

太湖沉积物再悬浮对水体中磷形态和浓度时空差异性影响

张洪梅^{1,2}, 刘鑫², 邓建才^{2*}, 沈爱春³, 陈方³, 徐彬³, 陈效民¹

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 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, 南京 210008; 3. 太湖流域管理局水文水资源监测局, 江苏 无锡 214024)

摘要:太湖作为重要的饮用水水源地,因风浪导致其沉积物中磷释放而对水质产生了显著的影响。采用Y型再悬浮发生装置模拟金墅水源地沉积物的再悬浮和沉降过程的结果表明:在 $5.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速作用下,上覆水体中总磷(TP)和磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)浓度存在明显的空间异质性,TP与悬浮物浓度呈正相关;水体TP距离沉积物-水界面越近其浓度越高,而 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在垂向分布上差异不显著;与 $3.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速作用相比, $8.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速能引起更高的TP释放量。这为科学制订抑制沉积物磷释放措施提供了理论依据。

关键词:磷;再悬浮;水源地;太湖;沉积物

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)11-2251-07 doi:10.11654/jaes.2013.11.021

Tempo-spatial Discrepancies in Phosphorus Species and Concentrations in Lake Taihu Water Influenced by Sediment Resuspension from Wind

ZHANG Hong-mei^{1,2}, LIU Xin², DENG Jian-cai^{2*}, SHEN Ai-chun³, CHEN Fang³, XU Bin³, CHEN Xiao-min¹

(1.College of Resource and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3.Hydrology and Resources Survey Bureau, Taihu Basin Authority, Wuxi 214024, China)

Abstract: Lake Taihu is an important source of local drinking water. Release of phosphorus from the sediments has a significant impact on water quality. A Y-shape apparatus was adopted to examine the effects of resuspension-sedimentation process on phosphorus release from the sediments in Jinshu water source in Lake Taihu. Under the wind speed of $5.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, obvious spatial heterogeneity of total phosphorus (TP) and orthophosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) was observed in the overlying water, and TP concentration was positively correlated with suspended solids concentration (SS). The vertical distribution of TP in water showed higher concentrations at closer to water-sediment interface, whereas no obvious vertical difference was observed in $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$. More TP was released under wind speed of $8.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. These results suggested that reducing wind speed and dissipating wave might improve water quality in Lake Taihu.

Keywords: phosphorus; resuspension; water source site; Lake Taihu; sediment

太湖流域是我国人口最集中、经济最发达、城镇化程度最高的地区之一,太湖水域面积为 $2\,338.1\text{ km}^2$,平均水深 1.89 m ,是我国第三大淡水湖泊。太湖承担着上海、无锡、苏州、湖州等市的城乡供水,太湖

水质尤其是水源地水质在一定程度上影响着流域内的供水安全。

磷是湖泊水体富营养化的主要限制性因子^[1-2],沉积物是其主要的蓄积库。在风浪作用下,沉积物发生再悬浮,随之大量的磷释放到上覆水体中。研究表明, $8.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速可使太湖水体的TP浓度增加17倍^[3]。沉积物再悬浮引起的磷释放是一个持续过程,受到诸多因素(如温度^[4],水动力^[5],沉水植物^[6],Fe、Al元素^[7-9]等)的影响。目前,有关太湖草型湖区和河口区域沉积

收稿日期:2013-03-22

基金项目:国家自然科学基金项目(41271213);水利部公益性行业专项经费(201001029)

作者简介:张洪梅(1987—),女,硕士研究生,主要从事湖泊污染物环境化学行为研究。E-mail:469733873@qq.com

*通信作者:邓建才 E-mail:jcdeng@niglas.ac.cn

物中磷的释放特征已有研究^[10],但对受人为活动、水动力频繁影响的水源地沉积物中磷释放的行为研究还鲜有报道。本文以金墅水源地保护区沉积物为研究对象,采用Y型再悬浮发生装置,室内模拟特定风速条件下水源地沉积物中磷的释放与沉降过程,阐明水源地保护区沉积物中磷的释放特征,为水源地水质保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 水源地保护区概况

贡湖位于太湖东北部,是无锡、苏州重要的水源地,主要有贡湖、锡东、金墅和上山村等水源地。金墅水源地取水口两侧分布着金墅港、龙塘港、田鸡港以及望虞河等河口,其中金墅港、龙塘港和田鸡港临近取水口,望虞河为引江济太的重要通道,大贡山水域为大太湖水体向取水口输水的必经之路。

