

藻华聚积及污水入流对太湖上下层水体 营养盐含量的影响

孙飞飞^{1,2}, 尹桂平^{1,2}, 范成新², 崔广柏¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098 ;
2. 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, 江苏 南京 210008)

摘要 通过采集太湖水体鲜藻和入湖区混合常见污水,应用再悬浮发生装置,室内模拟有底泥参与的不同藻类聚积和不同 COD_{Cr} 含量污水进入条件下,太湖西北竺山湖区水质上下层水体中 SS, NH₃-N 及 PO₄³⁻ 质量浓度的变化过程。分析结果表明:在 7 d 的常见风浪模拟环境中,无论加入藻类还是加入污水,太湖上下层水体中 SS 质量浓度均呈下降趋势,表明颗粒物有向水底沉降的可能;水体中的 NH₃-N 和 PO₄³⁻ 质量浓度并未因藻量增加而上升,反映出鲜藻此时对水体中的 N 和 P 呈吸收作用;污水添加量的增大则使试验水柱中 NH₃-N 和 PO₄³⁻ 质量浓度上升,并大致随时间的增加呈逐步上升的趋势。

关键词 藻类聚积;污水输入;营养盐变化;动力模拟;太湖

中图分类号 :X524 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)05-0024-05

Influences of alga accumulation and wastewater discharge on content of aqueous nutrients in Taihu Lake//SUN Fei-fei^{1,2}, YIN Gui-ping^{1,2}, FAN Cheng-xin², CUI Guang-bai¹(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: By use of the Y-type sediment re-suspension generator, laboratory model tests were performed on concentration variations of suspended sediment(SS), ammonia nitrogen(NH₃-N) and phosphate(PO₄³⁻) of Zhushan water area in the northwest of Taihu Lake under conditions of algae with different quantities and wastewater with different concentrations of COD_{Cr} based the original sediment and water body collected from Taihu Lake. The result shows that during 7 days' simulation under common wind waves, the concentration of SS in Taihu Lake tends to decrease no matter the addition of algae or wastewater, SS tends to reduce, indicating that the particles are possible to settle on the riverbed. However, the concentrations of NH₃-N and PO₄³⁻ do not increase with the increase of quantity of algae, indicating that the alive algae can absorb nitrogen and phosphate in the water. The increase of wastewater with different concentrations of COD_{Cr} results in the increase of concentrations of NH₃-N and PO₄³⁻, and they have a increasing tendency with the time.

Key words : alga accumulation ; wastewater discharge ; nutrient change ; dynamic simulation ; Taihu Lake

2007 年 8 月 31 日和 2008 年 1 月 11 日美国《Science》杂志刊登了 2 篇关于太湖黑水团现象的文章^[1-2]。前篇称,当年夏季太湖蓝藻暴发导致了水质的巨变;后篇则认为此次水质巨变是“一起复杂的由生物引起的化学事件,和此前发生过的多次太湖蓝藻水华的暴发并无关联。”针对此,笔者提出了 2 种对黑水团发生原因的解釋,一种是太湖蓝藻,另一种是化学事件,并试着从这两个角度来进行探索。试验原理如下:基于 Y 型旋桨式沉积物再悬浮发生装

置这个平台,在相同上覆水体和原位沉积物的基础上,通过添加不同量的藻类和配比不同质的污水来探索黑水团发生过程中水体营养盐的变化。

1 试验材料及方法

1.1 材料

a. 沉积物与上覆水。试验所用底泥是运用大口径柱状采样器于竺山湖采集的若干沉积物样,用橡胶塞将柱样塞紧保存。湖水用 25 L 的塑料桶盛

放。所有泥样及水样于采样当天运回实验室,在4℃的低温环境中保存。

b. 鲜藻与污水。首先用2L塑料桶取太湖竺山湖水体中漂浮于水面上的蓝藻,接着用额定体积滤网将鲜藻静置2d。称重后,从装置上口投入。污水取自槽桥污水处理厂进水口,采样当日运回并立刻测定其COD_{Cr}质量浓度。添加蓝藻分别为1号、2号和3号装置,添加污水分别为4号、5号和6号装置。

1.2 模拟条件

基本条件:温度为(28±1)℃,基于黑臭现象通常发生于盛夏时节,故选择该温度范围;光照为自然光;水动力为中等风(相当于风速3~4m/s),风速参考文献[3]来率定;水深为1.6m。

