

太湖底泥悬浮中营养盐释放的波浪水槽试验*

朱广伟¹, 秦伯强¹, 张路¹, 罗激葱¹, 孙小静¹, 洪大林², 高亚军², 谢瑞²

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 南京水利科学研究所, 南京 210024)

摘要:波浪水槽中研究了小波掀沙(波高 8.77 cm, 波周期 0.8 s)和大波掀沙(波高 12.31 cm 和 13.29 cm, 波周期 1.0 s)对太湖沉积物悬浮及 N、P 营养盐释放的作用规律。结果显示:小波掀沙时,底泥并未发生大量悬浮,SS 浓度最高时仅 13.6 mg/L;大波掀沙时,底泥大规模悬浮,SS 浓度最高达 245.2 mg/L。水体悬浮物、营养盐浓度变化滞后波高变化 1 h 以上。当波高改变 1 h 后,水体悬浮物、N、P 营养盐浓度才改变到相应的平衡浓度。除总磷浓度显著提高外,小波掀沙对水体 N、P 浓度的影响很小,大波掀沙则显著提高了水体总氮、总溶解氮、总磷、总溶解磷、氨氮(NH⁴⁺-N)、溶解性活性磷(SRP),其中 NH⁴⁺-N、SRP 最大增幅达 30% 和 20%。小波和大波掀沙过程中,水体溶解氧浓度均持续增加,掀沙 2 h 后增高 2 mg/L,溶解性有机碳持续下降,2h 后下降 33%–51%。试验结果表明,掀沙过程中水体充氧及颗粒物的絮凝、吸附作用可能是限制 NH⁴⁺-N、SRP 浓度增高的重要因素之一。

关键词:水动力;沉积物;再悬浮;营养盐;内源释放;波浪水槽;太湖

Wave Effects on Nutrient Release of Sediments from Lake Taihu by Flume Experiments

ZHU Guangwei¹, QIN Boqiang¹, ZHANG Lu¹, LUO Liancong¹, SUN Xiaojing¹, HONG Dalin², GAO Yajun² & XIE Rui²

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, P. R. China)

Abstract: The effect of wave disturbance on the nutrient release from lake sediments was simulated in flume experiments. The sediments were sampled from Lake Taihu, China, which is a large, shallow, eutrophic lake with a mean depth of 1.9 m and an area of 2447 km². The water flume was 30 m long, 0.5 m wide and 0.7 m deep. The sediments was 10 cm thick in the bottom of water flume in flume experiments. In a “little-wave” experiment, which means the wave height just a bit higher than the critical wave height for sediment resuspension, the depth of overlying water was 40 cm, the critical wave height for sediment resuspension was 8.45 cm, and the wave height for sediment resuspension experiments was 8.77 cm. In a “strong-wave” experiment, the depth of overlying water was 30 cm, the critical wave height for sediment resuspension was 5.93 cm, and the wave height for sediment resuspension experiments was 12.31 cm and 13.29 cm. In the “little-wave” experiments, contents of suspended solids (SS) was increased to 13.6 mg/L, while in strong-wave experiments, the SS content was increased to 245.2 mg/L. The equilibrium of the concentration of nutrients and SS in overlying water was lag more than 1h than the change of wave height. Strong wave disturbance significantly increased the concentrations of ammonia nitrogen and soluble reactive phosphorus in overlying water. In both the little-wave experiment and strong-wave experiment, concentrations of dissolved oxygen in overlying water was increased and concentrations of dissolved organic carbon in overlying water decreased. The study indicated that strong wave might caused significant increase of internal loading of nutrients. However, flocculation and adsorption of resuspended sediments and the oxygenate action accompany by the wave disturbance may district the increasing of reactive nutrients in overlying water.

Keywords: Hydrodynamics; sediments; resuspension; nutrients; internal loading; wave flume experiment; Lake Taihu

湖泊可以从绝对深度、相对深度、生态功能等多个角度区分为浅水湖泊和深水湖泊^[1]。一般而言,浅

* 中国科学院知识创新项目(KZCX1-SW-12)和中国科学院南京地理与湖泊研究所所长基金项目联合资助。2004-03-01 收稿;2004-05-05 收修改稿。朱广伟,男,1972年生,博士,助理研究员,E-mail:gwzhu@niglas.ac.cn.

水湖泊的水深小于 3 m, 具有不分层或者水体频繁混合的特征. 浅水湖泊的物理、化学及生物、生态特点与深水湖泊明显不同, 如温度分层特征、植被类型特征等等. 同样, 浅水湖泊沉积物的营养盐内源释放机制也与深水湖泊明显不同^[2], 水动力作用在浅水湖泊的营养盐内源释放中产生重要的作用^[3]. 浅水湖泊的底泥频繁受到大风浪的扰动而发生再悬浮^[4,5], 底泥的营养盐释放因此而呈现出暴发性释放的特点^[6,7].

