J. Lake Sci.(湖泊科学), 2020, **32**(6): 1848-1857
DOI 10.18307/2020.0624
© 2020 by *Journal of Lake Sciences*

太湖流域滆湖水体悬浮物分布特征及其影响因素*

吴晓东[1],王　露[1],晁建颖[2]**,廖泽勇[1],胡　垚[1],任伟祥[1],周梦蝶[1]
(1:湖北师范大学城市与环境学院,黄石 435002)
(2:生态环境部南京环境科学研究所,南京 210042)

摘　要: 基于2018－2019年的周年调查,分析了滆湖总悬浮物(TSS)的时空分布特征、组成及其季节变化规律,并探讨了水体悬浮物的影响因素及其与氮、磷的关系. 结果表明:(1)TSS浓度的年内变化范围在11.80~105.87 mg/L之间,平均浓度为41.87±18.09 mg/L. (2)滆湖水体TSS时空差异显著. 空间上呈现高速公路以南湖区(B区)大于高速公路以北湖区(A区),沿岸高于湖心区的分布趋势;季节变化整体表现为:夏季>秋季>春季>冬季,且夏季显著高于其他季节. (3)滆湖水体中无机悬浮物(ISS)和有机悬浮物所占TSS的比例差异悬殊,分别为75.5%和24.5%,A区和B区均以ISS为主. (4)线性拟合表明,TSS与颗粒态氮、总磷和颗粒态磷具有极显著正相关关系;(5)TSS与叶绿素*a*浓度相关性极显著. 综合结果分析,藻类暴发和泥沙再悬浮是影响滆湖水体悬浮物浓度的重要因素.
关键词: 滆湖;悬浮物;时空分布;影响因素

Characteristics and its influencing factors of suspended solids distribution in Lake Gehu, Taihu Basin*

WU Xiaodong[1], WANG Lu[1], CHAO Jianying[2]**, LIAO Zeyong[1], HU Yao[1], REN Weixiang[1] & ZHOU Mengdie[1]
(1: *College of Urban and Environmental Sciences, Hubei Normal University, Huangshi* 435002, *P.R.China*)
(2: *Nanjing Institute of Environmental Sciences, MEE, Nanjing* 210042, *P.R.China*)

Abstract: The spatial-temporal distribution characteristics, composition and its change rule of different seasons of total suspended solids (TSS) in Lake Gehu, were analyzed by annual investigation in 2018-2019. The key impacting factors of TSS and relationship between it and nitrogen, phosphorus were discussed. The results showed that the annual variation of TSS concentration ranged from 11.80 to 105.87 mg/L, and the average concentration was 41.87±18.09 mg/L. The temporal and spatial differences of TSS in Lake Gehu were significant. The spatial distribution trend of the lake area south of the highway (B area) was larger than that of the lake area north of the highway (A area), and the coastal area was higher than the central area. As a whole, the seasonal change was manifested as summer> autumn> spring> winter, and summer was significantly higher than other seasons. The proportions of inorganic suspended solids (ISS) and organic suspended solids (OSS) in TSS of the whole lake body were significantly different, with the value of 75.5% and 24.5%, respectively. Both area A and area B was dominated by ISS. Linear fitting showed that TSS had extremely significant positive correlation with particulate nitrogen, total phosphorus and particulate phosphorus. The correlation between TSS and chlorophyll-*a* was also significant. Based on the above analyses, algal blooms and sediment resuspension were important factors affecting the concentration of suspended solids in water.
Keywords: Lake Gehu; suspended solids; spatial-temporal distributions; influencing factors

水体悬浮物是指水体中不能透过特定规格过滤装置的固体物质,粒径一般不大于0.45 μm,主要包括由

* 2019-12-09收稿; 2020-03-22收修改稿.
国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203-004)和湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20182502)联合资助.
** 通信作者;E-mail: cjy@nies.org.

浮游动植物、微生物和有机碎屑等组成的有机物和由无机碎屑、黏土等组成的无机物[1-2]. 悬浮物是水环境监测和衡量水污染程度的关键指标,也是水域生态系统营养结构的重要体现. 悬浮物浓度变化直接影响水体透明度和进入水体的光量,决定了太阳光在水下的分布和植物的光合作用,进而影响湖泊初级生产力[3-6]. 此外,由于风的扰动作用而产生的风生流会使湖泊底部的沉积物处于再悬浮状态,这一过程不仅使水体悬浮物浓度发生变化,而且会使营养物质存在场所发生改变,增加了水体中营养盐的浓度,加剧了水体富营养化程度[7-8]. 水体中悬浮物也是各种污染物的重要载体,还能吸附和富集污染物,使水体环境发生变化而导致局部污染[9].

国内外学者对悬浮物浓度及其与环境因子的关系、遥感反演与模型估算等方面开展了大量研究. 秦蕴珊等[10]在渤海海域对海水中的悬浮物状况进行了现场调查;常秀玲等[11]通过野外调查,研究了湖北浮桥河水库悬浮物的季节变化;张海威等[12]研究了艾比湖流域地表水水体悬浮物、总氮与总磷光谱诊断及空间分布特征;刘忠华等[13]通过对生物光学模型进行合理的简化,构建了适用于太湖、巢湖水体总悬浮物浓度反演的半分析模型;周晓宇等[14]利用太湖水体原位观测数据,在对光学复杂水体进行分类的基础上,建立了水体总悬浮物浓度高光谱反演模型;乔娜等[15]利用遥感反演模型分析了水生植物对悬浮物浓度的影响,得到水生植物与其覆盖区水体总悬浮物浓度之间的定量关系,为浅水草型湖泊总悬浮物浓度遥感反演提供实用技术方法.

