

蠡湖水体悬浮物的时空变化及其影响因素

王书航¹, 姜霞^{1*}, 王雯雯¹, 胡佳晨^{1,2}, 张博^{1,2}, 李佳璐¹, 赵丽¹ (1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 根据 2012~2013 年的现场调查资料和历史监测资料, 分析了浅水湖泊蠡湖总悬浮物(TSS)的时空分布特征、组成、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, $\rho(\text{TSS})$ 的年内变化范围在 1.00~78.00mg/L 之间, 平均值为 17.35mg/L, 空间上呈现东蠡湖大于西蠡湖, 沿岸高于湖心区的分布趋势; 季节变化表现为秋季>夏季>春季>冬季, 且冬季显著低于其他季节; 全湖水体中 $\rho(\text{OSS})$ 和 $\rho(\text{ISS})$ 所占 $\rho(\text{TSS})$ 的比例相当, 分别为 51.52% 和 48.48%, 但组成比例空间差异较大, 东蠡湖 $\rho(\text{OSS})$ 比例较大, 而西蠡湖 $\rho(\text{ISS})$ 的比例较大。线性拟合表明, $\rho(\text{TSS})$ 与 $\rho(\text{PN})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{PP})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 均呈显著正相关 ($P < 0.01$), 浮游藻类增殖、水生植物的残体以及底泥的再悬浮是影响水体 $\rho(\text{TSS})$ 的主要因素。

关键词: 蠡湖; 悬浮物; 时空分布; 影响因素; 治理措施

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2014)06-1548-08

Spatial-temporal dynamic changes of the water suspended matter and its influencing factors in Lihu Lake. WANG Shu-hang¹, JIANG Xia^{1*}, WANG Wen-wen¹, HU Jia-chen^{1,2}, ZHANG Bo^{1,2}, LI Jia-lu¹, ZHAO Li¹ (1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Forestry Institute, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). *China Environmental Science*, 2014,34(6): 1548~1555

Abstract: The spatial-temporal distribution characteristics, composition and change rule of $\rho(\text{TSS})$ in Lihu Lake, a shallow lake, were analyzed by field survey data and historical monitoring data in 2012~2013. The key impacting factors of $\rho(\text{TSS})$ and relationship between it and nitrogen, phosphorus were discussed. Results showed that the annual $\rho(\text{TSS})$ was 1.00~78.00mg/L, with the mean value of 17.35mg/L. $\rho(\text{TSS})$ in east Lihu Lake and coastal areas was higher than that in west Lihu Lake and lake center, respectively. The seasonal characteristics of $\rho(\text{TSS})$ was autumn>summer>spring>winter, and $\rho(\text{TSS})$ in winter was significantly lower than the other seasons. $\rho(\text{OSS})$ and $\rho(\text{ISS})$ almost took the same proportion of $\rho(\text{TSS})$ in the whole lake, with the value of 51.52% and 48.48%, respectively. While significant spatial heterogeneity existed in the composition ratio. OSS was the main composition of east Lihu Lake, but the suspended matter of west Lihu Lake mainly existed in inorganic component. Results of multivariate regression analysis showed that $\rho(\text{TSS})$ was significant positive correlated with $\rho(\text{PN})$, $\rho(\text{TN})$, $\rho(\text{PP})$, and $\rho(\text{TP})$ ($P < 0.01$). Planktonic algae proliferation, residues of aquatic plants and sediment resuspension were the main factors influencing $\rho(\text{TSS})$ in water.

Key words: Lihu Lake; suspended matter; spatial-temporal distributions; influencing factor; treatment measure

水中悬浮物含量是衡量水污染程度的指标之一, 在湖泊内源释放和水环境变化中扮演重要的角色^[1-2]。研究表明, 悬浮物浓度的增加是引起湖水透明度(SD)降低和光学衰减系数增大的主要原因, 水体中悬浮物的存在, 会影响湖水水色, 增加对光辐射的衰减, 从而降低水体 SD, 进而改变水下光照强度分布, 影响湖区浮游植物光合作用及初级生产力水平^[3-5]。另外, 在一定条件下, 由

风生流引起湖泊底部沉积物的扰动使沉积物处于再悬浮状态, 这种再悬浮状态会强烈影响营养盐在沉积物-水界面间的再分配, 部分营养元素可从沉积物中向上层水体释放, 使水体营养负荷

收稿日期: 2013-09-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-013)

* 责任作者, 研究员, jiangxia@craes.org.cn

增加,加剧水体富营养化^[6-8].因此,研究水体悬浮物浓度的分布特征及其影响因素,对于提高水体 SD,改善水生态系统,控制水体富营养化具有重要的现实意义.