1.2 样品采集

采样点位置分布见图1。于2009年12月,采用全球卫星定位系统,分别在望虞河、田鸡港、金墅港、金墅水源地取水口、大贡山、龙塘港,使用柱状采样器(Rigo Co. Ø110×500 mm)采样,每个样点采集3根柱状样,共计18根。同时在各采样点用25 L聚乙烯桶采集水样作为实验上覆水,沉积物柱状样与上覆水均当天运回实验室,低温保存。

1.3 实验装置与方法

采用Y型旋浆式沉积物再悬浮发生装置^[11],在室内模拟风浪作用下沉积物的再悬浮-沉降过程。参数设置与详细介绍见文献[12]。依据对太湖多年风速数据统计结果,选用 $1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为背景风速, $1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速作用于水面仅能产生微小的波动,对沉积物再悬浮的贡献等同于静风^[11-12]。 3.2 、 5.1 、 $8.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 分别代

表小风、中风和大风3种典型风速,基本反映了太湖风速变化特征。

由于金墅水源地平均水深为1.6 m,因此确定实验模拟上覆水深度为1.6 m,模拟时间长度为12 h,其中,0~1 h为启动风速,1~4 h为典型风速,4~5 h为消减风速(小风以背景风、中风以小风、大风以中风为启动风速,启动风速与消减风速值相等),每组设置3次平行。采样时间点分别设置在第0.5、1、2、3、4、5、6、8、10、12 h。每次采样完毕后补充同体积同水域的湖水,维持上覆水深度,同时修正因补充水所产生的浓度误差。

1.4 样品分析方法

采集的水样用 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维膜抽滤, 105°C 烘至恒重,并计算悬浮物重量(SS)。正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)和总磷(TP)的测定方法参照《湖泊富营养化调查规范》^[13]。

2 计算

2.1 单位面积水柱物质总量计算

水柱垂直方向设置5个采样口,距沉积物-水界面的高度分别为10、25、50、100、155 cm,对应水层厚度分别为0.175、0.200、0.375、0.525、0.325 m,共计1.6 m。根据不同水层的SS浓度,计算出单位面积水柱SS总量,计算公式如下:

$$T = \sum_{i=1}^5 C_i h_i \quad (1)$$

式中: T 为单位面积水柱SS总量,简称SS总量, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; C_i 为第 i 水层SS浓度, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; h_i 为第 i 水层厚度,m。

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和TP的单位面积物质总量的计算公式同式(1)。

2.2 单位面积水柱物质增量计算

单位面积水柱SS增量按照式(2)计算:

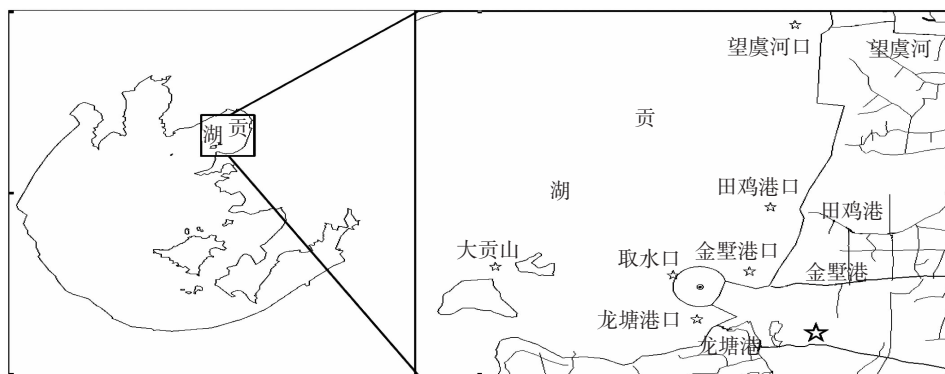


图1 采样点位置

Figure 1 The position of sampling sites

$$F_t = T_t - T_0 \quad (2)$$

式中: F_t 为历经 t h 后单位面积水柱 SS 增量, 简称 SS 增量, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; T_t 为某风速过程历经 t h 后的 SS 总量, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; T_0 为某风速过程 SS 总量的初始值, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 增量按照(2)式进行。

