

上海骨干河湖悬浮物时空分布及感潮影响分析

刘水芹¹, 孙凤云², 季永兴³

(1. 上海市水文总站, 上海 200232; 2. 上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200233;
3. 上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200232)

摘要:为针对性地控制悬浮物及其浓度,提升水体透明度,改善水环境,基于上海骨干河湖 1985—2023 年 20 条河湖 51 个监测断面逐月悬浮物监测和历史数据,分析了上海平原感潮河湖的悬浮物空间分布和变化特征,探讨了感潮对悬浮物的影响和感潮河湖控制悬浮物的措施。结果表明:上海骨干河湖均为悬浮物高浓度水体,东部区域河湖悬浮物浓度整体高于西部,但全区域河湖悬浮物浓度总体呈下降趋势;开敞式大江大河大湖的悬浮物浓度季节性波动明显,而受控制的河湖悬浮物浓度季节性波动较小;感潮河网地区河湖的悬浮物受潮汐影响时常处于变化、输移状态,控制悬浮物需要依据悬浮物的感潮特征、输移特性及分布特征,并充分利用潮汐水动力特性,但需要考虑存在承纳水体悬浮物浓度增高的风险;建议悬浮泥沙为主的感潮河湖以减少外源输入作为控制悬浮物浓度的首要措施。

关键词:悬浮物;时空分布;感潮;河网水系;上海

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)01 - 0178 - 08

Analysis of spatiotemporal distribution of suspended solids and its tidal influence in major rivers and lakes in Shanghai//LIU Shuiqin¹, SUN Fengyun², JI Yongxing³ (1. Shanghai General Hydrology Station, Shanghai 200232, China; 2. School of Environmental and Geographical Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200233, China; 3. Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200232, China)

Abstract: In order to control suspended solids and their concentrations in a targeted manner, improve water transparency and the water environment, based on monthly suspended solids monitoring and historical data from 51 monitoring sections of 20 major rivers and lakes from 1985 to 2023 in Shanghai, the spatial distribution and variation characteristics of suspended solids in tidal rivers and lakes in Shanghai were analyzed, and the impact of tidal characteristics on suspended solids and measures to control suspended solids in tidal rivers and lakes were discussed. The results show that the major rivers and lakes in Shanghai all have high concentrations of suspended solids; the suspended solids concentration in rivers and lakes in the eastern region is generally higher than that in the western region, but the suspended solids concentration in rivers and lakes in the entire region has shown a downward trend; the seasonal fluctuation of suspended solids concentration in large open-type rivers and lakes is significant, while the seasonal fluctuation of suspended solids concentration in controlled rivers and lakes is relatively small; the suspended solids in rivers and lakes in tidal river network areas are often in a state of change and transport due to the influence of tides. To control suspended solids, it is necessary to fully rely on the tidal characteristics, transport characteristics, and distribution characteristics of suspended solids, and make full use of tidal hydrodynamic characteristics. However, it is necessary to consider the risk of increasing the concentration of suspended solids in the receiving water body. It is suggested to reduce external inputs as the primary measure for tidal rivers and lakes with suspended solids as the main component.

Key words: suspended solids; spatiotemporal distribution; tidal; river system; Shanghai

上海濒江临海、三面环水,区域内河网纵横、河湖密布,为典型的平原感潮河网地区。从 20 世纪 20 年代开始,随着工业化和城镇化的发展,上海的河湖水体逐渐受到污染^[1-2];直到 20 世纪 90 年代,

上海开启以苏州河综合整治为代表的水环境治理工程,区域水环境逐渐得到改善^[2-3];到 2023 年,全市重要的河湖监测断面水质优于Ⅲ类水的占比约为 90%。相关研究表明,影响水体清澈透明的关键因

基金项目:上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(21DZ1202600);水利部重大科技项目(SKS-2022080)
作者简介:刘水芹(1971—),女,高级工程师,博士,主要从事水质及水环境研究。E-mail:liushuiqin1@126.com
通信作者:季永兴(1970—),男,正高级工程师,博士,主要从事水利规划研究与设计。E-mail:ljiyx@sh163.net

素是水体的悬浮物(SS)及其浓度,包括悬浮泥沙、浮游植物、溶解有机物等^[4-9]。但是,不同水体悬浮物的类型及其浓度变化非常大,对水体透明度的影响程度也不尽相同,所以准确掌握河湖的悬浮物时空分布及其变化特征非常重要。杨婷等^[4-5]研究了浅水湖泊悬浮物浓度和透明度的关系,建立了悬浮物浓度和透明度的反演模型,发现浅水湖泊水体透明度与悬浮物的吸收系数呈显著负相关,且不同湖区位置的悬浮物浓度与水体透明度不同。余丽凡等^[6]研究了城市公园绿地水体透明度,认为悬浮物是相对封闭式城市水体透明度的主导影响因子,总磷和铵态氮通过控制浮游藻类的营养水平来影响水体透明度。Liao等^[7-9]研究表明,河网地区流动水体的透明度以及悬浮物浓度与水动力条件关系密切。位于感潮地区的上海河湖水体悬浮物分布既受长江口、杭州湾随潮水上溯悬浮物的影响,也受上游太湖来水悬浮物的影响,还有本地入河地表径流悬浮物的影响。因此,为有效掌握水体悬浮物的时空分布、变化特征及影响因素,有针对性地控制悬浮物及其浓度,提升水体透明度,改善水环境,本文基于上海骨干河湖历史监测数据,尤其是1985—2023年20条河湖51个监测断面每月1次的悬浮物数据,分析了上海平原感潮河湖的悬浮物空间分布和变化特征,探讨了感潮对悬浮物的影响,并提出控制感潮河湖悬浮物的措施,为提高上海河湖透明度提供决策参考。

