

风浪扰动下湖滨带悬浮物和营养盐响应特征^{*}

周 阳¹, 刘金娥^{1,2**}, 许晓光^{1,2}, 祁 闯¹, 吴馨婷¹, 林 卉¹, 石 款¹

(1: 南京师范大学环境学院, 南京 210097)

(2: 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 江苏省水土环境生态修复工程实验室, 南京 210023)

摘 要: 为研究风浪扰动下沉积物起悬过程中悬浮物浓度的分布特征和水体营养盐时空分布状况, 以太湖西北湖滨带为例, 选择代表 4 种不同生境的 6 个点位进行了连续 12 d 的野外观测. 利用高精度分层同步采样装置, 采用重量法计算悬浮量, 并对悬浮过程中总磷(TP)、总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)浓度进行分析. 结果表明: 风速是引起太湖西北湖滨带水体悬浮物增加的主要因素, 沉积物悬浮的临界风速为 3.6 m/s. 各点位悬浮物浓度的均值差异明显, 表现为: 无植被区>植被区>河口区>湖心区. 太湖西北湖滨带水体氮、磷浓度日变化幅度较大, TN 浓度为 1.82~4.96 mg/L, TP 浓度为 0.10~1.47 mg/L. NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度分别在 0.09~2.83 和 1.05~3.69 mg/L 之间波动. 近岸无植被区水柱的总悬浮量与风速的相关性最好, 相关系数达到 0.722; 而远岸湖心区与风速的相关系数仅为 0.039. 悬浮物浓度除了受风情(风向和风速)的影响外, 同样受水深、地形特征和水生植被的影响.

关键词: 太湖; 底泥悬浮; 风速; 营养盐; 悬浮物

Response of suspended solids and dissolved nutrients in littoral zone of Lake Taihu under wind-wave disturbances

ZHOU Yang¹, LIU Jin'e^{1,2**}, XU Xiaoguang^{1,2}, QI Chuang¹, WU Xinting¹, LIN Hui¹ & SHI Kuan¹

(1: School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, P.R.China)

(2: Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Institute of Water Environmental Eco-remediation, Nanjing 210023, P.R.China)

Abstract: To understand the spatiotemporal characteristics of suspended solid concentration and nutrients under different wind-wave conditions in the northwestern littoral zone, Lake Taihu, six sites representing four biotopes were investigated for twelve days. The quantity of suspended solids were calculated by gravimetric method and the contents of total phosphorus, total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen were analyzed by the high-accuracy layered sampling apparatus. The results showed that the wind speeds were the major factor leading to the increase of the suspended solids in the western Lake Taihu littoral zone and the critical wind speed was 3.6 m/s. The mean concentration of suspended solids in each site was obviously different: non-vegetation areas > vegetation areas > estuary areas > open water areas. The diurnal variation of nitrogen and phosphorous contents were significant, with the total nitrogen of 1.82–4.86 mg/L and the total phosphors of 0.10–1.47 mg/L. The content of ammonium nitrogen was changed between 0.09–2.83 mg/L and nitrate nitrogen was 1.05–3.69 mg/L. In the nearshore non-vegetated areas, the correlation between the total suspended solids and the wind speeds was the strongest with the correlation coefficient of 0.722, while it was only 0.039 in the offshore areas. In addition to the influence of wind speeds, the concentration of suspended solids was also affected by the water depth, topography and aquatic vegetation.

Keywords: Lake Taihu; sediment suspension; wind speed; nutrient; suspended solid

^{*} 国家自然科学基金面上项目(41573061)和江苏省太湖水环境综合治理科研项目(JSZC-G2014-212)联合资助. 2017-10-20 收稿; 2017-11-23 收修改稿. 周阳(1993~), 女, 硕士研究生; E-mail: zhouyangnjnu@163.com.

^{**} 通信作者; E-mail: liujine@njnu.edu.cn.

大型浅水湖泊,由于频繁受风的作用,底部沉积物在风浪作用下易发生再悬浮^[1],造成赋存在沉积物中的营养盐进入水体,使水体营养盐水平增加数倍^[2-4],此时沉积物表现为营养盐的“源”;风浪过后,沉积物又表现为某些营养盐的“汇”,这也是浅水湖泊所具有的显著特征之一. 针对浅水湖泊的特点,动力扰动造成的沉积物再悬浮和水体中营养盐变化受到了国内外极大关注.

太湖是一个平均水深约 2 m 的大型浅水湖泊,受风浪作用的影响较大. 由于浅水湖泊底泥悬浮主要由风扰动而引起^[5],因而从风速因子着手成为研究沉积物再悬浮的关键因子之一. 近年来不少学者对不同生境下太湖起悬的临界风速开展了研究. 张运林等^[5]在对太湖悬浮物的野外调查中发现底泥悬浮的临界风速大约在 5~6.5 m/s 之间;秦伯强等^[6]对太湖中心附近沉积物进行观测,发现风速>4.0 m/s 时才开始出现再悬浮现象. 逢勇等^[7]对太湖 3 号观测站 1997—2002 年的风速和悬浮物浓度进行分析,得到沉积物起悬的临界风速约为 3.7 m/s. 上述研究表明,不同地点、不同生境下沉积物悬浮的临界风速有所不同.

