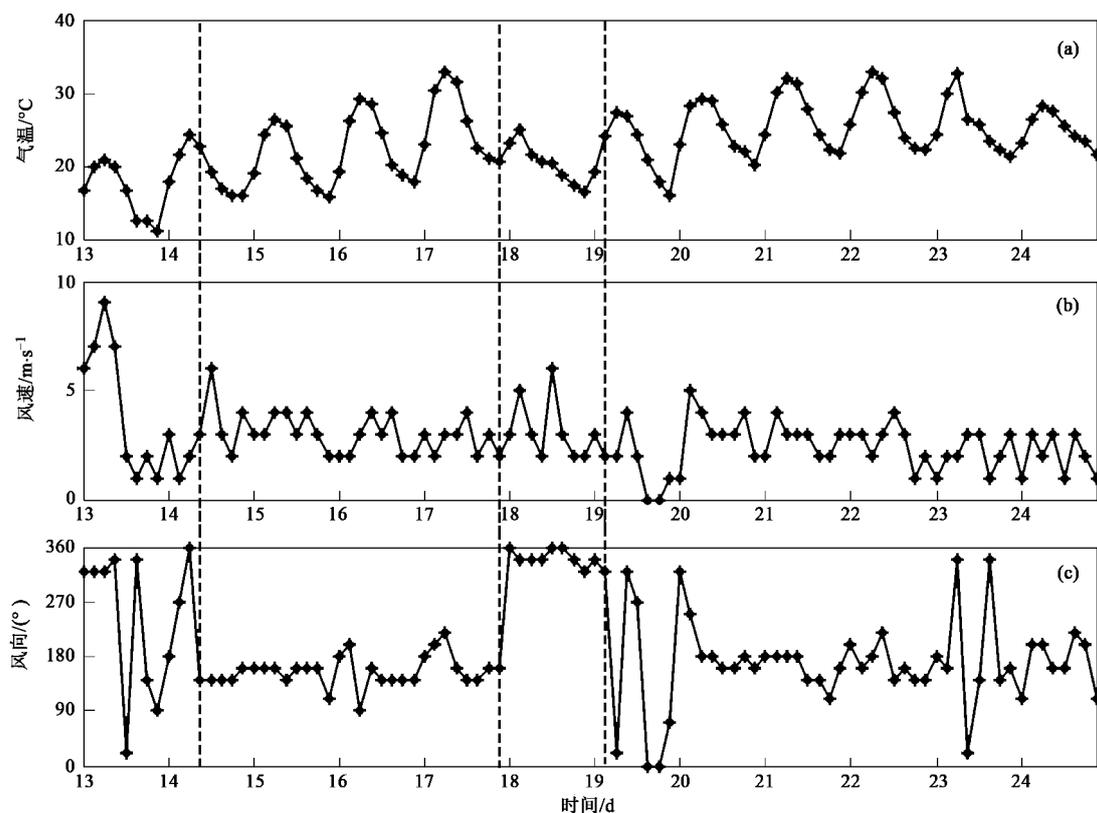


图4 2008年5月“湖泛”发生前后气象要素随时间的变化

Fig. 4 Temporal variation of meteorological elements during FAWA in May, 2008

03:00 为这 2 次“湖泛”厌氧反应产物“泛”起阶段。由表 1 可知,此阶段持续时间都超过 24 h (>1 d),最高气温都低于 30℃,最大温差都大于 8℃,平均风速增大(大于藻源形成阶段平均风速,且存在短时风速 > 6 m/s),平均风向都为西北风(> 300°)。所以,在厌氧反应产物“泛”起阶段气象要素演变的共同特征为:气温迅速降低、风速短时增大、风向偏转接近 180°。