1 资料及方法

1.1 河湖水系概况

上海市目前共有河道(湖泊)46 441条(个),河湖总面积约655.190 5 km²,河湖水面率约10.33%。根据河湖水系总体布局,全市共有黄浦江、苏州河等226条骨干河道^[10],总长约3 687 km。其中,主干河道(流域骨干河道、湖泊或区域主要引排水通道)71条,总长约1 823 km;次干河道(对主干河道在引排水、航运、生态景观等方面起重要联系作用的河道)155条,总长约1 864 km。全区域主要湖泊有51个,面积75.3 km²。其中,淀山湖面积最大,约45.2 km²(上海市域内)。全市大陆区域内以黄浦江、苏州河、蕴藻浜、淀浦河、太浦河、拦路港-泖河-斜塘、红旗塘-大蒸塘-园泄泾、胥浦塘-掘石港-大泖港、淀山湖、元荡等河道和湖泊及部分区界为界划分为11个水利片,崇明岛、长兴岛、横沙岛3个独立水系形成另外3个水利片^[10]。

1.2 数据来源及处理

为全面分析上海骨干河湖的悬浮物时空分布,

选取有长系列悬浮物监测数据的20条(个)骨干河湖的51个监测断面,涉及黄浦江、淀山湖、太浦河、拦路港-泖河-斜塘、红旗塘-大蒸塘-园泄泾、胥浦塘-掘石港-大泖港、苏州河、蕴藻浜、淀浦河、东大盈、西大盈、川杨河、大治河、金汇港、浦东运河、浦南运河、张泾河、新泾港、蒲汇塘、西泗塘等(图1)。较长河道有2个或多个监测断面。监测数据为1985—2023年每月非雨天一次,内容包括水温、pH值、盐度、氨氮、总磷、高锰酸盐指数、透明度、悬浮物、叶绿素a。



图1 上海陆域主要河湖及监测断面

Fig.1 Layout of major rivers and lakes and monitoring sections

在数据处理上,对黄浦江、苏州河等有明显上、下游特征的河流,按上、中、下游分别进行统计,其他河道采用多断面算术平均作为河道浓度。对于明显受工程影响的时段,在趋势分析时凸点数据予以剔除。个别数据缺失年份按缺失统计。

1.3 分析方法

a. 上海河湖的悬浮物空间分布。①宏观空间分布:以20条(个)骨干河湖51个监测断面为代表,统计39年悬浮物质量浓度的均值,并绘制等值云图。②不同阶段空间分布:以10年为周期,按1985—1994年、1995—2004年、2005—2024年、2015—2023年分别统计均值,并绘制等值云图。

b. 上海河湖悬浮物的年际变化。统计每条(个)河湖的悬浮物质量浓度均值后,再将39年的悬浮物质量浓度以年为单位统计均值,并绘制曲线,分析趋势变化和突变年份。根据河湖位置、感潮可能的影响及受控特征,分为黄浦江上游支流、西部郊区、中心城区、浦东片及淀山湖、黄浦江、苏州河等大江大河区域。

c. 大江大河悬浮物的季节性变化。以黄浦江、苏州河等为代表,分别统计上、下游的年度逐月悬浮物质量浓度,再考虑避开年度差异,以一定阶段统计均值。为避开三峡蓄水及“引江济太”对黄浦江、淀

山湖悬浮物浓度以及水环境治理高峰期对苏州河悬浮物浓度的影响,分别以黄浦江 1985—2002 年和 2015—2023 年、苏州河 1985—2000 年和 2015—2023 年、淀山湖 1985—2001 年和 2015—2023 年两个阶段进行对比。根据尤本胜等^[11-12]的研究,考虑到淀山湖年度悬浮物与水质的关系密切,统计了同期总磷(TP)的浓度。

2 结果与分析

2.1 悬浮物空间分布

骨干河湖 51 个监测断面 39 年数据统计均值如图 2 所示。悬浮物质量浓度总体范围为 16 ~ 819 mg/L,中位数为 58 mg/L,属浓度较高水体。以 10 年为周期统计各监测断面悬浮物质量浓度平均

值如图 3 所示,4 个阶段的均值分别为 113、79、94、58 mg/L,显示上海水体悬浮物质量浓度整体呈下降趋势。

从地理空间视角分析,东部整体高于西部。进一步分区统计分析,浦东片 39 年悬浮物质量浓度均值为 102 mg/L, 1985—1994 年、1995—2004 年、2005—2014 年、2015—2023 年 4 个阶段的均值分别为 136、91、115、63 mg/L;中心城区 39 年均值为 104 mg/L,4 个阶段的均值分别为 167、100、102、59 mg/L;西部郊区 39 年均值为 54 mg/L,4 个阶段均值分别为 42、50、61、59 mg/L。

由于黄浦江为开敞型河道,水体可以自长江口经黄浦江再经拦路港-泖河-斜塘、红旗塘-大蒸塘-圆泄泾、胥浦塘-掘石港-大泖港等上溯到太浦河、淀山湖,直至江苏、浙江境内的水系和太湖,所以统计黄浦江沿线的悬浮物质量浓度,自下而上各监测断面(吴淞口、杨浦水厂、南市水厂、长桥水厂、吴泾、松浦大桥等)均值分别为 148、98、99、86、77、65 mg/L。1985—1994 年自下而上各监测断面均值分别为 190、95、100、88、90、88 mg/L;2015—2023 年自下而上各监测断面均值分别为 70、57、56、55、54、50 mg/L。

