

风浪对太湖水体中胶体态营养盐和浮游植物的影响

孙小静^{1,2}, 秦伯强^{2*}, 朱广伟², 张战平³

(1. 华东师范大学资源与环境科学学院, 上海 200062; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 3. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310028)

摘要: 为了解不同风浪条件下太湖水体中胶体态营养盐和浮游植物含量的特征, 选择不同风速情况进行现场观测和采样, 用切向流超滤法获取胶体, 测定胶体态有机碳、氮、磷及其他形态营养盐含量. 同时收集浮游植物样品, 测定其密度和生物量. 结果表明, 在风速小于 4 m/s 时胶体氮(CN)和胶体磷(CP)含量随风速变大而升高, 而在风速大于 4 m/s 时其含量不再升高, 甚至略有降低; 叶绿素 a(Chl-a)、浮游植物密度、蓝藻密度和蓝藻生物量均在风速小于 4 m/s 时随风速增大而升高, 在风速大于 4 m/s 时随风速增大而降低, 说明小风浪有利于蓝藻生长或漂浮, 而大风浪对其生长或漂浮不利. CN 和 CP 含量与浮游藻类含量呈显著正相关, 表明在藻类生长旺盛的夏季, 太湖水体中胶体氮、磷的主要来源为藻类产物.

关键词: 风浪; 太湖; 胶体; 营养盐; 浮游植物

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)03-0506-06

Effect of Wind-Induced Wave on Concentration of Colloidal Nutrient and Phytoplankton in Lake Taihu

SUN Xiao-jing^{1,2}, QIN Bo-qiang², ZHU Guang-wei², ZHANG Zhan-ping³

(1. College of Resources and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China)

Abstract: In order to find out the characteristics of colloidal nutrient and phytoplankton under different wind conditions in Lake Taihu, observation were carried out and samples were collected. Colloid was collected by using cross-flow ultrafiltration system. Organic carbon, nitrogen, and phosphorus in colloidal, dissolved and other fractions of water samples were determined, and concentration and biomass of phytoplankton were also determined. The result showed that the concentration of colloidal nitrogen (CN), colloidal phosphorus (CP) increased with the increasing of wind speed when the wind speed was less than 4 m/s, and did not increase or even decreased with the increasing of wind speed when the wind speed was more than 4 m/s. The concentration of Chl-a, phytoplankton, cyanobacteria, and biomass of cyanobacteria increased with the increasing of wind speed when the wind speeds was less than 4 m/s, and decreased with the increasing of wind speeds when the wind speed was more than 4 m/s. It was indicated that the small wind-induced waves are of advantage to the float or growth of cyanobacteria while the big wind-induced waves are of disadvantage to the float or growth of cyanobacteria. Concentration of CN and CP are significantly correlated with concentration of phytoplankton and cyanobacteria, indicating that algae and their production are main sources of CN and CP in summer in Lake Taihu.

Key words: wind-induced wave; Lake Taihu; colloid; nutrition; phytoplankton

在湖泊富营养化过程中, 除了外源营养盐的输入之外, 浅水湖泊底泥所造成的内源释放也是 1 个重要原因^[1]. 湖泊富营养化治理中普遍出现的情况是外源营养盐输入得到有效控制后, 湖泊水质仍得不到显著改善^[2,3], 其原因在于营养盐的动态、静态内源释放使得湖水维持富营养水平^[4-6].

太湖位于长江三角洲, 面积 2 338 km², 平均水深 1.89 m, 最大水深 ≤ 3 m, 属大型浅水湖泊^[7]. 浅水湖泊的一个最大特点是水土界面不断受到风浪扰动导致沉积物大量悬浮, 水土界面不断受到破坏, 氧化还原环境在这种动力扰动下处于不断转换中^[8]. 国内外研究发现, 风浪扰动可将表层底泥中可溶性磷释放出来^[9], 大风浪扰动还可能引起磷的

爆发性内源释放^[10, 11]. 因此, 底泥再悬浮可能是内源营养盐释放的主要来源^[12]. 在充分考虑水动力作用影响的基础上, 秦伯强等提出了浅水湖泊内源营养盐释放的模式, 并估算出风浪扰动对太湖可能造成的内源释放潜力^[8, 13, 14].

