

上海市感潮河网水质劣化机理研究

魏祥龙^{1,2}, 陆卫安³, 唐洪武^{1,2,4}, 王玲玲^{1,2}, 羊 丹³, 陈 红^{1,2}, 袁赛瑜^{1,2},
黄 茗^{1,2}, 吕升奇^{1,2}

(1. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 上海市水利管理事务中心, 上海 200002;
4. 华南理工大学海洋科学与工程学院, 广东 广州 511442)

摘要:以典型平原河网上海市蕴南片区为例,综合运用实测数据分析、数值模拟以及现场采样测定等技术手段,开展感潮河网水质劣化机理研究。结果表明:蕴南片区河网水质时空异质性显著,非汛期水质明显优于汛期,东部和南部河道水质显著优于西部和北部;降雨致使该片区河网中NH₃-N、TP、COD 及浊度等指标严重超标,其中降雨引发的污水直排污染负荷增加是汛期水质劣化的主要成因;污水直排还造成该片区河网底泥污染严重,汛期以防洪为目标的工程调度形成了低水位-高流速的水动力格局,底泥冲刷、污染物再悬浮与持续释放,进一步加剧了汛期水质劣化;非汛期弱动力河道因换水率低、自净能力弱,叠加底泥污染物持续释放,导致水质劣化与稳定性差。

关键词:感潮河网;水污染;水动力重构;一维河网模型;上海市

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2025)05 - 0319 - 10

Study on the mechanisms of water quality deterioration in Shanghai City tidal river networks//WEI Xianglong^{1,2}, LU Weian³, TANG Hongwu^{1,2,4}, WANG Lingling^{1,2}, YANG Dan³, CHEN Hong^{1,2}, YUAN Saiyu^{1,2}, HUANG Ming^{1,2}, LYU Shengqi^{1,2} (1. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shanghai Water Conservancy Management Center, Shanghai 200002, China; 4. School of Marine Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 511442, China)

Abstract: Taking the Wunnan Area of Shanghai City, a typical plain river network, as an example, this study comprehensively adopted technical methods such as measured data analysis, numerical simulation, and on-site sampling and determination to conduct research on the mechanism of water quality deterioration in tidal-influenced river networks. The results show that: the water quality of the river network in the Wunnan Area exhibits significant spatiotemporal heterogeneity-water quality in the non-flood season is significantly better than that in the flood season, and water quality in the eastern and southern rivers is significantly superior to that in the western and northern rivers; rainfall causes severe exceedances of indicators such as NH₃-N、TP、COD, and turbidity in the regional river network, among which the increased pollution load from direct sewage discharge induced by rainfall is the primary cause of water quality deterioration in the flood season; direct sewage discharge also leads to serious sediment pollution in the regional river network; during the flood season, engineering operations aimed at flood control form a hydrodynamic pattern of low water level-high flow velocity, and sediment scouring, pollutant resuspension, and continuous release further exacerbate water quality deterioration in the flood season; in the non-flood season, low-dynamic rivers, due to low water exchange rates and weak self-purification capacity, coupled with the continuous release of pollutants from sediment, result in water quality deterioration and poor stability.

Key words: tidal river network; water pollution; hydrodynamic reconstruction; one-dimensional river network mode; Shanghai City

城市河网的水质与水环境直接影响城市景观、风貌及人民生活质量,是城市经济发展的命脉。随着城镇化进程的加快,沿海城市稠密的居住人口与发达的产业产生了较大的城市河网污染负荷。长江

基金项目:上海市“提升河湖水动力管控能力研究”揭榜挂帅项目;国家自然科学基金项目(52539005);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B250201009);流域水循环与水安全全国重点实验室项目(SK12025RCPY10);国家重点研发计划项目(2022YFC3202600)

作者简介:魏祥龙(1990—),男,副教授,博士,主要从事工程泥沙与河流治理研究。E-mail:xlw@hhu.edu.cn
通信作者:唐洪武(1966—),男,中国工程院院士,教授,博士,主要从事平原河网水动力学研究。E-mail:htwtang@hhu.edu.cn

下游感潮河网地区水系结构复杂、地势低洼,导致水环境与防洪安全矛盾突出^[1-2]。在新时期治水思路引领下,探明城市感潮河网在外源污染、水动力等多因素影响下的劣化机理,对统筹城市感潮河网水灾害防治与水环境修复治理、提升水安全保障能力、促进区域高质量发展具有重要意义。

降雨易引发市政污水溢流排放与降雨径流污染,污染物组成复杂,水体污染物浓度会短暂增加数倍至数十倍,进而导致河网水质劣化^[3-5]。其中,工业废水与生活污水溢流排放是城市感潮河网主要的有机污染源^[6];以上海市河网为代表的部分感潮河网,汛期雨后频繁出现河道黑臭现象,河道内氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总磷(TP)等指标严重超标^[7-11]。城市感潮河网水动力受潮汐影响显著、周期性强,局部河道水动力不足问题突出;汛期暴雨叠加高潮位,进一步加重了防洪与水环境的双重压力。污染物以水流为载体,其输移扩散过程与水体水动力密切相关^[12];而感潮河网中,污染物还受潮流顶托与径流的共同作用,复杂的边界条件导致污染物传播规律难以明晰^[13-14],河网水动力的影响不可忽视。此外,降雨会引发河网水污染,部分污染物可能通过沉淀或颗粒物吸附蓄积于底泥中,在适宜条件下重新释放成为二次污染源,且会与水动力作用交织,共同影响河网水质^[15-16]。降雨-水动力格局-底泥三者耦合交

