

邱 阳,苗作云,刘学芝. 贡湖壬子港藻体堆积下黑水团发生风险研究[J]. 江苏农业科学,2015,43(10):435-439.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.10.135

# 贡湖壬子港藻体堆积下黑水团发生风险研究

邱 阳<sup>1</sup>,苗作云<sup>2</sup>,刘学芝<sup>3</sup>

(1. 江苏省环境科学研究院,江苏南京 210029;2. 黄河科技学院,河南郑州 450063;3. 国环宏博(北京)节能环保科技有限公司,北京 100035)

**摘要:**利用室内实验装置,通过分别添加 2 000、5 000、8 000 g/m<sup>2</sup> 藻细胞以模拟高、中、低 3 种藻华聚集密度水体,研究不同藻华细胞聚集模拟水体发生黑水团的风险。结果表明,试验 3 d,上覆水体中溶解氧含量降低到 2 mg/L 以下,高藻华聚集模拟水体中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量增加到 14 mg/L 以上,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 含量增加到 0.20 mg/L,总氮、总磷含量分别高达 15、2.0 mg/L;水体中叶绿素含量呈现快速下降趋势,3 d 后含量下降为 1 500 mg/m<sup>3</sup>;水体浑浊度增加,COD<sub>Mn</sub> 含量从 50 mg/L 快速上升为 120 mg/L,大量藻细胞聚集,出现快速死亡,藻华聚集区出现黑水团现象。

**关键词:**藻华聚集;黑水团;风险;上覆水;溶解氧;贡湖

**中图分类号:** X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)10-0435-05

近年来,不少水体因藻华堆积使氮磷过量累积而引起水体富营养化,导致水体发生质的变化,发生“水体黑臭”现象。2007 年 5 月,因藻华聚集造成无锡贡湖水厂取水口水质恶化而发生饮用水供应危机,引起国内外广泛关注<sup>[1]</sup>。2008 年以来,太湖多次发生这种现象,主要分布在太湖的竺山湖和西部的部分沿岸水域,且发生面积远大于 2007 年,对当地生产和生活用水造成极大影响<sup>[2-3]</sup>。近 10 年来,随着湖泊富营养化程度的加剧,水污染现象频发,甚至已严重威胁到城市供水,“水体黑臭”成为继藻类暴发现象后又一类湖泊灾害问

题<sup>[4-6]</sup>。因此,弄清湖泊中水体黑臭发生的原因和风险,对治理太湖环境问题是迫切和重要的。

“水体黑臭”是一种俗称,在湖泊中又称黑水团、湖泛等,与周边正常水体颜色在视觉感官上有明显不同,水体黑色,边缘清晰可辨,且多伴有臭味,水域明显缺氧,溶解氧含量多在 0~4 mg/L 之间,化学需氧量、氨氮、硫化物和异味物质等含量高,有底泥参与、可移动,事发水面多无藻类聚集等。目前,河道黑臭的发生原因已较为清楚,有关湖泊黑水团问题至今没有定论。

湖泊主要指太湖、巢湖等,黑水团发生的原因当前主要有 4 种观点,即藻源说、泥源说、河源说和混合源说。藻源说指黑臭的发生是由于藻类聚集后死亡,沉降于湖底并分解而导致缺氧;泥源说指湖底底泥中因富含有机质,水温上升等外在因素作用下,底泥中微生物对有机质分解速度加剧,产生分解不完全的产物,连同因缺氧环境产生的硫化物随挥发性气体

收稿日期:2015-05-19

基金项目:太湖流域管理局课题(编号:BS20071612011)。

作者简介:邱 阳(1979—),女,硕士,工程师,主要从事环境监测、环境工程和环境科研等工作。E-mail:49489209@qq.com。

通信作者:刘学芝,硕士,工程师,主要从事环境监测及环境影响评价等工作。E-mail:395552443@qq.com。

[10] 虞伟斌,杨兴明,沈其荣,等. K<sub>3</sub> 解磷菌的解磷机理及其对缓冲容量的响应[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(2):354-361.

[11] 贺梦醒,高 毅,胡正雪,等. 解磷菌株 B25 的筛选、鉴定及其解磷能力[J]. 应用生态学报,2012,23(1):235-239.

[12] 钟传青. 解磷微生物溶解磷矿粉和土壤难溶磷的特性及其溶磷方式研究[D]. 南京:南京农业大学,2004.