关于水动力扰动对水体营养盐的“源”“汇”作用, 不同的室内模拟试验得出的结果之间往往不同, 既有“源”的证据^[5,8,9], 也有“汇”的发现^[8,10]. 本研究采用水动力研究中常用的波浪水槽, 研究水动力扰动下水体营养盐的浓度变化特征, 可以直观地反映出波浪水动力扰动对沉积物内源释放的影响, 为进一步认识浅水湖泊水动力作用对湖泊内源营养盐释放的影响提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验底泥和波浪水槽

本研究所用底泥于 2003 年 7 月采自太湖梅梁湾中部区域(120.17942°E, 31.47897°N), 采样点表层 2 cm 底泥的湿容重平均为 1.34 g/cm³, 有机质含量(以 LOI 表示)为 3.88%. 采样前 7 d 将采集底泥间隙水的 Peeper 管投放到采样点, 采样时取出 Peeper 管, 吸取每一层位(1 cm 为 1 层)的间隙水, 立即加酸固定后, 带回实验室测定间隙水中 NH₄⁺-N 和 SRP 浓度. 底泥运到实验室后, 铺设到水槽中备用. 波浪水槽长 30 m, 宽 0.5 m, 高 0.7 m, 玻璃观测段长约 20 m. 铺设底泥段长约 10 m, 底泥厚度 10 cm, 上覆水为与底泥平衡多日的自来水. 水槽一端装有推板式造波机, 可产生波高 3–22 cm 和周期 0.8–1.5 s 的波浪. 另一端设置 1:5 的消浪缓坡. 试验中波高和周期用 MTS 公司生产的电容式波高仪采集.

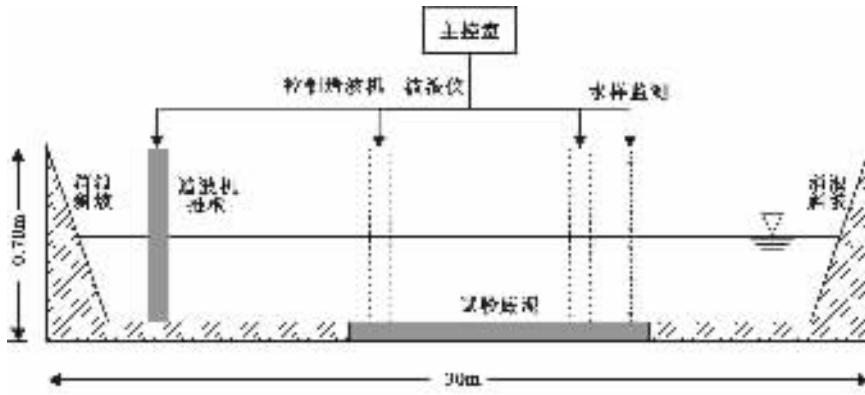


图 1 波浪水槽示意图

Fig. 1 Layout of wave flume

试验前先将底泥充分扰动悬浮, 然后静止使其自然沉降, 并每天两次监测表层 2 cm 的底泥容重, 当达到 1.32 g/cm³时(约需 1 d), 首先采集背景水样和泥样, 然后开始泥沙起动和掀沙试验. 柱状泥样的表层 4 cm 按 1 cm 进行分层, 离心获得间隙水, 测定间隙水中 NH₄⁺ 离子和 SRP 浓度. 用虹吸管获取上覆水的分层水样.

1.2 泥沙起动和掀沙试验

泥沙研究中, 泥沙起动的标准是泥沙普遍动, 即泥沙紧贴床面前后运动, 但还没有悬起. 本试验分小波掀沙和大波掀沙进行. 小波掀沙的主要目的是了解按照水利学的判断标准, 泥沙起动时水体悬浮物及营养盐增量, 并与大波掀沙的情况进行对比.