胶体粒子被认为是真正溶解相与颗粒相之间的联系, 天然水中痕量金属、有机物质等的地球化学循环和对生物相的作用在很大程度上受到胶体粒子

收稿日期: 2006-04-09; 修订日期: 2006-07-16

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-12); 国家自然科学基金项目(40203007)

作者简介: 孙小静(1977~), 女, 博士后, 主要研究方向为湖泊富营养化和土壤污染控制, E-mail: sxjkerry@sohu.com

* 通讯联系人, E-mail: qinbq@niglas.ac.cn

的影响^[15]. 胶体是诸多重金属的赋存载体,可透过1.2 μm滤膜的水体中通常有50%以上的Al、Pb和Ti存在于粗颗粒胶体中,其运移、归宿和生物可利用性都与胶体有关^[16]. 在水体生态系统中,胶体可改变生物对碳、氮、磷等营养元素的利用,并直接影响生物生长情况. 研究发现,胶体可作为浮游生物的营养补充来源,提高湖水胶体浓度可促进细菌和原生动物生长^[17]. 胶体中存在着微藻生长所必需的N、P和Fe,对微型藻类和光合细菌的生长有显著刺激作用^[18~20].

浅水湖泊的胶体来源比较复杂,不但水生生物的生命活动过程会产生很多富含糖类的有机胶体,而且底泥再悬浮也会向水体引入无机胶体,如水槽试验发现,随着波浪扰动过程的持续,水体悬浮物中小比重的有机质和细颗粒胶体物质所占比例会越来越大^[6]. 太湖是一个风浪扰动作用剧烈而频繁的大型浅水湖泊,风浪扰动对水体胶体的数量、性质的影响必将同时影响水体氮、磷营养盐的形态和转化过程.

因此,本研究对不同风速条件下太湖水体中碳、氮、磷,尤其是胶体态碳、氮、磷的含量变化进行了观测,并对胶体态营养盐含量变化及其与浮游藻类含量的关系进行了探讨,通过探索胶体态营养盐的来源及胶体在营养盐循环和藻类生长过程中的行为和作用,以期为深入揭示浅水湖泊营养盐内源释放机制提供重要依据.

1 材料与方法

1.1 采样点情况

采样地点选在太湖北部梅梁湾口(图1),太湖湖泊生态系统研究站的栈桥顶端,即太湖站常规采样的2号点,经纬度为N31.423 67°,E120.209 5°. 在2005-08-15~2005-08-29期间,选取了6个风浪条件不同的日期采集水样进行分析,采样日期和相应风浪状况见表1.

表1 采样时风速和波浪高度情况

Table 1 Wind speeds and wave heights at sampling time		
采样日期/月-日	采样时风速/m·s ⁻¹	浪高/cm
08-15	5.3	20
08-16	2.0	0
08-19	4.0	10
08-24	11.0	50
08-28	2.0	<10
08-29	2.7	<10