水生植被具有对风浪的削弱作用以及对沉积物的固定作用,可以有效减少风浪引起的底泥再悬浮,降低水体浊度^[8-12];生长过程可以吸收水体营养盐^[13-14];但植物死亡腐烂过程又将有机态转为无机态的营养盐释放回水体^[15],造成水体营养盐水平的改变.

在浅水湖泊中,沉积物中营养盐不仅通过静态扩散(分子扩散和浓度梯度扩散)进入水体,当水体受到动力扰动,营养盐也会通过底泥悬浮和沉积物-水界面环境条件的改变而进入水中,且这种动态扩散产生的量远大于静态释放量^[16]. 目前,较多研究侧重动力作用下沉积物再悬浮的室内模拟实验^[9,17-18]和再悬浮过程对营养盐释放的影响^[10,19],如 Reddy 等^[20]在实验室研究发现,悬浮作用造成的上覆水氨氮浓度增加量可以达到单纯由扩散产生的数 10 倍;Søndergaard 等^[3]通过对丹麦的阿勒湖调查发现,动力作用引起的底泥再悬浮使水体营养盐浓度增加,可以达到扰动前的 20~30 倍;范成新^[21]发现扰动作用下湖底泥的悬浮使得水体磷浓度增加约 2~4 倍. 而对风速、区位特征和有无水生植被生长等因素对沉积物再悬浮的影响以及动力扰动对整个水柱悬浮物、营养盐浓度的影响研究较少.

太湖西北湖滨带及芦苇沟沟内水华藻类和水生高等植物残体大量堆积,使得该区域黑臭底泥淤积现象普遍,污染较严重,因此,本实验选取其作为研究区域,对湖心区、河口区、水生植被区和无水生植被分布区共 6 个代表性点位进行了为期 12 d 的原位监测,利用高精度分层同步采样技术采集不同深度的水体进行研究,分析了风浪扰动下水柱中悬浮物的垂直变化及营养盐响应特征,以期对太湖营养盐控制及湖泊管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样点布设及观测设计

从太湖(30°56'~31°34'N,119°54'~120°36'E)西北沿岸带到湖心开敞区共设置 6 个点位(图 1). 在每

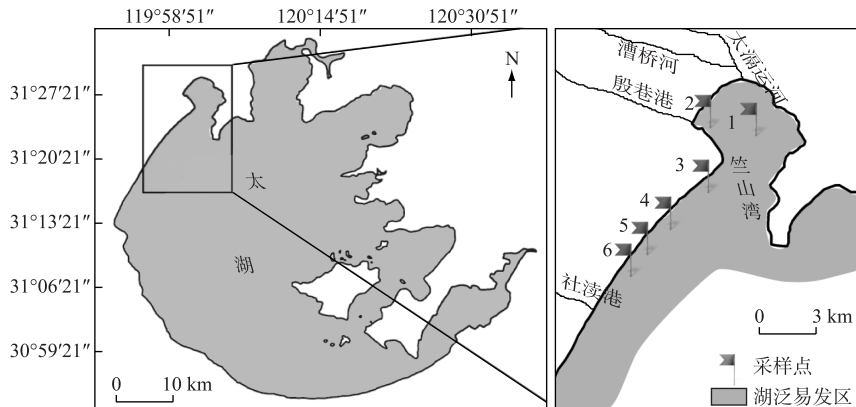


图 1 太湖采样点示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling sites in Lake Taihu

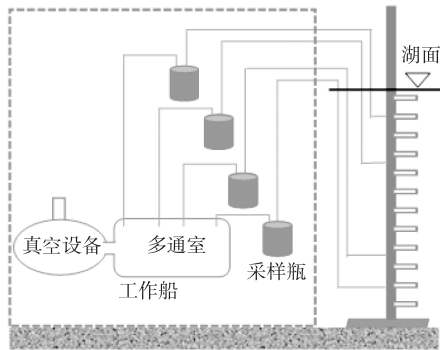


图2 分层采样装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of stratified sampling device

个点位固定一根木桩($\varphi=15\text{ cm}$, $H=4\text{ m}$), 并在木桩上扎上红布条, 以保证每次采样点位的一致性。1[#]点位于太湖西北部竺山湾的中心; 2[#]点位于沙塘河的入湖河口处; 3[#]点位于符淦港近岸的漕沟内(修建太湖大堤时取土而成的深漕); 4[#]点位于欧渚港的芦苇群从内; 5[#]点位于师渚港近岸无植被缓坡区; 6[#]点位于茭渚港蓝藻打捞点附近, 沿岸无水生植物分布。1[#]点表征湖心区、2[#]点表征河口区、3[#]点和4[#]点表征缓坡植被区、5[#]点和6[#]点表征缓坡无植被区, 4个区域距离岸边距离分别为3、0.25、0.25和0.30 km。

