

风浪条件下太湖藻源性“湖泛”的消退及其水体恢复进程

申秋实^{①②}, 邵世光^③, 王兆德^{①②}, 张雷^①, 胡海燕^③, 范成新^{①*}

① 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;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 河海大学水文水资源学院, 南京 210098

* 联系人, E-mail: cxfan@niglas.ac.cn

2011-12-05 收稿, 2012-02-13 接受

国家自然科学基金重点项目(40730528)、国家自然科学基金(50979102)和江苏省基础研究计划重点基金(SBE201078397)资助

摘要 “湖泛”发生后的稳定持续时间是决定其致灾程度的主要指标, 风浪的复氧是破坏其稳定性的主要因素. 本文采用室内装置模拟、视觉比较和氧化还原条件分析等方法, 研究了不同风浪作用下藻源性“湖泛”的稳定性及水体中主要特征参数恢复过程. 结果显示: 静风对照下, “湖泛”水体黑色在实验过程中始终未消失, 水体 DO 含量保持在约 1.5 mg/L 以下; 小风(~2 m/s)和中风(~4 m/s)下, “湖泛”大约可持续 2 d 左右, “湖泛”消失时的 DO 含量约 6 mg/L; 大风(~8 m/s)下, 仅需要 14 h 就可使“湖泛”黑臭完全消失. 并且发现, 在“湖泛”消失后, 保持原来的风速下至 144 h, 没有再出现黑臭的回复; 水体溶解性营养物(NH_4^+ 和 PO_4^{3-})含量的降低随风浪大小有明显的响应关系. 研究结果为藻源性“湖泛”的应急治理提供了决策依据.

关键词

湖泛
消退
风浪模拟
溶解氧
太湖

藻源性“湖泛”(或称“黑水团”)是指在适当的气象条件下, 由于湖泊藻类的高度聚积使得水体突然发黑发臭的水环境污染现象. 藻源性“湖泛”的发生, 可以看作是湖泊环境诸要素对重度湖泊富营养化及蓝藻水华产生的一种剧烈响应. 近年来, 太湖“湖泛”, 特别是 2007 年发生在无锡市南泉水厂太湖水源地附近的藻华及“黑水团”事件, 因其对生态系统致命的破坏及巨大的社会和经济影响而受到国内外广泛关注^[1,2]. “湖泛”具有水体发黑发臭, 水生生物大量死亡, 低 DO(接近 0 mg/L), 高营养盐负荷等一些显著的共同特征^[3-7]. 在国外, 美国 Illinois 州一个露天矿湖^[8]、Massachusetts 州 Lower Mystic 湖^[9]等湖泊曾发生过较为类似太湖“湖泛”的黑水现象, 并引发了一定的环境及社会经济影响. 湖泛水体的典型缺氧等特征还与近年来季节性存在于海洋水体中的缺氧现象(hypoxia)或死亡区域(dead zone)有显著的共性, 后者在美国墨西哥湾^[10-15]、欧洲波罗的海和黑海^[13]、中国东海和南海^[16-18]等全球海域都有广泛的发生和存

在, 并成为海洋环境与生态研究的新热点问题. 在国内, 中国科学院南京地理与湖泊研究所就太湖“湖泛”问题进行了最先的报道^[2], 并就应急处理手段做了简要的分析和建议. 陆桂华等人^[4,7]通过野外监测的方法对太湖“湖泛”进行了长时间的跟踪调查并对其特点进行了综合报道. 刘国锋等人^[3,19,20]则通过室内小规模培养和野外监测相结合的方法对发生环境敏感元素如 Fe, Mn, S, P 等在“湖泛”体系沉积物-水界面处的迁移转化做了相关研究. 资料显示^[3,7], 不同时间不同地点发生的“湖泛”在湖体里稳定存在的时间差异巨大, 持续时长从 1 d 到 15 d 不等. 有理由认为: “湖泛”这种缺氧/厌氧体系稳定存在的时间愈长, 给湖泊生态系统和环境条件造成的危害和影响就愈强烈. 但“湖泛”属于自然突发事件, 其发生地点和出现时间均具有很大程度的不确定性. 这使得当前的“湖泛”研究主要集中在跟踪监测或效应研究方面, 而对“湖泛”在水体中持续存在时长、消退条件与过程、水体恢复特征等问题尚无明确的认识, 相关研究存在