滆湖位于太湖流域上游,是典型浅水湖泊. 近几十年来,滆湖水质经历了 4 次较大的变化,水体中氮磷等营养盐明显增加,水体悬浮物的浓度也不断升高[16]. 近些年,通过开展控源截污、拆除围网和生态修复,滆湖水质整体上到达了Ⅳ类,但是滆湖水体悬浮物浓度仍然较高,水体感官指标没有得到明显的改善[17]. 本研究基于周年现场调查,探讨滆湖水体悬浮物的分布特征及其影响因素,以期为滆湖及长江中下游类似浅水湖泊的生态修复提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

滆湖(31°29′~31°42′N,119°44′~119°53′E),横跨江苏省常州市武进区和无锡宜兴市,位于太湖流域西部,属于太湖上游水系,是苏南地区第二大湖泊(图 1). 滆湖南北长 25 km,东西平均宽 6.6 km,水域面积为 164 km^2,底泥蓄积量约为 5400 万 m^3,底泥分布相对较浅,平均深度为 0.25 m,平均水深 1.59 m,是一个典型的浅水湖泊[18]. 滆湖沟通长江、太湖两大水体,具有蓄洪灌溉、水产养殖、水上运输和调节局部小气候等多种生态功能和生产功能[19]. 然而,随着环滆湖地区经济的发展,入湖污染物增加和围网养殖使得滆湖水体悬浮物浓度增加,水体透明度下降,沉水植被基本消亡,逐渐由浅水草型湖泊退化成为藻型湖泊,生态系统严重受损[20]. 2008 年修建的沿江高速将滆湖分为南北两个湖区,之后在湖北区开展了综合治理,包括入湖河流改道、地形改造、蓝藻打捞与水生植被恢复等措施[21]. 为了方便对比生态修复前后悬浮物浓度的变化,将滆湖分为 A 区(湖北区)和 B 区(湖南区)2 个研究区域. 根据湖域面积,在 A 区设置 6 个监测点(G1~G6),在 B 区设置了 14 个监测点(G7~G20).

1.2 样品采集和处理

全湖共设置 20 个采样点,分别于 2018－2019 年春季(4 月)、夏季(7 月)、秋季(10 月)和冬季(1 月)对滆湖水体悬浮物浓度进行调查(图 1).

用手持 GPS 定位导航,确定采样点位置. 在距水面 0.5 m 处用容积为 2 L 有机玻璃采水器采集表层水体;取 0.5 L 水样用 GF/C 微孔滤膜过滤悬浮物质;取 0.5 L 水样,用于提取和测定叶绿素 *a*(Chl.*a*)浓度;取 0.5 L 水样用于测定水体总氮(TN)、总磷(TP)、溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)等指标. 水样放置在 2~8℃保温箱中保存,并在 24 h 内进行分析测试. 水深用回声探测仪测定;采用过滤称质量法测定水体悬浮物(TSS)、有机悬浮物(OSS)和无机悬浮物(ISS)的浓度,钼锑抗分光光度法测定 TP 和 DTP 浓度,过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定 TN 和 DTN 浓度. PP=TP−DTP,PN=TN−DTN,以上指标详细方法均参考《水和废水监测分析方法(第四版)》[1].

1.3 数据处理

滆湖水体悬浮物浓度的监测数据均为实地采样分析得出. 依据经纬度数据,利用 ArcMap 10.2 作出滆湖

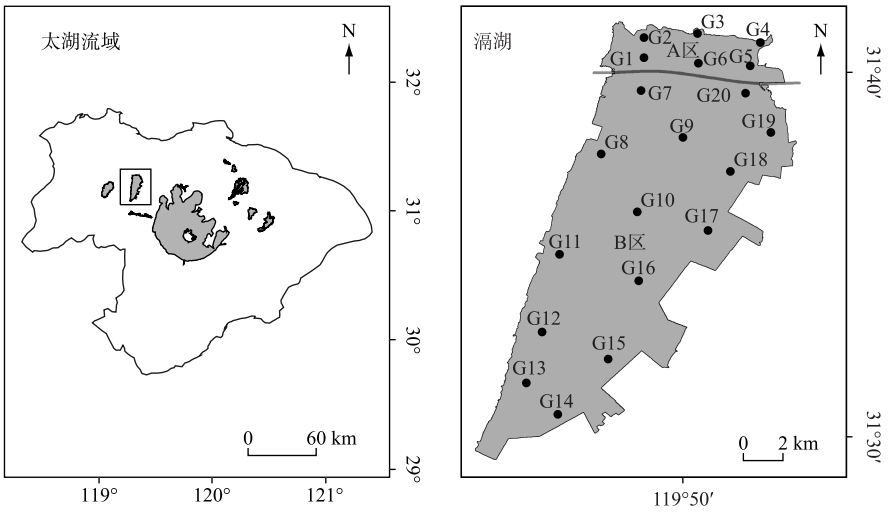


图 1 滆湖位置和采样点分布

Fig.1 Location and sampling points of Lake Guhu

采样点分布图;相关分析采用皮尔逊(Pearson)相关系数法,空间插值分析采用普通克里格插值法(Kriging).数据采用 Excel 2010、Origin 8.0 以及 SPSS 20.0 软件进行统计检验、绘图和分析.

2 结果与分析

2.1 营养盐特征

滆湖水体 TN 中,DTN 占主要部分(图 2). TN 浓度的变化范围在 1.30~4.57 mg/L 之间,平均浓度为 3.10±0.70 mg/L,季节变化趋势表现为冬季>秋季>夏季>春季;A、B 湖区 TN 平均浓度分别为 3.50±0.35、2.93±0.75 mg/L. PN 浓度变化范围在 0.09~1.73 mg/L 之间,平均浓度为 0.76±0.35 mg/L,A、B 湖区的平均浓度分别为 0.59±0.37、0.84±0.31 mg/L;全湖 PN 浓度季节变化趋势表现为春季>夏季>冬季>秋季.