3 结果与讨论

3.1 再悬浮-沉降过程中磷行为空间变化

沉积物再悬浮的临界风速为 $5 \sim 6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 当风速大于临界风速时, 沉积物发生大规模再悬浮^[14]。在小风($3.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、中风($5.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、大风($8.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 3 种典型风速中, 中风和大风条件下沉积物可以发生大规模再悬浮, 但由于大风出现频率较低, 且起风、落风过程相对复杂, 只选择中风作为模拟风速, 同步模拟不同采样点沉积物的再悬浮-沉降过程, 研究河口及取水口上覆水磷的行为特征。

3.1.1 SS 空间特征及与磷的关系

在 $5.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的中风过程中, 5 个采样点 SS 总量出现了不同程度的增加; 在沉降过程(7 h)中, 随着水动力的消失, 不同采样点 SS 总量均呈现下降趋势。望虞河 SS 总量初始值最大, 这是由于引江济太水流较大, 剧烈的水动力扰动破坏了沉积物表面结构, 使得上覆水 SS 初始总量较高, 因此在沉降过程后期, 水体 SS 总量明显低于初始值。田鸡港、大贡山和龙塘港 SS 总量与初始值持平, 表明该区域内 SS 在风浪过后 7 h 内能完全沉降, 使上覆水恢复原透明度。金墅港 SS 总量显著高于初始值水平, 因为金墅港沉积物腐殖质较多, 其中有机颗粒物含量高, 而有机颗粒物的沉降速率最慢^[15], 7 h 沉降不足以使其沉降完全, 所以风浪过后较多的颗粒物还悬浮在上覆水中。从图 2 可以看出, 在整个中风过程中, 水源地 5 个采样点内 SS 总量

变化曲线基本呈现“n”型。在沉降过程中, 5 个采样点 SS 总量基本呈现随时间的增加而减少的趋势, 但不同采样点 SS 增量和沉降量表现出一定的差异性, 其中金墅港 SS 增量和沉降量均为最大。

沉积物再悬浮不仅使上覆水体中悬浮物浓度增加, 也使上覆水中磷含量发生变化。从图 3 可以看出: 上覆水体 TP 总量随着 SS 总量的增大而增大, 且相关性良好, 其中: 金墅港 TP 与 SS 相关性最大, 相关系数 $r=0.91$; 田鸡港 TP 与 SS 相关性最小, 相关系数 $r=0.59$ 。综合 5 个河口数据分析, 沉积物 TP 与 SS 相关系数为 0.89。但 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在整个再悬浮过程与 SS 总量无显著相关性, 表明沉积物中蓄积磷主要以非活性态存在, 尽管在水动力作用下, 水体中总磷浓度增加, 但非活性态磷向生物可利用态磷($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)转化受到局部水环境条件的影响。

3.1.2 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 的空间特征

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在空间上表现出较大的差异性, 且每一采样点的变化规律不一致(图 4)。在 $5.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速过程中, 大贡山、田鸡港的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量出现下降, 与秦伯强等研究结果一致^[5]; 望虞河、金墅港水体 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 增幅较明显, 最大增量均为 $0.008 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这是由于各采样点底泥颗粒组分导致了水体 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 增量的变化。在沉降过程中, 龙塘港、望虞河与田鸡港的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量均呈现出不同程度的下降, 其中田鸡港最终 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量接近于零; 金墅港、大贡山 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量波动较大, 均呈增加趋势, 且沉降过程后期 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度远高于初始值。这表明 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量在沉降过程中并不是稳定降低的, 也有可能升高, 一方面水动力扰动消失有利于吸附在颗粒物或胶体表面的磷酸根离子解析到水体中, 另一方面取决于沉积物中磷本底浓度、沉积物颗粒组成、金属离子种类及浓度^[17, 9]。

龙塘港、望虞河、田鸡港、金墅港以及大贡山水体中 TP 总量均呈上升趋势(图 5)。金墅港上覆水中 TP 增量最大, 约为其他采样点 TP 增量的 10 倍。在沉降过程中, 各样点上覆水中 TP 总量逐渐下降, 其中龙塘港和望虞河水体中最终 TP 总量低于风浪作用前水平, 原因是该样点上覆水 TP 初始值就较高, 最后经过 7 h 沉降 TP 总量会低于初始值。在无风浪状态下, 金墅港 TP 总量并不比其他采样点浓度高, 但在风浪的作用下, 大量沉积物悬浮到上覆水体, 造成上覆水中 TP 总量爆发性增长, 在沉降过程中, 特别是沉降前 3 h 内, TP 总量迅速降低, 基本恢复到(甚至低于)初始浓度值。