郊区内河长期受水闸控制且较少受潮汐影响的监测断面,悬浮物质量浓度均值为 39 mg/L,4 个阶段的均值分别为 31、33、53、39 mg/L。统计Ⅳ级及以

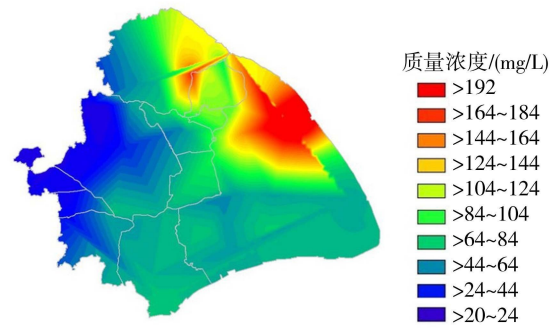


图 2 悬浮物质量浓度 1985—2023 年均值分布
Fig. 2 Average distribution of suspended solids mass concentration from 1985 to 2023

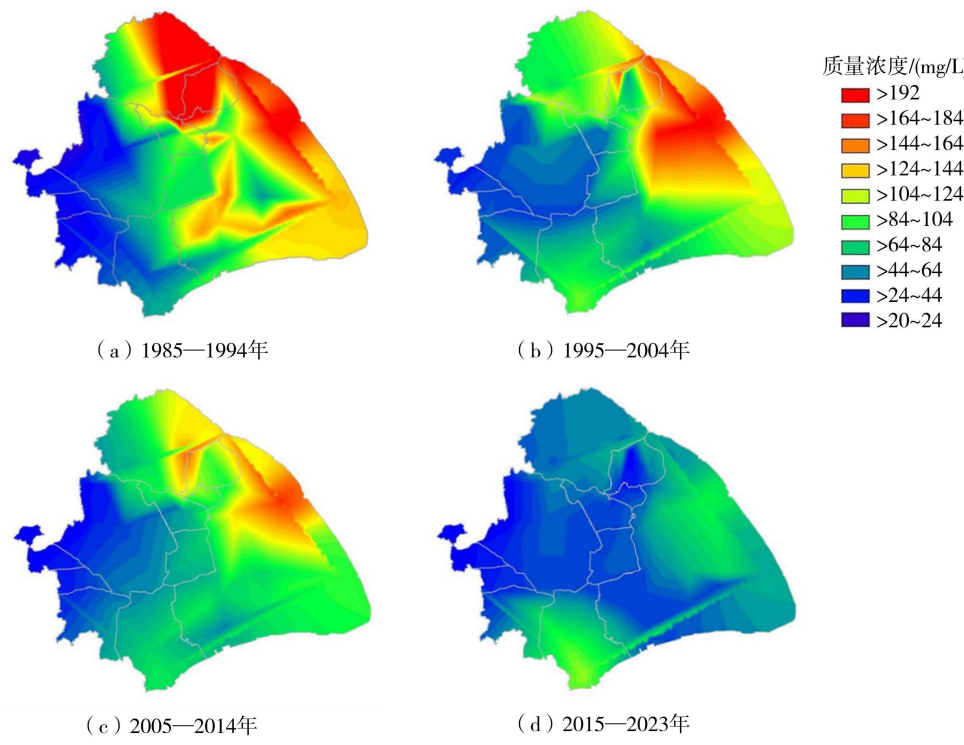


图 3 悬浮物不同阶段质量浓度均值分布
Fig. 3 Average distribution of suspended solids mass concentration at different stages

上等级内河通航河道的监测断面,悬浮物质量浓度均值为 73 mg/L,4 个阶段的均值分别为 93、68、79、57 mg/L。

2.2 悬浮物年际变化

根据悬浮物空间分布,将 20 条(个)骨干河湖 51 个监测断面按区域分类统计,其年际变化趋势见图 4(虚线为相应颜色河湖悬浮物质量浓度年际变化趋势)。

横跨沪、苏省界的淀山湖和太浦河在 2013 年前悬浮物质量浓度总体呈上升趋势,之后逐渐下降。与之相连的黄浦江上游支流,包括拦路港-泖河-斜塘、红旗塘-大蒸塘-园泄泾、胥浦塘-掘石港-大泖港,悬浮物质量浓度也在 2013 年前后总体呈上升趋势,之后逐渐下降。5 条(个)河湖总体悬浮质量浓度不高,范围为 16~130 mg/L,均值为 46 mg/L。

位于西部并与黄浦江上游支流相连的淀浦河、东大盈、西大盈和张泾河,在 1995 年前悬浮物质量浓度总体呈下降趋势,之后逐渐上升,在 2013 年前后又逐渐下降。除张泾河悬浮物质量浓度较高(范围为 18~211 mg/L,均值为 87mg/L)外,其余总体悬浮物质量浓度范围(16~90 mg/L,均值为 42 mg/L)与黄浦江上游支流的悬浮物质量浓度范围接近。

位于中心城区的新泾港、蒲汇塘、西泗塘,以及承泄中心城区北片河道排水的蕰藻浜,悬浮物质量浓度在 39 年间总体呈下降趋势。新泾港、蒲汇塘、

西泗塘的悬浮物质量浓度范围为 26~819 mg/L,均值为 78 mg/L。蕰藻浜悬浮物质量浓度偏高,范围为 28~373 mg/L,均值为 121 mg/L。