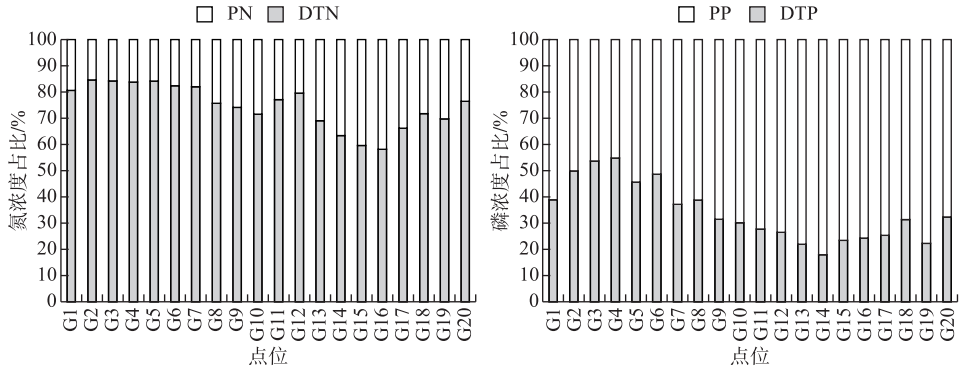


图 2 滆湖不同点位水体 DTN、PN、DTP 和 PP 分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of DTN, PN, DTP and PP in water of different sampling points in Lake Gehu

滆湖水体 TP 中,PP 占主要部分(图 2). TP 浓度的变化范围在 0.073~0.402 mg/L 之间,平均浓度为 0.172±0.052 mg/L,季节变化趋势表现为夏季>春季>冬季>秋季;A 湖区的平均浓度为 0.180±0.040 mg/L,B 湖区的平均浓度为 0.168±0.056 mg/L. PP 浓度变化范围在 0.042~0.224 mg/L 之间,平均浓度为 0.112±0.040 mg/L,A 湖区的平均浓度为 0.093±0.036 mg/L,B 湖区的平均浓度为 0.121±0.039 mg/L. 全湖 PP 浓度

季节变化趋势与 TP 一致.

2.2 Chl.*a* 浓度的季节变化特征

滆湖水体 Chl.*a* 浓度的季节变化趋势为:夏季>秋季>春季>冬季(图 3). 全湖 Chl.*a* 平均浓度为 39.57±36.32 μg/L,A 区的平均浓度为 24.52±30.95 μg/L,B 区的平均浓度为 58.51±36.54 μg/L. A 区 G5 点位 Chl.*a* 浓度较高,结合文献资料和现场观测得出,G5 点附近的 Chl.*a* 浓度较高是因为 B 湖区的藻团在夏季风的作用下经隔断堤坝中的缺口涌向 A 湖区 G5 点而形成的[22].

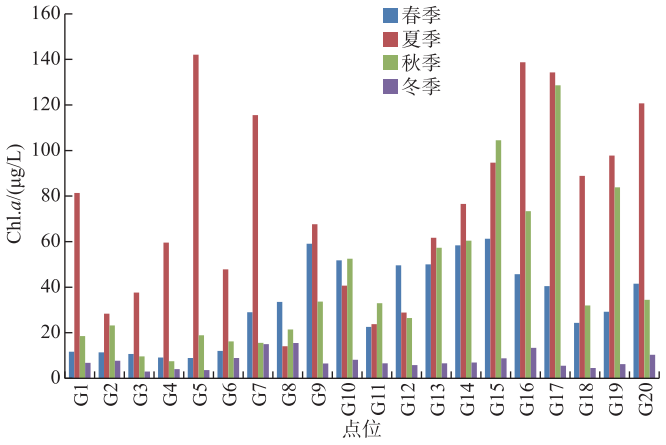


图 3 滆湖水体不同点位 Chl.*a* 浓度的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of Chl.*a* concentrations in water of different sampling points in Lake Gehu

2.3 悬浮物的季节变化特征

滆湖水体悬浮物的季节变化特征亦比较明显. 全湖 TSS 平均浓度的季节变化趋势是:夏季>秋季>春季>冬季,且夏季明显高于其他季节(图 4). 滆湖水体悬浮物春季、夏季、秋季、冬季的平均浓度分别为 36.28±13.78、61.36±20.91、40.21±9.18 和 29.62±5.82 mg/L. A 区和 B 区的 TSS 均以 ISS 为主,最高值均出现在夏季,且 ISS 和 OSS 所占的比例大致相同. A 区夏季悬浮物浓度最高为 55.60 mg/L,ISS 占 77.4%;冬季悬浮物浓度最低为 5.20 mg/L,ISS 占 75.2%. B 区夏季悬浮物浓度最高为 105.87 mg/L,ISS 占 77.3%;冬季悬浮物浓度最低为 6.67 mg/L,ISS 占 71.8%.