明显不足。

太湖是一个典型的浅水湖泊，其多种环境和生态过程受风浪作用影响显著^[21-24]，风浪作用对其湖泊水体复氧和沉积物再悬浮能力影响巨大。本文以太湖“湖泛”区原位沉积物、湖水和堆积蓝藻为对象，在沉积物再悬浮发生模拟装置内模拟“湖泛”，并在此基础上主要研究风浪作用对“湖泛”稳定程度的影响，以期揭示在风浪作用下“湖泛”水体恢复过程的主要规律和特征，从而推进对“湖泛”发展变化至消亡过程的理解和认识。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究所用的沉积物、上覆水以及蓝藻均采集于太湖月亮湾水域同一个点位。月亮湾近年来多次发生“湖泛”现象^[7]，选择该水域为采样点研究“湖泛”具有较典型的代表性。

用重力式沉积物采泥器(Φ110 mm, L50 cm)采集数根约 30 cm 深的沉积物原位柱状样，采样过程无扰动并保持界面稳定，柱状样上部带约 20 cm 的原上覆水。进行沉积物柱状样采样之前，用 25 L 聚乙烯桶采集足够实验用的湖水，并用 25 号浮游生物网采集堆积于采样点的蓝藻。妥善保存好采集的样品，24 h 内带回实验室进行装样并开始实验。

1.2 实验方法

(i) “湖泛”发生模拟装置。利用位于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内 Y-型沉积物再悬浮发生模拟装置^[25]模拟“湖泛”的发生，并作为“湖泛”暴发后水体恢复过程的实验装置。该装置(如图 1 所示)可实现浅水湖泊实际水深及不同风浪情况下沉积物-水界面间一些物理、化学、生物过程的室内模拟，具有室内良好再现浅水湖泊水动力过程及沉积物再悬浮等功能^[26,27]。

(ii) 实验方案。在不破坏其原有结构和性状的前提下，将采集的 4 根沉积物柱状样上部的 20 cm 分别装进 Y-型沉积物再悬浮发生模拟装置的 4 根模拟柱内。然后以无扰动法加入采集的湖水，使水深达到和实际湖水深度相类似的 180 cm。其后再加入新鲜蓝藻，使每管中达到 47.5 g/柱(约 5000 g/m²)，控制环境温度(29±1)℃，静置模拟湖岸堆积，直至第 4 天发

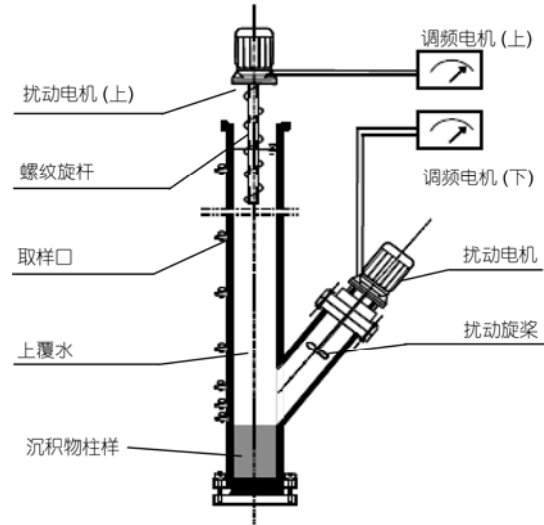


图 1 Y-型沉积物再悬浮发生模拟装置(剖面示意图)

生“湖泛”。于指定的风浪条件设置装置扰动参数，进行风浪作用下“湖泛”稳定性及水体恢复实验。实验设置无风、小风、中风和 4 个大风等级，按照和湖体风级的对应关系对模拟装置进行调整^[28]，具体控制条件如表 1 所示。实验过程中按照采样时间，分别测定水面表层之下 20 cm 和沉积物-水界面之上 10 cm 处的 DO, Eh 和 pH，并取一定体积的水样待实验结束后统一测定。

1.3 样品测定与分析

使用雷磁 JPB-607A 型便携式溶解氧分析仪(中国)测定水体 DO，使用传滴 PHB-04 型便携式 ORP(中国)测定仪测定水体 Eh，使用雷磁 PHB-4 型便携式 pH 计(中国)测定水体 pH。水体中营养盐的测定都采用《湖泊富营养化调查规范》中的方法^[29]进行。总氮(TN)采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定，氨氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂比色法测定，总磷(TP)采用过硫酸钾消解钼锑抗分光光度法测定，溶解性活性磷(SRP，文中以 PO₄³⁻-P 计)采用钼锑抗分光光度法测定。