原位分层水样通过高精度分层同步采样装置进行采集(图2)^[22]。该装置主要由固定装置、样品收集和抽滤装置3部分组成。由于太湖风浪多变, 悬浮物含量变化速度快, 水样分层精度一般在0.25~0.50 m, 本研究设定的采样精度为0.20 m。为了减少因人为扰动导致的系统误差, 采样过程中支撑杆缓慢放入水中, 以扎带固定在木桩上以保持垂直, 并

静置10 min后开始采样。

2016年10月12—24日每天上午9:00依次从1[#]~6[#]点采样, 共采集12次。水样放入4℃冷藏箱中保存, 迅速运回实验室。分析悬浮物(SS)、总磷(TP)、总氮(TN)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)浓度。

1.2 样品分析与数据处理

SS含量采用重量法测定(GB 11901—1989)。溶解性营养盐 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度采用0.45 μm 醋酸纤维素膜抽滤后, 用AA3c流动水质分析仪(德国Bran Luebbe公司)测定。TN浓度采用碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定(GB 11894—1989), TP浓度采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)测定; TOC和DOC浓度(经0.45 μm 玻璃纤维膜过滤)统一采用multi N/C 3100型总有机碳分析仪测定(德国Jena公司)。每个样品设置3个平行样, 结果以均值表示。风速和风向数据统一采用采样前、后10 min内实时气象要素数据的均值, 用数据记录仪和气象要素监测系统软件测定(中国·武汉中科能慧科技公司)。利用Origin 8.5软件对实验数据进行统计和图像绘制。运用ArcGIS 10.2软件作出研究区与采样点分布图。

太湖湖流较小, 悬浮物的平流输移作用可以忽略, 水柱总悬浮物量根据水样所处各水层深度的悬浮物浓度累积求和得出, 按公式(1)计算。

$$S = \sum_{i=1}^n ss_i \cdot \Delta h_i \quad (1)$$

式中, S 为单位面积水柱总悬浮物含量(kg/m^2), ss_i 为第 i 水层悬浮物含量(kg/m^3), Δh_i 为第 i 水层的厚度(m)。

2 结果与讨论

2.1 实验期间风速和风向特征

2016年10月13—24日实验期间, 存在2次起风过程, 分别是10月13—16日和10月17—24日(图3), 起风过程中悬浮物浓度变化幅度较大。日平均风速范围在3~6 m/s之间。取样间隔内平均风速(10 min)最大值出现在10月20日, 为5.8 m/s; 最小值出现在10月16日, 为0.8 m/s。观测期间风向变化较大。

2.2 风浪扰动下悬浮物浓度的垂向分布特征

风速是引起水体中悬浮物浓度增加的主要因素。风速低于3.6 m/s的条件下, 各点位悬浮物浓度的垂向差异并不显著, 此时各点位水体中悬浮物浓度的均值在20~60 mg/L之间波动(图4)。这与逢勇等^[7]和胡开明等^[23]的研究结果较为一致, 其结果表明太湖底泥起悬的临界风速分别是3.4和3.7 m/s, 当风速小于该临界值, 悬浮物浓度值范围为20~50 mg/L, 没有明显上升趋势。而随着风速增加到临界风速(>3.6 m/s), 更多的沉积物发生悬浮, 同时引起大粒径的颗粒发生悬浮^[24-25]。强风浪干扰下, 底层悬浮物浓度明显高于上层水