通过近 10 年的环境综合整治,蠡湖水体整体已经处于地表水质标准^[9]的 IV 类水平,其部分区域已经符合 III 类水质的条件,但代表感观指标的 SD 和悬浮物没有显著改善^[9-10].本研究通过现场调查和历史监测资料的分析,研究了蠡湖水体悬浮物的空间分布、季节变化以及影响因素,探讨了导致悬浮物浓度居高不下的主要原因和有效的应对措施,旨在能够为蠡湖水生态深度优化调控以及浅水湖泊富营养化防治提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

蠡湖位于太湖北部(120.22°E~120.29°E, 31.48°N~31.55°N),东西长约 6km,南北宽 0.3~1.8km,湖区面积约 8.6km²,其中水面面积 7.82km².经梁溪河闸、五里湖闸与梅梁湖相通,通过曹王泾、长广溪等分别与京杭大运河、贡湖相连接,湖周围还有一些小河及断头浜,是一个既相对独立又与太湖相通的水体(图 1).

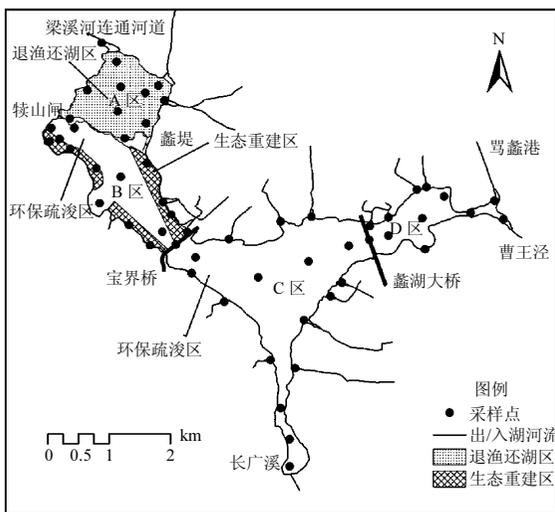


图 1 蠡湖采样点分布示意

Fig.1 Sampling points and location of Lihu Lake

为方便讨论,以蠡堤、宝界桥和蠡湖大桥为

边界将蠡湖划分为 4 个区域(图 1),分别为 A 区、B 区、C 区和 D 区,各个区域的特征见表 1.

表 1 蠡湖各区域特征统计

Table 1 Statistical characteristics of each region in Lihu Lake

区域	水深(m)			底泥厚度(m)			水面面积(km ²)
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	
A	0.6	6.2	2.51	0	1.97	0.34	1.41
B	0.7	3.4	2.18	0	2.65	0.90	1.90
C	0.6	3.9	2.24	0	2.46	0.62	3.61
D	0.4	5.0	1.77	0.1	2.51	0.69	0.89
全湖	0.6	6.2	2.22	0	2.65	0.65	7.82

注:水深及水面面积为吴淞水位3.38m的统计数据

1.2 样品采集及处理

在蠡湖及其出/入湖河口共布置 56 个采样点,分别于 2012~2013 年秋季(10 月)、冬季(1 月)、春季(4 月)和夏季(7 月)对蠡湖水体悬浮物浓度进行了调查,采样期间天气晴朗,无风或者微风,且风力无明显变化.用 GPS 进行定位导航,采样点位置见图 1.每个样点用测绳和回声测深仪测定水体深度;用多参数水质分析仪现场测定水温、pH 值和溶解氧.用容积为 2.5L 有机玻璃采水器采集表层 0.5m 水体,取 0.5L 水样用 0.45μm 微孔滤膜过滤藻类,用于提取和测定 $\rho(\text{Chl.a})$;取 0.5L 水样用 GF/C 微孔滤膜过滤悬浮物质,用于分析悬浮物.同时取 0.5L 水样用于测定水体中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{DTN})$ (DTN 为溶解性总氮)、 $\rho(\text{DTP})$ (DTP 为溶解性总磷)等水质参数.水样放入 2~8℃ 保温箱中保存,并在 48h 内进行水样分析测试.

$\rho(\text{TSS})$ (TSS 为总悬浮物)、 $\rho(\text{ISS})$ (ISS 为无机悬浮物)、 $\rho(\text{OSS})$ (OSS 为有机悬浮物)采用称重法测定^[12]; $\rho(\text{Chl.a})$ 的测定采用丙酮提取分光光度法; $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{DTN})$ 的测定采用碱性过硫酸钾氧化-分光光度法;颗粒态氮 $\rho(\text{PN})=\rho(\text{TN})-\rho(\text{DTN})$; $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{DTP})$ 测定采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法;颗粒态磷 $\rho(\text{PP})=\rho(\text{TP})-\rho(\text{DTP})$.具体分析测定方法详见《水和废水监测分析方法(第四版)》^[13]和《沉积物质量调查评估手册》^[14].

1.3 数据处理

蠡湖水体悬浮物浓度的历史数据参考了相关文献^[15-18].所有实测指标的分析均做3次平行,试验结果均以3次样品分析的平均值表示(3次分析结果的误差范围<5%),相关分析采用皮尔逊(Pearson)相关系数法,显著性检验采用独立样本 *t*

检验,空间插值采用普通克里格插值法(Kriging).试验数据采用 Excel2010、Origine8.0、Suffer10.0 以及 SPSS17.0 软件进行统计检验、绘图和分析.