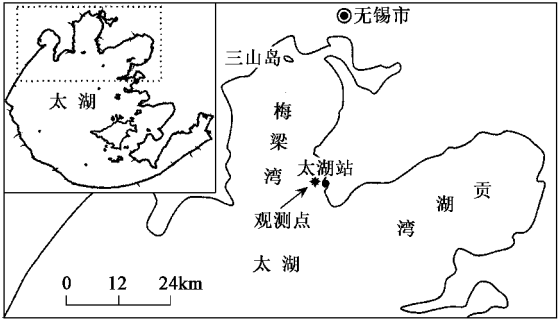


图1 采样点位置示意

Fig.1 Location of the sampling site

1.2 样品采集与处理方法

采集水体表面以下20 cm处的表层水样. 每次采集水样体积约20 L,现场用64 μm的筛网滤去大型悬浮杂质和藻类,然后立即运回实验室进行预过滤和切向流超滤. 同时单独采集水样用于测定悬浮固体(SS)和叶绿素a(Chl-a)含量,并采集浮游植物样品. 浮游植物样品用鲁哥氏液固定,用于分析藻类密度和生物量. 采回的水样首先通过装1 μm滤芯(型号CR0171006,聚丙烯材料)的预过滤系统(10 inch Millipore prefilter),得到的预滤液用于切向流超滤. 超滤系统为Millipore Standard Pellicon System,膜为相对分子质量1 000的Millipore PLAC超滤膜. 因此本研究中的胶体是指能透过1 μm滤膜且被相对分子质量1 000超滤膜阻止的微粒. 正式超滤前,先取1~2 L预滤液在超滤系统中循环约10 min后弃去,以润洗超滤膜和管道,其余进行超滤. 水样经过超滤处理后,所得到的保留液是某种粒径胶体粒子被浓缩若干倍数的胶体浓缩液,而透过液是不含该粒径胶体粒子的超滤液^[15]. 切向流超滤流程参见文献[21],每次水样超滤前后都要对超滤系统进行清洗,清洗流程同文献[22]. 采样和测试用到的水样容器均经过10%盐酸溶液浸泡和去离子水清洗.

本研究中的总有机碳(TOC)、总氮(TN)和总磷(TP)是指湖水经64 μm筛网过滤后水样中总的有机碳、氮和磷含量;胶体有机碳(COC)、胶体氮(CN)、胶体磷(CP)是指水样中能通过1 μm预滤膜且被相对分子质量1 000超滤膜截留的胶体物质中的有机碳、氮、磷含量;真溶解态有机碳(UOC)、真溶解态氮(UDN)、真溶解态磷(UDP)是指水样经相对分子质量1 000超滤膜超滤后滤液中总的有机碳、氮、磷含量.

1.3 测定分析方法

水样中 TN、TP、CN、CP 和 UDN 含量的测定采用过硫酸钾消解后钼锑抗分光光度法^[23]. UDP 是将通过相对分子质量1 000膜超滤后的超滤液消解后用 SKALAR 连续流动分析仪测定, 硝态氮(NO_3^- -N)和磷酸根磷(PO_4^{3-} -P)则是将超滤液直接用 SKALAR 连续流动分析仪测定. Chl-a 采用乙醇提取后分光光度法测定. 浮游生物的密度则是用显微镜计数法测定, 并由此换算生物量^[24]. TOC、COC、UOC 均用 Shimadzu 公司生产的 TOC-5000A 型总有机碳分析仪进行测定, CN、CP 和 COC 含量的计算方法同文献[21, 22, 25]. SS 的测定为 Whatman GF/C 玻璃纤维滤膜抽滤后 105℃ 烘干称重法^[23]. 相关分析采用 SPSS11.0 统计软件完成.

2 结果与讨论

2.1 水体 SS 和有机碳含量

图 2(a)为各次采样的风速和水体悬浮固体(SS)变化情况. 由图 2(a)可知, SS 的变化曲线基本与采样时刻风速的变化曲线重叠, 通过相关分析得

出 SS 与采样时刻风速和采样前 24 h 平均风速的相关系数分别为 0.953 和 0.910, 均呈显著正相关, 但与其与采样时刻风速的相关性较采样前 24 h 平均风速的相关性更为显著, 说明 SS 含量受采样时刻即时风速的影响最为直接.

图 2(b)为各次采样的 TOC 和 UOC 含量变化曲线. 由图 2(b)看出, TOC 含量的变化与采样时风速的变化趋势基本一致, 即随风速的升高而升高, 随风速的降低而降低, 但其变化曲线较为平缓. UOC 的变化趋势与风速和 TOC 的变化趋势却大致相反, 在风速最大的 2006-08-24 达到最低值 5.156 mg/L. TOC 含量变化的原因主要是不同风浪扰动下引起的底泥悬浮量不同, 相应带入水体的总有机碳含量会随风速及 SS 的变化而变化; 而水体中真溶解态有机碳(UOC)含量除了因底泥悬浮而增加之外, 还会因颗粒和胶体物质吸附以及自身的絮凝作用而降低, 而且 TOC 含量越高, 吸附作用对 UOC 含量的影响越强, 使得本研究中 UOC 的变化趋势与风速和 TOC 的变化趋势大致相反.