表 1 “湖泛”稳定性及水体恢复实验条件控制

实验柱编号	1 号	2 号	3 号	4 号
对应风情	无风/C	小风/S	中风/M	大风/H
对应风速(m/s)	0	~2	~4	~8
采样时间	实验开始后第 0, 0.5, 1, 2, 6, 16, 24, 48, 72, 96, 144 h			
风浪持续时间(h)	持续无风	144	144	144

2 结果与讨论

2.1 风浪强度对“湖泛”水体稳定程度的影响

在不同强度风浪作用下，“湖泛”水体稳定存在的时间具有明显差异(如图2所示). 实验发现, 在大风作用下, 6 h左右水体黑色即开始有显著的消退, 16 h后黑色完全消失, 原有的黑色“湖泛”水体被含有大量悬浮颗粒物的较混浊的水体替代. 中风和小风作用下, 水体黑色在36 h左右时开始变浅、至48 h时完全消退. 而与此相对的是在无风情况下, 水体一直持续保持稳定的黑色, 直至实验结束都未出现恢复的迹象. 这表明“湖泛”水体在持续风浪作用下并不能稳定存在, 其水体黑色在相对较短时间内会消退并恢复至正常水平, 且风浪作用愈强烈其恢复愈迅速, 但持续无风却会让“湖泛”水体保持相对长时间的稳定.

刘国锋等人^[3]认为, 厌氧及低 Eh 的还原性环境下形成的大量金属硫化物, 是造成“湖泛”水体发黑的主要原因. Stahl^[8]和 Duval 等人^[9]也分别认为, 湖泊黑水的出现主要是由于水体在厌氧条件下生成以 FeS 为代表的大量金属硫化物造成的. 在风浪作用、特别是强风浪作用下, 水体 DO 含量恢复迅速, Eh 在较短时间内即从还原状态升高到弱氧化态至氧化状态 (DO, Eh 相关内容将在下文中详细讨论). 氧化还原环境的改变, 使得充斥于水柱中的 FeS 等金属硫化物被氧化成高价态的氧化物, 这可能是导致湖泛水体黑色消退的直接原因.

2.2 风浪作用对“湖泛”水体 DO 含量的影响

海洋或湖泊等大型水体 DO 含量异常下降是由

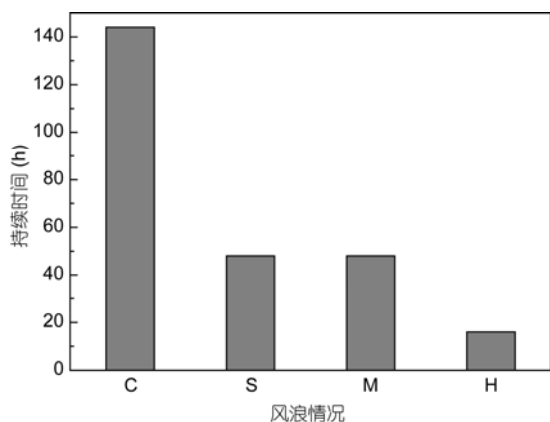


图2 不同强度风浪作用下“湖泛”持续时间

于过多的藻类或有机负荷大量降解造成的^[12,13,30]. “湖泛”水体处于严重的缺氧/厌氧状态, 水域内低 DO 水平直接导致了“湖泛”水域生境恶化, 并通过影响水体和沉积物氧化还原条件而影响一些敏感元素的生物地球化学循环^[3,19]. 因此, DO 含量的恢复对“湖泛”的消退和水体恢复具有重要的意义.