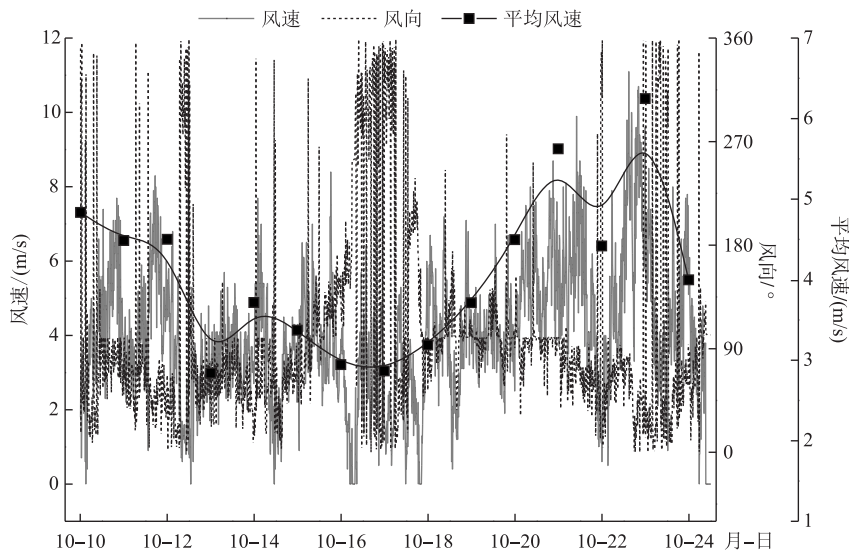


图3 实验期间的风速、风向情况
Fig.3 Wind speed and wind direction during observation

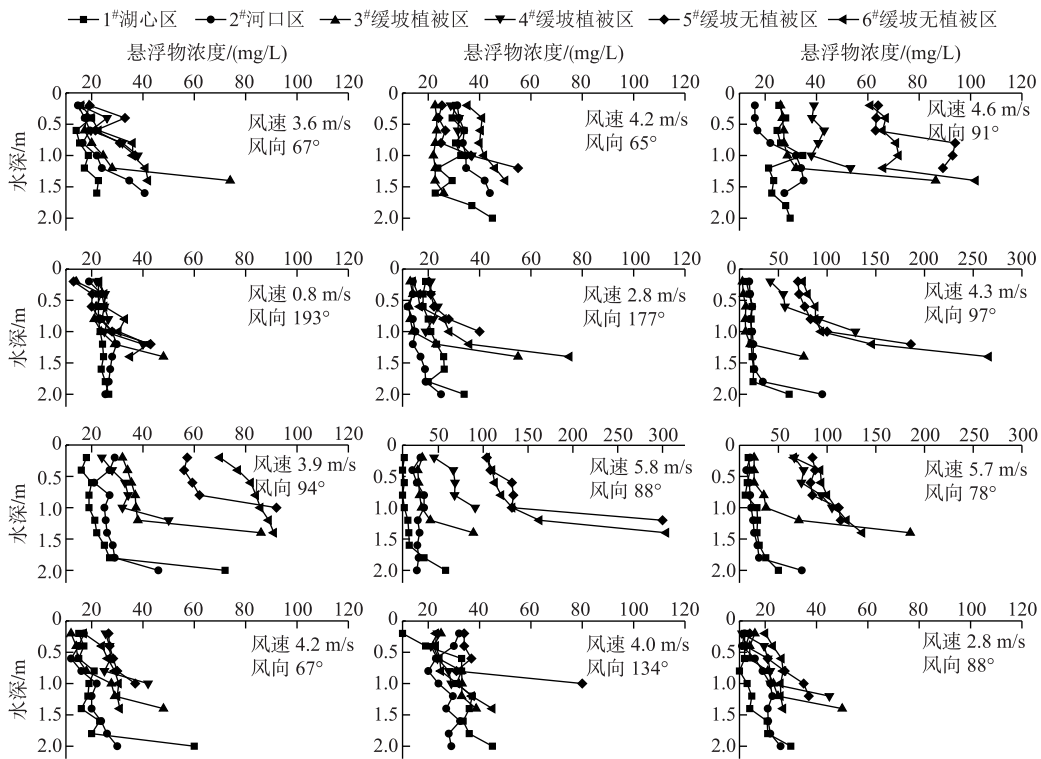


图4 观测期间各点位悬浮物浓度的垂向变化
Fig.4 Vertical variation of suspended solid concentration during observation

体,底泥悬浮物在动力作用下向表层传递,使得表层浓度也逐渐升高,其浓度可以达到表层悬浮物浓度的

3~5 倍. 因此随着风速增大, 水体中悬浮物浓度也增大.

各点位悬浮物浓度均值差异明显, 表现为: 无植被区(6[#])>植被区(3[#]、4[#])>河口区(2[#])>湖心区(1[#]) (图4). 相同风速条件下, 距离大湖区越近, 湖面开阔, 且无水生植被分布的近岸区域悬浮物浓度变化幅度较大(6[#]). 当风速从 2.8 m/s 升至 5.8 m/s 时, 近岸无植被区(6[#])的悬浮物浓度从 30 mg/L 升至 149 mg/L, 而符淙港相对封闭的槽沟区(3[#]), 该区域分布有整齐的人工种植的芦苇群落, 水柱中悬浮物浓度仅从 20 mg/L 升至 39 mg/L. 水生植物具有消浪^[9]和抑制底泥上浮^[26]的作用. 由此可见, 悬浮物浓度除了受风速的影响, 同样受地形特征和水生植被的影响. 而近岸带悬浮物浓度高于湖心区(1[#], 远岸带). 究其原因, 一方面可能是受太湖常年主导风向东风、东南风的影响, 造成大量蓝藻聚集在太湖西部近岸带, 藻体死亡分解产生许多生物碎屑; 另一方面可能是由于地形条件的限制, 近岸带反射流作用较强, 促进了悬浮物的起悬^[27].

2.3 风速与水柱总悬浮量的对应关系

胡春华等^[22]研究表明, 仅用表层悬浮物浓度计算整个水柱的悬浮物总量时, 其结果多为实际值的 80%~85% (无风浪状态) 和 50% (风浪状态). 因此比起表层悬浮物的浓度, 整个水柱的总悬浮量更能体现与风速的对应关系. 按公式(1), 将各水层单位面积水柱的悬浮物浓度与水深累计求和得到水柱总悬浮量, 将计算所得水柱总悬浮量与取样间隔内(10 min)平均风速作拟合(图5), 可以看出实验期间 1[#]~6[#]点位水柱悬浮物浓度与风速的相关性. 其中近岸无植被区(6[#])与风速的相关性最好, 相关系数达到 0.722. 而远岸湖心区(1[#])与风速的相关性仅为 0.039, 虽然都是无植被区, 但本研究近岸带观测点位的水深仅为 1.0~1.2 m, 而 6[#]湖心区水深可达 1.8 m. 由此可知悬浮物浓度不仅受风情的影响, 也受水深的影响.