小波掀沙的试验条件为水深 40 cm, 波周期 0.8 s, 波高由 0 到 8.8 cm 分阶段提高(图 2a). 其中在底泥起动前 2.3 cm 波高时采一次样, 代表底泥不发生悬浮的小波情况. 波高 7.28 cm 底泥出现“少量动”, 波高为 8.45 cm 时底泥出现“普遍动”, 即底泥发生起动. 之后将波高提高到 8.77 cm, 观测泥沙的掀动情况和水体营养盐浓度变化情况. 大波掀沙的试验条件为水深 30 cm, 波周期 1.0 s, 波高由 0 到 13.3 cm 分阶

段提高(图2b)。其中波高为5.93 cm时泥沙起动。之后将波高直接提高为12.31 cm,观测掀沙情况。每隔20 min 取样一次,取样4次后,再次提高波高为13.29 cm,并每隔30 min 取样一次。

小波掀沙时,分3层采集水样,分别为底层(距泥面5 cm)、中层(距泥面15 cm)、表层(距泥面35 cm)。每次每层采3个平行样品。由于小波掀沙试验中,发现底泥的起动比预想的困难,表层和中层水体中的营养盐浓度差异性不大,所以大波掀沙期间水深改为30 cm,分2层采集水样:底层(距泥面5 cm)、表层(距泥面25 cm)。每次每层采三个平行样。

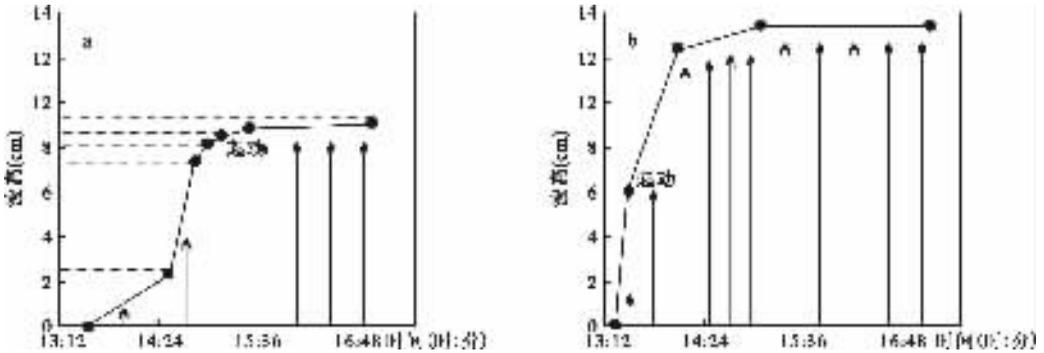


图2 小波(a)和大波(b)水槽试验中的波高变化及采样时间(箭头为采样时间点)

Fig. 2 Wave height and sampling site in the wave flume experiments

1.3 分析方法

总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)的测定分别为碱性过硫酸钾消解后210 nm比色法和钼锑抗分光光度法^[11]。氨氮(NH₄⁺-N)、溶解性活性磷(SRP)的测定为水样过0.45 μm GF/F滤膜后Skalar流动分析仪测定。溶解性有机碳(DOC)的测定为水样过GF/F滤膜后I/O 1020A型TOC仪测定。溶解氧(DO)浓度用YSI多参数水质分析仪现场测定。悬浮物(SS)为水样过GF/C滤膜时的残留固体物质(105°C烘干后的质量)。悬浮颗粒有机质用悬浮物530°C灼烧3h后的重量损失(LOI)表征。

2 结果与讨论

2.1 底泥间隙水及静态时水体NH₄⁺-N和SRP浓度

底泥在波浪扰动下悬浮时释放营养盐的先决条件是底泥间隙水中营养盐含量比上覆水高^[6]。本次野外采样及水槽中小波起动试验前(水槽中的水静置24 h)沉积物及水体中NH₄⁺-N和SRP浓度如图3。采样点自然水体中上覆水(4 cm内平均)NH₄⁺-N含量为1.33 mg/L, PO₄³⁻-P含量为0.055 mg/L, 间隙水(表层20 cm平均)中的NH₄⁺-N含量为2.99 mg/L, PO₄³⁻-P含量为0.686 mg/L。在小波掀沙试验前, 当底泥充分扰动, 并静置24 h后, 上覆水中NH₄⁺-N含量为0.042 mg/L, PO₄³⁻-P含量为0.010 mg/L(3层平均), 沉积物间隙水(4层平均)NH₄⁺-N含量为3.28 mg/L, PO₄³⁻-P含量为0.030 mg/L。无论是野外的情况和水槽的情况, 都反映出一个共同的现象: 沉积物间隙水中的NH₄⁺-N和SRP浓度显著高于上覆水体。这就给波浪扰动下底泥暴发性释放营养盐提高了物质条件。

2.2 波浪掀沙过程中水体SS和LOI浓度的变化

小波掀沙和大波掀沙试验前水体SS、LOI背景浓度均低于2.5 mg/L, 基本为有机物(图4)。波浪低于底泥临界波高时对水体SS及LOI的影响很小, 2.3 cm的小波时水体SS浓度为2.3 mg/L, 而背景浓度为1.6 mg/L。大于临界波高时则引起水体SS浓度显著增高。在波高保持在8.77 cm, 即高于临界波高0.32 cm时, SS浓度最后达到13.6 mg/L。大波掀沙试验中, SS及LOI浓度都大幅度增高, 最大水柱平均SS浓度达224 mg/L, 平均LOI浓度达15.4 mg/L。这一浓度与太湖多年常规水监测的最高浓度值比较接近^①, 但低于

① 中国科学院太湖湖泊生态系统研究站年报, 1991-2000。

大风浪期间的观测值(SS 浓度在 400 mg/L 以上)^[12].