由图 4 和图 5 可知, 风浪作用对于磷的释放具有

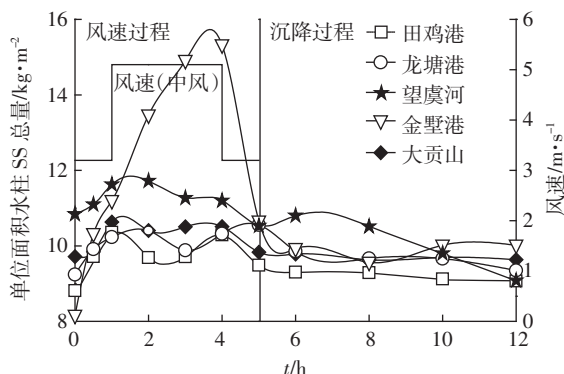


图 2 中风条件下 SS 总量变化过程

Figure 2 The variation process of TSS on moderate wind

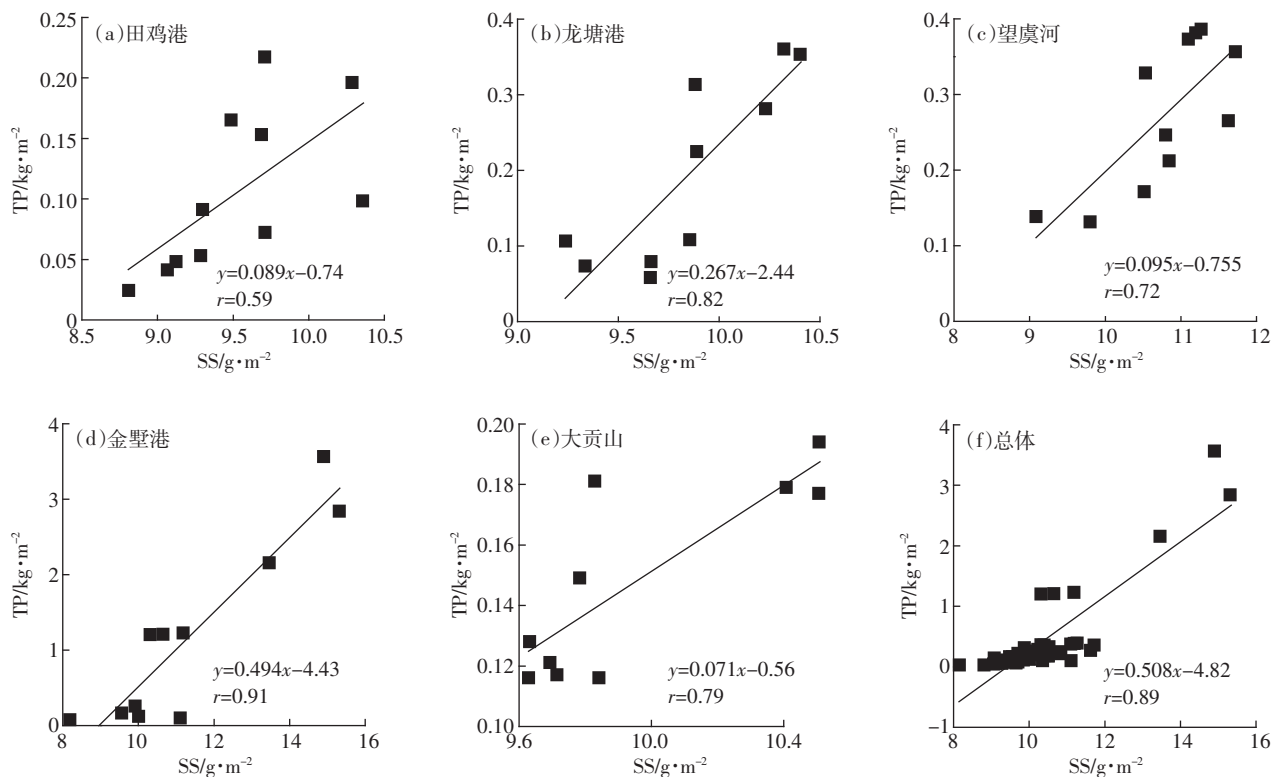
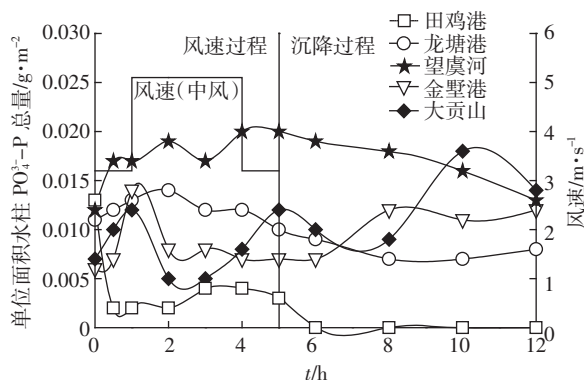