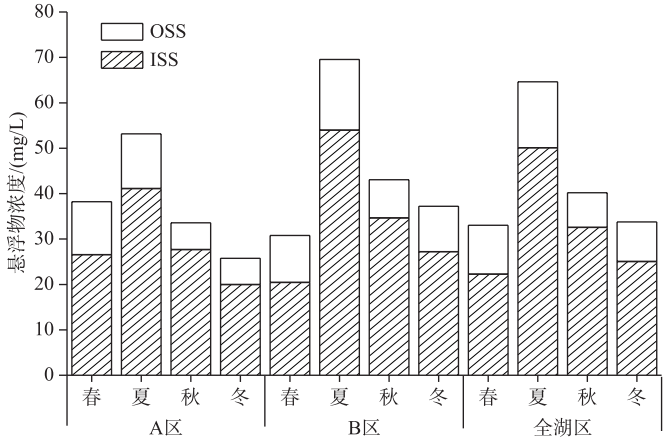


图 4 滆湖水体悬浮物浓度的季节变化

Fig.4 Seasonal variation of TSS concentration in water of Lake Gehu

2.4 悬浮物的空间变化特征

根据 2018 年 4 月至 2019 年 1 月的观测资料,各采样点悬浮物浓度的变化范围在 11.80~105.87 mg/L 之间,平均浓度为 41.87±18.09 mg/L,大致呈现出东岸大于西岸,沿岸大于湖心的趋势. A 区悬浮物平均浓度为 37.04±17.62 mg/L,B 区悬浮物平均浓度为 43.94±19.63 mg/L,呈现出 A 区小于 B 区的状况. 春季悬浮物浓度极高值出现在滆湖东南区域,极低值出现在东北和西南区域;夏季悬浮物极高值出现在湖心和东南区域,极低值出现在西南区域;秋季极高值主要出现在南部和东北区域,极低值在 A 区;冬季滆湖西部和 A 区较低,东岸浓度较高(图 5).

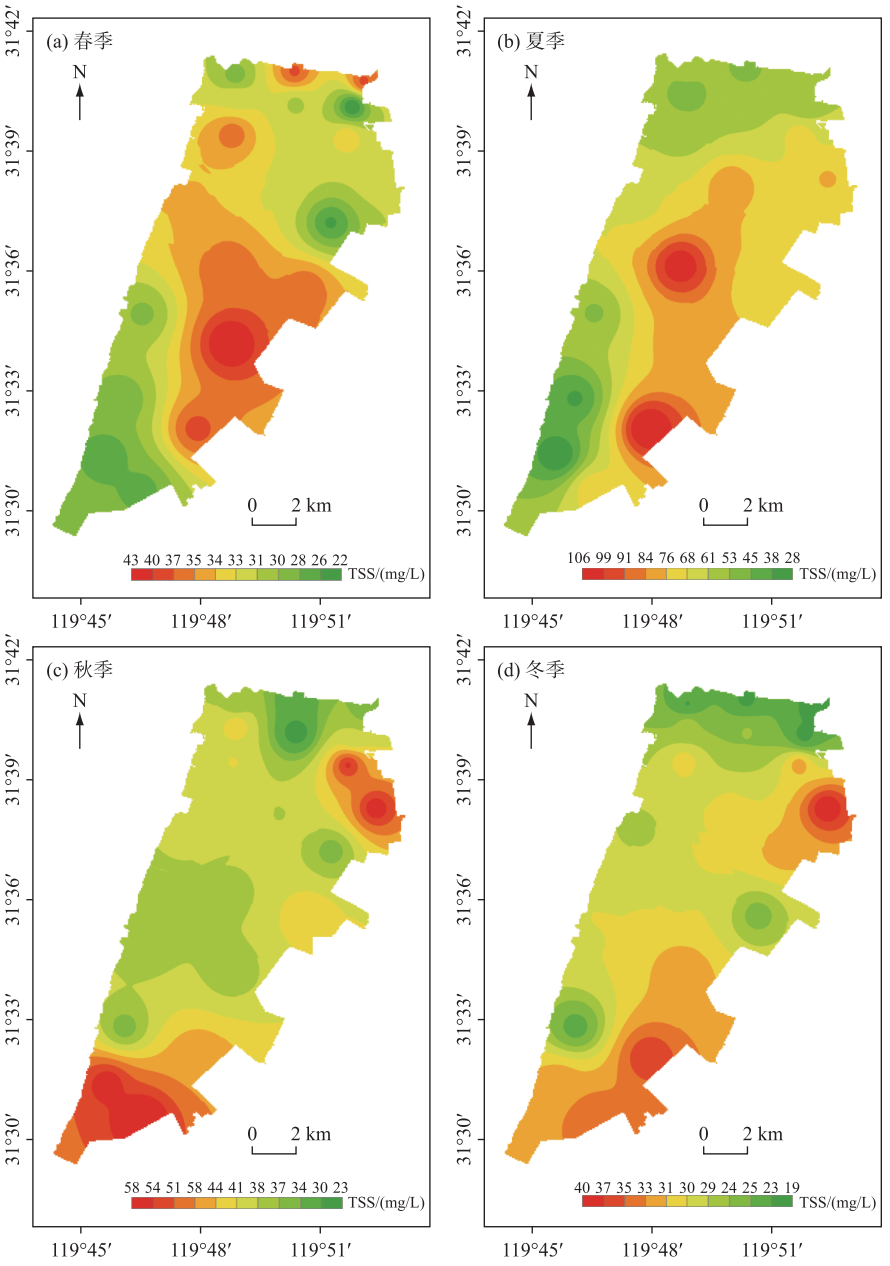


图 5 滆湖水体 TSS 在春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)的空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution of TSS in spring(a), summer(b), autumn(c) and winter(d) in water of Lake Gehu

2.5 透明度季节变化特征

滆湖水体透明度季节变化差异明显(图 6). 从季节上看,滆湖冬季透明度最高,其次为春、秋季,夏季最低(平均仅为 21.2 cm). 从空间上看,滆湖水体透明度空间差异较大. 总体上看,A 区透明度高于 B 区. A 区春、夏、秋、冬水体透明度分别是 B 区的 1.02、1.04、1.18 和 1.26 倍.