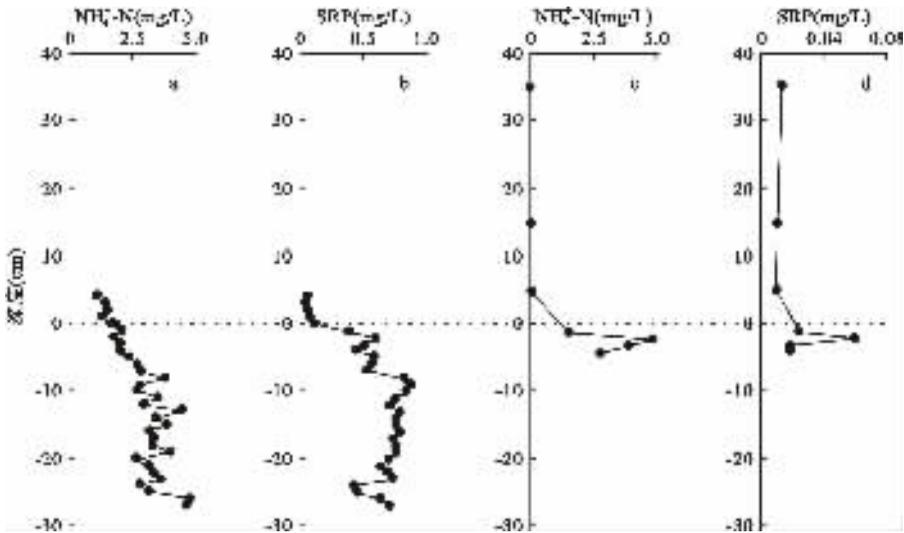


图3 采样点取样期间(a, b)及波浪水槽试验前(c, d)水体及底泥间隙水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 SRP 浓度
Fig. 3 Contents of ammonium and soluble reactive phosphorus in overlying water and interstitial water of sediments in sampling site and in wave flume after stable for 24 hours

从图 4 中还可以看出,波浪掀沙中 SS 浓度的平衡需要一定的时间. 在小波掀沙试验中, 3、4、5、6 次采样是在保持波高不变的情况下, 每隔 30 min 一次的采样, 而 SS 浓度随采样时间的延长不断增加. 在大波掀沙试验中, 3、4、5、6 次采样也是在保存波高不变下每隔 20 min 采一次样, SS 浓度同样是逐步增高. 从两次的结果看, 掀沙期间, 水体 SS 浓度达到相应的平衡浓度的时间需要 1h 以上. 据范成新等人的统计, 太湖频繁受到大风浪的扰动, 但大风过程的持续时间一般不长^[13]. 另外, 据对太湖湖泊生态系统研究站 2001 年 11 个月(11 月除外)逐时风速资料进行统计的结果表明^①: 被统计的 335 d 中, 以小时为单位, 出现平均风速 $>6.5 \text{ m/s}$ 的风浪过程共计 238 次, 其中持续时间 5 h 以上的次数为 32 次, 持续时间 1 h 左右的次数 139 次(表 1). 这说明太湖的实际中, 大部分的大风浪过程对底泥的悬浮未达到充分悬浮. 在考虑太湖风浪过程的水动力效应, 如底泥侵蚀引起的内源释放问题, 以及波浪作用引起的输沙和航道回淤作用, 必须予以考虑.

表 1 2001 年(11 月除外)太湖小时风速超过 6.5 m/s 的大风过程次数及其持续时间频次

Ta. 1 Times and frequency of wind-wave courses in Lake Taihu which the wind-speed over 6.5 m/s in 2001

持续时间	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	19
频次	139	36	16	14	6	5	5	4	1	3	1	2	1	2	2	1
百分比(%)	58.4	15.1	6.7	5.9	2.5	2.1	2.1	1.7	0.4	1.3	0.4	0.8	0.4	0.8	0.8	0.4

从 SS 及 LOI 的层间差异看, 大波掀沙过程中底层悬浮物浓度明显高于上层水体(图 4). 需要说明的是, 本研究中的底层是指水土界面之上 5 cm. 根据周益人等的研究结果, 水土界面上 5 cm 内还存在很陡的悬浮物浓度梯度, 接近水土界面处的 SS 浓度比 5 cm 处的浓度高几倍甚至几十倍^[14].