图3 上覆水体中 TP 总量与 SS 总量之间的关系

Figure 3 Relationship between C_{TP} and C_{SS} in overlying water图4 中风条件下 PO_4^{3-} -P 总量变化过程Figure 4 The variation process of C_P on moderate wind

促进作用,但是由于不同水域沉积物理化性质的不同,在沉降过程中上覆水体磷含量的降低也表现一定的差异性。金墅港和望虞河沉积物的磷释放应引起重视,尤其是金墅港,居民的生活污水就近排入港,水生植物茂盛,腐烂后形成腐殖质沉入湖底,极大地增加了沉积物的磷蓄积量,稍有风浪便会引起上覆水体磷的爆发性增长,且金墅港距离金墅水源地取水口较近,在风浪以及湖流的作用下,对水源地水质影响较大。望虞河作为引江济太的重要通道之一,其沉积物

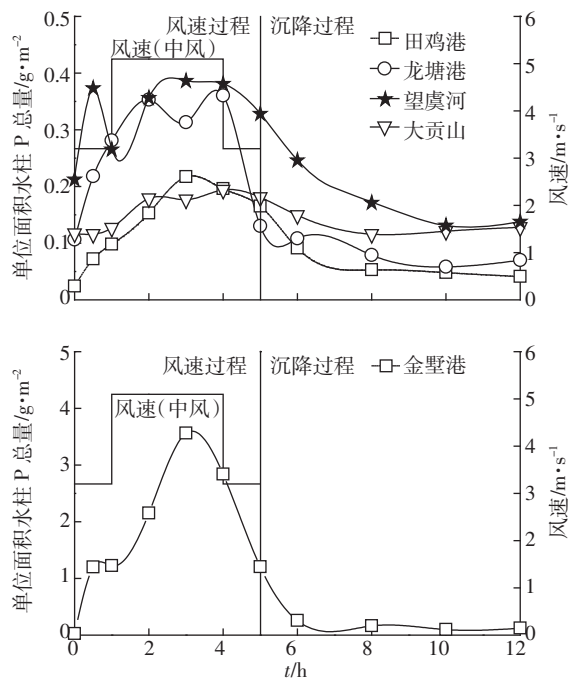


图5 中风条件下 TP 总量变化过程

Figure 5 The variation process of C_{TP} on moderate wind

中磷的释放可能与望虞河沿线支流携带较高磷含量的化合物入湖有关,在望虞河较大水流冲击下,沉积

物中磷的释放必然会快速扩散至贡湖,进而对金墅水源地乃至整个贡湖水体的营养盐负荷产生不容忽视的作用。大贡山虽距离金墅水源地相对较远,但作为大太湖与贡湖水交换的过渡区域,在持续风浪作用下,沉积物磷释放一定程度上增加了水源地的磷负荷。

3.2 磷垂向分布特征

图 6 给出了 $5.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速过程的第 4 h 上覆水各水层磷的垂向分布特征曲线。由于水动力作用的复杂性,上覆水体中的悬浮颗粒物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸附与解析过程同时进行着, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量变化在垂向分布上没有明显的规律性。由于距离沉积物-水界面越近的水层悬浮物浓度越大,其 TP 含量也较大,TP 在垂向上分布规律显著,即距离沉积物-水界面越近的水层,TP 浓度越高,且各采样点表现较一致。金墅港 TP 浓度较大,这与沉积物中较多的腐殖质有关。上覆水中 TP 与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 并没有显著的相关性。

3.3 风速对磷释放量的影响

风速越大,水动力对沉积物-水界面的扰动越剧烈,其沉积物再悬浮通量越大^[16]。为了探究大风($8.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和小风($3.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)条件下,强弱风速对水源地沉积物磷释放的影响,选择以金墅水源地取水口沉积物为研究对象,在 Y 型再悬浮发生装置内分别同步进行小风和大风过程的模拟实验。