表 1 2007 与 2008 年“湖泛”前后气象要素对比

Table 1 Comparison on meteorological elements during FAWA between 2007 and 2008

阶段	气象因素	2007 年	2008 年
藻源形成	持续时间/h	118	85
	平均气温/℃	25.06	22.38
	最高气温/℃	31	32.8
	平均风速/m·s ⁻¹	3.2	3.03
	平均风向/(°)	155.75	154.5
	风向平均绝对偏差/(°)	19.31	18.5
厌氧反应产物“泛”起	持续时间/h	25	28
	最大温差/℃	9	8.5
	最高气温/℃	29.8	25
	平均风速/m·s ⁻¹	3.56	3.1
	平均风向/(°)	302.22	342
黑臭水团聚积	平均气温/℃	25.94	25.4
	最高气温/℃	33.5	33
	平均风速/m·s ⁻¹	2.07	2.39
	平均风向/(°)	151.35	167.83

当冷空气过境时,气温迅速降低、风速短时增大、风向偏转接近 180°。对“湖泛”产生的影响首先是气温迅速降低,使得水体垂直方向温度梯度减小,其层积稳定度降低,易受扰动发生再悬浮;其次,风速短时增大,使得水体垂直方向上扰动增大;再次,风速短时增大、风向 180°调转,使得蓝藻水华大量堆积的岸边出现较强的离岸流,根据补偿原理,在离岸流出现的岸边会有涌升流产生。所以,此 3 种原因共同作用,在沿岸产生强烈上升运动,将水底已经形成的大量黑臭物质带至水表,在水面形成大面积黑臭水团,即藻源性“湖泛”现象。

2.2.3 黑臭水团聚积阶段

对应图 3 中 2007 年 5 月 25 日 12:00 ~ 29 日 21:00 和图 4 中 2008 年 5 月 19 日 06:00 ~ 24 日 21:00 为这 2 次“湖泛”产生的黑臭水团聚积阶段。由表 1 可知,此阶段平均气温都大于 25℃,最高气温都大于 33℃,平均风速 < 2.5 m/s。所以,在黑臭水团聚积阶段气象要素演变的共同特征为:气温持续较高、微风。

当冷空气过境后,气温持续升高,甚至超过第 1

阶段气温;风速维持较小。这对“湖泛”产生的影响首先是,持续较高的气温有利于黑臭水团内发生化学、生物反应,释放出难闻气体;其次,较小的风浪有利于黑臭水团长时间存在于水表。所以,这 2 种原因共同作用有利于黑臭水团较长时间存在于水表,并释放出难闻的气味。

2.3 模拟验证“湖泛”形成的动力与热力机制

由于缺乏上述 2 次“湖泛”发生时实测的水体热力和动力参数,所以本研究利用图 4 中对应时间段(2008 年 5 月 13 日 00:00 ~ 24 日 21:00)的气象条件驱动水动力模式,从理论上验证气象因素对“湖泛”形成的影响,揭示“湖泛”形成的动力与热力机制。

根据图 1 中蓝藻水华所在位置,选择图 2 中坐标为(6,42)的点(宜兴沿岸附近),对此点处模拟的水表与水底温度差,水表流速、流向,垂直方向流速进行分析,结果分别如图 5 所示。图 5(a)中水表与水底温度差与图 4(a)中气温变化基本一致。在“湖泛”形成的厌氧反应产物“泛”起阶段,当外界气温迅速降低,风速短时增大时,水表与水底温度差也迅速减小,由下至上水温梯度减小,其层积稳定度降低,易受短时增大的风浪扰动,产生垂向运动。结合图 5(b)和图 5(c)可以看出,当表面流向为东南或东北时,存在下沉流;当表面流向为西北时,存在上升流。其垂直流速与表面流速成正比,当东南或东北方向水流增大时,向下的流速增大;当西北方向水流增大时(即离岸流),向上的流速增大,产生涌升流。结合图 4(c)分析发现,在“湖泛”形成的藻源形成阶段,风向基本一致,其表面流向为东南或东北,存在明显的下沉流。在厌氧反应产物“泛”起阶段,风向调转,其表面流向为西北,存在明显的涌升流。由图 5(c)还可以看出,涌升流在厌氧反应产物“泛”起阶段持续时间超过 24 h,以平均 0.000 03 m/s 计算,24 h 上升距离可达 2.59 m,已超过水深,其可以将水底黑臭物质带至水表。