位于浦东地区的浦东运河、大治河、金汇港、浦南运河和川杨河的悬浮物质量浓度在 20 世纪 90 年代前呈突降状态,之后维持基本稳定,在 1998—2007 年逐年上升,其后逐年下降。20 世纪 90 年代后,除川杨河外,其他 4 条河道悬浮物质量浓度范围为 30~175 mg/L,均值为 74 mg/L,变幅不大。川杨河悬浮物质量浓度范围为 28~340 mg/L,均值为 139 mg/L。

黄浦江和苏州河的悬浮物质量浓度总体呈下降趋势。1985—2000 年,苏州河全河段悬浮物质量浓度均值为 136mg/L,2016 年起维持在 50mg/L 左右。按上、中、下游分别统计,20 世纪 90 年代前悬浮物质量浓度均值分别为 56、181、169 mg/L,2016 年起分别为 58、51、42 mg/L。20 世纪 90 年代前,黄浦江全河段悬浮物质量浓度年均值为 112 mg/L,2016 年起维持在 55 mg/L 左右。以吴淞口为代表的黄浦江下游,20 世纪 90 年代前悬浮物质量浓度均值为 182 mg/L,2016 年起均值为 66 mg/L。以松浦大桥为代表的黄浦江上游,20 世纪 90 年代前悬浮物质量浓度均值为 82 mg/L,2016 年起均值为 50 mg/L。

2.3 悬浮物季节变化

为分析悬浮物季节性变化,剔除工程建设对悬

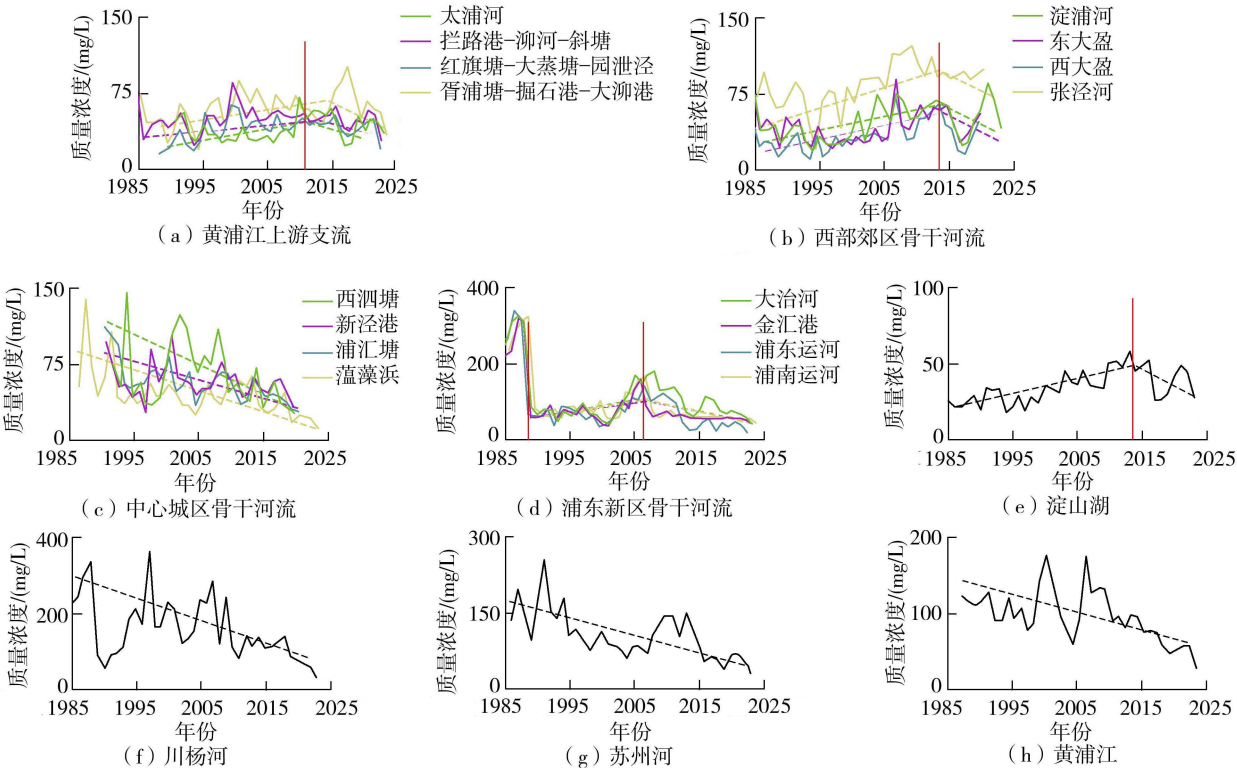


图 4 骨干河湖悬浮物年际统计分析

Fig. 4 Annual statistical analysis of suspended solids in backbone rivers and lakes

浮物的影响,黄浦江按三峡工程蓄水前(1985—2002年)和蓄水后近期(2015—2023年),苏州河选取苏州河综合整治前(1985—2000年)和整治后近年(2015—2023年),淀山湖选取“引江济太”工程实施前(1985—2001年)和近年(2015—2023年),中心城区内河以蒲汇塘为代表选取治理前(1985—1998年)和治理后近年(2015—2023年)分别统计。以月为单位计算各河湖悬浮物质量浓度均值,结果见图5。

a. 黄浦江吴淞口悬浮物质量浓度三峡工程蓄水前季节性变化非常明显,春季(3—5月)和秋季(8—10月)质量浓度均值分别达221、218 mg/L,多年平均值为178 mg/L;三峡工程蓄水后悬浮物年度季节性变化减弱,且质量浓度降低较大,春季和秋季均值分别为70、77 mg/L,多年平均值为73 mg/L。黄浦江上游松浦大桥悬浮物质量浓度在三峡工程蓄水前季节性变化较明显,春季和秋季均值分别为112、101 mg/L,多年平均值为86 mg/L;三峡工程蓄水后年度季节性变化减弱,春季和秋季均值分别为55、45 mg/L,多年平均值为51 mg/L(图5(a)(b))。