2 结果及分析

2.1 悬浮物空间分布特征

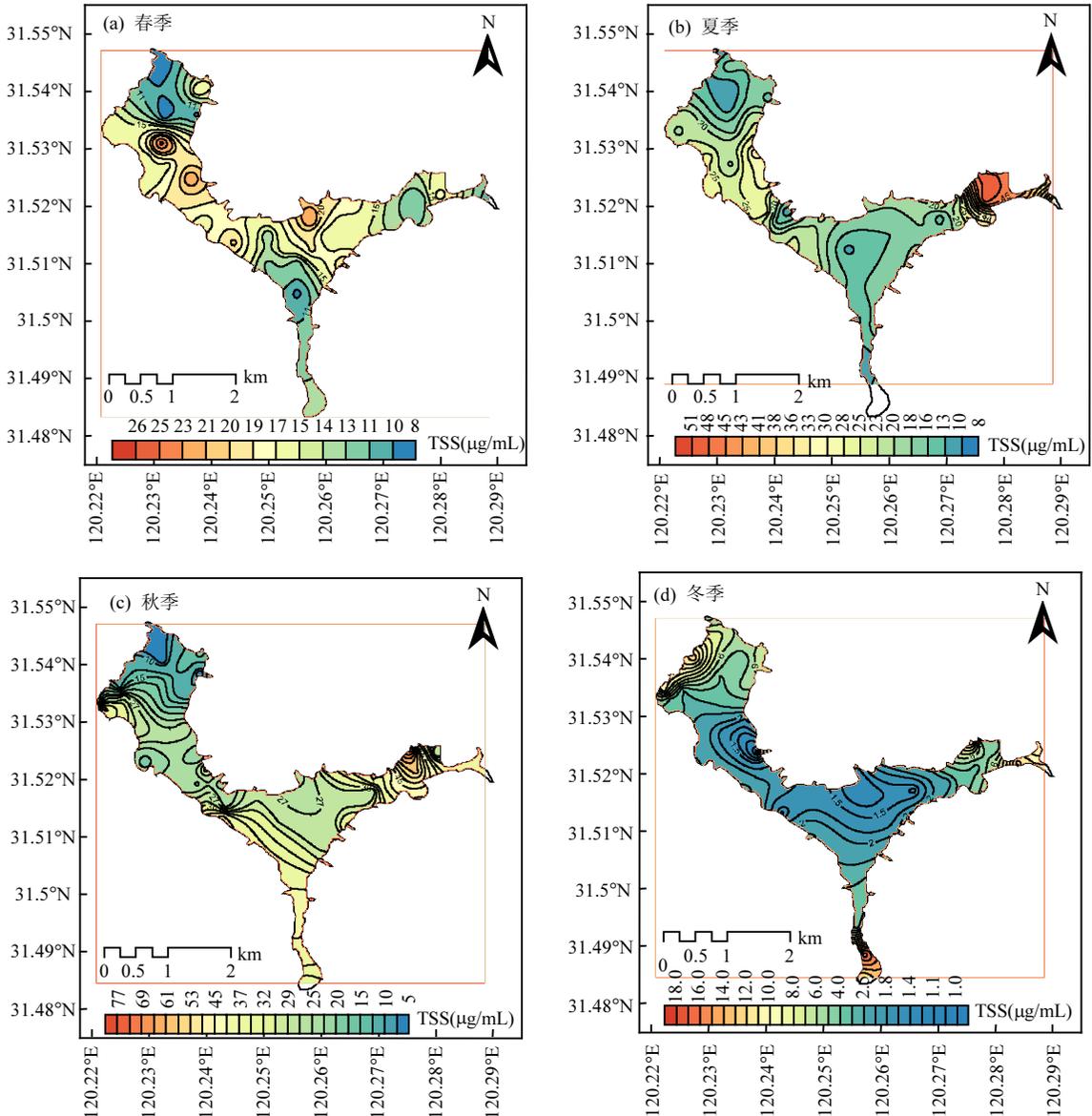


图2 蠡湖水体 ρ (TSS)在春季(a)、夏季(b)、秋季(c)和冬季(d)的空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution of ρ (TSS) in spring, summer, autumn and winter in water of Lihu Lake

根据2012年10月到2013年7月底观测资料,各采样点水体 ρ (TSS)在不同季节的变化范围

在1.00~78.00mg/L之间,平均为17.35mg/L,总体上呈现东蠡湖大于西蠡湖,沿岸区高于湖区的情况。

分布趋势,且各湖区 $\rho(\text{TSS})$ 平均值的高低顺序为 A 区 < C 区 < B 区 < D 区,见图 2.

不同季节蠡湖水体 $\rho(\text{TSS})$ 的空间分布特征也不相同.春季 $\rho(\text{TSS})$ 的低值区主要分布在蠡湖东北部已开展的生态修复工程区内(即退渔还湖的渤公岛附近区域)以及西蠡湖南部长广溪湿地内,这主要是因为在这 2 个区域内已经建立了水生植物较为完整的生态系统,水生植物对水体起着过滤、净化、消浪和抑制底泥上浮的作用,有效降低了水体中的 $\rho(\text{TSS})$,同时在春季藻类还没有大量生长,这也是水体中 $\rho(\text{TSS})$ 较低的原因之一.夏季水体 $\rho(\text{TSS})$ 高值区主要集中在蠡湖东出口区域,而在水生植物生长较好的东蠡湖以及 C 区南部长广溪湿地区域内水体 $\rho(\text{TSS})$ 相对较低,在调查时发现在东出口处的河口处均有大量的藻类生长,水质感官较为浑浊.秋季水体 $\rho(\text{TSS})$ 整体偏高,平均值达 27.76mg/L,最高值(78.00mg/L)出现在 D 区.