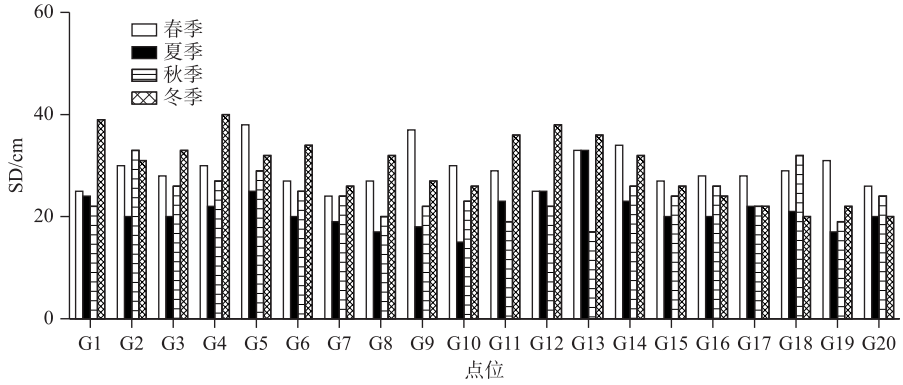


图 6 滆湖水体透明度的季节变化

Fig.6 Seasonal variation of SD in water of Lake Gehu

3 讨论

3.1 悬浮物时空分布规律

水体悬浮物浓度的季节变化规律与湖泊所处的地理位置、水深、盛行风向和风速的季节变化、水生植物的长枯以及藻类暴发的空间变化有关. 一般而言,水体悬浮物与透明度呈负相关关系. 悬浮物浓度高的点位,透明度均较低,反之亦然. 以滆湖为代表的我国长江中下游浅水湖泊,受风向和风速变化的影响,不同湖区底部沉积物再悬浮存在较大差异. 夏、秋季气温高,在东南季风的影响下,极易造成浅水区域底部沉积物的再悬浮;尤其是夏、秋季藻类的大量暴发、死亡都会增加水体悬浮物的浓度. 冬、春季节,藻类生长缓慢,水体中悬浮物浓度相对较低. 悬浮物浓度的变化还与采样的天气有关,风速大时,底部泥沙稍加扰动即会再悬浮,导致水体悬浮物浓度显著增加.

不同季节滆湖 TSS 浓度的空间分布特征不同. 春季 TSS 极高值出现在 B 区东南部,该区平均水深为 1.05 m,在风力的作用下,沉积在湖泊底部的淤泥再悬浮而出现极高值. 夏季由于藻类的大量繁殖,TSS 极高值出现在 B 区中心位置和东南部,而在 A 区和 B 区西南部 TSS 浓度相对较小. A 区悬浮物浓度低主要是由于浅坝的阻挡,吹程缩短,加上生态修复工程的开展,水生植被覆盖度增加[21]. 根据 2019 年的调查,A 区水生植被覆盖度达到 10.31%,B 区水生植被覆盖度不到 1%,两个区域差异较大. 水生植物对水体具有过滤、消浪和阻挡泥沙再悬浮的作用,削减了水体中营养盐的浓度,抑制了藻类的生长,从而有效降低了 TSS 浓度. 秋季 TSS 浓度的极高值出现在 B 区南部和东北区域,极低值出现在 A 区,悬浮物浓度略有偏高,平均浓度为 40.20 mg/L. 冬季 TSS 平均浓度在 4 个季节中最低,最高值主要出现在湖泊东岸. 其主要原因是,冬季盛行西北风,湖底沉积物在风力作用下再悬浮并被裹挟至湖泊东岸.

3.2 水体中悬浮物与氮、磷的关系

研究表明,悬浮物的总量与水体中的总磷浓度和营养水平均呈正相关,是水体富营养化程度评价中的一个重要指标[23]. 对于依据悬浮物浓度评价水体富营养化方面,目前尚未形成统一的评价标准. 有学者提出,贫营养型湖泊的悬浮物平均浓度为 1.0 mg/L(变幅为 0.02~9.17 mg/L),中营养湖泊的悬浮物平均浓度为 6.6 mg/L,富营养化湖泊的悬浮物平均浓度为 7.3 mg/L(变幅为 0.2~127.2 mg/L),高度富营养化湖泊的悬浮物平均浓度为 22 mg/L(变幅为 5~64 mg/L)[24].

由结果可知,A 湖区 PN 的平均浓度为 0.59±0.37 mg/L,B 湖区的则为 0.84±0.31 mg/L ,前者是后者的

70.23%;A、B 湖区 PP 的平均浓度分别为 0.093±0.036、0.121±0.039 mg/L,前者是后者的 76.86%. 这说明 A 区经过治理之后,PN、PP 浓度明显下降. 经线性拟合发现,TSS 与 TN 之间相关性不显著(P>0.1),与 PN、TP 和 PP 具有极显著正相关关系(P<0.01)(图 7). 相比而言,PP 与 TSS 具有更强的相关性,并且 PN 在 TN 中所占的比例比 PP 在 TP 中所占的比例要低,说明 TP 受悬浮物的影响更大. 研究表明,受风浪作用,湖泊很少处于完全静止状态,由沉积物再悬浮而释放出的营养盐很难在短时间内沉淀,会长期存在于水体中为水生植物供给营养元素. 由泥沙再悬浮作用释放出的营养盐随着扰动作用的强度而发生变化,因而,PN 与 SS 之间具有显著的正相关关系;而水体中 DTN 浓度无太大的变化,TN 与 TSS 相关性不明显. 因此,在湖泊生态修复过程中应当采取适当的措施控制水体悬浮物的浓度,减低因底泥释放而产生的营养盐[25].