[13] 黄 毅,徐榕敏,江信红,等. 黄鳝碱性磷酸酶的分离纯化及其部分性质研究[J]. 水生生物学报,2005,29(3):323-328.

[14] 孙 芳,任美凤,胡瑞斌,等. 韭菜酸性磷酸酶的分离纯化及酶学性质[J]. 食品科学,2013,34(17):187-191.

[15] Bopaiah B M. Occurrence of phosphate solubilizing microorganisms in the root region of arecanut palms[J]. Plantation Crops,1985,13(1):60-62.

[16] Li X L, George E, Marschner H. Extention of the phosphorous depletion zone in a VA-mycorrhizal white clover in a calcareous soil[J]. Plant and Soil,1991,136:41-48.

[17] Illmer P, Schinner F. Solubilization of inorganic calcium phosphates-solubilization mechanisms[J]. Soil Biology and Biochemistry,1995,27(3):257-263.

[18] 范丙全. 北方石灰性土壤中青霉菌 P8(*Penicillium oxalicum*) 活化难溶磷的作用和机理研究[D]. 北京:中国农业科学院,2001.

[19] 赵小蓉,林启美,李保国. 微生物溶解磷矿粉能力与 pH 值及分泌有机酸的关系[J]. 微生物学杂志,2003,23(3):5-7.

[20] Narsian V, Patel H H. *Aspergillus aculeatus* as a rock phosphate solubilizer[J]. Soil Biology and Biochemistry,2000,32(4):559-565.

[21] Agnihotri V P. Solubilization of insoluble phosphates by soil fungi isolated from nursery seedbeds[J]. Canadian Journal of Microbiology,1970,16(9):877-880.

[22] 樊 磊,叶小梅,何加骏,等. 解磷微生物对土壤磷素作用的研究进展[J]. 江苏农业科学,2008(5):261-263.

[23] Patgiri I, Bezbarah B. Strain contributing to phosphorus mobilization in acid soils[J]. India Journal of Agricultural Sciences,1990,60(3):197-200.

[24] Deubel A, Gransee A, Merbach W. Transformation of organic rhizodeposits by rizoplane bacteria and its influence on the availability of tertiary calcium phosphate[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2000,163:387-392.

上浮而污染上覆水体。目前,对湖体发生黑水团的研究较多,但对大量蓝藻细胞聚集,使水体发生藻源性黑水团是未见有系统的研究报道<sup>[7-10]</sup>。本试验采用太湖贡湖壬子港的底泥,通过添加新鲜的蓝藻细胞,利用波浪水槽扰动装置<sup>[11-12]</sup>,研究藻华细胞聚集后上覆水的营养盐动态变化及不同藻华聚集程度下黑水团发生与藻体不同密度的相关性,以评估黑水团的易发风险,更好地认识藻源性黑水团对水体生态系统产生的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 波浪水槽装置

波浪水槽长、宽、高为 12 m × 2 m × 1.2 m,在槽的一端有 1 个调频电机带动的造浪板,并通过控制电机转动频率来调节造浪频率。

### 1.2 试验设计

2012 年 6 月,于太湖贡湖壬子港港口采用重力采样器采集原位底泥和水体,该处水体常年处于重污染状态,且受主导风向影响,在夏季经常会出现藻华严重聚集现象;接近实际的湖体泥、水深,对采集的沉积物柱状样进行分层,10 cm 以下的沉积物先装入水槽中,把 10 cm 的表层沉积物铺在表层,再把采集的湖水缓慢、无扰动注入水槽中,保持水槽中沉积物深度不少于 20 cm、水深不低于 60 cm;静置 10 d,待水体和沉积物达到动态平衡;用浮游植物网在底泥采集点附近捞取藻华聚集时的新鲜藻细胞,带回实验室,去掉水分,藻细胞聚集体呈浆状;称量藻浆,在水槽中分别添加藻细胞量为 2 000、5 000、8 000 g/m<sup>2</sup>,编号分别为 1#、2#、3#,开始水体藻华聚集模拟试验,每天上、下午各扰动 1 h。根据太湖北部湖区常见风变化及风浪扰动情况,设定试验水动力为中等风条件,相当于 3~4 m/s 风速<sup>[13-15]</sup>;温度控制在 (28 ± 1) °C,自然光照。