藻类梯度:以单位水体表面积藻量作为梯度统计标准。低藻量为1000g/m²,中藻量为5000g/m²,高藻量为10000g/m²。

污水梯度:以水体COD_{Cr}作为污水梯度统计标准。低浓度(质量浓度,下同): $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})=50\text{ mg/L}$ ($\rho(\text{NH}_3\text{-N})=4.5\text{ mg/L}$, $\rho(\text{PO}_4^{3-})=0.05\text{ mg/L}$);中浓度: $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})=100\text{ mg/L}$ ($\rho(\text{NH}_3\text{-N})=5.5\text{ mg/L}$, $\rho(\text{PO}_4^{3-})=0.5\text{ mg/L}$);高浓度: $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})=150\text{ mg/L}$ ($\rho(\text{NH}_3\text{-N})=6.5\text{ mg/L}$, $\rho(\text{PO}_4^{3-})=0.3\text{ mg/L}$)。

试验时间:2008年12月6—12日。

1.3 沉积物再悬浮发生装置

Y型旋桨式沉积物再悬浮发生装置由Y型聚乙烯管、下部(呈侧位)扰动电机、上部扰动电机和调频电机等主件组成^[4]。将原位沉积物和上覆水体装入再悬浮发生装置后,对于加藻试验,直接添加相应的藻量;对于污水试验,因为湖水通常情况下COD_{Cr}不高(作忽略计),所以用体积比的方法来调配相应COD_{Cr}数值的污水+湖水混合上覆水。依据风速特征的研究结果^[5],选用太湖常见风速为本次模拟风速,并确定风速时长为4h。

试验在不同蓝藻添加量与不同污水水质的条件下模拟黑水团物质产生的过程。每日13:00—17:00进行搅动,模拟太湖风力影响。18:00分别在每根试验柱子的上、下2处取水样。

1.4 分析项目与计算

在每根柱子上、下2个取水口(距离泥-水界面分别为0.1m和1.4m)采样分析水样的NH₃-N(纳氏比色法)和PO₄³⁻(磷钼蓝比色法)。在采集水样时,同步测定其悬浮物(SS)质量浓度(便携式SS计)。主要参照《湖泊富营养化调查规范》^[6]和国家分析测试标准废水监测分析方法^[7]对样品进行分析。采集的水样用玻璃纤维滤膜抽滤。

采用平均数的方法来计算每个装置的分析项目值,即

$$\alpha(i)_j = \frac{1}{2}(\alpha(i)_{j_{\text{up}}} + \alpha(i)_{j_{\text{down}}})$$
$$(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

式中: i 分别为SS, NH₃-N, PO₄³⁻; j 为装置编号; $\alpha(i)_{j_{\text{up}}}$ 和 $\alpha(i)_{j_{\text{down}}}$ 分别为上、下部水样检测值。

2 结果与分析

2.1 藻类聚积和污水输入对水体 $\rho(\text{SS})$ 的影响

6个装置中的SS经历了较为相似的变化过程:起初在藻量或污水的添加下,水体SS均出现较大的增长;接着在动力搅动下,发生了一系列沉降—再悬浮—再沉降的物理动力过程;最后呈现下降的趋势,见图1和图2。沉降过程汇总,部分蓝藻和部分污水颗粒物沉降进入水-土界面层中,参加了这个微生物最为丰富的沉积物层中的各种反应过程,成为重要有机质的源项。动力搅动带来的复氧可以为有机质的有氧降解提供充分条件。蓝藻和污水分别在动力搅动的作用不断与水体中再悬浮的泥沙接触、碰撞,发生一系列物理、化学和生物反应。在水-土界面层中,有机质的存在及其后续的耗氧或厌氧生物降解都让该层的结构变得松散。原因在于在充足