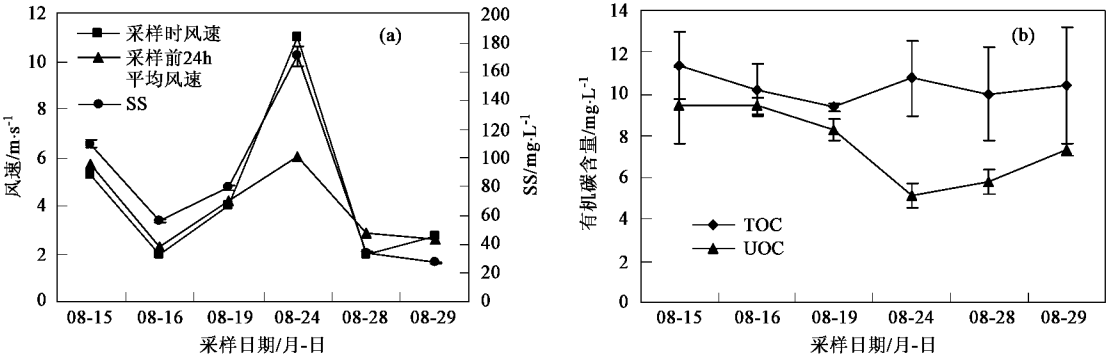


图 2 各次采样的风速、SS 和有机碳含量情况

Fig.2 Wind speed, SS and concentration of organic carbon at each sample time

2.2 水体氮、磷含量

TN 和 TP 含量变化与 SS 的变化趋势基本一致, 均是随风速的变大而升高, 随风速变小而降低(图 3), 相关分析得出 TP 与 SS 相关系数达 0.824, 呈显著正相关. 而 UDN、UDP、 NO_3^- -N 和 PO_4^{3-} -P 的变化没有显著的规律性.

2.3 水体 Chl-a、浮游植物及蓝藻含量

Chl-a 含量的变化与采样时风速却不一致, 见图 4(a). 在风速为 4 m/s 时 Chl-a 含量最高, 当风速由 5 m/s 减小到 2 m/s 时, Chl-a 含量有所降低; 当风速由 2 m/s 增大到 4 m/s 时, Chl-a 含量急剧升高; 但是当风速由 4 m/s 升高到 11 m/s 时, Chl-a 含量反而

降低. 即在风速小于 4 m/s 的情况下 Chl-a 含量随风速的增大而升高, 在风速大于 4 m/s 的情况下 Chl-a 含量随风速的增大而降低.

图 4(b)为各次采样表层水体浮游植物和蓝藻的含量变化情况. 与图 4(a)对比可知, 浮游植物密度、蓝藻密度和蓝藻生物量的变化趋势与 Chl-a 的变化基本一致, 均是在风速为 4 m/s 时最高, 在风速小于 4 m/s 时随风速变大而升高, 在风速大于 4 m/s 时随风速增大而降低. 这一结果与小水流有利于藻类生长而大水流会妨害藻类生长的研究结果一致^[26]. 其原因一方面可能是小水流改善了水体的溶解氧和营养盐条件, 有助于藻类生长繁殖; 另一方