### 1.3 样品采集与分析

每天定时用溶氧仪测定溶解氧 (DO) 的浓度,利用手持便携式悬浮物 (SS) 测定仪测定水体的 SS 变化;观察上覆水中水体的颜色、气味变化;每天定时分表层 (上部)、底层 (下部) 采集上覆水,表层取样设置在距水面 3 cm 左右,底层取样为距底层沉积物表面 3 cm 左右,样品按照一定顺序标号,放入冰箱中保存;测定总氮 (TN)、总磷 (TP)、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P 含量<sup>[16]</sup>。取 500 mL 上覆水,立即用 GF/C 滤膜抽滤藻细胞,用热乙醇法测定藻细胞的叶绿素含量<sup>[17]</sup>。根据太湖藻华聚集产生黑水团持续的时间,模拟试验持续时间为 10 d 左右;试验结束,把沉积物进行分层,测定表层 10 cm 沉积物的氧化还原电位值 (Eh),用冷扩散法测定表层沉积物中酸可挥发性硫化物 (AVS) 的含量<sup>[7]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 水体物理性质及感官反应

造浪机推板的扰动作用可以使藻体在水体中均匀分布,扰动停止,由于藻体的生物学特性,藻细胞会很快聚集到水体的表面<sup>[18-19]</sup>,由于大量藻体的新陈代谢及高温作用,会消耗水体中大量的溶解氧 (DO)。试验结果表明,当水体中的溶氧消耗殆尽,加入高藻量的水体 DO 降低,Eh 迅速下降,底层水体的 Eh 下降到 -138.6 mV (图 1),同时,水体及沉积物中

微生物等的活动也会消耗部分氧气,他们和藻体协同作用,加剧了水体从有氧到厌氧的快速转变,当水体处于极度厌氧条件下,到 3 d 就产生异味,随着时间的延长,异味变得愈来愈浓烈,从轻微的臭味到很强烈的刺鼻臭味,同时,5 d 时水体颜色从透明状变化为微黑色至黑色;添加低藻量,由于在悬浮模拟扰动过程中,表层复氧过程使水体的溶解氧可以基本保持或满足藻体的代谢需求,溶解氧在水体中表现变化较小或水体溶解氧含量较低;添加中藻量的水体中溶解氧也很低,水体呈现出异臭味,但尚未有发黑的现象。

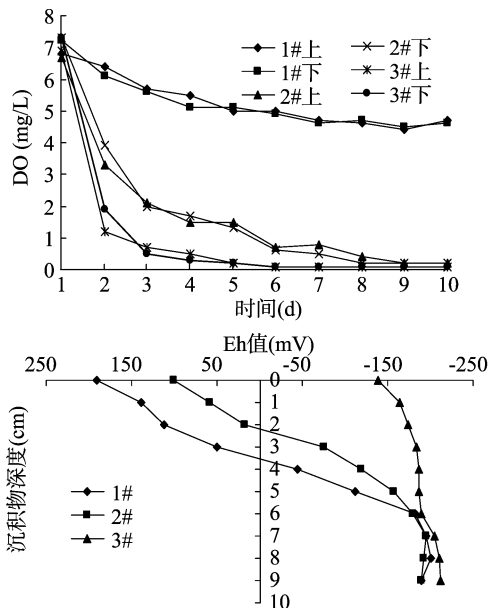


图1 水体溶解氧(DO)浓度变化和表层沉积物中Eh含量变化

### 2.2 上覆水中营养盐含量变化

2.2.1 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N和PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P含量变化 由图 2 可见,添加低藻量(1#柱),上、下部水体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 含量整体变化趋势呈不规则波动趋势,总体变化较为平稳,且基本处于较低的水平;添加中藻量(2#柱),上、下部水体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 含量呈现前 4 d 基本持平后增加的变化趋势,且上、下部水体趋同一致,这是由于底部水体缺氧产生的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 在扰动作用下不断扩散到表层水体中所致;添加高藻量(3#柱),水体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 含量不断增加,到测试结束,含量高达 17.5 mg/L,这是由于 8 000 g/m<sup>2</sup>高藻密度的加入,使藻华新陈代谢作用消耗较多的溶解氧,水体中溶解氧迅速消耗殆尽,很快进入厌氧状态,部分藻体沉降在沉积物表面,进一步使有机质的矿化分解成为厌氧分解,造成水体和沉积物中氮的还原以同化还原为主,诱发 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 的快速产生,并在水体扰动下扩散到水体中, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 含量达到一个动态平衡。