由此可见,模拟结果验证了“湖泛”形成机制的气象成因。

2.4 结果检验

除了 2007 年与 2008 年 5 月的 2 次“湖泛”以外,发生时间有准确记载、形成面积达 1 km² 以上的尚不多见。陆桂华等^[17]对 2009 年太湖水域“湖泛”进行了监测与分析,报道指出 2009 年 5 月 11 ~ 15 日宜兴境内沙塘港至师渎港附近发生了面积为 0.5 ~ 2.0 km² 的“湖泛”现象。图 6 所示为此时段无锡

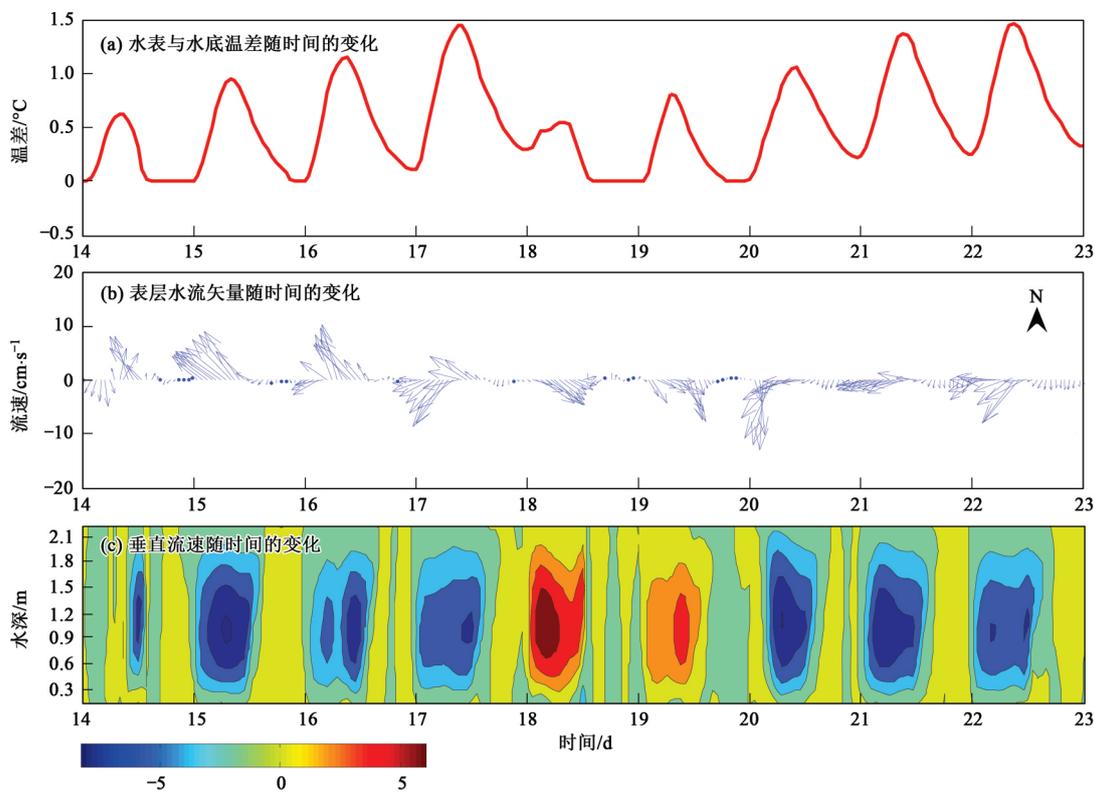
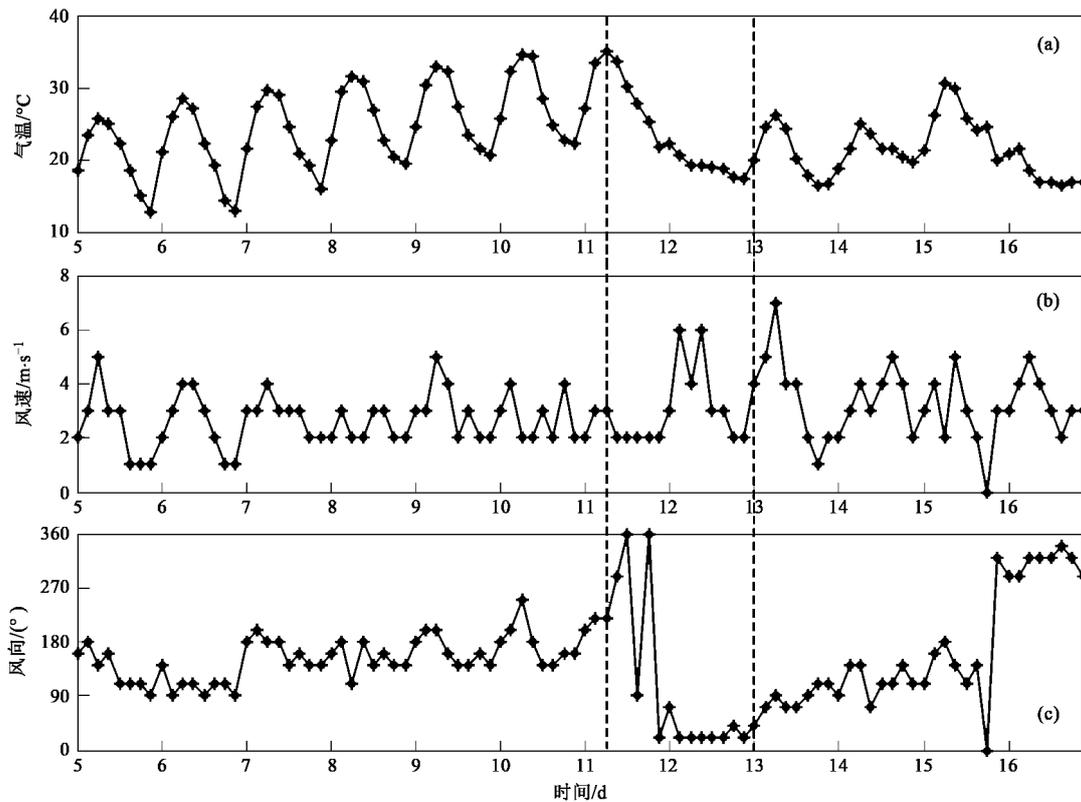