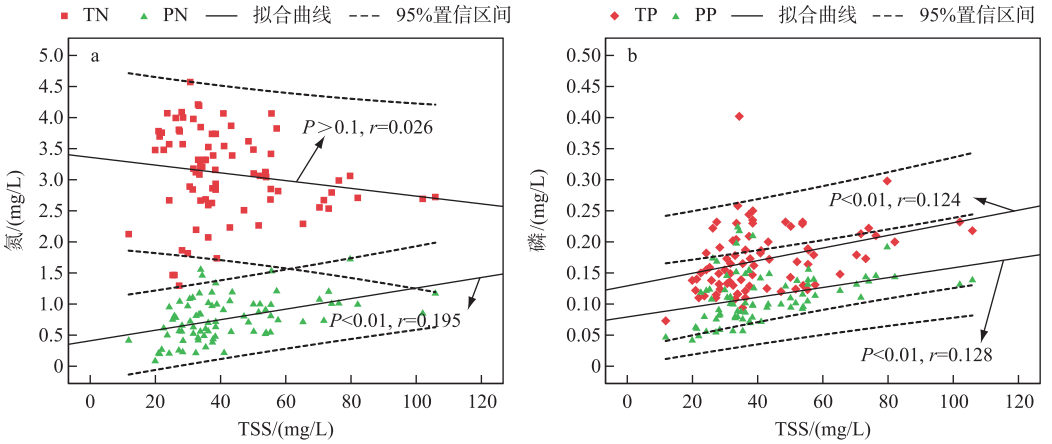


图 7 滆湖水体 TSS 与氮(a)、磷(b)的相关关系

Fig.7 Relationship between TSS and nitrogen(a), phosphorus(b) in water of Lake Gehu

3.3 水体中悬浮物的影响因素

滆湖入湖河流较多,是一个比较开放的湖泊,与外界的物质与能量交换比较频繁. 因此,滆湖水体悬浮物主要来源于河流输入的泥沙以及风力作用造成的泥沙再悬浮. 从全湖悬浮物组成来看,ISS 占 TSS 的 75.5%,OSS 占 TSS 的 24.5%,比例差别悬殊. A 区和 B 区情况相似,均以 ISS 为主且,二者相差不大. 同时,从季节变化可以看出,在 A 区,夏季 TSS 浓度占全年的 35.8%,冬季占全年的 15.7%;B 区夏季 TSS 浓度占全年的 39.6%,冬季占全年的 18.3%. 夏季,气温高藻类暴发,加之鱼类活动强,悬浮物的浓度为一年最高;冬季气温低,浮游植物生物量较少,悬浮物浓度最低.

Chl.a 与 TSS 浓度之间存在着较强相关关系(图 8a),说明滆湖仍然是一个比较典型的富营养化湖泊. 作为 OSS 重要组成成分的浮游植物对水体悬浮物有着重要的影响,从悬浮物组成状况来看,OSS 占比较小,这与太湖水体悬浮物中 OSS 占 TSS 总量的 30%大致相同[26]. 但不可忽视的是水体中 Chl.a 浓度仍然很高,部分点位甚至达到了 105.87 μg/L.

滆湖平均水深较小,仅为 1.59 m,最大水深在 A 区,为 3.3 m,B 区平均水深 1.31 m,是一个典型的浅水湖泊. 从相关性分析来看(图 8b),水深与 TSS 浓度的相关性较弱(0.05<P<0.1). 这可能与采样的深度有关,采样深度距水面 0.5 m 左右,采集的样品很难反映水中 TSS 在不同深度的分布状况与变化规律,因而表现出较弱的相关性. 水动力扰动也是影响水体悬浮物浓度的重要因素,由风力、行船等形成的紊流而造成的泥沙再悬浮是浅水湖泊沉积物的重要来源[27]. 滆湖近几十年来水质不断恶化,由浅水草型湖泊变为藻型湖泊,水生植物大量死亡加上藻类的暴发,在湖泊底部形成了一层半流动状态的淤泥,在行船、鱼类活动以及季风的影响下极易再悬浮. 由此可见,风速大小也是影响水体悬浮物浓度多少的一个重要因素,必须采取有效措施控制泥沙再悬浮以减少悬浮物浓度[28-29].

从悬浮物时间变化以及氮磷与叶绿素 a 和悬浮物的相关关系可知,若要降低滆湖水体悬浮物浓度,控

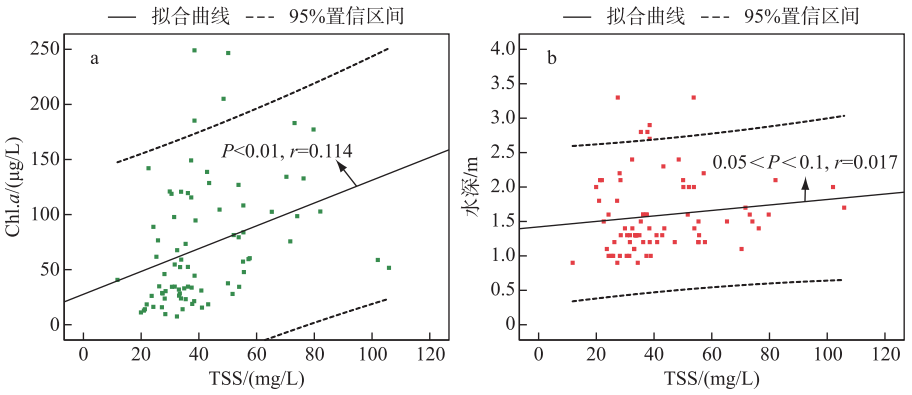


图 8 滆湖水体 TSS 与 Chl.*a* 浓度(a)、水深(b)的相关关系

Fig.8 Relationship between TSS and Chl.*a* concentration(a), water depth(b) in water of Lake Gehu

制水体营养盐浓度,需从控制浮游植物暴发,减少泥沙再悬浮和恢复水生植被等措施入手. 从悬浮物的空间分布可以看出,经过综合治理的区域悬浮物浓度相对较低,这说明水生植被的恢复对水体具有过滤、吸附和消浪作用,是影响水体悬浮物浓度以及营养盐浓度的重要因素[30-33]. 因此沉水植被恢复与重建是降低滆湖水体悬浮物浓度的重要措施.