与水体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 的含量变化相比,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P 的含量变化规律并不明显。由图 2 可见,添加低藻量,上、下部水体中的 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P 含量变化波动性较大,有表现为浓度逐渐降低的趋势;添加中藻量,水体中的 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P 含量表现为较为平缓的趋势,试验 6 d 时表现有些异常,这可能是由于取样时取到大量藻体,而藻体细胞中含有大量的 P;添加高藻量,水体中的 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P 含量表现为前期较低,且基本不变,到试验 7 d 急剧增加后降低,这可能是由于水体处于厌氧状态,大量藻体细胞

失去活性沉降到水体底部,而细胞含有大量的 P,从而提高了  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的测定值<sup>[20-21]</sup>。

**2.2.2 总氮、总磷的含量变化** 由图 3 可见,上覆水体中总磷(TP)的浓度变化同  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  变化趋势类似,波动性较大,整体呈下降趋势;1#柱水体中,TP 浓度表现为逐渐下降;2#柱下部水体在 6 d 时浓度较高,后又降低,3#柱 TP 浓度也呈逐渐下降趋势。这可能由于开始阶段,加入的藻体密度较高,而采样是在扰动结束后进行的,所采样品中有较多的藻细胞,而藻细胞中含有较多的 P,对初始阶段 TP 的浓度提高贡献较大。

对总氮(TN)而言,呈现试验前期 TN 浓度较高、后期 TN 浓度较低的趋势(图 3),这是由于在试验过程中,添加低藻

量,藻细胞随着取样次数的增加而不断减少;添加中、高藻量,受藻细胞代谢作用引起水体缺氧,大量藻细胞死亡分解,在厌氧条件下产生大量的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,并在扰动作用下挥发到大气中,减少了水体 TN 的含量。需说明的是,添加高藻量,在试验结束 TN 的浓度仍然很高,这可能是由于水体处于极端厌氧,造成水体中的藻细胞大量分解,细胞内含有的氮释放到水体中,从而使水体中 TN 浓度的升高。

通过室内模拟试验说明,大量藻体聚集,如果藻体需氧量超过水体的自我复氧能力,则会造成水体处于厌氧状态,甚至极端厌氧,从而引起藻细胞的死亡分解,细胞内含物中大量的 N、P 将会释放到水体中,从而加重水体营养盐的负荷<sup>[20-22]</sup>。