图 5(c) 中垂直流速单位为:0.000 01 m/s

图 5 水面与水底温差、表面流速流向、垂直流速随时间变化的序列图

Fig. 5 Temporal variation of temperature-difference between top and bottom , top current and vertical current



风向中静风为 0°, 东风为 90°, 南风为 180°, 西风为 270°, 北风为 360°, 下同

图 6 2009 年 5 月“湖泛”发生前后气象要素随时间的变化

Fig. 6 Temporal variation of meteorological elements during FAWA in May, 2009

站(站号为 58354)实测的气象 3 要素(包括气温、风速、风向)演变趋势,2009 年 5 月 5 日 00:00~5 月 11 日 06:00 满足“湖泛”形成的第 1 阶段的气象条件,即气温持续较高、风速较小、风向基本一致;2009 年 5 月 11 日 06:00~5 月 13 日 00:00 满足“湖泛”形成的第 2 阶段的气象条件,即气温迅速降低、风速短时增大、风向偏转接近 180° ;2009 年 5 月 13 日 00:00~5 月 15 日 21:00 满足“湖泛”形成的第 3 阶段的气象条件,即气温持续较高、微风。由此可见,此次“湖泛”形成的气象因素演变趋势与上述研究结果是一致的,证实了气象因素是藻源性“湖泛”形成的必要条件之一。