2.2 悬浮物的季节变化特征

蠡湖水体悬浮物浓度的季节变化较为明显,全湖 $\rho(\text{TSS})$ 平均值的季节变化的总趋势是:冬季 < 春季 < 夏季 < 秋季,且冬季显著低于其他季节 ($P < 0.01$),见图 3.

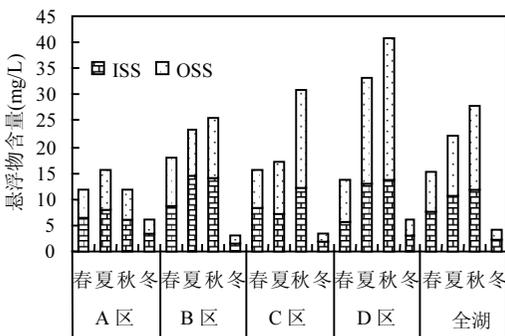


图 3 蠡湖水体悬浮物的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of SS in water of Lihu Lake

蠡湖水体 $\rho(\text{TSS})$ 在春季、夏季、秋季和冬季分别为 (15.23±4.00), (21.98±9.74), (27.76±12.20), (4.38±3.57)mg/L, 冬季水体中 $\rho(\text{TSS})$ 最低, A 区、B 区、C 区、D 区 $\rho(\text{TSS})$ 的平均值分别为 6.09, 2.92, 3.56, 6.00mg/L, 且各分区之间不存在显

著性差异.其中, $\rho(\text{OSS})$ 在春季、夏季、秋季和冬季分别为 (7.42±1.69), (11.33±6.60), (15.70±9.14), (2.10±0.74) mg/L, 占 $\rho(\text{TSS})$ 的比例分别为 49%、52%、57% 和 48%. 蠡湖水体悬浮物季节变化差异可能与蠡湖的地理位置、湖区风速的季节变化、藻类生长繁殖季节变化和沉水植物的季节性生长、死亡存在关系. 蠡湖典型的亚热带季风气候特点导致其冬季受大陆冷气团侵袭,盛行偏北风且风力较小,底泥很难悬浮;同时,冬季鱼类活动减弱,加之较低的水温致使水体中悬浮颗粒物的溶解度降低,有利于水体中的悬浮颗粒物沉积. 春、夏季,蠡湖流域盛行东南风,强度较大,湖底的底泥在风浪的扰动下极易悬浮起来,尤其是夏季,藻类大量生长繁殖也导致水体中悬浮物浓度增大. 秋季,由于浮游植物和水生植物大量死亡而产生的残体开始腐解而产生絮状悬浮物,同时由于水生植物过滤、消浪、抑制底泥上浮的作用的消失,稍大的风浪就会把底泥扰动起来,进而导致水体中的悬浮物浓度显著增加.

2.3 悬浮物的年际变化特征

1998~2012 年蠡湖水体 $\rho(\text{TSS})$ 在 17.35~38.88mg/L 之间,平均为 27.76mg/L,年际变化呈现不稳定的波动趋势,如图 4 所示.

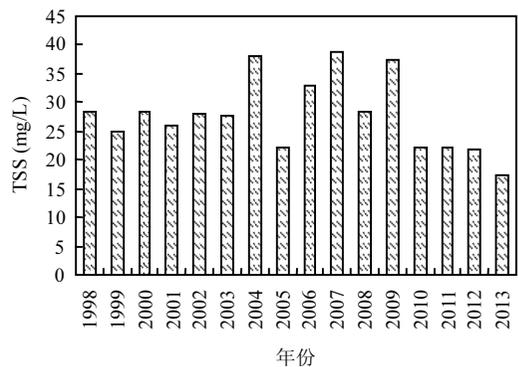


图 4 蠡湖水体 $\rho(\text{TSS})$ 的年际变化

Fig.4 Interannual variability of $\rho(\text{TSS})$ in water of Lihu Lake

20 世纪 90 年代,蠡湖水生植物几乎绝迹,生态系统由“草型清水稳态”转变为“藻型浊水稳态”,水体富营养化严重,1998~2003 年,全湖水体 $\rho(\text{TSS})$ 的平均值为 27.22mg/L. 2003 年以来,无锡