b. 苏州河下游浙江路桥在综合整治前悬浮物质量浓度冬季较大,夏季则有所下降,且月度波动较大,同时整治前悬浮物质量浓度均值(169 mg/L)远大于整治后(42 mg/L)。苏州河上游白鹤的悬浮物质量浓度在综合整治前后变化不大,且季节性也不明显,整治前均值为56 mg/L,整治后为63 mg/L(图5(c)(d))。

c. 淀山湖的悬浮物质量浓度在“引江济太”工程实施前后均呈现季节性波动,8—9月明显升高,

5月略高。为分析悬浮物质量浓度季节性变化原因,统计悬浮物分析阶段同期总磷质量浓度,发现淀山湖的悬浮物质量浓度季节性变化与湖体总磷质量浓度变化呈现较大的相关性(图5(e)(f))。

d. 位于中心城区的内河在治理前后也呈现季节性微弱变化,7—9月悬浮物质量浓度较其他月份高。

3 讨论

悬浮泥沙、浮游藻类、溶解有机物等是河湖水体悬浮物的主要物质。悬浮泥沙主要由陆源输入和河湖底泥再悬浮产生;浮游藻类生长的影响因素包括营养盐、光照、温度、水动力条件和动物捕捉等;溶解有机物由生物源蛋白质和腐殖质等物质组成,主要来自点源、面源等陆源污染输入及水体内水生生物代谢分解。位于上海感潮区域河湖水体中的悬浮物除上述因素外,潮汐动力引起的水体流动影响了其所至河湖的悬浮物分布。

3.1 感潮对悬浮物影响

1985—2023年,上海西部区域悬浮物质量浓度明显低于感潮较强的东部区域,黄浦江沿程的悬浮物质量浓度自上而下呈逐渐递增趋势,分别为65、77、86、101、98、148 mg/L。黄浦江吴淞口的监测数据显示,三峡工程蓄水前悬浮物质量浓度均值为178 mg/L,而蓄水后为126 mg/L,这与张怀静等^[13-14]对长江口悬浮物质量浓度变化的研究成果一致。

历史上的上海河网水系与长江口、杭州湾互通,随潮汐上溯的悬浮物可以影响上游河湖水系的透明度。《上海通志》^[15]关于明清时期上海水系的记载,黄浦江“虽有浑浊,不能淤也”,吴淞江“既积沙,又

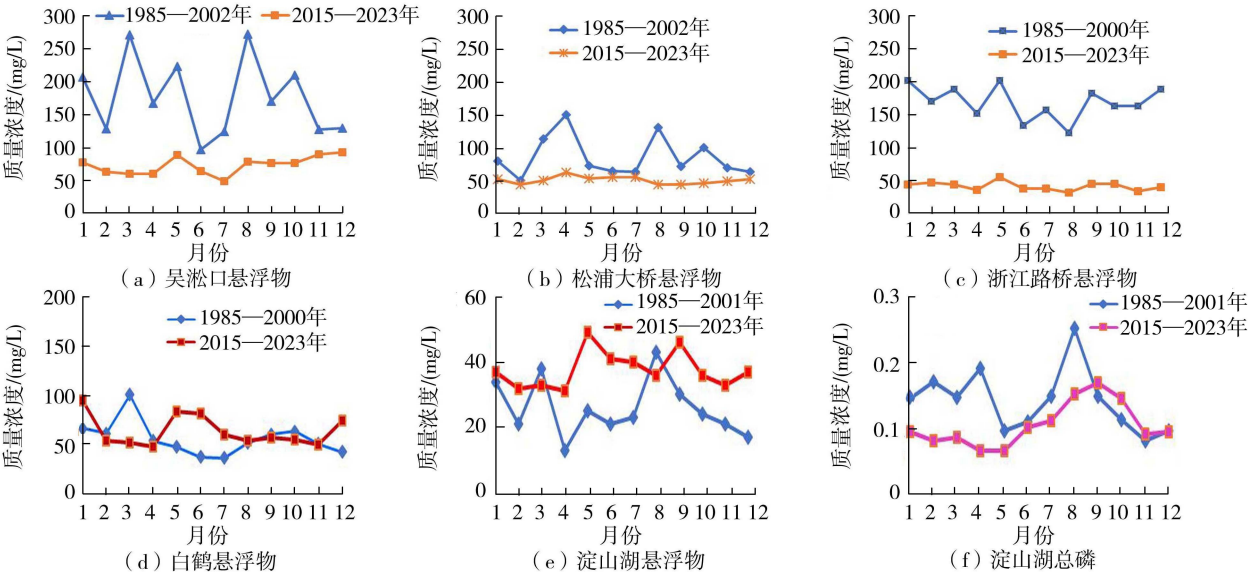


图5 典型河湖悬浮物和总磷季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of suspended solids and TP in typical rivers and lakes

阻舟”, 蓝藻浜“建石闸(清咸丰九年, 1859 年), 以拒浑潮”, 均表明历史上的上海大江大河水体较浑浊, 悬浮物浓度较大。《上海公用事业(1840—1986)》^[16]记载, 1870 年上海工部局委托卫生官英国人爱德华·亨德生对黄浦江、苏州河及附近可能水源进行监测, 淀山湖的悬浮物浓度小于 10(以 100 万份中份数表示, 即 ppm), 黄浦江上游段悬浮物浓度为 5.4~57.4, 苏州河及黄浦江中下游悬浮物浓度为 100~202.8。Yang 等^[17-18]研究成果表明, 长江口悬浮固体等污染物沿黄浦江等内河向上游输入。