2.3 TN、DTN 及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

小波掀沙对水体氮浓度的影响很小(图 5a、c、e). 尽管 TN、DTN 及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度发生了一定的波动,

① 中国科学院太湖湖泊生态系统研究站年报, 2001.

但浓度变化并不显著. 大波掀沙过程中 TN 浓度的变化与 SS 的变化曲线一致, 随着水体 SS 浓度的增高, TN 浓度相应增高, 而当水体 SS 浓度保持不变时, TN 的浓度也趋于稳定(图 5b). 这说明 TN 浓度主要受掀沙量的控制, 且平衡时间较快.

水体 DTN 的浓度与 TN 浓度并不一致(图 5d). 在掀沙过程的初期, DTN 浓度就达到最大, 以后并没有随掀沙的继续而增高. 但是大波掀沙过程中表层和底层 DTN 浓度差迅速缩小, 趋于一致, 说明大波掀沙过程中水体溶解性盐类浓度比较均一.

大波掀沙中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度总体上是增加的(图 5f). 在掀沙的初期增加比较明显, 后期则不明显甚至下降. 尤其是底层 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在大波掀沙的初期就达到最大, 而后反而显著下降. 说明在大波掀沙过程中同样存在着水体复氧过程对水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度影响的现象.

水体 TN 的大部分是以溶解态形式存在的, 如小波试验中 DTN 约相当于 TN 的 30% - 50%. 而大波试验中更是占到 70% - 80%. 说明底泥悬浮过程中释放的氮也主要是以溶解性氮的形式存在. 这可能是掀沙过程中氮的浓度迅速达到平衡并保持不变的原因.

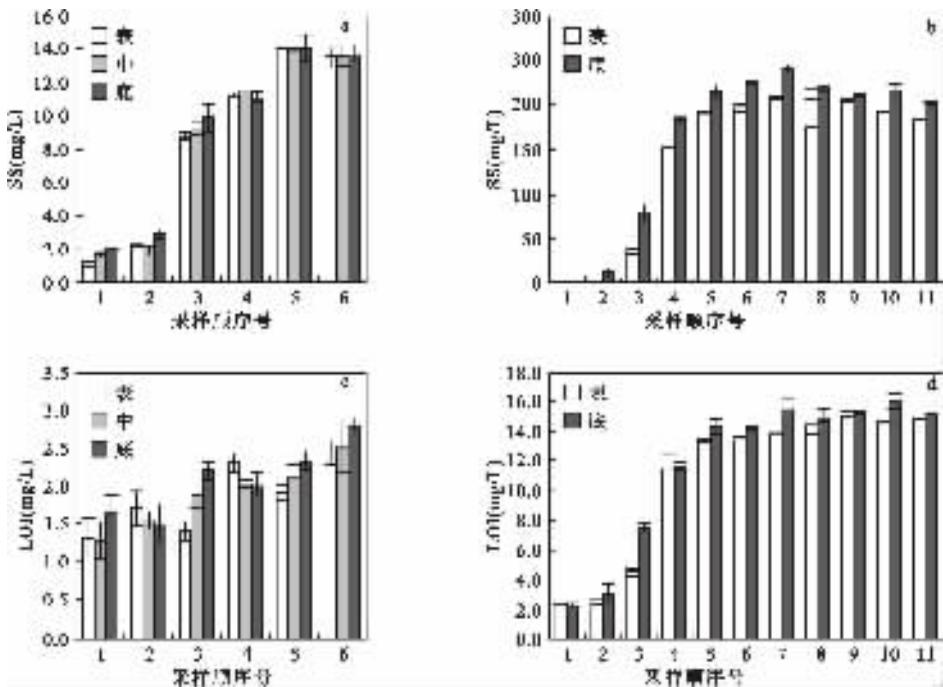


图4 小波(a, c)和大波(b, d)掀沙期间水体 SS 及 LOI 浓度变化

Fig. 4 Contents of SS and organic matter (LOI) in overlying water during weak- and strong-wave experiments