4 结论

1)滆湖水体悬浮物浓度的变化范围在 11.80~105.87 mg/L 之间,平均浓度为 42.56 mg/L,大致呈现出东岸大于西岸,湖岸大于湖心的趋势,并且 A 区悬浮物浓度小于 B 区.

2)滆湖水体悬浮物春季、夏季、秋季和冬季的平均浓度分别为 33.01、43.73、40.20 和 29.62 mg/L,夏季显著高于其他季节.

3)滆湖水体 ISS 和 OSS 占 TSS 的比例差异较大,且 A 区和 B 区均以 ISS 为主.

4)TSS 与 PN、TP 和 PP 具有极显著正相关关系(P<0.01),藻类暴发和沉积物再悬浮是影响水体悬浮物浓度的重要因素.

5 参考文献

[1] Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China eds. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods: 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.[国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法:第 4 版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.]

[2] Zhang B, Wang S, Jiang X *et al*. Identification of WSOM fluorescence spectral components in suspended solids and correlation analysis with nitrogen forms of Lake Wuli, Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 102-111. DOI: 10.18307/2018.0110.[张博, 王书航, 姜霞等. 太湖五里湖水体悬浮物中水溶性有机质(WSOM)的荧光光谱组分鉴别及其与氮形态的关系. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 102-111.]

[3] Gao WC, Li XL, Hu CW *et al*. The spatial and temporal variations of the total suspended solids on surface water in a large reservoir of Yimeng Mountain area. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(S2): 80-87.[高炜程, 李修岭, 胡长伟等. 沂蒙山区大型水库水体悬浮物的时空变化. 环境科学与技术, 2018, **41**(S2): 80-87.]

[4] Almroth RE, Eilola K, Hordoir R. Transport of fresh and resuspended particulate organic material in the Baltic Sea—A model study. *Journal of Marine Systems*, 2011, **87**(1): 1-12.

[5] Tengberg A, Almroth E, Hall P. Resuspension and its effects on organic carbon recycling and nutrent exchange in coastal sediments: in situ measurements using new experimental technology. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2003, **285**: 119-142.

[6] Van Duin EHS, Blom G, Johannes Los F *et al*. Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth. *Hydrobiology*, 2001, **444**(1): 25-42.

[7] Morgan B, Rate AW, Burton ED. Water chemistry and nutrient release during the resuspension of FeS-rich sediments in a eutrophic estuaries system. *Science of the Total Environment*, 2012, **432**(15): 47-56.

[8] Wang PF, Zhao L, Wang C *et al*. Nitrogen distribution and potential mobility in sediments of three typical shallow urban lakes in China. *Environmental Engineering Science*, 2009, **26**(10): 1511-1521.

[9] Guo LD, Hong HS. Suspended matter in Luoyuan Bay seawater, Fujian. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1992, **23**(1): 83-89. [郭劳动, 洪华生. 福建罗源湾海水悬浮物的研究. 海洋与湖沼, 1992, **23**(1): 83-89.]

[10] Qin YS. A study on sediment and mineral compositions of the sea floor of the East China Sea. *Oceanic Selections*, 1979, **2**(2): 130-142.

[11] Chang XL, Liu JS, Hu CL *et al*. Seasonal variation of suspended solids in Fuqiaohe Reservoir, Hubei. *J Lake Sci*, 2010, **22**(2): 300-306. DOI: 10.18307/2010.0221.[常秀玲, 刘家寿, 胡传林等. 湖北浮桥河水库悬浮物的季节变化. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 300-306.]

[12] Zhang HW, Zhang F, Li Z *et al*. Spectral diagnosis and spatial distribution of SS, TN and TP in surface water in Ebinur Lake Watershed. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(6): 1042-1050. [张海威, 张飞, 李哲等. 艾比湖流域地表水水体悬浮物、总氮与总磷光谱诊断及空间分布特征. 生态环境学报, 2017, **26**(6): 1042-1050.]

[13] Liu ZH, Li YM, Tan J *et al*. Construction of semi-analytical model for inversing total suspended matter in Lake Taihu and Chaohu and assessment of its applicability. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3000-3007. [刘忠华, 李云梅, 檀静等. 太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价. 环境科学, 2012, **33**(9): 3000-3008.]

[14] Zhou XY, Sun DY, Li YM *et al*. Hyperspectral remote sensing of total suspended matter concentrations in Lake Taihu based on water optical classification. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2619-2627. [周晓宇, 孙德勇, 李云梅等. 结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度. 环境科学, 2013, **34**(7): 2619-2627.]

[15] Qiao N, Huang CP, Zhang LF *et al*. Remote sensing inversion of total suspended matter concentration in typical shallow macrophytic lake. *Journal of Hubei University*:*Natural Science*, 2016, **38**(6): 510-516. [乔娜, 黄长平, 张立福等. 典型浅水草型湖泊水体悬浮物浓度遥感反演. 湖北大学学报:自然科学版, 2016, **38**(6): 510-516.]