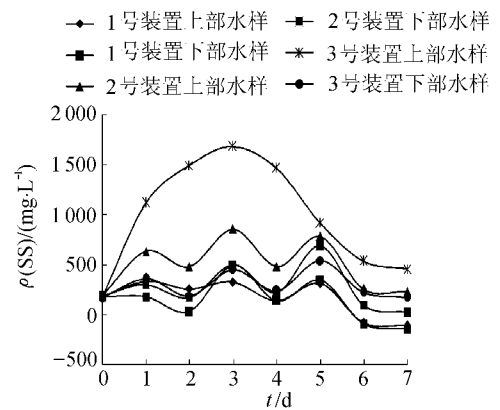


图1 加藻试验柱上下水层 $\rho(\text{SS})$ 变化

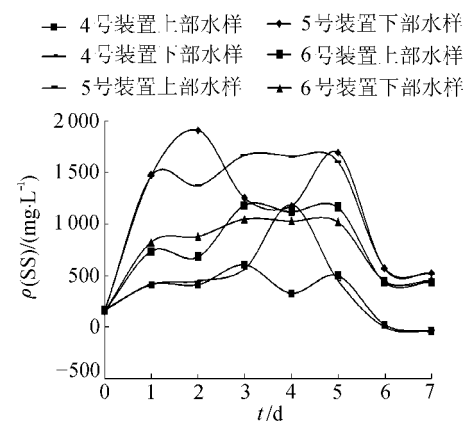


图2 加污水试验柱上下水层 $\rho(\text{SS})$ 变化

的有机质和适宜的温度条件下,沉积物存在的休眠和厌氧状态微生物快速被激活,进入对数期快速生长。而此时微生物形成的菌胶团结构蓬松,沉降性差,从而导致水体中SS质量浓度的暂时增加。但随着有机质的生物降解完全,菌胶团的数量将逐渐较少,表现在水体中SS质量浓度下降。

2.1.1 藻类聚积对 $\rho(SS)$ 的影响

加藻装置中的 $\rho(SS)$ 呈现出波浪形的变化趋势。但在出现3个峰谷后,出现了稳定的下降。从图1中可以看到,加藻装置在第3天左右 $\rho(SS)$ 达到最大值;上、下部水样 $\rho(SS)$ 的差距在不断地缩小。这说明藻残体粒度不利于混合均匀。1号装置在第3~4天就实现上下水样混合均匀;2号装置要到第5~6天才能实现上下水样混合均匀;3号装置中的水样不仅花了更长的时间向上下水样混合均匀的方向发展,而且其上部水样 $\rho(SS)$ 变化似经历了一个较大的山峰。

藻类聚积后,因为环境条件的有限性,藻体出现死亡态势:由蓝绿色转变为黄色残体。部分残体沉降到水-土界面层,参与其中的生物降解。藻残体为水-土界面提供有机质。有机质在上覆水体和沉积物中的分解成为整个试验过程的主体内容。要实现藻体的聚沉就必须把静电排斥减弱,以便相同物质能够聚沉。由于藻残体作为悬浮胶体物,其比表面积很大,能够强烈地吸附各种分子和离子。随后, $\rho(SS)$ 下降的原因在于有机质分解,使得水体吸附的胶体物变少。

2.1.2 污水输入对 $\rho(SS)$ 影响

加污水装置中的 $\rho(SS)$ 表现为先增加后稳定在一定的水平,最后急剧下降并稳定。水体中 $\rho(SS)$ 在第1次搅动后就稳定下来,直到第5次搅动后 $\rho(SS)$ 出现急剧下降。同时,加污水装置的上下取样点间 $\rho(SS)$ 的差异较小,说明污水组成的颗粒物粒度有利于混合均匀。

污水汇入后,污水含有的颗粒物、细菌、病毒、表面活性剂、油滴等作为胶体物对水体中的 $\rho(SS)$ 产生了很大的影响。污水组成的复杂性让 $\rho(SS)$ 维持了5d的稳定。最终,胶体颗粒的絮凝或聚沉作用使水体 $\rho(SS)$ 下降。

总体上,各装置中 $\rho(SS)$ 呈先上升、后下降的趋势。在数量级上,加污水与加藻装置中 $\rho(SS)$ 的变化趋势相似。

2.2 藻类聚积量对水体 $\rho(NH_3-N)$ 及 $\rho(PO_4^{3-})$ 的影响

藻类聚积量为水体及沉积物提供了有机质源。通常情况下,有机质分解及水生生物代谢活动是造

成水体 $\rho(NH_3-N)$ 增加的主要途径。沉积物有机质含量与磷酸酶活性显著相关。高温下,微生物复苏、生长和繁殖加快。磷释放受到微生物活动、有机质分解,以及沉积物的水、气、热状况等条件的影响。