20 世纪 90 年代后期至今,太湖几乎每年都发生较大面积蓝藻水华,大量藻华常常在湖湾、浅水区堆积,但并不是每次都形成“湖泛”现象。马荣华等^[18]报道中提供的卫星遥感图象显示,2007 年 9 月 7 日蓝藻水华几乎覆盖整个西北太湖,在梅梁湾东侧沿岸也存在大量蓝藻水华。但 2007 年 9 月 7 日前后并没有发生“湖泛”现象。其原因从图 7 可以看出,9 月 7 日前后没有出现短时降温、风速增大、风向调转的现象。所以,不存在藻源性“湖泛”形成的触发机制。由此可见,若不具备必要的气象条件,即使存在大面积蓝藻水华,也不一定会发生“湖泛”现象。

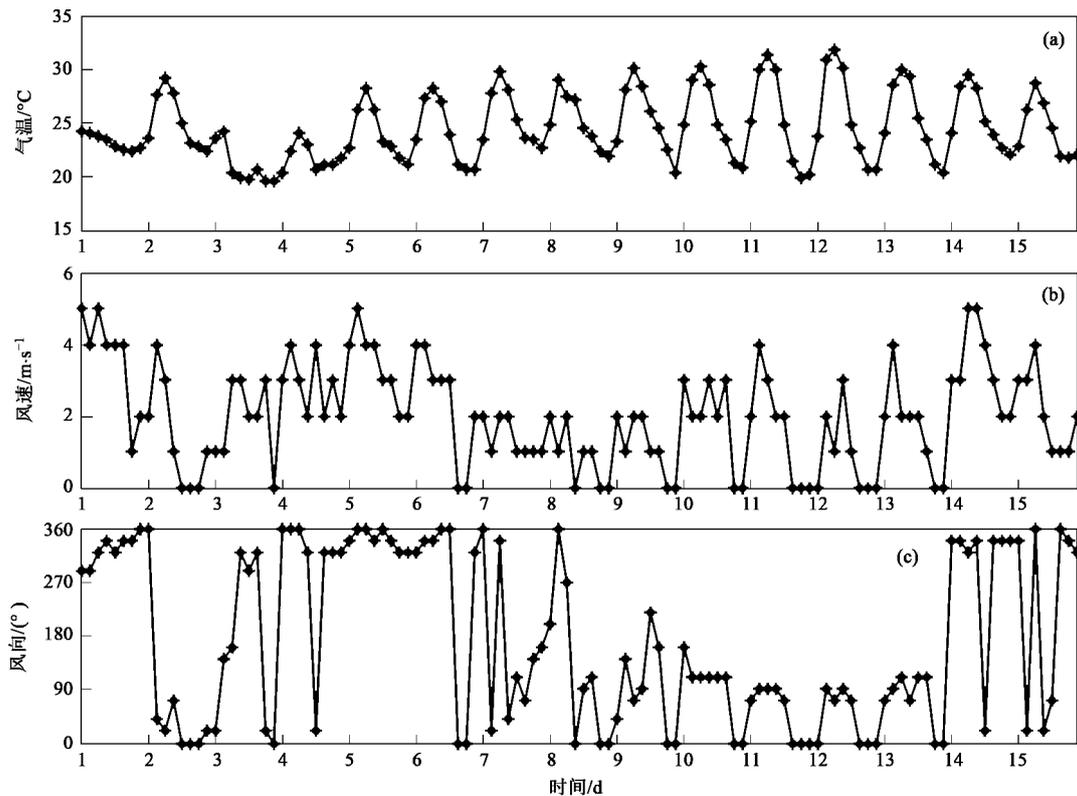


图 7 2007 年 9 月 7 日前后气象要素随时间的变化

Fig. 7 Temporal variation of meteorological elements from the 1st to the 15th in September, 2007