[16] Wu XD, Pan JZ, Li WC *et al*. Water purification effect in the eco-remediation zone in the east of the Lake Gehu. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, **29**(3): 284-289. [吴晓东, 潘继征, 李文朝等. 滆湖东岸生态修复试验区的水质净化效果. 生态与农村环境学报, 2013, **29**(3): 284-289.]

[17] Wu YB, Zheng JP. Study on measures to control pollutants into Lake Gehu. *Environmental Science and Technology*, 2010, **23**(1): 12-14. [吴云波, 郑建平. 滆湖入湖污染物控制对策研究. 环境科技, 2010, **23**(1): 12-14.]

[18] Li AQ, Song XL. Eutrophication status of Lake Gehu and comprehensive control countermeasure. *Environmental Science and Management*, 2013, **38**(8): 85-87. [李爱权, 宋晓兰. 滆湖富营养化进程及其综合整治对策研究. 环境科学与管理, 2013, **38**(8): 85-87.]

[19] Chen LJ, Peng ZR, Kong YJ *et al*. Characteristics of community structure of planktonic algae in Lake Gehu of Jiangsu Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, **27**(9): 1549-1556. [陈立婧, 彭自然, 孔优佳等. 江苏滆湖浮游藻类群落结构特征. 生态学杂志, 2008, **27**(9): 1549-1556.]

[20] Tao H, Pan JZ, Shen YL *et al*. Overview and degradation reasons of submerged macrophytes of Lake Gehu. *Environmental Science and Technology*, 2010, **23**(5): 64-68. [陶花, 潘继征, 沈耀良等. 滆湖沉水植物概况及退化原因分析. 环境科技, 2010, **23**(5): 64-68.]

[21] Wu XD, Li WC, Pan JZ *et al*. Restoration in northern Lake Gehu, a eutrophic lake in China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2017, **35**(6): 1417-1431.

[22] He SW, Li Y, Pan JZ *et al*. Optical roperties after multi-treatments in northern part of Lake Gehu, Jiangsu Province in summer. *J Lake Sci*, 2015, **27**(2): 311-318. DOI: 10.18307/2015.0216.[何尚卫, 李勇, 潘继征等. 江苏滆湖北部湖区综合整治后夏季水体光环境研究. 湖泊科学, 2015, **27**(2): 311-318.]

[23] Zhang M, Yu JL, He H *et al*. Effects of restoration on water quality of Wuli Bay, Lake Taihu. *Biological Science*, 2012, **31**(3): 240-244. [章铭, 于谨磊, 何虎等. 太湖五里湖生态修复示范区水质改善效果分析. 生态科学, 2012, **31**(3): 240-244.]

[24] Jones JR, Knowlton MF. Suspended solids in Missouri reservoirs in relation to catchment features and internal processes.

Water Research, 2005, **39**(15): 3629-3635.

[25] Wang D, Kong FX, Liu AJ *et al*. Analysis of the influence of the ecological dredging to ecosystem of Lake Wuli, Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2005, **17**(3): 263-268. DOI: 10.18307/2005.0312.[王栋, 孔繁翔, 刘爱菊等. 生态疏浚对太湖五里湖湖区生态环境的影响. 湖泊科学, 2005, **17**(3): 263-268.]

[26] Zhang YL, Qin BQ, Chen WM *et al*. A study ontotal suspended matter in Lake Taihu. *Resource 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] Wang SH, Jiang X, Wang WW *et al*. Spatial-temporal dynamic changes of the water suspended matter and its influencing factors in Lihu Lake. *China Environmental Science*, 2014, **34**(6): 1548-1555. [王书航, 姜霞, 王雯雯等. 滆湖水体悬浮物的时空变化及其影响因素. 中国环境科学, 2014, **34**(6): 1548-1555.]

[28] Mao ZG, Gu H, Lu XM *et al*. Ecological effects of dredging on aquatic ecosystem in the different regions of eastern Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2014, **26**(3): 385-392. DOI: 10.18307/2014.0308.[毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明等. 太湖东部不同类型湖区底泥疏浚的生态效应. 湖泊科学, 2014, **26**(3): 385-392.]

[29] Huang F, Li Y, Pan JZ *et al*. Restoration and purification of submerged macrophytes in eutrophic Lake Gehu during winter and spring. *Environmental Science and Technology*, 2010, **23**(4): 13-16. [黄峰, 李勇, 潘继征等. 冬春季富营养化漏湖中沉水植被重建及净化效果. 环境科技, 2010, **23**(4): 13-16.]

[30] Li WC. Multiplicity of stable states in shallow lakes and its application. *J Lake Sci*, 1997, **9**(2): 97-104. DOI: 10.18307/1997.0201.[李文朝. 浅水湖泊生态系统的多稳态理论及其应用. 湖泊科学, 1997, **9**(2): 97-104.]

[31] Li WC. Construction and purification efficiency test of an ever-green aquatic vegetation in an eutrophic lake. *China Environmental Science*, 1997, **17**(1): 55-59. [李文朝. 富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究. 中国环境科学, 1997, **17**(1): 55-59.]

[32] Cheng XY, Wang GX, Pu PM *et al*. Construction and purification of macrophytes in an eutrophic lake during winter. *J Lake Sci*, 2002, **14**(2): 139-144. DOI: 10.18307/2002.0207.[成小英, 王国祥, 濮培民等. 冬季富营养化湖泊中水生植物的恢复及净化作用. 湖泊科学, 2002, **14**(2): 139-144.]

[33] Tong CH, Yang XE, Pu PM. Purification of eutrophicated water by aquatic plant. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(8): 1447-1450. [童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 富营养化水体的水生植物净化试验研究. 应用生态学报, 2004, **15**(8): 1447-1450.]