市政府开始取缔沿湖水产养殖,迁移沿湖居民,消除入湖污染源;中央和地方政府联合对蠡湖实施了“重污染水体底泥环保疏浚与生态重建工程”,包括退渔还湖、环保疏浚、植被重建以及对周边污染河道进行闸控或封堵^[11].工程实施后,蠡湖水体中氮、磷和 COD_{Mn} 等指标的浓度显著下降,但是水体 $\rho(\text{TSS})$ 并未得到有效降低,2004~2007年,全湖 $\rho(\text{TSS})$ 在 22.28~38.88mg/L 之间,平均值为 32.96mg/L,较治理之前升高了 21%,可能是因为工程实施过程中沉积物被扰动或者是漂浮植物死亡的残体产生的絮状悬浮物.2007 年以来,根据蠡湖和太湖水质状况,对蠡湖与梅梁湾及周边的一些入湖河流实施闸控,保持蠡湖常年高水位,防止周边污水流入、渗入,使得蠡湖水质得到了改善和维持,尤其 2010 年以后,夏季浮叶植物菱大量种植,加之岸边水深较浅的区域出现少量沉水植物,使得水体中 $\rho(\text{TSS})$ 有所下降,2008~2012 年平均值为 26.35mg/L.本次调查水体中 $\rho(\text{TSS})$ 仅仅达到 17.35mg/L,显著低于多年平均水平,一方面可能是蠡湖水质在逐渐变好,另外一方面还可能与本次调查采样点的设置着重关注生态修复区有关.但是同时也可以看到,夏季和秋季蠡湖水体中 $\rho(\text{TSS})$ 依然很高,部分区域(D区)水体 $\rho(\text{TSS})$ 的平均值仍然在 40mg/L 以上.因此,有必要深入探讨蠡湖水体悬浮物的影响因素,并采取有针对性的治理措施降低水体悬浮物浓度.

3 讨论

3.1 水体中悬浮物与氮、磷的关系

水体悬浮物是悬浮于水体中的浮游生物和无生命颗粒物的总称.水体的 $\rho(\text{TSS})$ 不仅与营养水平成正相关,也与水体中 $\rho(\text{TP})$ 成正相关,是反映水体营养状态的一个参考指标^[18-19].以寡营养为主的美国和阿根廷 65 个湖泊中, $\rho(\text{TSS})$ 平均仅为 1.00mg/L^[21];以富营养为类型为主的欧洲 86 个浅水湖泊, $\rho(\text{TSS})$ 平均为 7.3mg/L^[22];而丹麦 15 个高度富营养化的浅水湖泊的 $\rho(\text{TSS})$ 的平均值更高达 22mg/L^[23].本次研究中,蠡湖水体中 $\rho(\text{TSS})$ 年均值为 17.35mg/L,并且夏季和秋季 $\rho(\text{TSS})$ 基本都在 25mg/L 以上,与丹麦 15 个高度

富营养化湖泊以及杭州西湖夏季 $\rho(\text{TSS})$ (25.02mg/L)相当^[24],但夏季 $\rho(\text{TSS})$ 低于富营养化较为严重的太湖 (32.32mg/L)^[12] 和巢湖 (43.62mg/L)^[25].

本次研究中,蠡湖水体中 $\rho(\text{PN})$ 、 $\rho(\text{PP})$ 分别在 0.01~2.54mg/L 和 0.01~0.19mg/L 之间,平均值分别为 0.35,0.04mg/L,占 $\rho(\text{TN})$ 和 $\rho(\text{TP})$ 的比例分别为 22% 和 59%.通过线性方程进行拟合发现, $\rho(\text{TSS})$ 与 $\rho(\text{PN})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{PP})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 均具有显著正相关关系 ($P < 0.01$),见图 5.

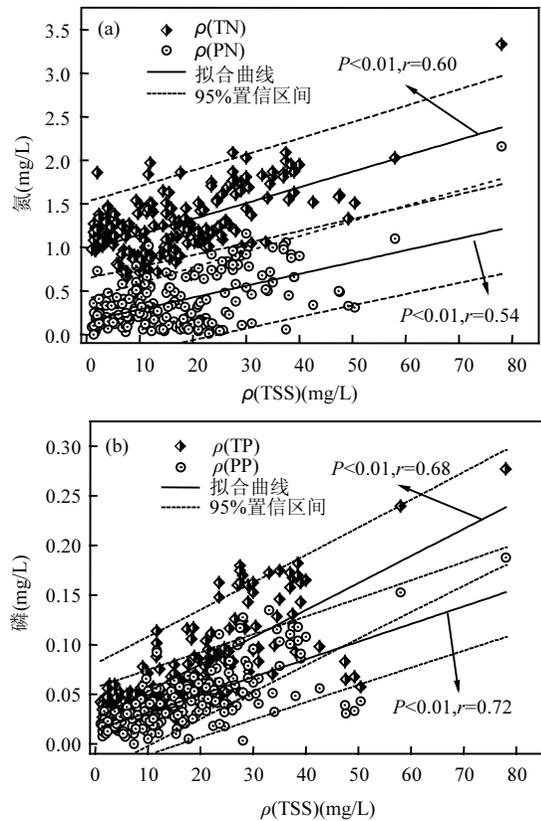


图5 蠡湖水体 $\rho(\text{TSS})$ 与氮、磷的相关关系
Fig.5 Relationship between $\rho(\text{TSS})$ and nitrogen, phosphorus in water of Lihu Lake