风浪过程同时也是一个水体复氧的过程, 对于平衡和补充水体 DO 含量具有显著的作用. 图3为不同强度风浪下“湖泛”水体 DO 含量的变化情况. 无风浪扰动时, 受试水体 DO 含量在整个实验期间都稳定在<1.5 mg/L 的水平, 一直处于缺氧/厌氧状态; 而在有风浪扰动的小风、中风和大风风情下, 水体 DO 含量则呈现出随实验时间延长而升高的趋势, 并分别在不同时刻恢复至好氧状态. 大风情况下 DO 含量在实验初期上升迅速, 2 h 后即>2 mg/L, 16 h 时已经恢复至>6 mg/L, 并于达到峰值 8.4 mg/L 后维持在稳定的好氧状态. 小风和中风情况下水体 DO 含量变化趋势相似, 都呈现出随风浪的持续而逐步升高的走向, 但其升高速度较大风时缓慢、水体恢复至好氧的时间也较晚. 实验证实, 不同风浪强度对湖泛水体 DO 的恢复具有显著的影响, 大风浪作用下 DO 含量恢复最快, 而无风或静风条件下“湖泛”水体 DO 含量则稳定维持在缺氧/厌氧状态.

2.3 风浪作用对“湖泛”水体 Eh 水平的影响

受 DO 水平的影响, “湖泛”水体 Eh 很低, 本研究及以往实验得到数据通常<50 mV(29℃), 这与已有文献报道的结果相类似^[3,4]. 风浪作用有力地打破了“湖泛”水体低 DO 含量的缺氧/厌氧状态, 水体 Eh 随

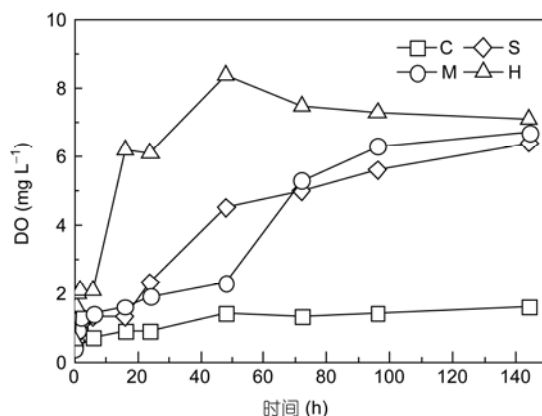


图3 不同风浪强度下“湖泛”底层水体 DO 含量变化

之开始恢复. 如图 4 所示, 风浪作用下水体 Eh 呈现出不断升高的趋势, 并在达到峰值后稳定在氧化区域. 其中, 大风浪作用下“湖泛”水体 Eh 迅速增高, 0.5 h 即已经达到了 300 mV, 至“湖泛”消失前后已经恢复至 >400 mV. 中等风浪和小风浪作用下, 水体 Eh 在 24 h 之后升高速度较快, 并在“湖泛”消失前后基本从还原区域上升到弱氧化区域. 形成鲜明对比的是, 无风浪作用下“湖泛”水体 Eh 维持在较低的还原区, 且有随时间延长不断下降的趋势. 这表明, 风浪作用对“湖泛”水体 Eh 从还原区域升高到氧化区域具有推动作用, 且这种作用在大风浪条件下更为明显. pH 和 Eh 具有紧密的联系, 但监测结果显示 pH 在 7.34~8.93 的范围内跳动, 并没有呈现出任何升高、降低的趋势或其他的规律性.

2.4 “湖泛”消退及水体恢复过程中营养盐的变化特征

高营养盐浓度负荷, 是“湖泛”水体的重要特征之一. 在“湖泛”酝酿发生及形成过程中, 水体 TN, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 SRP 含量均在不断升高^[31]. 而在风浪作用造成的“湖泛”消亡及水体恢复阶段, 其本身的营养盐负荷则表现了和“湖泛”发生阶段相反的变化特征(如图 5 所示). 一定强度的风浪作用下, “湖泛”水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 SRP 含量都呈现出实验初期短暂升高, 然后持续下降的趋势. 无风浪扰动时, “湖泛”水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 SRP 含量维持在稳定的高浓度状态. 实验过程中 TN, TP 的变化和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, SRP 的变化特征类似, 呈现出随风浪作用的持续而逐渐降低的趋势, 但受风浪作用造成的再悬浮效应影响其总体浓度依旧

较高, 始终表现为 $\text{TN}>4.51 \text{ mg/L}$, $\text{TP}>0.76 \text{ mg/L}$.