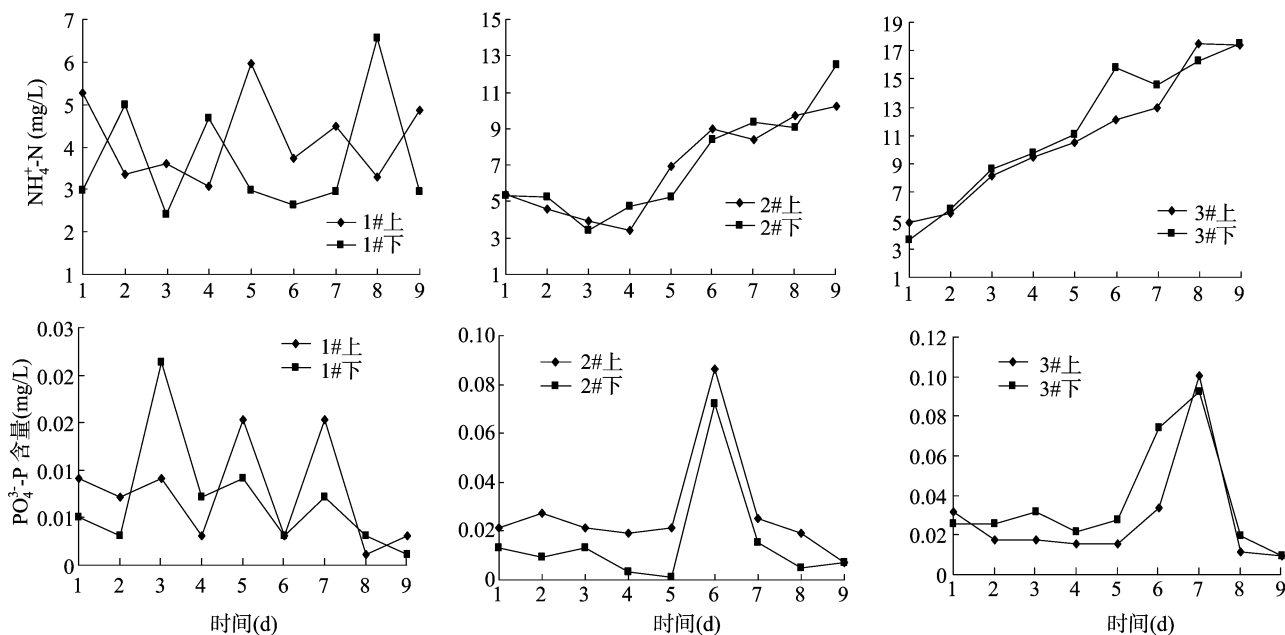


图2 上覆水中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 含量随时间的变化

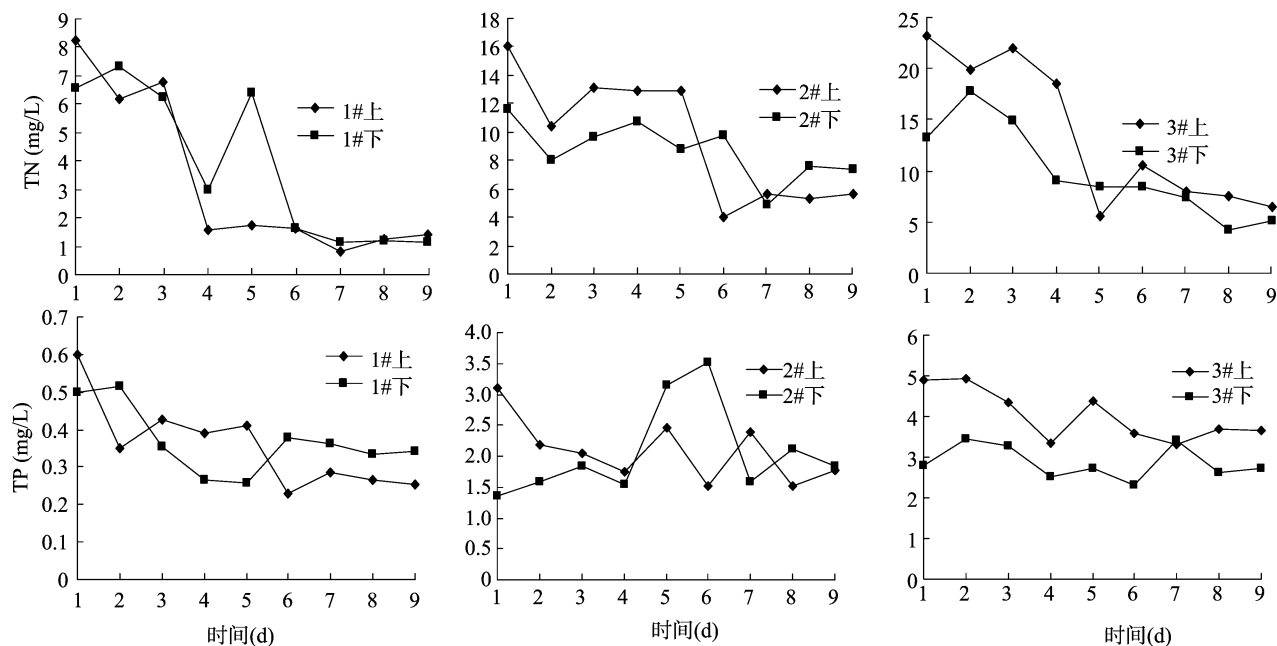


图3 上覆水总氮、总磷含量随时间的变化趋势

## 2.3 黑水团模拟试验中关键物质含量的变化

**2.3.1 水体中叶绿素含量的变化** 蓝藻细胞被认为是黑水团发生的主要诱导因素,其含量变化对黑水团发生起到至关重要的作用,而叶绿素含量的变化最能体现蓝藻细胞含量及浓度的变化。由图 4 可见,添加低藻量,上、下部水体中的叶绿素含量在初期较高,但随着试验进行,由于水样采集过程中取出较多的藻细胞,因而随时间的延长其浓度逐渐下降,试验结束时叶绿素含量仅为  $30.0 \text{ mg/m}^3$ ;添加中藻量,在试验 4 d 和 7 d 时,上部水体叶绿素浓度异常增加,这是由于取样是在扰动结束后进行,水体中的藻细胞向表层聚集,此时取得的蓝藻细胞较多;添加高藻量,由于初始添加藻的量比较多,上、下部水体中叶绿素含量都比较高,试验 2、3 d 时叶绿素含量较低,这是由于采样时间不同造成的含量差异,随试验过程中水体溶解氧含量的降低,水体从有氧向缺氧和厌氧状态转变,使藻细胞不能聚集在水体表面,逐渐散布在水体中,再加上动力扰动,使得藻细胞在水体中分布较为均匀,表现为上、下部水体中叶绿素含量均逐渐升高,试验末期,由于厌氧水体环境下,分散在水体中的藻细胞可能死亡分解,叶绿素含量下降。表层水体由于动力扰动过程的复氧作用,增加了表层水体的

溶解氧含量,能维持部分藻细胞的新陈代谢作用,从而使残留的藻细胞聚集在上部水体中,这导致虽然水体发黑、发臭,但水体表面仍然有许多藻细胞存活<sup>[22-23]</sup>。