2.2.1 对 $\rho(NH_3-N)$ 的影响

藻体聚积对水体 $\rho(NH_3-N)$ 产生较大的影响: $\rho(NH_3-N)$ 变化呈现明显的规律性和一致性(图3)。 $\rho(NH_3-N)$ 并没有因为藻量的增加而呈现明显的变化差异,但总体趋势是一致的。有趣的是,在第1天1号装置表现出较高的 $\rho(NH_3-N)$ 。其原因可能是在中等风速搅动下1号装置的表层沉积物释放出较多的 NH_3-N 。接下来,在搅动所带来的溶解氧作用下1号装置中的 $\rho(NH_3-N)$ 迅速下降。再接着,动力搅动导致了藻体与沉积物表层相混合并沉降。随后发生的有机质分解对 $\rho(NH_3-N)$ 产生第3天明显的梯度。该梯度与藻量梯度负相关,原因在于剩余鲜藻对 NH_3-N 的吸收作用。在第3天之后,1号装置因为此前有机质分解的完结,不再出现 $\rho(NH_3-N)$ 的升高;2号装置有机质分解量的增大和相对的鲜藻量减小导致 $\rho(NH_3-N)$ 升高;3号装置中虽然有较多的有机质分解,可是鲜藻量仍较大,结果 $\rho(NH_3-N)$ 升高较2号装置中缓慢些。

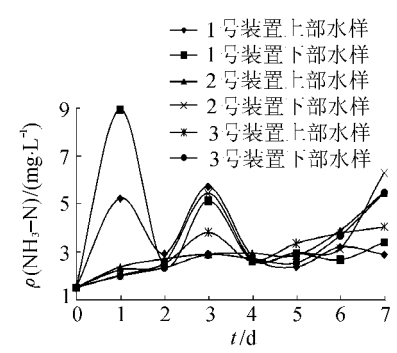


图3 加藻试验柱上下水层 $\rho(NH_3-N)$ 变化

2.2.2 对 $\rho(PO_4^{3-})$ 的影响

藻类堆积对 $\rho(PO_4^{3-})$ 的影响并未因藻量的增加而增大,反而呈现一定的负相关(图4)。原因可能为鲜藻的吸附作用。 $\rho(PO_4^{3-})$ 的变化与藻体有机质的分解、沉积物再悬浮释放和鲜藻胶体的化学吸附作用有关。1号装置中 $\rho(PO_4^{3-})$ 呈现出2次峰谷变化。而其他另外2个装置中因为鲜藻含量仍较大或悬浮胶体物的大量存在,对 $\rho(PO_4^{3-})$ 产生了吸附作用。

2.3 污水添加量对水体 $\rho(NH_3-N)$ 及 $\rho(PO_4^{3-})$ 的影响

2.3.1 对 $\rho(NH_3-N)$ 的影响

加污水装置中 $\rho(NH_3-N)$ 变化呈现出较为混乱的状态,特别是在第1~5天。这个过程与其 $\rho(SS)$ 的变化是类似的。不同的是污水中各物质不像藻体

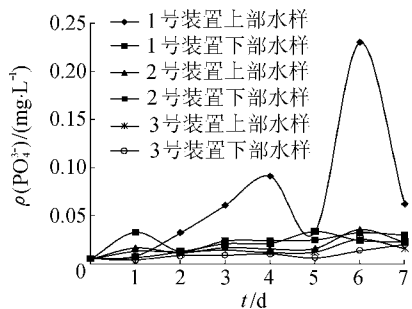


图4 加藻试验柱上下水层 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 变化

那么单一,其复杂性导致了其与加藻相比更为复杂的过程。污水所含的有机质分解几乎在前6天内完成,随后水体中 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 开始下降并恢复到之前的状态(图5)。

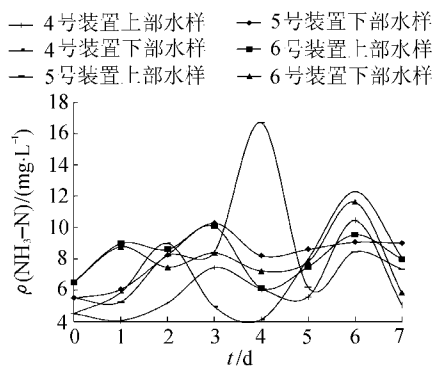


图5 加污水试验柱上下水层 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 变化

2.3.2 对 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 的影响

不同的加污水装置中, $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 呈现出较为一致的规律性。污水为水体提供了大量有机磷。随着有机质的分解, PO_4^{3-} 得到了释放。同时,细菌胶团和其他悬浮胶体物对 PO_4^{3-} 起着吸附作用。第5天之前 PO_4^{3-} 经历了1次逐步上升后又较快地下降的过程。第5天开始的下降是有机质分解完结的标志。在第5天之后出现了1次较小幅度的上升(图6),原因可能主要在于再悬浮过程,与有机质的分解无关。