我国珠江河口^[19-21]、闽江河口^[22], 以及国外巴西帕拉河(Pará River, 亚马逊河三角洲的一条水道)河口^[23]、印度恒河口^[24]等世界滨海地区的研究成果同样揭示了感潮对邻近滨海水域悬浮物浓度的影响。

3.2 感潮河湖悬浮物控制措施

对于河湖悬浮物控制与透明度的提升, 目前研究与实践项目大多采用水环境治理的思路与路径, 包括源头管控、污染拦截、水体净化等物理、化学、生物和生态等措施, 以及几种措施的综合运用。上海在浦东软件园(祖冲之园)、曹杨环浜等河湖截污控污后采取了沉水植物生态措施^[25-26]; 上海滨江森林公园采用引入清水水源和生态修复措施^[27]; 浙江嘉兴南湖提出源头管控、清水廊道构建、河口水质净化、湖体生境改善和长效管护等 5 项综合措施^[28]。对于相对封闭的水体, 如公园水体、断头河、部分湖泊等, 采取上述治理措施在治理水环境的同时也达到了控制悬浮物、提高透明度的效果。

对感潮河网地区的河湖, 悬浮物控制与透明度的提升需要充分考虑感潮河湖悬浮物分布特征、输移特性及感潮特征, 并充分利用潮汐水动力特性。1998 年开始的苏州河综合调水试验及后续实践表明, 利用苏州河水系的潮差及水闸设施调控, 可以改善苏州河水环境、降低悬浮物浓度^[3, 29]。上海进博会河网水系^[30]和苏州河古城区水系^[31]也在水环境治理的同时, 构建了水循环通道, 增加了活水畅流措施, 控制了悬浮物, 提升了透明度。另外, 上海在潮汐动力弱、引排水功能需求低的河道, 如北上海物流

园区、蟠龙古镇、上海海洋大学校园内的河段等, 在河段两端采用多道软围隔拦截悬浮物, 构建相对缓流水体, 同时采取水生态修复措施, 也取得了控制水体悬浮物和提升透明度的效果(图 6)。

无论是敞开式河道, 还是闸控的引排或通航河道, 感潮河网水系的最大特征是水体经常性受潮汐影响处于变化、输移状态, 所以对其浓度控制难度较大。从来源、状态、输移和去除方式来看, 对于以悬浮泥沙为主要悬浮物的感潮河湖, 减少外源输入是首要措施。三峡蓄水后长江来沙减少, 由吴淞口进入黄浦江的含沙量也减少, 因此随着潮汐进入上海河网水系的悬浮泥沙也相应减少。太湖开展了“引江济太”, 江苏和浙江进行了河湖治理, 因此由太湖再经太浦河、淀山湖等进入上海的悬浮物进一步减少^[32]。由于上海的河湖同时进行了治理, 因而进入其河网水系的悬浮物更少。从状态和输移来看, 细颗粒的悬浮物受感潮影响较大。若能采取缓流措施使之沉淀, 或经较大水动力使悬浮物外移, 均可降低悬浮物在该河段的浓度。所以, 通过絮凝等方式, 使悬浮物颗粒增大而沉淀, 也许是一种控制悬浮物的较好方式。许多污水处理厂污水排放口的河段河床淤积较重, 其原因主要是处理后排出的水仍有残留絮凝物质, 导致河道水体的悬浮物絮凝、沉淀。另外, 有研究^[33]表明, 通过潮汐动力使悬浮物搬移的方式可能存在风险。蓝藻浜的悬浮物浓度大于中心城区河道的一个主要原因是苏州河以北多条河道利用潮汐动力将水体经蓝藻浜向长江口排泄。

4 结 语

上海经过多年的水环境综合治理, 近年来又以“美丽乡村”“幸福河湖”和“清洁小流域”建设为抓手, 开展“滩水田林湖草荡”蓝绿空间治理, 河湖水体悬浮物得到了进一步控制。①历史记载和实测数据均表明, 黄浦江、苏州河等骨干河湖均为悬浮物高浓度水体; ②上海东部区域河湖悬浮物浓度整体高于西部, 但全区河湖悬浮物浓度总体呈下降趋势; ③中心城区及浦东区域河湖悬浮物浓度下降明显,

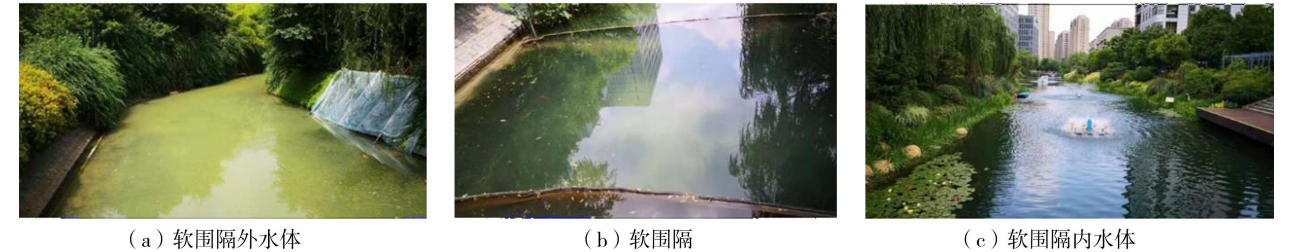


图 6 软围隔内外水体对比实景照
Fig. 6 Comparison of turbidity of water bodies inside and outside soft enclosures