**2.3.2 水体中  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  含量的变化**  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  是一种评价水体污染程度的常用综合性指标,可反映水体受还原性物质污染的程度, $\text{COD}_{\text{Mn}}$  越高,污染越严重,利用  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  以评价藻华堆积过程中水体有机质的变化较为可行。由图 5 可见, $\text{COD}_{\text{Mn}}$  变化呈现不规则波动,总体上表现为前期浓度较高,后期及末期呈逐渐下降趋势。试验前期,由于加入藻体细胞浓度较高,而藻细胞中含有大量的可降解有机质,因此在水体中表现为  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  含量较高;随时间延长,水体中含有一些还原物质,包括部分死亡的藻细胞,在动力扰动复氧情况下逐渐降解, $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度会有所降低。添加高藻量,由于加入的藻量较大,且水体呈现为厌氧状态,水体中还原性物质,包括死亡藻细胞残体的降解速率下降,后期  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度仍然较高,这也说明藻体大量聚集、死亡对水质的影响很大。试验末期,部分水柱出现  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  含量突然增高的情况,这是由于此时水体中藻细胞活性大大降低,在扰动结束后,其向表层水体聚集的能力大大降低,在采样过程中采集到了大量的藻细胞。

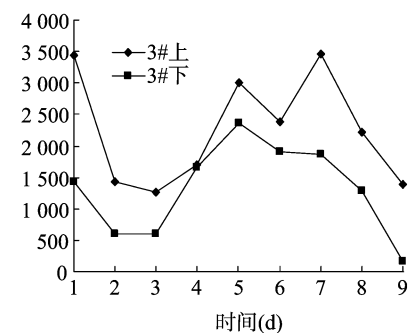
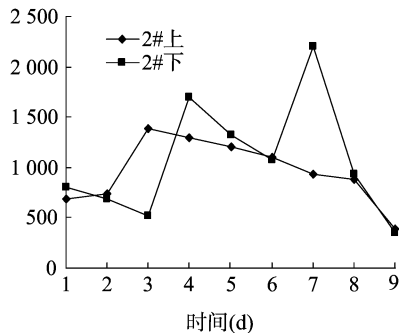
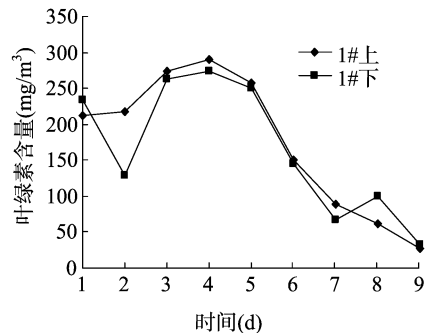