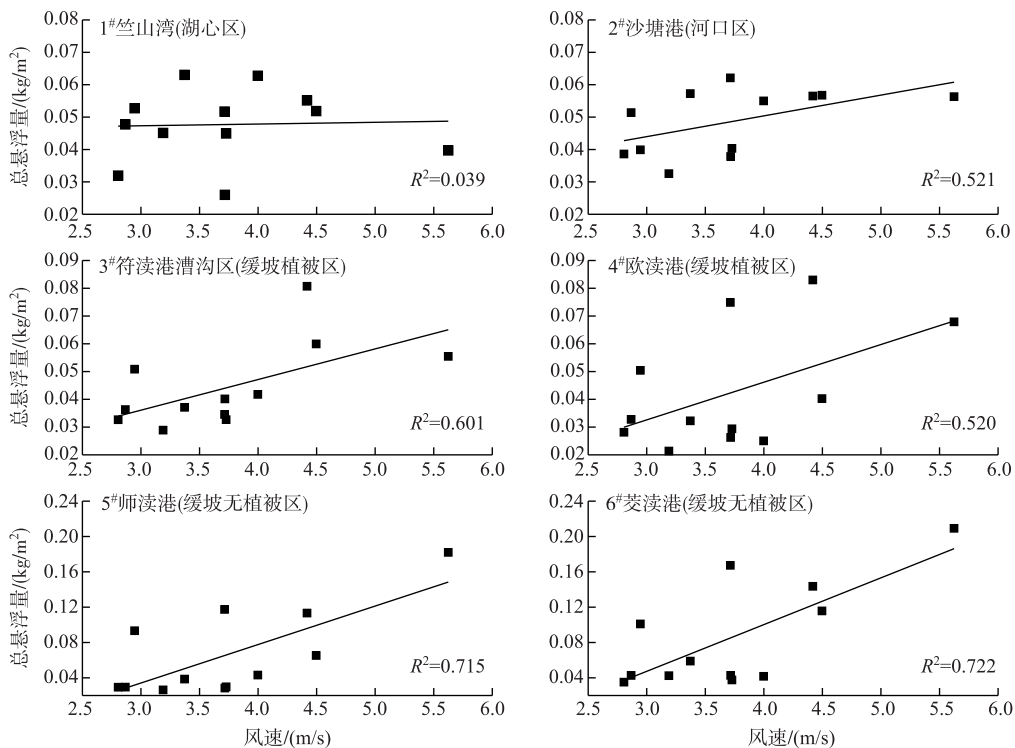


图5 水柱总悬浮量和风速的对应关系

Fig.5 The corresponding relationship between total suspended solids of water column and wind speed

2.4 风浪作用下营养盐响应特征

2.4.1 水体中 TN 和 TP 浓度分布特征 实验期间 1[#]~6[#]点 TN 浓度变化范围分别为 2.06~4.81、2.95~4.16、2.69~3.81、2.07~3.34、2.04~4.96 和 1.82~3.63 mg/L. 相应的, TP 浓度变化范围分别为 0.14~0.48、0.15~

0.38、0.10~0.63、0.18~0.42、0.18~1.47 和 0.21~0.46 mg/L(图 6)。湖心区(1[#])水体氮、磷浓度日变化幅度较大,受风情影响更为显著,TN、TP 最大浓度可以达到每日最低值的 2~3 倍。该区域受地形干扰小,风暴露面积大,一定强度的风力扰动引起黏质颗粒物的起悬,使得沉积物中大量可溶性 N、P 进入水体。TN 浓度均值表现为: 3[#]>2[#]>5[#]>4[#]>1[#]>6[#]。漕沟区(3[#])TN 浓度最高,均值达 3.31 mg/L,可能是受东南季风的影响,大量水华蓝藻从湖区随盛行风进入芦苇群丛和漕沟后,难以回到湖区,在漕沟内快速堆积腐烂,加之外源污染物汇聚到此,导致污染严重^[28]。

同样是近岸带,植被区的 TN 浓度(3[#]、4[#]、5[#])达到 3.07 mg/L,高于 TN 浓度均值为 2.64 mg/L 的无植被区(6[#])。一方面可能是因为采样处于秋季,藻类和水生植物凋落分解,促进沉积物 TN 的释放^[29-31],而一经风浪扰动,使得沉积物中 TN 向上覆水释放;另一方面可能是因为,水生植物对风浪的削弱作用以及对沉积物的固定作用,一定程度能够抑制沉积物的再悬浮^[9],同等风情下植被区 SS 浓度较小,而 SS 浓度与水体 N 浓度呈负相关关系^[12],因此 TN 浓度高于无植被区。而芦苇在生长过程中对磷元素的吸收,又使得植被区的 TP 浓度高于无植被区,这与杨荣敏等^[32]的研究结果一致,因此生境条件对水体氮、磷浓度具有一定影响。