由图 7 可知,小风作用使得 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量出现明显增大;而在大风的作用下,由于上覆水中较多的颗粒物配合较强的水动力作用,对可溶性磷吸附作用明显^[17],有助于磷由上覆水向底泥的沉积和迁移^[18],使得 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量大幅度降低。但无风浪作用时, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量又会逐渐上升,甚至超过初始值。由此可见,虽然大风浪的作用可以暂时减少水体中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$,但是风浪过后,被吸附在颗粒物上的可溶性磷以及与 Fe、Al 形成不稳定化合物形态的磷都会慢慢地再次释放到水体中,所以大风浪对于水体中可溶性磷的减少只是暂时的,一旦大风浪结束,水体中磷含量还会恢复甚至超过风浪作用前的浓度。风浪作用的强弱直接决定着水体中 TP 的含量^[19],取水口的 TP 总量也会随着风速的增大而增大,大风作用下取水口水体中 TP 总量远高于小风作用下水平。消浪工程可以有效减少水体中的悬浮物和营养盐浓度^[20],本实验也初步证实小风相对于大风,其上覆水体中 TP 浓度较低。因此,采取消浪措施对于水源地取水口的水质保护将起到一定的作用。

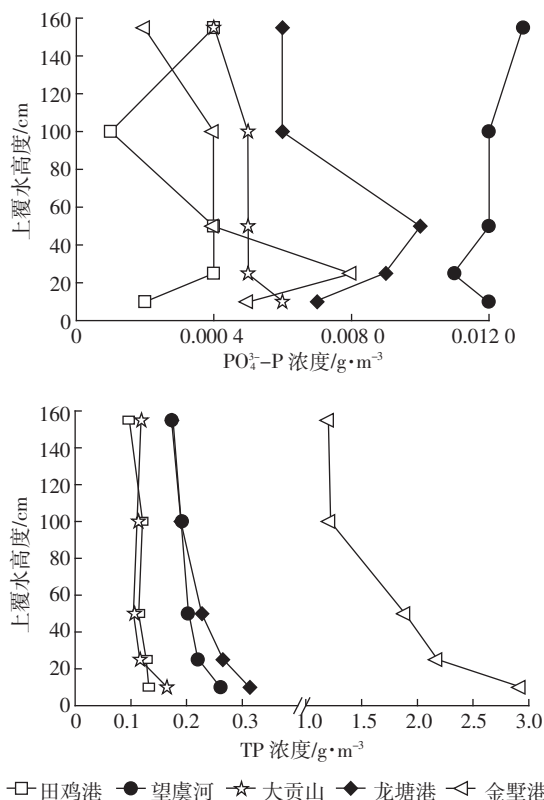
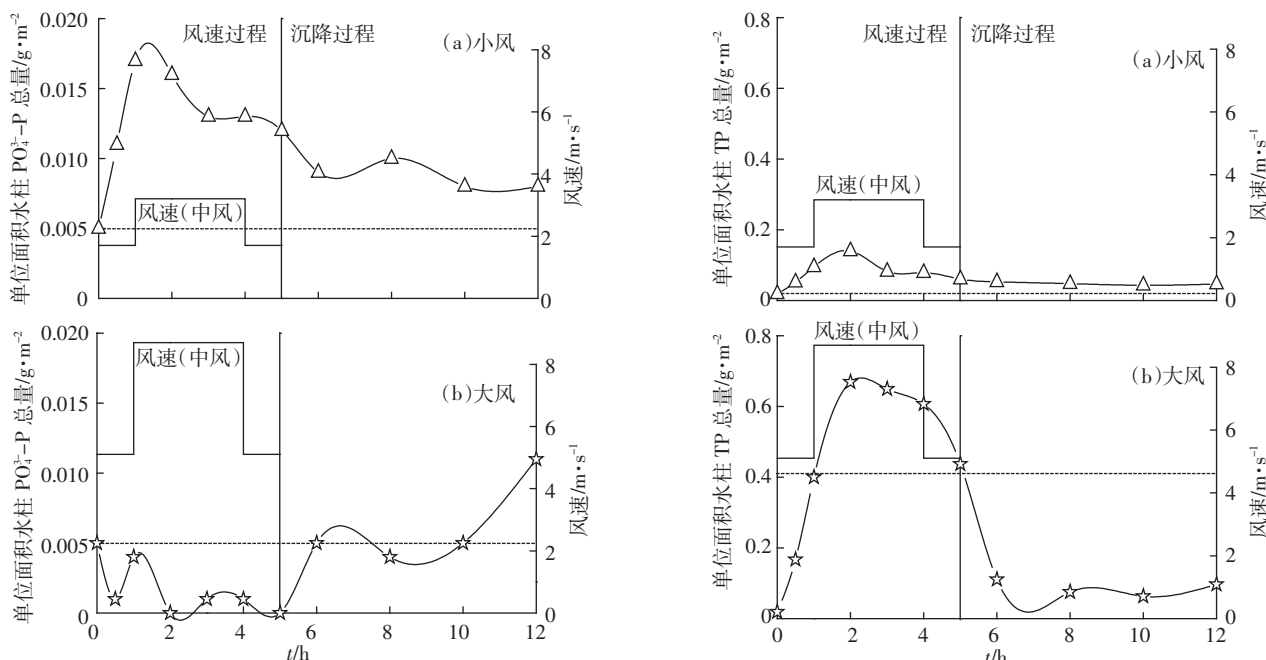