与 $\rho(\text{PN})$ 相比, $\rho(\text{PP})$ 与 $\rho(\text{TSS})$ 具有相对较好的相关性,结合 $\rho(\text{PN})$ 、 $\rho(\text{PP})$ 占 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 的比例,说明蠡湖目前仍处于藻型生态系统,加之风浪的扰动使得水体中的悬浮物浓度较高而 SD 较低,进而导致水体中氮、磷维持一个较高水平,尤其是总磷,受水体中悬浮物的影响更大.孙小静

等^[26]的研究结果表明,在风浪扰动作用下,由沉积物释放到水体中的氮磷营养盐会长时间停留在水体,使得水质改善非常缓慢.另外,自然湖泊,尤其是浅水湖泊,会一直受到不同程度的扰动,很少处于完全静置的理想状态,因此沉积物中的营养盐也在持续不断的通过再悬浮和扩散通量向水体中释放,为浮游植物提供源源不断的营养补给.因此,在蠡湖深度生态修复过程中应采取相应措施控制水体中悬浮物的含量.

3.2 水体中悬浮物的影响因素

水体中悬浮物的来源有外源性和内源性两种.外源性来源主要包括地表径流带入到水体的细颗粒泥沙、腐屑以及投饵网箱的残体等,内源性来源主要包括浮游生物及其死后的残体、风浪作用下底泥的再悬浮、水生植物腐烂后的残体^[24].由于蠡湖与周边河流基本上以闸控的方式隔绝,外源河流输入的颗粒物可以忽略不计,因此水体中悬浮物主要以风浪扰动引起的沉积物再悬浮物、浮游生物、水生植物腐烂后的残体为主.将悬浮物置于 550 °C 的马福炉中灼烧 6h,残留部分为无机颗粒物,主要是碎屑矿物、粘土矿物等,烧失部分为有机颗粒物,主要是浮游植物、浮游动物残体.蠡湖全湖水体中 $\rho(\text{OSS})$ 和 $\rho(\text{ISS})$ 所占 $\rho(\text{TSS})$ 的比例平均值相差不大,分别为 51.52%和 48.48%,但是悬浮物的组成在空间上存在一定的差异性,A区和B区水体中主要以ISS为主, $\rho(\text{ISS})$ 分别占 $\rho(\text{TSS})$ 的 52%和 59%;而对于污染相对严重的C区和D区,OSS占优势, $\rho(\text{OSS})$ 分别占 $\rho(\text{TSS})$ 的 53%和 60%.同时从季节性变化可以看出, $\rho(\text{OSS})$ 占 $\rho(\text{TSS})$ 的比例在秋季(57%)、夏季(52%)高于春季(49%)和冬季(48%).相关性分析表明,水体中 $\rho(\text{Chl.a})$ 与 $\rho(\text{TSS})$ 呈显著正相关(图 6a),从而印证了蠡湖仍然是一个典型的富营养化湖泊,藻类浮游植物作为 OSS 的重要组成部分,对水体悬浮物等感官指标影响较大.

从蠡湖水体中悬浮物的组成来看,有机组分和无机组分的比例几乎相当,这与太湖的情况有所不同,在太湖有机悬浮物的比例一般只能占到 30%左右^[12].可能是由于水体中有机颗粒物主要是由浮游植物和水生植物及其残体组成,虽然蠡

湖水体中藻类生物量较前几年显著下降,但仍然是典型富营养化湖泊,夏季浮游植物生长迅速,水体中 $\rho(\text{Chl.a})$ 较高,部分点位的 $\rho(\text{Chl.a})$ 仍可达到 $80\text{mg}/\text{m}^3$.而太湖湖底平坦、湖面开阔、水深较浅,悬浮物的最大值一般发生在无机泥沙较易悬浮的湖心区.

蠡湖水深较浅,平均水深仅为 2.25m(吴淞水位 3.38m 时),最大水深(6.2m)在退渔还湖区的中部,而此区域的 $\rho(\text{TSS})$ 在各个季节相对较低,基本都在 $10\text{mg}/\text{L}$ 以下(图 2),说明水深是影响蠡湖悬浮物的重要因素,但从水体 $\rho(\text{TSS})$ 与水深的相关性分析可以看出,提高水体深度并不能降低 $\rho(\text{TSS})$ (图 6b),可能是因为蠡湖水深主要集中在 1.5~3.5m 之间,此范围内水体悬浮物主要受其他因素,如风浪、藻类生物量、鱼类活动及水生植被分布的影响,而受水深的影响较小.