风浪作用下水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 SRP 含量在实验初期有所升高, 显然是因为沉积物再悬浮效应及表层间隙水中高浓度营养盐向水体释放造成的^[22,23,32]. 随着“湖泛”水体向氧化性环境转变, 硝化作用开始加强而反硝化和氨化作用逐渐减弱^[33], 同时水体高浓度的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为硝化作用提供了充足的反应底物, 使得 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被逐渐氧化, 从而造成水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的持续减少. 但 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的大量减少并没有和 DO, Eh 的显著增加同步出现, 在时间上有一个明显的大约 48 h 左右的滞后, 这可能是因为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化主要依赖于氨氧化细菌等微生物的作用造成的. 在环境条件变得适宜之后, 这些微生物还需经过 1~2 d 的迟滞生长期才会进入大量繁殖的对数生长期和稳定期, 此后其对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的转化利用效应才会凸显出来, 因此造成了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 大幅度减少的滞后现象. 此外, 风浪作用使得溶解于水体中的部分 NH_3 通过水气界面挥发进入大气^[33], 也是造成受试水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 减少的因素之一.

水体中 SRP 的变化趋势与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有所不同, SRP 含量在短时间内即迅速下降到一定程度, 其后趋于缓和并基本稳定. 水体中高浓度 SRP 的减少源自悬浮颗粒物的吸附作用^[34]. 再悬浮效应造成相当可观数量的沉积物颗粒进入水体^[23], 它们将过剩的 SRP 吸附于其表面并固定, 从而减少了水体中 SRP 浓度. 达到吸附饱和时, 悬浮颗粒物对 SRP 的吸附与释放达到动态平衡, 单纯的吸附作用不能再使 SRP 含量显著减少, 因此水体中 SRP 开始维持在较稳定水平. 被吸附的 SRP 将因再沉降过程得到沉积, 最终“汇入”沉积物之中. 强风浪过程能造成更大的再悬浮量, 因此该过程下水体 SRP 的减少更加显著.

2.5 水体恢复过程中水质参数间相关关系分析

相关性分析结果如表 2 所示. DO 与除 TP 外的所有参数都呈极显著相关, 其中与 Eh, pH 呈极显著正相关关系, 与 TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 SRP 呈极显著负相关关系. 本研究过程中, 风浪作用是造成“湖泛”水体厌氧状态被打破唯一驱动, 水体 DO 含量升高和变化主要受大气复氧作用的影响. 因此, 上述相关关系表明 DO 含量对 Eh, pH, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 SRP 的变化产生重要影响, “湖泛”消退及水体恢复过程中 Eh, pH 的升高以及 TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 SRP 含量的减少是对水体 DO 含