2.4 TP、DTP 及 SRP

受悬浮颗粒物浓度增加的影响, 小波掀沙试验中 TP 浓度相应增高. 但 SRP 及 DTP 的浓度变化不明显(图 6a, c, e). 大波掀沙中 TP 浓度显著增高, 变化趋势与 SS、TN 一致, DTP 的增高显得滞后, 且变化剧烈, 但总体趋势仍是呈上升趋势. SRP 浓度则总体呈上升趋势, 浓度也显著增高, 但在掀沙开始后基本保持不变了. SRP 的浓度变化曲线波动较大, 总体上掀沙引起 SRP 浓度的增幅大约为 20%. 底层水体的 SRP 开始阶段显著增高, 但后期又下降到掀沙前的水平. 波浪掀沙过程中引起 SRP 浓度下降的原因可能有如下 2 点: 1) 掀沙作用增加了水体颗粒物质的数量, 加剧了水体颗粒物质的运动和颗粒与颗粒、颗粒与离子间的碰撞, 增大了水体无机和有机胶体颗粒对溶解性盐类的吸附作用; 2) 掀沙作用增加了水体氧含量, 使得沉积物悬浮带入水体的还原性 Fe、Mn 等离子转换具有较强离子吸附能力的氧化铁、氧化锰, 而后者极易

吸附水体溶解性的磷酸根离子。

图6表明,底泥悬浮前,水体中的磷主要以溶解态存在,而掀沙后,水体磷主要以颗粒态磷为主要存在形式.如大波扰动前,水体DTP浓度为TP浓度的74%,泥沙起动时为60%,而掀沙过程中基本稳定在20%.DTP中的磷主要是SRP.如在大波掀沙试验前,SRP占DTP的98%,整个掀沙过程中,SRP基本占到DTP的80%.从TP的浓度看,底层浓度基本略高于表层,但差别不大.而DTP和SRP总体上两层间的差别不大.小波掀沙的试验结果也反映了这一点.

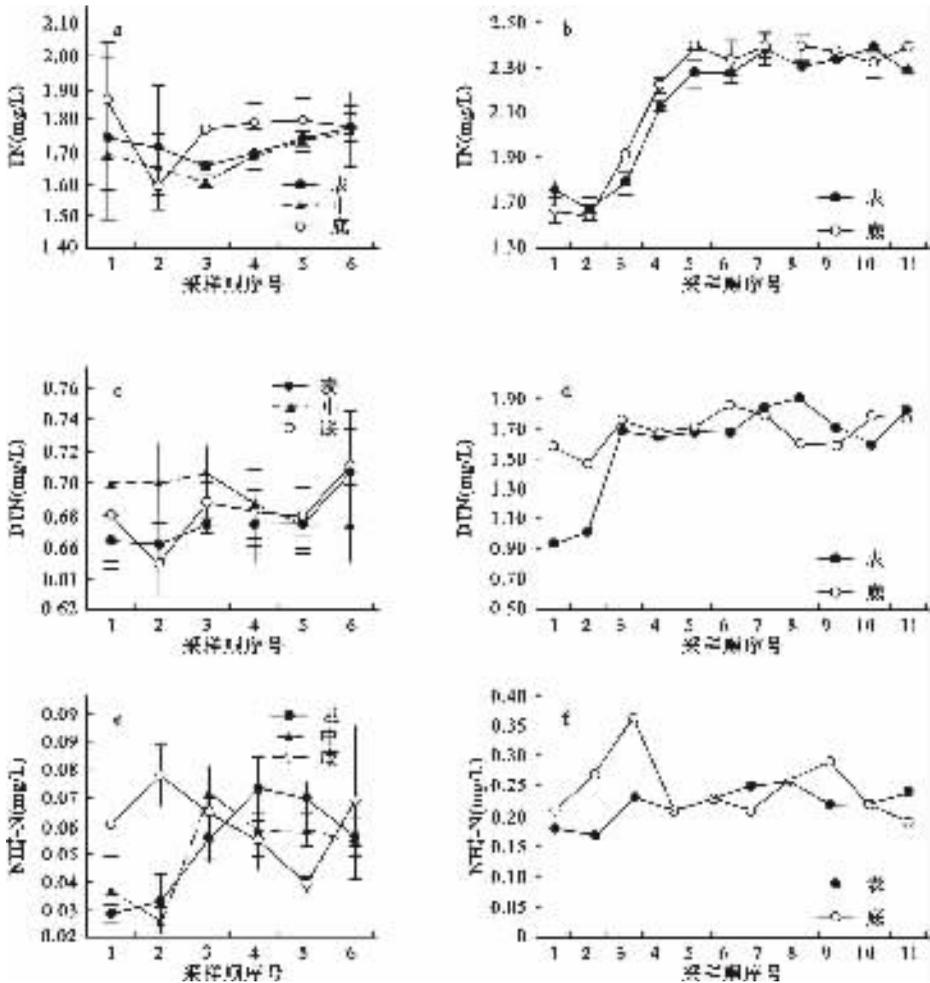


图5 小波(a, c, e)和大波(b, d, f)掀沙期间水体TN、DTN及 NH_4^+ -N浓度变化

Fig.5 Contents of TN, DTN, and NH_4^+ -N in overlying water during weak- and strong-wave experiments.