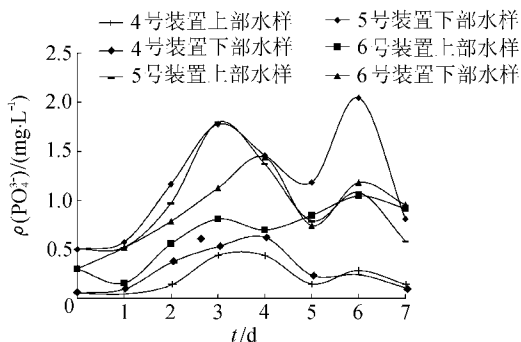


图6 加污水试验柱上下水层 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 变化

3 讨论

3.1 不同添加物对 $\rho(\text{SS})$ 的影响

加藻及加污水2种添加状态都造成水体 $\rho(\text{SS})$

增加,其增量对添加量有明显依赖关系(图7)。低藻量、中藻量和高藻量梯度与每天各装置水体 $\rho(\text{SS})$ 有着较好的相关性,这说明所选择中等风速的动力有足够的张力范围来把藻量梯度体现在 $\rho(\text{SS})$ 梯度上。低浓度、中浓度和高浓度污水的添加与每天各装置水体 $\rho(\text{SS})$ 也有着较好的相关性。

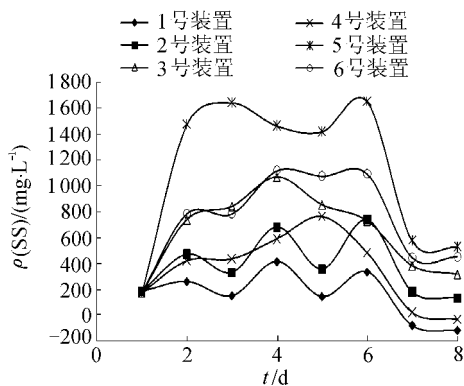


图7 各装置 $\rho(\text{SS})$ 变化

从数值上看,加藻装置的 $\rho(\text{SS})$ 小于加污装置的 $\rho(\text{SS})$ 值。而且加污装置上下水样之间的 $\rho(\text{SS})$ 差值明显小于加藻装置上下水样之间的 $\rho(\text{SS})$ 差值。加藻装置明显的规律性源于蓝藻个体的单一性,而加污装置在第5天之前体现的 $\rho(\text{SS})$ 变化无规律性源于污水组成的复杂性。

以上情况说明在中等风速下藻量的增加和污染物的进入都会对水体造成五六天的 $\rho(\text{SS})$ 升高。在第6天之后,水体中的 $\rho(\text{SS})$ 逐渐下降。

3.2 不同添加物对 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 的影响

加藻梯度对水体中 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 的影响不大,而加污梯度对水体 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 有较大的影响,见图8。假定装置的复氧效率相同,由于藻体或污水中有机物分解耗氧,使得水体氧含量存在一个下降和上升的变化过程。只有当溶解氧含量高时, $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 才会下降,而当耗氧大于复氧效率时, $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 才会升高^[6]。第1天的 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 变化受沉积物再悬浮的较大影响^[7]。随后,有机质分解逐渐占据了主导。

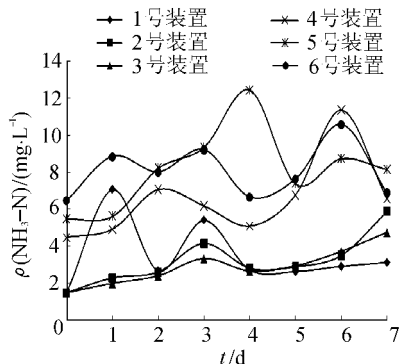


图8 各装置 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 随时间的变化

藻体聚积对 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 升高的作用较为缓慢,而污水汇入对 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 升高的作用较为明显。从图 8 中可见,加藻装置中的 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 变化与加污水装置相比较而言有着更明显的规律性。这个事实也验证了污水的组成与蓝藻相比极为复杂。但是,在第 5 天之后,加污水装置中 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 也呈现出明显的规律性、一致性。在数量级上,蓝藻导致的 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 与污水导致的值相差 1 倍。藻体堆积和污水汇入,前者产生的 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 明显小于后者。 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 变化在前期受沉积物再悬浮影响较大,随着时间的推移,逐渐出现受藻量及污水影响较为一致的变化趋势。