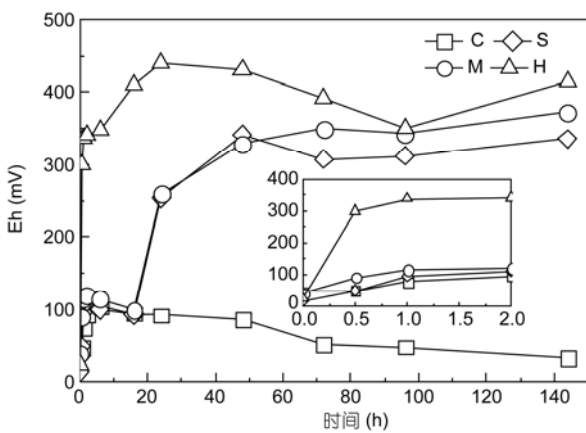


图 4 不同风浪强度下“湖泛”底层水体 Eh 变化

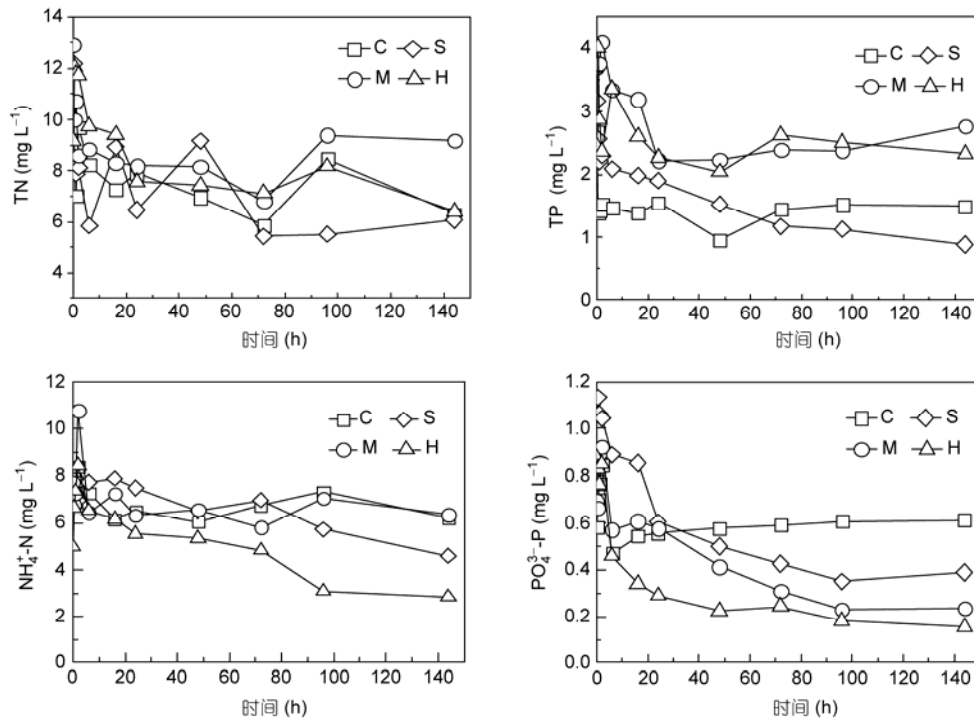


图5 不同风浪强度下“湖泛”底层水体营养盐变化

表2 水体主要水质指标相关性分析^{a)}

因子	DO	Eh	pH	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	SRP
DO	1						
Eh	0.857**	1					
pH	0.348**	0.223*	1				
TN	-0.302**	-0.087	-0.087	1			
TP	-0.116	-0.098	-0.038	0.775**	1		
NH ₄ ⁺ -N	-0.532**	-0.400**	-0.107	0.303**	0.205	1	
SRP	-0.759**	-0.659**	-0.025	0.324**	0.194	0.572**	1

a) **显著性水平为 0.01, *显著性水平为 0.05; n=88

量升高的积极响应. Eh 与 NH₄⁺-N, SRP 呈极显著负相关关系, 与 TN, TP 无显著相关性. 一般认为, Eh 通过影响氨氧化细菌等微生物的活性间接影响了水体中 NH₄⁺-N 的浓度, 同时通过影响悬浮颗粒物吸附活性影响了 SRP 的浓度, 从而使得 Eh 对“湖泛”消退过程中水体 NH₄⁺-N 和 SRP 含量的变化产生了显著的影响.

NH₄⁺-N 和 SRP 间的极显著正相关关系并不能说明 NH₄⁺-N 对 SRP 具有显著影响或者 SRP 对 NH₄⁺-N 具有显著影响, 而是暗示着两者在“湖泛”水体中相似的变化规律, 这可能是由于二者同受到 DO 和 Eh 变化的支配而引起的. 同样地, TN 和 TP 间的极显著正相关关系可能更多地表明了二者同受沉积物再悬

浮效应和再沉降效应的影响发生了类似的同步变化.

2.6 “湖泛”消退及水体恢复过程中水质参数主成分分析

为了进一步阐明水体各参数对“湖泛”消退与水体恢复的作用与贡献, 对其进行了主成分分析. 经主成分分析(方差最大正交旋转)提取特征根大于 1 的公因子后, 前 3 个公因子解释了方差贡献率的 83.81%, 因此我们认为这 3 个公因子(公因子 1, 公因子 2, 公因子 3)对“湖泛”消退和水体恢复具有较强的解释能力. 主成分分析的输出结果如图 6 所示. 经分析可以得出: 公因子 1 在 DO 和 Eh 上有较大载荷, 表现了