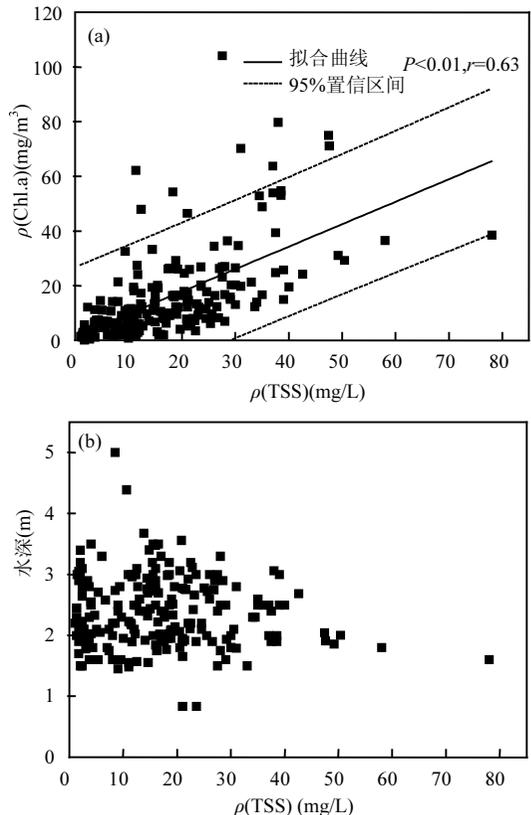


图 6 蠡湖水体 $\rho(\text{TSS})$ 与 $\rho(\text{Chl.a})$ 、水深的相关关系
Fig.6 Relationship between $\rho(\text{TSS})$ and $\rho(\text{Chl.a})$, water depth in water of Lihu Lake

水动力扰动可促使底泥再悬浮,增加水体悬浮颗粒物浓度,是浅水湖泊沉积物悬浮和营养盐释放的主要驱动力之一。蠡湖近几十年来大量沉积的死亡藻体,混合无机黏土矿物,在湖底形成一层密度很小且呈半流体状态的高有机质污泥。虽然经过疏挖,但除退渔还湖区较少外,湖底沉积物表面往往被一层污泥所覆盖。这种污泥,在风浪、鱼类、游船扰动,尤其夏季东南风的作用下,极易发生再悬浮。太湖的研究结果表明,在大风浪扰动下,太湖悬浮物含量增加近 200 倍^[27]。而 Sheng 等^[28]在浅水湖泊与海湾中的研究也发现,沉积物的悬浮主要是由于风浪的作用,其贡献可以达到 70% 以上。同时也有研究表明,浅水湖泊中 50% 以上的悬浮质是由底栖鱼类扰动产生的^[29],而减少底栖鱼类的密度可以有效降低水体中悬浮物的浓度。本次研究中,水体中 $\rho(\text{ISS})$ 占 $\rho(\text{TSS})$ 的比例为 48.48%。因此,要降低水体中的 $\rho(\text{TSS})$,应采取相应措施控制底泥的再悬浮作用。

从蠡湖水体悬浮物的空间分布、季节变化及与氮磷、叶绿素 a 的相关分析中可以看出,要改善水质、降低水体中悬浮物的含量,可从减少沉积物的再悬浮、抑制浮游藻类生长和水生植物死亡残体的打捞入手,通过循环换水或者人工湿地的方式,降低水体中的无机颗粒物及藻类颗粒物浓度,或者通过降低风浪、游船等的扰动、调整鱼类群落结构来减少沉积物的再悬浮量。同时结合悬浮物的空间分布可以看出,退渔还湖区经过综合治理后,已经出现了相当面积的沉水植物,而有沉水植物分布的区域,悬浮物含量都低于其他区域。主要因为沉水植物的出现不但可通过植株对无机悬浮颗粒物的阻挡沉降及吸附作用,减少水体的无机悬浮颗粒物,又会与浮游植物竞争营养盐和光能,因而进一步抑制藻类的生长,起到改善水质并有效降低水体中悬浮物的效果^[30-31]。因此,沉水植物的恢复与重建是蠡湖水体悬浮物控制的关键措施之一。

4 结论

4.1 蠡湖水体 $\rho(\text{TSS})$ 的变化范围在 1.00~78.00mg/L 之间,平均值为 17.35mg/L,总体上呈

现东蠡湖大于西蠡湖,沿岸区高于湖心区的分布趋势;年际上,治理前后蠡湖水体 $\rho(\text{TSS})$ 未得到有效的降低,一直维持在较高水平。

4.2 $\rho(\text{TSS})$ 在春季、夏季、秋季和冬季分别为 (15.23±4.00), (21.98±9.74), (27.76±12.20), (4.38±3.57) mg/L,冬季显著低于其他季节。

4.3 全湖 $\rho(\text{OSS})$ 和 $\rho(\text{ISS})$ 占 $\rho(\text{TSS})$ 的比例相差不大,但是在空间上存在一定的差异性,A 区和 B 区主要以 ISS 为主,C 区和 D 区主要以 OSS 为主。

4.4 水体中 $\rho(\text{TSS})$ 与 $\rho(\text{PN})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{PP})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 均具有显著正相关关系 ($P < 0.01$),可以作为判断水体营养水平的一个参考指标,且浮游藻类增殖、水生植物的残体以及底泥的再悬浮是影响水体 $\rho(\text{TSS})$ 的主要因素。

参考文献:

- [1] 秦伯强,范成新.大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模型探讨 [J]. 中国环境科学, 2002,22(2):150-153.
- [2] Tengberg A, Almroth E, Hall P. Resuspension and its effects on organic carbon recycling and nutrient exchange in coastal sediments: in situ measurements using new experimental technology [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2003,285:119-142.
- [3] Almroth-Rosell E, Eilola K, Hordoir R. Transport of fresh and resuspended particulate organic material in the Baltic Sea—a model study [J]. Journal of Marine Systems, 2011,87(1):1-12.
- [4] Van Duin E H S, Blom G, Johannes Los F, et al. Modeling underwater light climate in relation to sedimentation, resuspension, water quality and autotrophic growth [J]. Hydrobiology, 2001,444(1):25-42.
- [5] 张运林,秦伯强,朱广伟,等.长江中下游浅水湖泊沉积物再悬浮对水下光场的影响研究—以龙感湖和太湖为例 [J]. 中国科学 D 辑地球科学, 2005,35(增刊 II):101-110.
- [6] De Vicente I, Guerrero F, Jiménez-Gómez F. Settling and resuspension particles: a source or a sink of phosphate in two contrasting oligotrophic high mountain lakes? [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2010,342(1):46-52.
- [7] Morgan B, Rate A W, Burton E D. Water chemistry and nutrient release during the resuspension of FeS-rich sediments in a eutrophic estuaries system [J]. Science of the Total Environment, 2012,432(15):47-56.
- [8] 毛劲乔,陈永灿,刘昭伟,等.太湖五里湖湾富营养化进程的模型研究 [J]. 中国环境科学, 2006,26(6):672-676.
- [9] GB3838-2002 地表水环境质量标准 [S]. 北京:国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局, 2002.

- [10] 张博,李永峰,姜霞,等.环境治理工程对蠡湖水体中磷空间分布的影响[J].中国环境科学,2013,33(7):1271-1279.
- [11] 蔡琳琳,朱广伟,王永平,等.五里湖综合整治对湖水水质的影响[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(9):482-488.
- [12] 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.
- [13] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [14] 姜霞,王书航.沉积物质量调查评估手册[M].北京:科学出版社,2012.
- [15] 李英杰,年跃刚,胡社荣,等.太湖五里湖水生植物群落演替及其驱动因素[J].水资源保护,2008,24(3):11-16.
- [16] 范立民,吴伟,胡庚东,等.五里湖生态系统健康评价初探[J].中国农学通报,2012,28(2):195-199.
- [17] 孟顺龙,陈家长,范立民,等.2007年太湖五里湖浮游植物生态学特征[J].湖泊科学,2009,21(6):845-854.
- [18] 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[J].生态科学,2012,31(3):240-244.
- [19] Lindström M, Håkanson L, Abrahamsson O, et al. An empirical model for prediction of lake water suspended particulate matter[J]. Ecological Modelling, 1999,15(2):185-198.
- [20] Jones J R, Knowlton M F. Suspended solids in Missouri reservoirs in relation to catchment features and internal processes[J]. Water Research, 2005,39(15):2849-2861.
- [21] Morris D P, Zagarese H, Williamson C E, et al. The attenuation of solar UV radiation in lakes and the role of dissolved organic carbon[J]. Limnology and Oceanography, 1995,40(8):1381-1391.
- [22] Nöges P, Nöges T, Tuvikene L, et al. Factors controlling hydrochemical and trophic state variables in 86 shallow lakes in Europe[J]. Hydrobiologia, 2003,506(1):51-58.
- [23] Jeppesen E, Jemsen J P, Sondergaard M, et al. Does resuspension prevent a shift to a clear state in shallow lakes during reoligotrophication? [J]. Limnology and Oceanography, 2003, 48(5):1913-1919.
- [24] 张运林,秦伯强,朱广伟,等.杭州西湖水体光学状况及影响因子分析[J].长江流域资源与环境,2005,14(6):744-749.
- [25] 陈成.夏季巢湖总悬浮物浓度估测模型研究[D].南京:南京师范大学,2010.
- [26] 孙小静,秦伯强,朱广伟,等.持续水动力作用下湖泊底泥胶体态氮、磷的释放[J].环境科学,2007,28(6):1223-1229.
- [27] 郑超海.湖泊水体营养盐含量对沉积物再悬浮及沉降过程的响应[D].南京:河海大学,2005.
- [28] Sheng Y P, Lich W. The transport and resuspension of sediments in a shallow lake[J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(C4):1809-1826.
- [29] Meijer M L, Raat A J P, Doef R W. Restoration by biomanipulation of lake Bleiswijkse Zoom (The Netherlands): first results[J]. Hydrobiologia, 1989,23:49-57.
- [30] Xu X W, Chen C R, Wan F X, et al. Effects of aquatic plants on the feature of sediment resuspension in Lake Taihu[J]. Agricultural Science and Technology, 2012,13(1):206-210.
- [31] Liu Y C, Yu J L, Chen L, et al. Changes of submerged macrophyte community structure and water quality in the process of ecosystem restoration of a shallow eutrophic lake[J]. Ecological Science, 2008,27(5):376-379.

作者简介: 王书航(1985-),男,安徽省阜阳人,工程师,硕士,主要从事湖泊水环境治理方面的研究.发表论文 20 篇.

《中国环境科学》获评“百种中国杰出学术期刊”

《中国环境科学》2012 年被中国科学技术信息研究所评为“2011 年度百种中国杰出学术期刊”.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定的,包含总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标.