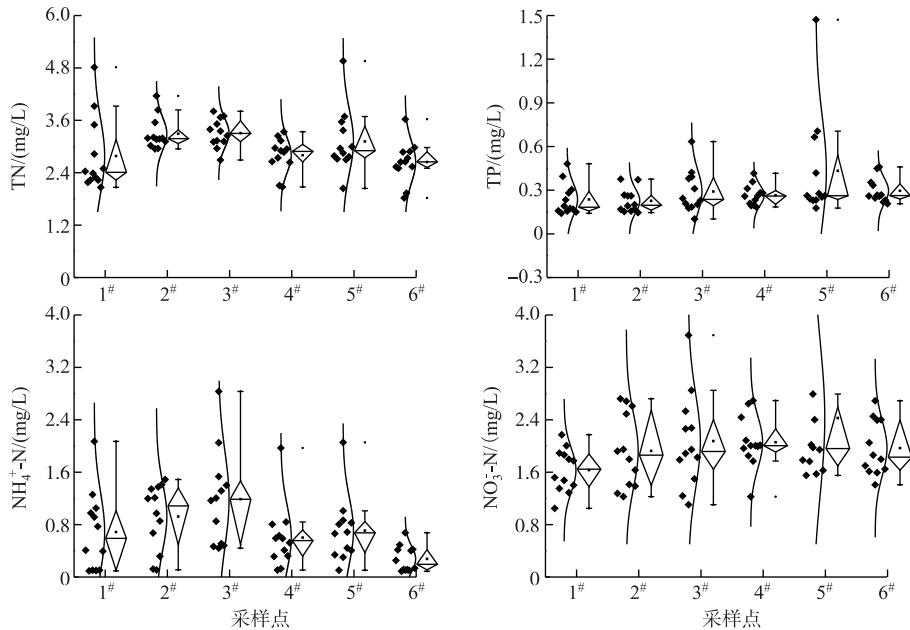


图 6 不同点位营养盐分布特征

Fig.6 Distribution characteristics of nutrients at different sites

2.4.2 水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分布特征 实验期间 1[#]~6[#] 点位 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化范围分别为 0.09~2.07、0.11~1.49、0.44~2.83、0.11~1.97、0.10~2.06 和 0.09~0.68 mg/L; 相应的, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度范围分别为 1.05~2.17、1.23~2.72、1.11~3.69、1.23~2.69、1.55~4.85 和 1.41~2.69 mg/L(图 6)。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度普遍高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 这是因为太湖中的氮以无机氮为主, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是无机氮的主要部分, 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ^[33]。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度日变化幅度较大, 尤其是湖心区(1[#])和 5[#], 最大值比最小值分别高出 23 和 20 倍。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度的分布趋势为: 3[#]>2[#]>5[#]>1[#]>4[#]>6[#], 与 TN 浓度分布相仿。 植被区(3[#]和 4[#]) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度达到缓坡无植被区(5[#]和 6[#]) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的 1.8 倍。 水中胶体及颗粒悬浮物大多带负电荷, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 带有正电荷, 因此颗粒物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附是无机氮吸附的主要方面^[34]。 与无植被区相比, 风浪扰动更易导致植被区悬浮物的增加, 也加剧了水体中颗粒物与颗粒物、颗粒物与离子之间的碰撞, 且水中无机和有机胶体颗粒对溶解性盐类吸附作用加强, 因此 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度表现为植被区>无植被区。 而漕沟区(3[#]), 累积的大量蓝藻、水生生物以及密闭的空间, 形成了厌氧还原环境, 反硝化作用强烈, 因此 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度处于最高。

NO_3^- -N 平均浓度各点位差异不大,各点位 NO_3^- -N 浓度均值仅为 0.8 mg/L. 但实验期间每日 NO_3^- -N 浓度有较大波动. 植被区的 NO_3^- -N 平均浓度(3[#]和4[#])高于无植被区(5[#]和6[#]),一方面因为水生植被的光合作用,吸收二氧化碳放出氧气,促进了硝化反应,使得 NO_3^- -N 浓度高出无植被区;另一方面,水生植物生长也在吸收游离的氮、磷,减少了水相和沉积物相的 N 含量^[35-36]. 因此,水生植物对水体中营养盐的释放和吸收起一定作用.

3 结论

1) 风速是引起水体中悬浮物浓度增加的主要因素. 低于临界风速(3.6 m/s),各点位悬浮物浓度的垂向差异并不显著,此时各点位水体中的悬浮物浓度均值在 20~60 mg/L,而无明显上升趋势. 而随着风速增加到临界风速(>3.6 m/s),更多的沉积物发生悬浮,同时引起大粒径的颗粒发生悬浮.

2) 各点位悬浮物浓度均值差异明显,表现为:无植被区(6[#])>植被区(5[#]>4[#]>3[#])>河口区(2[#])>湖心区(1[#]). 悬浮物浓度除了受风情的影响,同样受地形特征和水生植被的影响. 适当种植水生植被和增加消浪装置,有利于控制水体悬浮物浓度,并有效缓解太湖内源营养盐的释放.