文献 [2] 指出:“该‘黑水团’的存续可以与水中 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 的变化联系起来——平时 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 为 0.23 ~ 0.97 mg/L,5 月 28 日开始突然上升,在 5 月 31 日达到峰值 4.0 mg/L 后逐渐回落。然而,这一时期观察到的不寻常的高 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 却并不是藻类水华爆发过程的通常情况。”本次试验得出的结果验证了这一描述:藻华聚积不会造成 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 较大增加,而污水汇入可以导致水体中 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 大幅度增加。

3.3 不同添加物对 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 的影响

加藻梯度与水体中 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 有着一定的负相关,且逐渐加强。而加污梯度与水体中 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 有一定的正相关,见图 9。藻体死亡分解过程中产生的胶体态在动力搅动中不断分解为更小的颗粒。 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 的第 1 次高峰也是集中在藻体分解最快的前 4 d 中^[8]。而加污水装置中因污水成分复杂,故而造成 5 号和 6 号装置中 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 与配置污水的质量浓度呈负相关。总体而言,藻体堆积和污水汇入产生的 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 变化趋势较为一致。藻体堆积产生的 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 仅为污水汇入的 1/10。总之,2 种情况的 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 呈现出相似的变化规律。但是,二者不在同一数量级上。

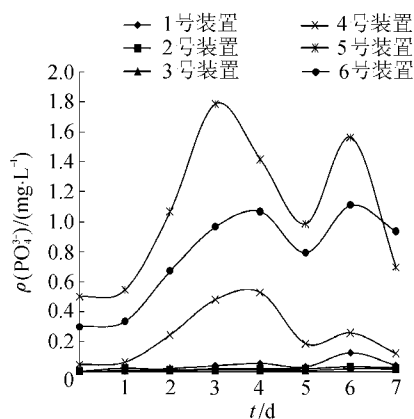


图 9 各装置 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 随时间的变化

4 结 语

由于蓝藻结构的单一性,藻体堆积对上覆水体营养盐的影响与藻量梯度有着较好的相关性;而污水成分复杂,污水汇入对营养盐的影响与 COD_{Cr} 梯度相关性不太好,原因可能是 COD_{Cr} 不足以反映污水的复杂结构。

初步试验结果表明,在 7 d 的常见风浪模拟环境中,无论加入藻类和加入污水后试验装置内上下层水体中 $\rho(\text{SS})$ 均下降,表明颗粒物有向水底沉降的可能,但水体的 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 和 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 并未因藻量增加而上升,反映鲜藻此时对水体中的 N、P 呈吸收作用,污水添加量的增加则使水柱中 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 和 $\rho(\text{PO}_4^{3-})$ 上升,并大致随时间增加呈逐步上升趋势。

此次试验过程中有机质为微生物指数级生长繁殖提供了条件。随着微生物的大量增加,其生物降解将需要更多的溶解氧。可是,常见风速条件下并不能提供足够的氧量,于是有机质将出现缺氧分解或厌氧分解。有机质的不完全降解将对沉积物中的物质组成产生剧烈的影响。不完全分解产物是黑臭产生的原因。

参考文献:

- [1] ECOLOGY L G. Doing battle with the green monster of Taihu lake[J]. Science, 2007, 317: 1166. [DOI: 10.1126/science.317.5842.1166] (in News Focus).
- [2] YANG Min, YU Jian-wei, LI Zong-lai, et al. Taihu lake not to blame for wuxi's woes[J]. Science, 2008, 319: 158. [DOI: 10.1126/science.319.5860.158a] (in Letters).
- [3] 尤本胜,王同成,范成新,等.太湖沉积物再悬浮模拟方法[J].湖泊科学, 2007, 19(5): 611-617.
- [4] 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:中国, CN 200410014329. X[P]. 2006-09-27.
- [5] 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[J].中国科学:D 辑, 2003, 33(8): 760-768.
- [6] 金相灿,屠清英.湖泊富营养化调查规范[M].北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [7] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [8] 步青云.浅水湖泊溶解氧变化对沉积物磷、氮的影响[D].北京:中国环境科学研究院, 2006.
- [9] 朱广伟,秦伯强,张路,等.太湖底泥悬浮中营养盐释放的波浪水槽实验研究[J].湖泊科学, 2005, 17(1): 61-68.
- [10] 孙小静,秦伯强,朱广伟.蓝藻死亡分解过程中胶体态磷、氮、有机碳的释放[J].中国环境科学, 2007, 27(3): 341-345.

(收稿日期: 2009-09-24 编辑: 高建群)