2.5 DO及DOC

无论是小波掀沙还是大波掀沙试验中,DO及DOC的变化趋势都是相同的.即水体DO浓度随着波浪的扰动而不断增高,而水体DOC浓度却逐步下降(图7).无论是小波掀沙还是大波掀沙试验,2h作用的掀沙后水体DO浓度都增大了约2mg/L.小波掀沙2h后DOC浓度下降约33%,而大波掀沙2h后DOC浓度下降大约52%.DO浓度的不断增高说明波浪扰动过程中水体的复氧强烈,DO浓度可以增高2mg/L.而DOC浓度的下降似乎不合情理.由于沉积物间隙水中一般也含有较多的DOC,沉积物悬浮过程中应当

增加水体 DOC 浓度。推测 DOC 浓度下降的原因可能是由于大量无机和有机悬浮颗粒物悬浮并不断剧烈运动和水体不断复氧的情况下,增大了颗粒物的絮凝和吸附作用甚至改变了水体无机和有机胶体的性质,从而对 DOC 物质的吸附能力增加所致。

显然波浪扰动过程中的 DO 增高不利于 NH_4^+-N 及 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 等营养盐的存在,而 DOC 浓度的下降也不利于二者以溶解性有机态存在。这可能正是波浪长时间掀沙后二者浓度增加不明显甚至下降的原因之一。

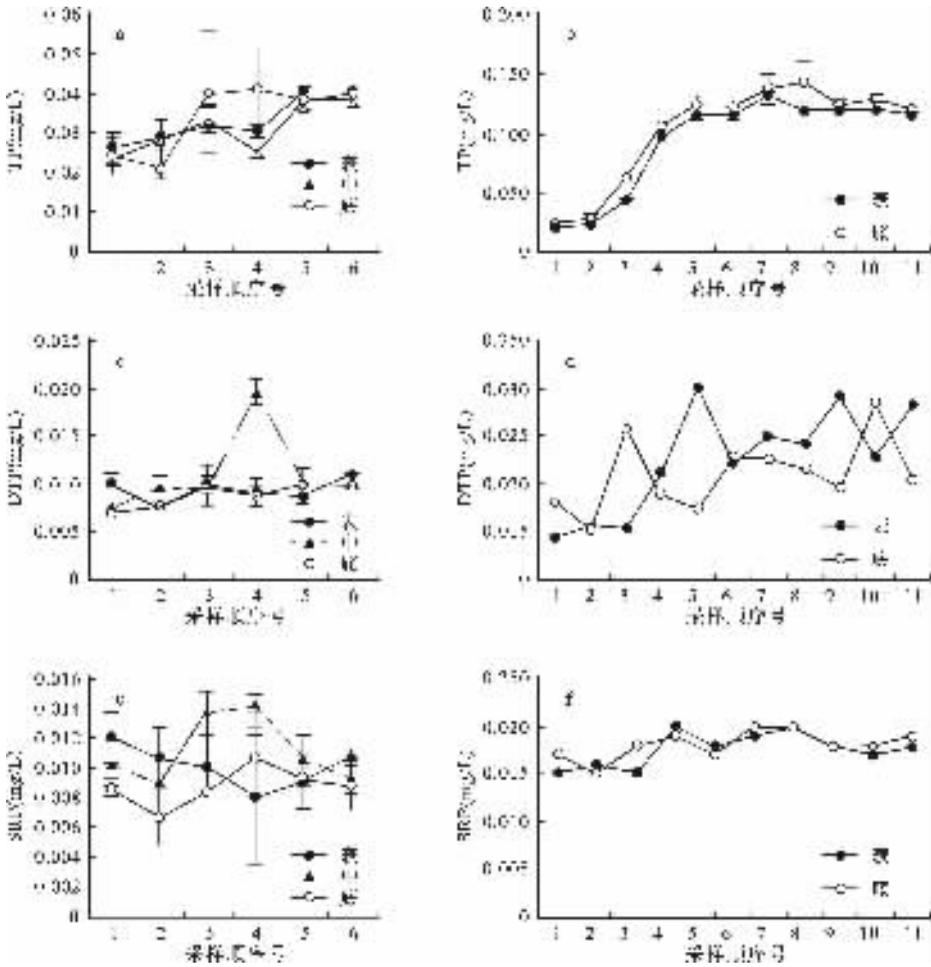


图6 小波(a, c, e)和大波(b, d, f)掀沙期间水体TP(●)、DTP(▲)及SRP(○)浓度变化
Fig. 6 Contents of TP, DTP, and SRP in overlying water during weak- and strong-wave experiments