图 6 $5.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速过程第 4 h 的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 浓度的垂向分布

Figure 6 The vertical distribution of C_{P_4} and C_{TP} at the fourth hour on $5.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wind process

在小风条件下(图 7),沉积物不发生再悬浮或者处于再悬浮的临界状态时,上覆水体的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量是增加的,微弱的湖底流速有利于 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 由沉积物向上覆水迁移释放。在中风条件下(图 4),沉积物发生再悬浮,一方面促进了沉积物间隙水向上覆水释放,由于间隙水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度远高于上覆水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度,也促进了 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 向上覆水释放;另一方面悬浮在上覆水体中的颗粒物和胶体在水动力的作用下对磷酸根离子具有吸附作用,也促进了上覆水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的减少。释放和吸附两种过程同时进行,当释放量大于吸附量时,上覆水体 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量增加,反之则减小。由于沉积物理化性质不同,再悬浮时, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的释放存在空间差异。大风条件下(图 7), $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量是明显降低的,因为大风浪的作用过程中,水体扰动剧烈,悬浮颗粒物和胶体的吸附作用显著,其吸附作用大于释放作用,因而水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量较低。在沉降过程中,扰动动力消失后,吸附作用逐渐减弱,加上上覆水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度偏低,有利于被颗粒物和胶体吸附的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 向水中扩散,同时沉积物中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 也会向上覆水体中迁移,导致水柱中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量

图7 金墅水源地取水口水体中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 总量变化过程Figure 7 the variation process of C_P and C_{TP} on Jinshu waterworks

高于初始浓度值。

4 结论

在 $3.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速条件下, 上覆水体 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量呈现增加的趋势; 在 $5.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速条件下, 太湖金墅水源地上覆水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 空间上具有明显的差异性, TP 与悬浮物呈良好正相关性; 在 $8.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速条件下, 由于水中颗粒物吸附作用较强, 上覆水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量下降, 但风浪过后 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 总量会逐渐恢复到较高的水平。

太湖水源地水体频繁受到风浪扰动的影响, 造成水体中可溶性磷浓度的显著增加。消浪围隔可以减小风的吹程, 减弱风浪对水体的扰动及抑制沉积物磷的释放, 为了消除水动力对沉积物的作用, 构筑消浪围隔将是行之有效的措施。

参考文献:

- [1] 张强, 刘正文. 附着藻类对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 2010, 22: 930-934.
- ZHANG Qiang, LIU Zheng-wen. Simulation on the effect of periphytic algae on phosphorus release from sediments of Lake Taihu[J]. *Lake Science*, 2010, 22: 930-934.
- [2] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55: 420-432.
- [3] 许志波, 卢信, 胡维平, 等. 风浪作用下入湖河口内源释放特征[J].

水科学进展, 2011, 22(4): 128-133.