图4 上覆水叶绿素含量随时间的变化趋势

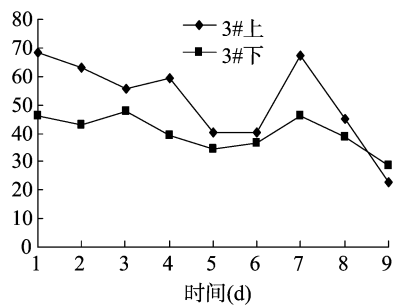
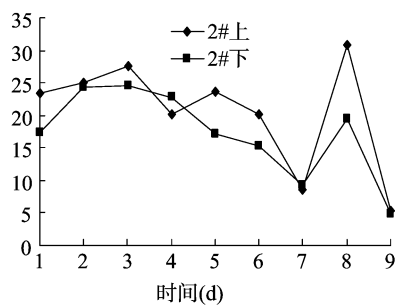
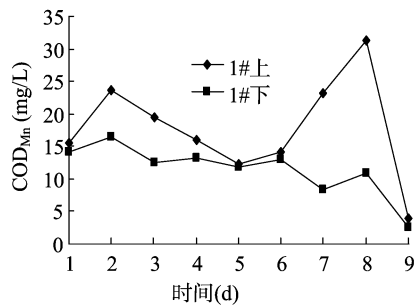
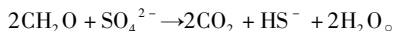


图5 上覆水 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 含量随时间的变化趋势

**2.3.3 沉积物中还原性无机硫化物 (AVS) 的变化** 酸挥发性硫化物 (AVS) 是各种无机硫的总称,包括非晶质  $\text{FeS}$ 、马基诺矿、硫复铁矿 ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ) 与沉积物间隙水中的  $\text{S}^{2-}$ 。沉积物中 AVS 易受到外界 Eh 的影响,特别是在厌氧环境中容易形成  $\text{H}_2\text{S}$  气体释放出来。黑水团区藻体大量聚集,水体易形成厌氧环境,藻华残体沉降,形成大量的有机质 (以  $\text{CH}_2\text{O}$  表示),与沉积物中的  $\text{SO}_4^{2-}$  会发生反应<sup>[24]</sup>:



大量的  $\text{SO}_4^{2-}$  还原产生大量的  $\text{HS}^-$ ,从而使表层沉积物及水体中  $\text{S}^{2-}$  含量增加。因此,大量藻体聚集沉降分解形成的厌

氧环境,为 AVS 形成  $\text{H}_2\text{S}$  提供了一个良好的外界环境。由图 6 可见,1#、3#柱表层沉积物中 AVS 含量分别为 0.06、14.95 mmol/kg,添加高藻量、形成黑水团区的表层沉积物中 AVS 含量明显要高于添加低藻量且没有形成黑水团区的表层沉积物;添加中藻量,其表层沉积物中 AVS 含量也较高,为 5.43 mmol/kg,这是由于其底部水体藻细胞形成缺氧区,使  $\text{H}_2\text{S}$  含量较大幅度增加;1 cm 向下的沉积物中 AVS 含量逐渐下降,且和非黑水团区呈现一致的变化趋势。另外,黑水团中形成的  $\text{H}_2\text{S}$  由于在扰动过程中会部分逸散到空气中,这从试验过程中能闻到极强烈的臭鸡蛋气味得以确证<sup>[25]</sup>。