西部区域在 39 年间先趋势上涨后逐渐下降;④开敞式大江大河大湖的悬浮物浓度季节性波动明显,而受控制的河湖悬浮物浓度季节性波动较小;⑤河湖悬浮物浓度在三峡工程蓄水、河道底泥疏浚等人类活动前后呈现较大变化。

感潮河网地区河湖悬浮物浓度感潮特性明显,悬浮物受潮汐影响时常处于变化、输移状态,所以要控制其浓度、提升透明度,充分考虑悬浮物感潮特征、输移特性及分布特征,并利用潮汐水动力特性。已经开展的局部河段软围隔透水阻悬的缓流控悬措施,可以提升水体的透明度;利用潮汐特性综合调水及活水畅流方式,可以起到悬浮物搬移作用,但存在承纳水体悬浮物浓度增高的风险。所以,对以悬浮泥沙为主要悬浮物的感潮河湖,减少外源输入是控制悬浮物浓度的首要措施。

参考文献:

[1] YIN Zhiyong, WALCOTT S, KAPLAN B, et al. An analysis of the relationship between spatial patterns of water quality and urban development in Shanghai, China [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2005, 29(2):197-221.

[2] YANG Hongjun, SHEN Zhemin, ZHANG Jinping, et al. Water quality characteristics along the course of the Huangpu River (China) [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(10):1193-1198.

[3] 季永兴,刘水芹. 苏州河水环境治理 20 年回顾与展望 [J]. 水资源保护, 2020, 36(1):24-29. (JI Yongxing, LIU Shuiqin. Review and prospect of Suzhou creek water environment treatment 20 years [J]. Water Resource Protection, 2020, 36(1):24-29. (in Chinese))

[4] 杨婷,张慧,王桥,等. 基于实测高光谱数据的太湖悬浮物浓度与透明度分区[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(4):21-26. (YANG Ting, ZHANG Hui, WANG Qiao, et al. Zoning of Taihu Lake by concentration of suspended substances and transparency based on measured hyper spectral data [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(4):21-26. (in Chinese))

[5] 陈俊伊,王书航,郑朔方,等. 南湖水系水体透明度时空分布、影响因素及控制对策[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(6):897-904. (CHEN Junyi, WANG Shuhang, ZHENG Shuofang, et al. Study on spatial and temporal distribution, influencing factors and control measures of water transparency of Nanhu Lake water system [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(6):897-904. (in Chinese))

[6] 余丽凡,施渺筱,达良俊,等. 上海公园绿地景观水体透明度影响因子研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2012(4):112-119. (YU Lifan, SHI Miaoxiao, DA

Liangjun, et al. Influencing factors of water transparency in landscape water bodies of parks and public green space, Shanghai [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2012(4):112-119. (in Chinese))

[7] LIAO Yipeng, LI Yun, SHU Jingxiang, et al. Water transparency prediction of plain urban river network: a case study of Yangtze River Delta in China [J]. Sustainability, 2021, 13(13):7372

[8] 耿慧,姜翠玲,吴宸晖,等. 城市水体(宁波市姚江)透明度主要影响因素研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(7):59-63. (GENG Hui, JIANG Cuiling, WU Chenhui, et al. Research on the main influencing factors of urban water transparency [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(7):59-63. (in Chinese))

[9] 朱天依,王欢,胥瑞晨. 长三角“水乡客厅”水体透明度数值模型构建[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(5):51-58. (ZHU Tianyi, WANG Huan, XU Ruichen. Numerical model of water transparency in the water village living room in Yangtze River Delta [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(5):51-58. (in Chinese))

[10] 张海燕,唐迎洲,徐贵泉,等. 上海市骨干河湖分级研究 [J]. 人民长江, 2011, 42(3):49-52. (ZHANG Haiyan, TANG Yingzhou, XU Guiquan, et al. Study on classification of key rivers and lakes in Shanghai [J]. Yangtze River, 2011, 42(3):49-52. (in Chinese))

[11] 尤本胜,马书占,古小治,等. 风浪扰动对太湖梅梁湾水体总磷变化的驱动模式研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(6):756-764. (YOU Bensheng, MA Shuzhan, GU Xiaozhi, et al. Preliminary study on the contribution model of wind wave disturbance to the variation of total phosphorus in Meiliang Bay of Taihu Lake [J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(6):756-764. (in Chinese))

[12] 果有娜,张晨. 气象因素作用下于桥水库悬浮物对总磷的影响[J]. 水资源保护, 2018, 34(6):71-75. (GUO Youna, ZHANG Chen. Effects of suspended solids on total phosphorus in Yuqiao Reservoir under meteorological conditions [J]. Water Resource Protection, 2018, 34(6):71-75. (in Chinese))

[13] 张怀静,翟世奎,范德江,等. 三峡工程一期蓄水后长江口及其邻近海域悬浮物浓度分布特征[J]. 环境科学, 2007(8):1655-1661. (ZHANG Huajing, ZHAI Shikui, FAN Dejiang, et al. Distribution of suspended matter concentration in the Changjiang Estuary and adjacent area after the first-stage storage of the Three Gorges Project [J]. Environmental Science, 2007(8):1655-1661. (in Chinese))

[14] LUO Wei, SHEN Fang, HE Qing et al. Changes in suspended sediments in the Yangtze River Estuary from