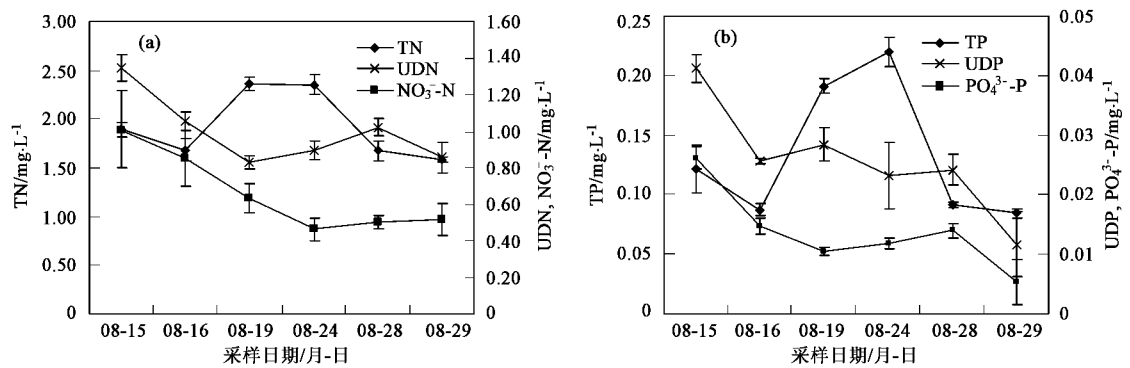


图3 各形态氮和磷含量
Fig.3 Concentration of N and P in different fractions

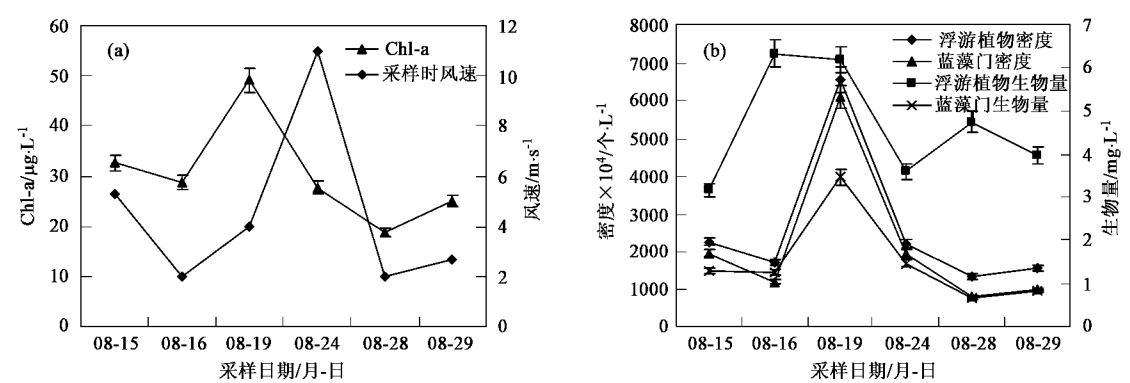


图4 采样期间 Chl-a 和浮游植物含量情况
Fig.4 Concentration of Chl-a and phytoplankton at each sampling time

面也可能是小风浪有利于蓝藻尤其是微囊藻的上浮和飘移而使其大量堆积在表层水体,使得表层水体中的叶绿素和藻含量升高,在大风浪条件下,原来飘浮于表层的藻类被卷入水体与水体混合,使得表层水体中的叶绿素和藻含量降低.

2.4 水体胶体态氮、磷、有机碳含量及蓝藻占浮游植物百分含量

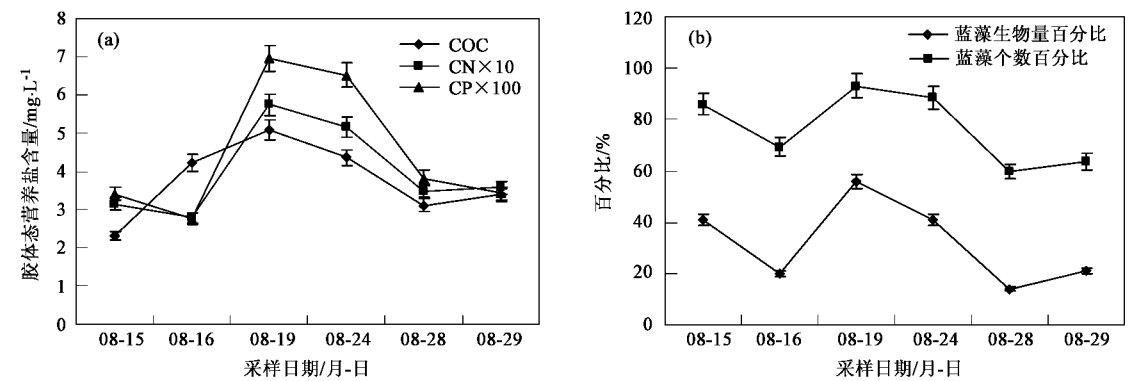


图5 采样期间胶体态营养盐含量和蓝藻占浮游植物百分含量(为便于比较,将CN和CP含量分别乘以10和100)
Fig.5 Percentage of colloidal N, P, OC in TN, TP and TOC, and percentage of cyanobacteria in total phytoplankton

降低; 计算出蓝藻个数和生物量占浮游植物总个数和生物量的百分比, 见图 5(b), 将其与胶体态碳、氮、磷含量进行对比, 发现蓝藻个数和生物量占总浮游植物的百分比与胶体氮和胶体磷的变化趋势非常一致, 说明它们之间可能存在一定联系。

2.5 讨论

湖水中的胶体物质可分为无机胶体和有机胶体 2 大类, 无机胶体的主要来源为底泥悬浮, 胶体铁和胶体锰是其主要组分, 所以通常可用胶体铁和胶体锰含量代表无机胶体含量。有机胶体的主要来源是藻类分泌物和生物碎屑, 在水华频繁暴发的夏