3) 太湖西北湖滨带水体氮、磷浓度日变化幅度较大,TN 和 TP 浓度范围分别为 1.82~4.96 和 0.10~1.47 mg/L, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 浓度范围分别为 0.09~2.83 和 1.05~3.69 mg/L.

4) 比起表层悬浮物的浓度,整个水柱的总悬浮量更能体现与风速的对应关系. 近岸无植被区(6[#])与风速的相关性最好,相关系数达到 0.722;而远岸湖心区(1[#])与风速的相关性仅为 0.039,悬浮物浓度不仅受风情的影响,也受水深的影响.

4 参考文献

- [1] Kristensen P, Søndergaard M, Jeppesen E. Resuspension in a shallow eutrophic lake. *Hydrobiologia*, 1992, **228**(1): 101-109.
- [2] Roberts RD, Waiser MJ, Ora H *et al.* Relaxation of phosphorus limitation due to typhoon-induced mixing in two morphologically distinct basin of Lake Biwa, Japan. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(6): 1023-1036.
- [3] Søndergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark. *Hydrobiologia*, 1992, **228**(1): 91-99.
- [4] Zhu GW, Qin BQ, Gao G. Vertical distribution of the concentrations of phosphorus and suspended solid in Taihu lake affected by wind-induced wave. *Advances in Water Science*, 2004, **15**(6): 775-780. [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.]
- [5] Zhang YL, Qin BQ, Chen WM *et al.* A study on total suspended matter in Lake Taihu. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, **13**(3): 266-271. [张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 太湖水体中悬浮物研究. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(3): 266-271.]
- [6] Qin BQ, Hu WP, Gao G *et al.* Dynamic mechanism of suspended sediment and conceptual model of endogenous release in Taihu. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(17): 1822-1831. [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**(17): 1822-1831.]
- [7] Pang Y, Yan RR, Yu ZB *et al.* Suspension-sediment of sediment and release amount of internal load in Lake Taihu affected by wind. *Environmental Science*, 2008, **29**(9): 2456-2464. [逢勇, 颜润润, 余钟波等. 风浪作用下的底泥悬浮沉降及内源释放量研究. 环境科学, 2008, **29**(9): 2456-2464.]
- [8] Granéli W, Solander D. Influence of aquatic macrophytes on phosphorus cycling in lakes. *Hydrobiologia*, 1988, **170**(1): 245-266.
- [9] Du GL. Study on sediment resuspension and the mechanism of nutrient release of Taihu Lake[Dissertation]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013. [杜广龙. 太湖沉积物再悬浮及营养盐释放规律机制研究[学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2013.]
- [10] Hu XZ, Liu Q, Li YJ. The controlling of plants rebuild engineering on sediment resuspension and nutrient salts release in Fubao Bay of the Dianchi Lake. *China Environmental Science*, 2012, **32**(7): 1288-1292. [胡小贞, 刘倩, 李英杰. 滇池福保湾植被重建对底泥再悬浮及营养盐释放的控制. 中国环境科学, 2012, **32**(7): 1288-1292.]