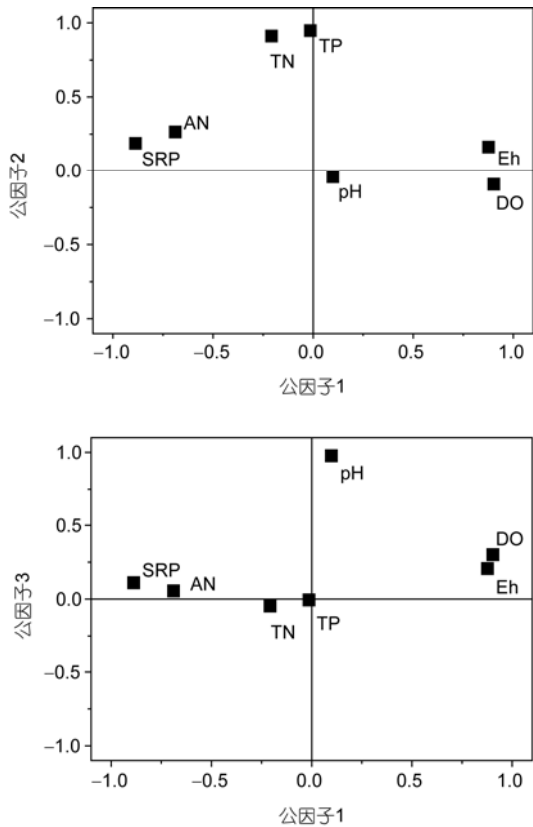


图6 “湖泛”消退及水体恢复过程水质参数主成分分析

水体氧化还原环境对“湖泛”消退及水体恢复的作用，因此定义为氧化还原条件的影响因子；公因子2在TP、TN上有较大载荷，另外氨氮(AN)和SRP对其也有一定的贡献，表现为营养盐类物质对“湖泛”消退

及水体恢复的作用，故而定义为营养盐含量的影响因子；公因子3主要在pH上有较大载荷，表现为pH对“湖泛”消退及水体恢复的作用，故定义为pH的影响因子。这3个公因子的性质及顺序体现了其代表的参数对“湖泛”消退及水体恢复的影响程度。由此可以认为：DO和Eh是“湖泛”消退和水体恢复的主导影响因素，营养盐含量对“湖泛”消退和水体恢复具有重要的影响，pH对“湖泛”消退和水体恢复具有一定的影响但影响程度较小。

3 结论

风浪作用对“湖泛”水体的稳定存在具有显著的影响，不同强度风浪条件下，“湖泛”水域总是趋向于“湖泛”消退及水质恢复的积极变化。平均风速约8 m/s的大风浪条件下，这种变化更加快速和显著。在“湖泛”消退过程中，水体主要水质指标向常态恢复。溶解氧和氧化还原电位升高趋势明显，水体呈现出从缺氧/厌氧的还原性环境向有氧/好氧的氧化性环境转变；同时，高浓度的N、P营养盐污染负荷呈现出明显下降的态势。分析表明，风浪作用下“湖泛”的消退和水体恢复主要受溶解氧含量变化的影响和驱动，水体氧化还原条件是引发“湖泛”消退的第一影响因素。由于“湖泛”水域是受水质、沉积物性质及气候因素影响的多相复杂污染体系，其氧化还原环境的剧烈转变对该体系中诸多敏感元素产生影响，因此“湖泛”消退及水体恢复之后沉积物中营养盐和重金属的赋存及循环特征等问题尚需进一步的深入研究。

致谢 中国科学院南京地理与湖泊研究所古小治博士对数据处理与分析方面提出了宝贵建议，在此深表感谢。

参考文献

- 1 Yang M, Yu J, Li Z, et al. Taihu Lake not to Blame for Wuxi's woes. *Science*, 2008, 319: 158
- 2 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: 357-358
- 3 刘国锋, 钟继承, 何俊, 等. 太湖竺山湾藻华黑水团沉积物中Fe-S-P的含量及其形态变化. *环境科学*, 2009, 30: 2520-2526
- 4 陆桂华, 马倩. 太湖水域“湖泛”及其成因研究. *水科学进展*, 2009, 20: 438-442
- 5 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: 41-44, 52
- 6 戴玄吏, 汤佳峰, 章霖之. “湖泛”恶臭物质分析及来源浅析. *环境监测与预警*, 2010, 2: 39-41
- 7 陆桂华, 马倩. 2009年太湖水域“湖泛”监测与分析. *湖泊科学*, 2010, 22: 481-487
- 8 Stahl J B. Black Water and 2 peculiar types of stratification in an organically loaded strip-mine lake. *Water Res*, 1979, 13: 467-471
- 9 Duval B, Ludlam S D. The black water chemocline of meromictic Lower Mystic Lake, Massachusetts, USA. *Int Rev Hydrobiol*, 2001, 86: 165-181
- 10 Bianchi T S, DiMarco S F, Cowan J H, et al. The science of hypoxia in the Northern Gulf of Mexico: A review. *Sci Total Environ*, 2010, 408: 1471-1484