3 结论

(1) 本研究将蓝藻水华引发的太湖水域黑臭水团现象称为藻源性“湖泛”,并将其形成过程分为 3 个阶段,分别为藻源形成阶段、厌氧反应产物“泛”起阶段、黑臭水团聚积阶段。在这 3 个阶段中适宜的气象条件是诱发“湖泛”形成的必要因素之一。

(2) 在藻源形成阶段,3 d 以上时间维持高温、微风、风向基本一致。这种气象条件使得蓝藻水华大

面积暴发,并在湖岸浅水区局地大量聚集、死亡、下沉、腐烂;同时也为水底厌氧反应提供了有利的热力条件和稳定的水动力条件。这为第 2 阶段黑臭水团“泛”至水表提供了物质基础。

(3) 在厌氧反应产物“泛”起阶段,冷空气过境使得气温迅速降低、风速短时增大、风向调转 180° 左右。此突变的气象条件使得厌氧反应的区域水体稳定度减小并形成较强的离岸涌流,将厌氧反应产物带至水表,形成黑臭水团。这种天气过程触发了

“湖泛”的形成。

(4)在黑臭水团聚积阶段,较长时间维持高温、微风.较小的风浪搅动使得黑臭水团较长时间存在于水表,高温为黑臭水团内生物、化学反应提供了有利的热力条件,释放出难闻气体。

参考文献:

- [1] 陆桂华,马倩.太湖水域“湖泛”及其成因研究[J].水科学进展,2009,20(3):438-442.
- [2] 孔繁翔,胡维平,谷孝鸿,等.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[J].湖泊科学,2007,19(4):357-358.
- [3] 孔繁翔,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[J].湖泊科学,2009,21(3):314-328.
- [4] 谢平.太湖蓝藻的历史发展与水华灾害——为何2007年在贡湖水厂出现水污染事件?30年能使太湖摆脱蓝藻威胁吗?[M].北京:科学出版社,2008.
- [5] 刘泽.泛塘的发生与治理[J].现代农业科技,2009,(16):288.
- [6] Antenucci J, Imerito A. The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model-ELCOM: Science Manual [EB/OL]. <http://www.cwr.uwa.edu.au/services/models/elcom/documentation/> (posted 12/30/2000), 2000.
- [7] Callister E V. A three-dimensional, time-dependent circulation model of Utah Lake[D]. Utah State University, 2008.
- [8] 王惠中.浅海与湖泊三维环流及水质数值模拟研究和应用[D].南京:河海大学,2001.
- [9] 吴晓东,孔繁翔.水华期间太湖梅梁湾微囊藻原位生长速率的测定[J].中国环境科学,2008,28(6):552-555.
- [10] 孔繁翔,高光.大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J].生态学报,2005,25(3):589-595.
- [11] 孙小静,秦伯强,朱广伟,等.风浪对太湖水体中胶体态营养盐和浮游植物的影响[J].环境科学,2007,28(3):506-511.
- [12] 尤本胜,王同成,范成新,等.风浪作用下太湖草型湖区水体N、P动态负荷模拟[J].中国环境科学,2008,28(1):33-38.
- [13] 朱广伟,秦伯强,高光.风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据[J].科学通报,2005,50(1):66-71.
- [14] 郑庆锋,孙国武,李军,等.影响太湖蓝藻暴发的气象条件分析[J].高原气象,2008,27(S1):218-223.
- [15] 王成林,潘维玉,韩月琪,等.全球气候变化对太湖蓝藻水华发展演变的影响[J].中国环境科学,2010,30(6):822-828.
- [16] 黄漪平,范成新,濮培民,等.太湖水环境及其污染控制[M].北京:科学出版社,2001.
- [17] 陆桂华,马倩.2009年太湖水域“湖泛”监测与分析[J].湖泊科学,2010,22(4):481-487.
- [18] 马荣华,孔繁翔,段洪涛,等.基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识[J].湖泊科学,2008,20(6):687-694.