季, 藻类分泌物和藻类残体碎屑是有机胶体的重要来源。为了探索胶体氮、磷的主要来源, 揭示胶体物质与浮游藻类之间的相互关系, 将胶体碳、氮、磷含量和浮游藻类含量与胶体铁、锰含量^[27]做了相关分析(表 2)。由表 2 可知, 胶体氮和胶体磷显著正相关, 说明两者的来源相同; 胶体态 Mn 和 SS 呈显著正相关, 证实了胶体锰主要来自于底泥的再悬浮。但是胶体氮、磷与胶体铁、锰之间没有显著的相关性, 说明无机胶体不是决定 CN、CP 的主要因素, 可能还存在其他因素, 即胶体氮、磷的主要来源不是底泥悬浮而可能是其它来源。

表 2 胶体物质含量与浮游植物及蓝藻含量的相关性¹⁾

Table 2 Pearson correlation between concentration of colloidal elements and cyanobacteria											
	SS	COC	胶体 氮 CN	胶体 磷 CP	胶体 态 Fe	胶体 态 Mn	浮游植 物密度	浮游植物 生物量	蓝藻门 密度	蓝藻门 生物量	蓝藻生物 量百分比
SS	1										
COC	0.228	1									
胶体氮 CN	0.499	0.713	1								
胶体磷 CP	0.634	0.688	0.975 **	1							
胶体态 Fe	0.549	0.372	0.245	0.375	1						
胶体态 Mn	0.778 *	0.093	0.244	0.400	0.895 **	1					
浮游植物密度	0.244	0.653	0.771 *	0.747	0.591	0.428	1				
浮游植物生物量	-0.157	0.672	0.178	0.218	0.538	0.141	0.514	1			
蓝藻门密度	0.303	0.645	0.787 *	0.771 *	0.615	0.474	0.998 **	0.485	1		
蓝藻门生物量	0.302	0.718	0.774 *	0.748	0.636	0.460	0.985 **	0.518	0.986 **	1	
蓝藻生物量百分比	0.562	0.416	0.745	0.719	0.527	0.580	0.796 *	-0.012	0.823 *	0.834 *	1
蓝藻个数百分比	0.817 *	0.420	0.682	0.764 *	0.772 (*)	0.852 *	0.723	0.141	0.765 *	0.752	0.861 *

1) * 显著性水平为 0.05(双尾检验), ** 显著性水平为 0.01(双尾检验)

胶体氮含量与浮游植物密度、蓝藻门密度以及蓝藻门生物量呈显著正相关, 胶体磷含量与蓝藻门生物量也呈显著正相关, 说明胶体氮和胶体磷的来源与浮游植物尤其蓝藻的关系密切, 很可能由于浮游植物和蓝藻的增多引起富含氮磷的胶体分泌物和胶体碎屑相应增多, 也就是说, 藻类及其产物是胶体态氮、磷的主要来源。从另一方面来讲, 目前也有人通过研究发现水中胶体物质含量的升高可以促进藻类和细菌的生长^[17~20], 因此胶体态氮、磷的增多还有可能为浮游藻类的生长提供了充足的营养来源, 促进了浮游藻类的生长, 即胶体态氮、磷和浮游藻类之间存在一种相互促进的作用关系。

蓝藻个数占总浮游植物个数的百分比与 SS、胶体磷、胶体铁、胶体锰均呈显著正相关。证明胶体物质的增加也可能为小风浪作用下漂浮于表层水体的蓝藻提供了充足的营养补充, 在一定程度上促进了蓝藻发展成为表层水体浮游植物的优势种。

3 结论

(1)SS、TN 和 TP 含量均是随风速的变大而升高, 随风速变小而降低; CN、CP 和 COC 含量在风速为 4 m/s 时均达到最高值, 在风速小于 4 m/s 的情况下随风速的变大而升高, 而在风速大于 4 m/s 时其含量不再升高, 甚至略有降低。

(2)Chl-a、浮游植物密度、蓝藻密度和蓝藻生物量均是在风速小于 4 m/s 时随风速增大而升高, 在风速大于 4 m/s 时随风速增大却有所降低, 说明风速处于 4 m/s 以下的小风浪有利于蓝藻生长或漂浮于表层水体。而风速大于 4 m/s 的风浪对蓝藻的生长或漂浮不利。

(3)CN 与浮游植物含量和 CP 与蓝藻含量的显著相关关系表明, 在藻类生长旺盛的夏季, 太湖梅梁湾水体中胶体氮、磷的主要来源为藻类产物, 而不是底泥悬浮物。

参考文献:

[1] Granéli W. Internal phosphorus loading in Lake Ringsjön [J]. *Hydrobiologia*, 1999, **404**: 19 ~ 26.