- XU Zhi-bo, LU Xin, HU Wei-ping, et al. Release characteristic of nutrient from sediment in the estuary driven by wind and wave[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 128-133.
- [4] 逢勇, 颜润润, 李一平, 等. 内外源共同作用对太湖营养盐贡献量研究[J]. 水利学报, 2008, 39: 1051-1059.
- PANG Yong, YAN Run-run, LI Yi-ping, et al. Contribution of combined action of exogenous source and internal load on water nutrient in Taihu Lake[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39: 1051-1059.
- [5] 秦伯强, 朱广伟, 张路, 等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法: 以太湖为例[J]. 中国科学(D辑 地球科学), 2005, 35(增刊 II): 33-44.
- QIN Bo-qiang, ZHU Guang-wei, ZHANG Lu, et al. Release pattern and estimation method of internal nutrient from sediments in large shallow lake: With Taihu Lake for case[J]. *Science China(Series D Earth Sciences)*, 2005, 35(Suppl II): 33-44.
- [6] 徐铁群, 熊慧欣, 赵秀兰. 底泥磷的吸附与释放研究进展[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(11): 148-149.
- XU Yi-qun, XIONG Hui-xin, ZHAO Xiu-lan. Research progress on the adsorption and release of sediment phosphorus[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2003, 25(11): 148-149.
- [7] 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[J]. 科学通报, 2003, 48(17): 1822-1831.
- QIN Bo-qiang, HU Wei-ping, GAO Guang, et al. Dynamic mechanism and conceptual model of release from inner source of sediment suspension in Taihu Lake[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(17): 1822-1831.
- [8] Li E H, Li W, Liu G H, et al. The effect of different submerged macrophyte species and biomass on sediment resuspension in a shallow fresh-

- water lake[J]. *Aquatic Botany*, 2007, 22: 121-126.
- [9] Darke A, Walbridge M R. Al and Fe biogeochemistry in a floodplain forest: Implications for pretention[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 51: 1-32.
- [10] 尤本胜, 王同成, 范成新, 等. 太湖草型湖区沉积物再悬浮对水体营养盐的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29: 26-31.
- YOU Ben-sheng, WANG Tong-cheng, FAN Cheng-xin, et al. Effects of sediment resuspension on aqueous nutrient loading in grass type zone of Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2008, 29: 26-31.
- [11] 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[P]. 中国: CN200410014329. X, 2006-09-27.
- FAN Cheng-xin. A method and device of laboratory simulation of the state of underwater sediment resuspension[P]. China: CN200410014329. X, 2006-09-27.
- [12] 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: 611-617.
- YOU Ben-sheng, WANG Tong-cheng, FAN Cheng-xin, et al. Quantitative simulative method of sediment resuspension in Lake Taihu[J]. *Lake Science*, 2007, 19: 611-617.
- [13] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- JIN Xiang-can, TU Qing-ying. investigation specifications of Lake Eutrophication[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [14] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体中悬浮物研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(3): 266-271.
- ZHANG Yun-lin, QIN Bo-qiang, CHEN Wei-min, et al. A study on total suspended matter in Lake Taihu[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(3): 266-271.
- [15] 向 军, 逢 勇, 李一平, 等. 浅水湖泊水体中不同颗粒悬浮物静沉降规律研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(1): 111-115.
- XIANG Jun, PANG Yong, LI Yi-ping, et al. Hydrostatic settling suspended matter of large shallow lake[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(1): 111-115.
- [16] 李一平, 逢 勇, 李 勇. 水动力作用下太湖底泥的再悬浮通量[J]. *水利学报*, 2007, 38(5): 558-564.
- LI Yi-ping, PANG Yong, LI Yong. Resuspended flux of sediment in Taihu Lake under hydrodynamic action[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(5): 558-564.
- [17] Horppila J, Nurminen L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidenvesi (Southern Finland)[J]. *Water Research*, 2003, 37: 4468-4474.
- [18] 李大鹏, 黄 勇, 李伟光, 等. 底泥再悬浮对不同营养水平上覆水中磷酸盐迁移的影响[J]. *水处理技术*, 2008, 34(6): 4-7.
- LI Da-peng, HUANG Yong, LI Wei-guang, et al. Effects of sediment resuspension on different nutritional level of phosphate in water migration[J]. *Technology of Water Treatment*, 2008, 34(6): 4-7.
- [19] Huang P S, Liu Z W. The effect of wave-reduction engineering on sediment resuspension in a large, shallow, eutrophic lake (Lake Taihu)[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35: 1619-1623.
- [20] 高永霞, 朱广伟, 逢 勇. 消浪工程对太湖底泥再悬浮及营养盐释放的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(3): 357-361.
- GAO Yong-xia, ZHU Guang-wei, PANG Yong. Effects of wave dissipation engineering on sediment resuspension and nutrient release in Lake Taihu[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(3): 357-361.