- 11 Diaz R J, Rosenberg R, Rabalais N N, et al. Dead zone dilemma. *Mar Pollut Bull*, 2009, 58: 1767–1768
- 12 Vaquer-Sunyer R, Duarte C M. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 15452–15457
- 13 Diaz R J, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 2008, 321: 926–929
- 14 Jocelyn K. Gulf's Dead Zone worse in recent decades. *Science*, 2005, 308: 195
- 15 Boesch D F. The gulf of Mexico's dead zone. *Science*, 2004, 306: 977–978
- 16 Luo L, Li S, Wang D. Hypoxia in the Pearl River estuary, the South China Sea, in July 1999. *Aquat Ecosys Health Manag*, 2009, 12: 418–428
- 17 Wang B D. Hydromorphological mechanisms leading to hypoxia off the Changjiang estuary. *Mar Environ Res*, 2009, 67: 53–58
- 18 Chen C C, Gong G C, Shiah F K. Hypoxia in the East China Sea: One of the largest coastal low-oxygen areas in the world. *Mar Environ Res*, 2007, 64: 399–408
- 19 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: 2652–2660
- 20 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: 2917–2924
- 21 范成新, 张路, 秦伯强, 等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33: 760–768
- 22 秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式. *科学通报*, 2003, 48: 1822–1831
- 23 朱广伟, 秦伯强, 高光. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷爆发性释放的直接证据. *科学通报*, 2005, 50: 66–71
- 24 胡春华, 胡维平, 张发兵, 等. 太湖沉积物再悬浮观测. *科学通报*, 2005, 50: 2541–2545
- 25 范成新. 一种室内模拟水下沉积物再悬浮状态的方法及装置. 中华人民共和国专利, CN1563928-A, 2005-1-12
- 26 刘国锋, 范成新, 钟继承, 等. 风浪作用下太湖改性沉积物对藻体絮凝去除效果研究. *环境科学*, 2009, 30: 52–57
- 27 尤本胜, 王同成, 范成新, 等. 太湖沉积物再悬浮模拟方法. *湖泊科学*, 2007, 19: 611–617
- 28 尤本胜. 太湖沉积物再悬浮和沉降过程中物质的动态迁移及其定量化. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2007. 23–28
- 29 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 160–188
- 30 Hogue C. Dead zone—Task force seeks advice on how to reduce and control Gulf of Mexico's low-oxygen zone. *ChemEng News*, 2006, 84: 40–42
- 31 刘国锋. 藻源性湖泛对太湖沉积物-水界面物质行为影响及预控研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2009. 50–53
- 32 Søndergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark. *Hydrobiologia*, 1992, 228: 91–99
- 33 范成新, 杨龙元, 张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布. *湖泊科学*, 2000, 12: 360–366
- 34 张路, 范成新, 秦伯强, 等. 模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究. *湖泊科学*, 2001, 13: 35–42

Fade and recovery process of algae-induced black bloom in Lake Taihu under different wind conditions

SHEN QiuShi^{1,2}, SHAO ShiGuang³, WANG ZhaoDe^{1,2}, ZHANG Lei¹, HU HaiYan³ & FAN ChengXin¹

¹ State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China

The duration time of the black bloom is a major index which would determine whether the disaster of the black bloom is severe or not. Wind-induced reoxygenation is the main factor which can disrupt the stability of the black bloom. In this study, laboratory simulation, visual comparison, and analysis of oxidation and reduction methods were employed to investigate the stability of algae-induced black bloom and the recovery processes of the water characteristics under different levels of wind conditions. Results showed that under the controlled calm condition, the black bloom system remained at a stable state in the entire experiment period, in which the DO was continuously < 1.5 mg/L. Under slow wind (S, the wind speed was about 2 m/s) and moderate wind (M, the wind speed was about 4 m/s) conditions, the black bloom disappeared after 2 d and the DO increased to about 6 mg/L when the black color of the water faded. Under high wind (H, the wind speed was about 8 m/s) condition, the black bloom totally disappeared in only 14 h. The results indicated that the black bloom did not re-occur after disappears while the wind conditions were maintained in the left experiment time. It was also shown that the concentrations of water soluble nutrients (NH₄⁺-N and PO₄³⁻-P) were significantly responded to the wind levels. The research results would provide decision basis on the emergency control of the algae-induced black bloom.

black bloom, diminish, wind-wave simulation, dissolved oxygen (DO), Lake Taihu

doi: 10.1360/972011-745