[2] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. *湖泊科学*, 2002, **14**(3): 193 ~ 202.

[3] Steinman A, Rediske R. Internal Phosphorus loading in Spring Lake: Year 1 [R]. Report for Spring Lake-Lake Board. AWRI Publication Number: MR-2003-115.

[4] Wang H, Appan A, Gulliver J S. Modeling of phosphorus dynamics in aquatic sediments: 1 -model development[J]. *Water Research*, 2003, **37**(16): 3928 ~ 3938.

[5] McManus J, Berelson W, Coale K H. Phosphorus regeneration in continental margin sediment [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1997, **61**(14): 2891 ~ 2907.

[6] 孙小静, 朱广伟, 罗澈慈, 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)*, 2005, **35**(增刊 II): 81 ~ 89.

[7] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. 1 ~ 40.

[8] 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)*, 2005, **35**(增刊 II): 33 ~ 44.

[9] Canfield D J, Hoyer M V. The eutrophication of Lake Okeechobee [J]. *Lake and Reservoir Management*, 1988, (4): 91 ~ 99.

[10] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据[J]. *科学通报*, 2005, **50**(1): 66 ~ 71.

[11] 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[J]. *水科学进展*, 2004, **15**: 775 ~ 780.

[12] Laenen A, Le Tourneau A P. Upper Klamath Basin nutrient-load study-estimate of wind-induced resuspension of bed sediment during periods of low lake elevation [R]. Portland, Oregon, U. S. GEOLOGICAL SURVEY Open-File Report, 1996. 95 ~ 414.

[13] 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.

[14] 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[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(2): 150 ~ 153.

[15] 赵新淮, 张正斌, 刘莲生. 天然水体中的胶体粒子[J]. *黄渤海海洋*, 2001, **19**(2): 107 ~ 114.

[16] Davide V, Janusz D. The role of coarse colloids as a carrier phase for trace metals in riverine systems[J]. *Aquatic Sciences*, 2003, **65**(2): 129 ~ 142.

[17] Lars T. Effects of colloidal organic matter on the growth of bacteria and protests in lake water[J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, **39**(6): 1276 ~ 1285.

[18] 郑爱蓉, 陈敏, 吕娥, 等. 海洋胶体中的氮、磷和铁对微藻生长的效应[J]. *自然科学进展*, 2004, **14**(3): 339 ~ 343.

[19] 郑爱蓉, 陈敏, 郑雪红, 等. 海洋胶体对光合细菌生长的效应[J]. *自然科学进展*, 2002, **12**(7): 759 ~ 762.

[20] 赵新淮, 张正斌, 韩喜江. 海水胶体与 PO_4^{3-} 、 Cu^{2+} 的作用及对微藻生长的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2002, **34**(6): 776 ~ 779.

[21] 王江涛. 黄河、长江和钱塘江水体中的胶体有机碳[J]. *科学通报*, 1998, **43**(8): 840 ~ 843.

[22] 孙小静, 张战平, 朱广伟, 等. 太湖水体中胶体磷含量初探 [J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(3): 225 ~ 231.

[23] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法编委会编著. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 243 ~ 248.

[24] 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 72 ~ 79.

[25] 张战平, 孙小静, 楼章华, 等. 太湖春季水体中的胶体有机碳及其影响因素分析[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(2): 166 ~ 170.

[26] 张运林, 秦伯强, 陈伟民. 水下光场及其影响机制的水槽模拟实验研究[J]. *自然科学进展*, 2004, **14**(7): 792 ~ 798.

[27] 张战平, 朱广伟, 秦伯强, 等. 太湖水体中胶体态痕量金属含量对风浪扰动的响应[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(6): 662 ~ 666.