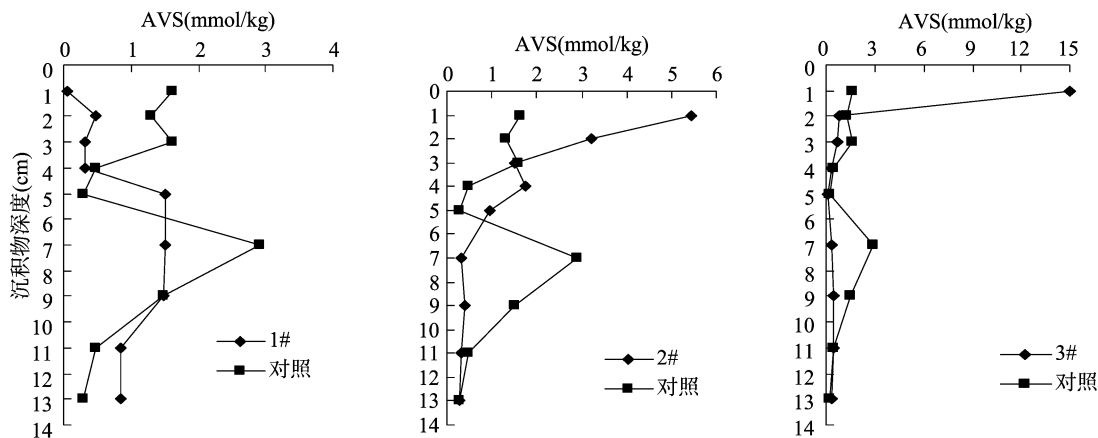


图6 沉积物中还原性无机硫化物含量的变化

### 3 结论

藻华细胞聚集会很快消耗掉水体中的溶解氧,即使有中等风浪扰动,也不足以消除这种厌氧状态,造成沉积物表层出现厌氧、强还原环境;高密度藻华细胞聚集下会引起水体中叶绿素、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  含量快速升高,藻细胞出现快速死亡,致使水体处于严重污染状态;藻华细胞高聚集易产生黑水团现象,藻华细胞快速死亡,释放大量的氮磷营养盐于上覆水体中,导致水体  $\text{TN}$ 、 $\text{TP}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  -  $\text{P}$ 、 $\text{NH}_4^+$  -  $\text{N}$  等营养盐浓度急剧增加,水体处于严重富营养化状态,表层沉积物中 AVS 含量急剧增加,导致水体产生质的变化。

### 参考文献:

- [1] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu lake[J]. Science, 2007, 317(5842): 1166.
- [2] 盛东,徐兆安,高怡. 太湖湖区“黑水团”成因及危害分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(3): 41-44, 52.
- [3] 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[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2009.
- [4] 许宽,刘波,王国祥,等. 苦草(*Vallisneria spiralis*)对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2642-2649.
- [5] 卢信,冯紫艳,商景阁,等. 不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSCs)产生机制研究[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3152-3159.
- [6] 王成林,张咏,张宁红,等. 太湖藻源性“湖泛”形成机制的气象因素分析[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 401-408.
- [7] 刘国锋,钟继承,何俊,等. 太湖竺山湾藻华黑水团区沉积物中 Fe、S、P 的含量及其形态变化[J]. 环境科学, 2009, 30(9): 2520-2526.
- [8] 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[J]. 环境科学, 2010, 31(12): 2917-2924.
- [9] Duan H T, Ma R H, Loisselle S A, et al. Optical characterization of black water blooms in eutrophic waters[J]. The Science of the Total Environment, 2014, 482-483: 174-183.
- [10] 沈爱春,徐兆安,吴东浩. 蓝藻大量堆积、死亡与黑水团形成的关系[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(3): 68-72.
- [11] 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试验[J]. 湖泊科学, 2005, 17(1): 61-68.
- [12] 孙小静,朱广伟,罗淑葱,等. 浅水湖泊沉积物磷释放的波浪水槽试验研究[J]. 中国科学:D 辑:地球科学, 2005, 35(增刊2): 81-89.
- [13] 李一平,逢勇,陈克森,等. 水动力作用下太湖底泥起动规律研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 770-774.
- [14] 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.
- [15] 逢勇,庄巍,韩涛,等. 风浪扰动下的太湖悬浮物实验与模拟[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2743-2748.
- [16] 国家环保总局. 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.
- [17] 陈宇炜,陈开宁,胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5): 550-552.
- [18] 吴生才,陈伟民,高光. 太湖冬季底泥中活体藻类的检测[J]. 湖泊科学, 2003, 15(4): 339-344.
- [19] 逢勇,丁玲,高光. 基于生态槽实验的藻类生长参数确定[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 78-82.
- [20] 刘丽贞,秦伯强,朱广伟,等. 太湖蓝藻死亡腐烂产物对狐尾藻和水质的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(10): 3154-3159.
- [21] 朱梦圆,朱广伟,王永平. 太湖蓝藻水华衰亡对沉积物氮、磷释放的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(2): 409-415.
- [22] 申秋实,邵世光,王兆德,等. 太湖月亮湾湖泛发生过程模拟及水土物化性质的响应[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 710-719.
- [23] 申秋实,周麒麟,邵世光,等. 太湖草源性“湖泛”水域沉积物营养盐释放估算[J]. 湖泊科学, 2014, 26(2): 177-184.
- [24] Burton E D, Bush R T, Sullivan L A. Reduced inorganic sulfur speciation in drain sediments from acid sulfate soil landscapes[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(3): 888-893.
- [25] Henry G, Spratt J, Morgan M D, et al. Sulfate reduction in peat from a New Jersey Pinelands cedar swamp[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1987, 53(7): 1406-1411.