- [11] Qin BQ, Gao G, Hu WP *et al.* Reflections on the theory and practice of shallow lake ecosystem restoration. *J Lake Sci*, 2005, **17**(1): 9-16. DOI:10.18307/2005.0102. [秦伯强, 高光, 胡维平等. 浅水湖泊生态系统恢复的理论与实践思考. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 9-16.]
- [12] You BS, Wang TC, Fan CX *et al.* Effects of sediment resuspension on aqueous nutrient loading in grass type zone of Lake Taihu. *Environmental Science*, 2008, **29**(1): 26-31. [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. 环境科学, 2008, **29**(1): 26-31.]
- [13] Andersen FØ, Olsen KR. Nutrient cycling in shallow, oligotrophic Lake Kvie, Denmark. *Hydrobiologia*, 1994, **275/276**(1): 267-276.
- [14] Shi Q, Jian F, Chen Y *et al.* Decomposition of lotus leaf litter and its effect on the aquatic environment of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(18): 5171-5179. [史绮, 焦锋, 陈莹等. 杭州西湖北里湖荷叶枯落物分解及其对水环境的影响. 生态学报, 2011, **31**(18): 5171-5179.]
- [15] Zheng CH. Response of nutrients in lake water to sediment resuspension and sedimentation [Dissertation]. Nanjing: Hohai University, 2005. [郑超海. 湖泊水体营养物质含量对沉积物再悬浮及沉降过程的响应 [学位论文]. 南京: 河海大学, 2005.]
- [16] Portielje R, Lijklema L. Estimation of sediment-water exchange of solutes in lake Veluwe, the Netherlands. *Water Research*, 1999, **33**(1): 279-285.
- [17] Zhu M, Zhu G, Nurminen L *et al.* The influence of macrophytes on sediment resuspension and the effect of associated nutrients in a shallow and large lake (Lake Taihu, China). *PLoS One*, 2015, **10**(6): e0127915.
- [18] Zhu GW, Qin BQ, Zhang L *et al.* Wave effects on nutrient release of sediments from Lake Taihu by flume experiments. *J Lake Sci*, 2005, **17**(1): 61-68. DOI:10.18307/2005.0110. [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. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 61-68.]
- [19] Wang C, Wang C. Study on resuspension and NH_4^+ -N release of taihu lake sediment under current flow. *Environmental Protection Science*, 2011, **37**(2): 7-9. [王村, 王超. 湖流作用下太湖底泥再悬浮和 NH_4^+ -N 释放规律研究. 环境保护科学, 2011, **37**(2): 7-9.]
- [20] Reddy KR, Fisher MM, Ivanoff D. Resuspension and diffusive flux of nitrogen and phosphorus in a hypereutrophic lake. *Journal of Environmental Quality*, 1996, **25**(2): 363-371.
- [21] Fan CX. Physiochemical characteristics of sediments in Gehu Lake and simulation of its phosphorus release. *J Lake Sci*, 1995, **7**(4): 341-350. DOI:10.18307/1995.0408. [范成新. 漏湖沉积物理化特征及磷释放模拟. 湖泊科学, 1995, **7**(4): 341-350.]
- [22] Hu CH, Hu WP, Zhang FB *et al.* Observation of sediment resuspension in Taihu. *Chinese Science Bulletin*, 2005, **50**(22): 2541-2545. [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**(22): 2541-2545.]
- [23] Hu KM, Wang S, Pang Y *et al.* Suspension-sedimentation of sediment and release amount of internal load in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 191-199. DOI:10.18307/2014.0204. [胡开明, 王水, 逢勇等. 太湖不同湖区底泥悬浮沉降规律研究及内源释放量估算. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 191-199.]
- [24] Bloesch J. Mechanisms, measurement and importance of sediment resuspension in lakes. *Marine & Freshwater Research*, 1995, **46**(1): 295-304.
- [25] Fan CX, Zhang L, Qin BQ *et al.* Estimation on dynamic release of phosphorus from wind-induced suspended particulate matter in Lake Taihu. *Science in China*, 2004, **47**(8): 710-719.
- [26] Zhang YL, Qin BQ, Chen WM *et al.* A study on total suspended matter in Lake Taihu. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, **13**(3): 266-271. [张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 太湖水体中悬浮物研究. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(3): 266-271.]
- [27] Cao ZD, Kong LS, Jiao GY. Sediment movement under the effect of periodic reciprocating current. *Journal of Waterway and Harbour*, 2005, **26**(1): 6-11. [曹祖德, 孔令双, 焦桂英. 往复流作用下粉砂的起悬和沉降过程. 水道港口, 2005, **26**(1): 6-11.]
- [28] Liu XS, Xu XG, Huang HY *et al.* Analysis of two odorous compounds in sediment in west nearshore zone of Taihu. *China Environmental Science*, 2017, **37**(1): 302-309. [刘宪圣, 许晓光, 黄鹤勇等. 太湖西岸沉积物中两种致嗅物质的分布特征. 中国环境科学, 2017, **37**(1): 302-309.]
- [29] Shang LX, Ke F, Li WC *et al.* Laboratory research on the contaminants release during the anaerobic decomposition of high-

- density cyanobacteria. *J Lake Sci*, 2013, **25**(1): 47-54. DOI:10.18307/2013.0107. [尚丽霞, 柯凡, 李文朝等. 高密度蓝藻厌氧分解过程与污染物释放实验研究. 湖泊科学, 2013, **25**(1): 47-54.]
- [30] Shen AC, Xu ZA, Wu DH. Relationships between accumulation and dying of cyanobacteria and black spot. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(3): 68-72. [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. 水生态学杂志, 2012, **33**(3): 68-72.]
- [31] Zhu MY, Zhu GW, Wang YP. Influence of scum of algal bloom on the release of N and P from sediments of Lake Taihu. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 409-415. [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. 环境科学, 2011, **32**(2): 409-415.]
- [32] Yang RM, Li KY, Wang CH *et al.* Effects of macrophytes on release of phosphorus from Taihu sediment. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(s1): 274-278. [杨荣敏, 李宽意, 王传海等. 大型水生植物对太湖底泥磷释放的影响研究. 农业环境科学学报, 2007, **26**(s1): 274-278.]
- [33] Xu H, Paerl HW, Qin B *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [34] Liu HL ed. Code for investigation of lake eutrophication. Beijing: China Environmental Science Press, 1987. [刘鸿亮. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1987.]
- [35] Melzer A. Aquatic macrophytes as tools for lake management. *Hydrobiologia*, 1999, **395/396**(1): 181-190.
- [36] Bao XM, Chen KN, Fan CX *et al.* Effects on nitrogen and phosphorus distribution in interstitial water and sedimentation-water nitrogen and phosphorus release with growing of submerged macrophytes. *J Lake Sci*, 2006, **18**(5): 515-522. DOI:10.18307/2006.0513. [包先明, 陈开宁, 范成新等. 沉水植物生长对沉积物间隙水中的氮磷分布及界面释放的影响. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 515-522.]