- 1984 to 2020: responses to basin and estuarine engineering constructions [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150381.
- [15]《上海通志》编纂委员会. 上海通志[M]. 上海: 上海人民出版社, 2005.
- [16] 上海市公用事业管理局. 上海公用事业: 1840—1986 [M]. 上海: 上海人民出版社, 1991.
- [17] YANG Hongjun, SHEN Zhemin, ZHANG Jinping, et al. Water quality characteristics along the course of the Huangpu River (China) [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(10): 1193-1198.
- [18] 娄全胜, 张纯超, 邓伟, 等. 基于半分析算法的海岸带和内陆水体悬浮物浓度遥感估算[J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 33-42. (LOU Quansheng, ZHANG Chunchao, DENG Wei, et al. Remote sensing estimation of suspended solids concentrations in coastal and inland waters based on quasi-analytical algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 33-42. (in Chinese))
- [19] HU Jiatang, LI Shiyu, GENG Bingxu. Modeling the mass flux budgets of water and suspended sediments for the river network and estuary in the Pearl River Delta, China [J]. *Journal of Marine Systems*. 2011, 88(2): 252-266.
- [20] WANG Chongyang, LI Weijiao, CHEN Shuisen, et al. The spatial and temporal variation of total suspended solid concentration in Pearl River Estuary during 1987-2015 based on remote sensing [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1125-1138.
- [21] 速云中, 唐世林, 史合印. 广州市河网水体总悬浮物变化的遥感分析[J]. *遥感信息*, 2020, 35(2): 65-69. (SU Yunzhong, TANG Shilin, SHI Heyin. Remote sensing analysis of total suspended matter in Guangzhou section of Pearl River [J]. *Remote Sensing Information*, 2020, 35(2): 65-69. (in Chinese))
- [22] 龚松柏, 高爱国, 林建杰, 等. 闽江下游及河口悬浮物时空分布特征及其影响因素[J]. *地球科学与环境学报*, 2017, 39(6): 826-836. (GONG Songbai, GAO Aiguo, LIN Jianjie, et al. Temporal-spatial distribution and its influencing factors of suspended particulate matters in Mingjiang lower reaches and estuary[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(6): 826-836. (in Chinese))
- [23] CARNEIRO A G, PRESTE Y O, ROLLNIC M. Estimates of suspended solid transport in the Pará River Estuary [J]. *Ocean and Coastal Research*, 2020, 68: e20281.
- [24] ROY R, NAIK R K, D' COSTA P M, et al. Nutrient cycling and seasonal dynamics of primary production in nearshore waters of east coast of India [M]//DAS S, GHOSH T. *Estuarine Biogeochemical Dynamics of the East Coast of India*. New York: Springer, 2021: 165-181.
- [25] 卢晓明, 宋英伟, 黄民生, 等. 上海城区中小河道沉水植被恢复的瓶颈问题及可行性分析[J]. *水资源保护*, 2008, 24(4): 26-30. (LU Xiaoming, SONG Yingwei, HUANG Minsheng, et al. Key problems and feasibility of submerged macrophytes restoration in medium and small rivers in Shanghai City [J]. *Water Resource Protection*, 2008, 24(4): 26-30. (in Chinese))
- [26] 李珍明, 蒋国强, 朱锡培. 上海地区黑臭河道治理技术分析[J]. *净水技术*, 2010, 29(5): 1-3. (LI Zhenming, JIANG Guoqiang, ZHU Xipei. Analysis of control and remediation technology for black and odorous rivers in Shanghai [J]. *Water Purification Technology*, 2010, 29(5): 1-3. (in Chinese))
- [27] 王旭旭. 上海滨江森林公园补水水源净化措施研究[J]. *水利规划与设计*, 2022(8): 64-66. (WANG Xuxu. Research on purification measures for water supply source of Binjiang Forest Park in Shanghai [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2022(8): 64-66. (in Chinese))
- [28] 魏志杰, 尚晓, 张彦朋, 等. 嘉兴市南湖生态环境修复工程的系统构建与效果评价[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(9): 3113-3124. (WEI Zhijie, SHANG Xiao, ZHANG Yanpeng, et al. System construction and effect evaluation of Nanhu lake ecological environment restoration project in Jiaxing, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(9): 3113-3124. (in Chinese))
- [29] XU Zuxin, LU Shiqiang. Research on hydrodynamic and water quality model for tidal river networks [J]. *Journal of Hydrodynamics (Series B)*, 2003, 15(2): 64-70.
- [30] 廖轶鹏, 周钰林, 范子武, 等. 夏季引流条件下苏州古城河网水质变化研究[J]. *水利水运工程学报*, 2019(5): 18-26. (LIAO Yipeng, ZHOU Yulin, FAN Ziwu, et al. Study on water quality changes of river work in Suzhou ancient city under summer drainage conditions [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(5): 18-26. (in Chinese))
- [31] 陈庆江, 丁瑞, 王维维. 进博会区域河网水环境提升与效果评估[J]. *水利水运工程学报*, 2020(3): 122-128. (CHEN Qingjiang, DING Rui, WANG Weiwei. Improvement and effect evaluation of river network water environment in China International Import Expo area [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(3): 122-128. (in Chinese))
- [32] 朱金格, 刘鑫, 邓建才, 等. 太湖西部环湖河道悬浮物输移速率及变化特征[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(9): 3682-3687. (ZHU Jing, LIU Xin, DENG Jiancai, et al. Suspended solids transport rate of the rivers around western Lake Taihu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(9): 3682-3687. (in Chinese))
- [33] YAO Xiaolong, ZHANG Lu, ZHANG Yunlin, et al. Water diversion projects negatively impact lake metabolism: a case study in Lake Dazong, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 613/614: 1460-1468.

(收稿日期: 2024-07-17 编辑: 胡新宇)