3 结语

通过室内波浪水槽掀沙试验,在试验条件下有如下结论:

- (1) 当波浪扰动强度大于表层底泥起动的临界波高时,能显著改变水体磷、氨氮、溶解氧、溶解性有机碳浓度,大波的影响强度显著大于小波;
- (2) 波浪产生后悬浮物浓度达到相应的平衡浓度需要1 h以上的时间(本研究中约100 min),TN、TP浓度达到平衡浓度也需要一定的时间;
- (3) 波浪掀沙引起水体充氧作用增强,水体溶解氧浓度不断增高。掀沙也引起水体溶解性有机碳的浓度下降;

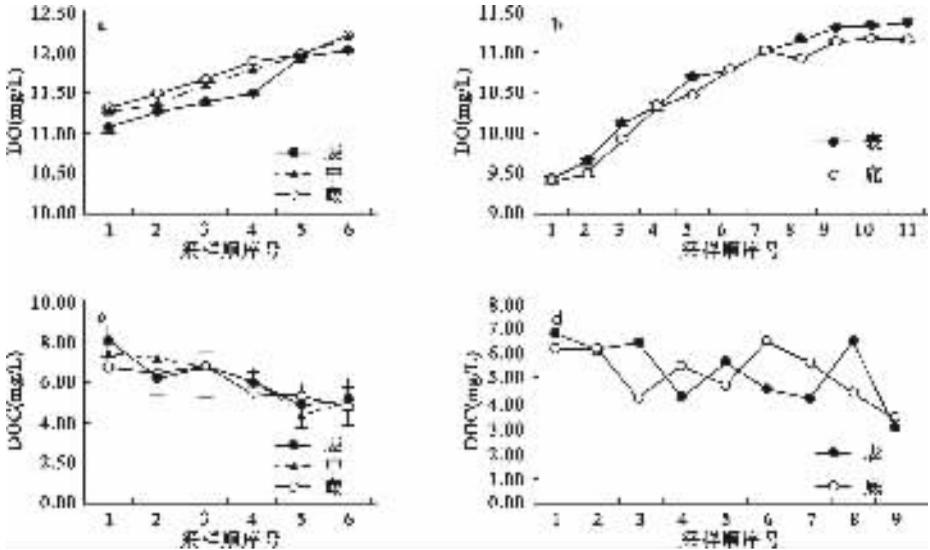


图7 小波(a, c)和大波(b, d)掀沙期间水体DO及DOC浓度变化

Fig. 7 Contents of DO and DOC in overlying water during weak- and strong-wave experiments

(4) 大波掀沙作用初期引起水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 SRP 浓度显著变化, 小波掀沙对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 SRP 浓度的影响不显著.

致谢 季江高级工程师、胡春华副研究员协助野外采集样品工作, 曹焕生博士研究生协助进行水体 DO 等水质现场监测工作, 钱荣树实验师进行了全部水样的分析工作, 特此致谢.

4 参考文献

- [1] Padish K J, Reynolds C S. Shallow lakes: the absolute, the relative, the functional and the pragmatic. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**: 1-11.
- [2] Nixdorf B, Deneke R. Why very shallow lakes are more successful opposing reduced nutrient loads. *Hydrobiologia*, 1997, **342/343**: 269-284.
- [3] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**: 135-145.
- [4] Hawley N & Lesht B M. Sediment resuspension in Lake St. Clair. *Limnol Oceanogr*, 1992, **37**(8): 1720-1737
- [5] Søndergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arreso, Denmark. *Hydrobiologia*, 1992, **228**: 91-99.
- [6] Qin Boqiang, Hu Weiping, Gao Guang, 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.
- [7] 秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨. *中国环境科学*, 2002, **22**(2): 150-153.
- [8] 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**(1): 35-42.
- [9] 李一平, 逢勇, 田娜等. 水动力条件下底泥营养盐释放率的量化研究. *湖泊科学*, 2004, **16**(4): 318-324.
- [10] 朱广伟, 陈英旭, 周根娣等. 运河(杭州段)沉积物磷释放的模拟试验. *湖泊科学*, 2002, **14**(4): 343-349.
- [11] 金相灿, 屠清瑛 编著. 湖泊富营养化调查规范, 第二版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [12] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 强弱风浪扰动下太湖的营养盐垂向分布特征. *水科学进展*, 2004, **15**(6): 775-780.
- [13] 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)*, 2003, **33**(8): 760-768.
- [14] 周益人, 肖惠兴, 潘军宁等. 波浪作用下太湖底泥试验及航道回淤分析. *湖泊科学*, 2003, **15**(4): 305-312.