织、相互作用,导致降雨影响下感潮河网水质劣化机理尚不明确。

本文以上海市蕴南片区降雨影响下的水质演变规律与劣化机理为研究对象,基于实测数据,分析片区污水溢流排放与水质特征,探明该片区河道水质的时空响应特征;构建一维感潮河网水动力模型,开展原型底泥采样与污染物测定,结合多类实测数据,多维度探讨降雨-水动力格局及底泥环境因子影响下的城市感潮河网水质劣化机理,以期为感潮河网城市黑臭水体治理及基于水动力重构技术的感潮河网水质改善提供基础支撑。

1 研究区概况

上海市蕴南片区河网由蕴藻浜、苏州河、桃浦河、黄浦江包围(图1),片区内水系复杂,可分为桃浦河水系-彭越浦水系-虹口港水系(由东茭泾、彭越浦、桃浦河、木淞港、南泗塘、西泗塘、沙泾港、俞泾浦、小吉浦和虹口港组成)、杨树浦港水系(由虬江、东走马塘和杨树浦港组成)和新江湾城水系(由经一河、经二河、经三河、纬二河、纬三河、纬四河、纬五河、纬六河等组成)。蕴南片区共有河道69条,河道总长度159.51 km,其中市管河道8条,总长110.57 km,河道面积4.3945 km²;涉及杨浦区、宝山区、虹口区、静安区和普陀区等5个行政区域;水利片外围控制性水

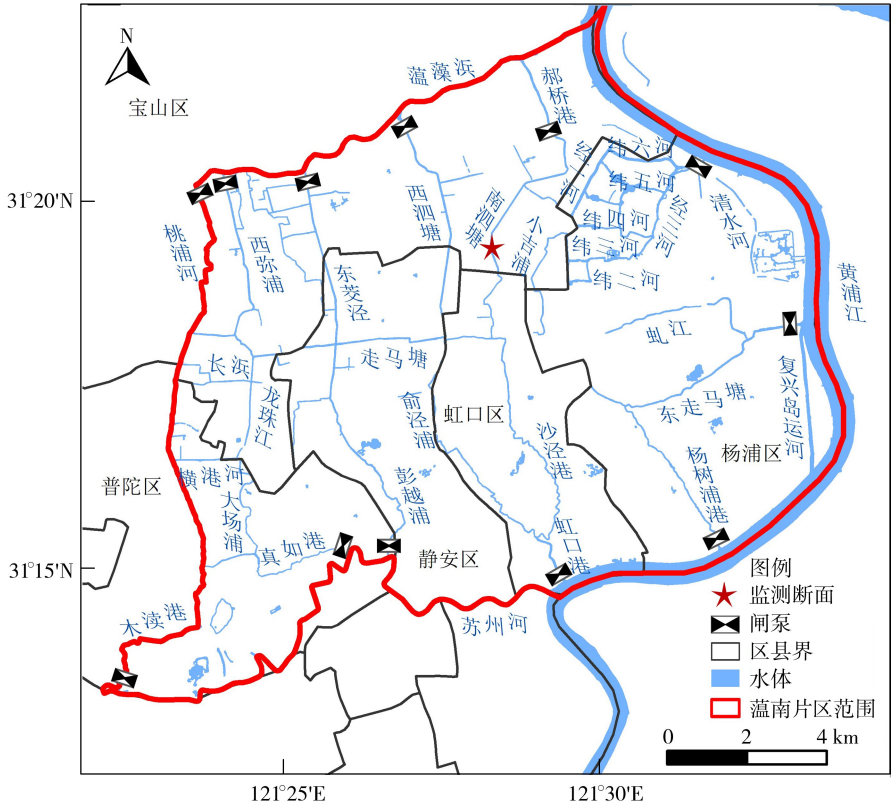


图1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

闸共有 12 座,外围泵站 11 座,市政泵站 95 座。通过外围控制性泵闸,调控片区内外引排水,以保障片区内的水安全及水环境质量。市政泵站包括雨水泵站与合流泵站,主要功能为调控雨水及城市污水排放;汛期降雨影响下雨水泵站与合流泵站均会往河道内直排生活污水,造成水质劣化,导致汛期 I ~ III 类水质断面占比低于 50%。

2 研究方法

2.1 基础数据来源

本文采用的基础资料为模型构建所需的数据,均由研究区域相关管理部门提供:①水文数据,2021 年 1 月至 2024 年 7 月蒹南片区内各水位站、口门闸泵的实测水位数据,以及模型边界控制站点米市渡、吴淞口、黄渡站和淀西闸的实测水位数据,数据测量间隔为 5 min;②地形数据,采用 2017 年实测成果,断面测量间隔为 50~100 m;③水利工程与调度数据,包括片区内完整的水利工程参数与调度规则,如工程设计尺寸、底标高、设计流量,以及与调度相关的闸门启闭、闸门开度时间和泵站抽排流量等信息;④水质数据,2021 年 1 月至 2024 年 7 月蒹南片区 96 个水质监测断面的月度监测数据;⑤泵站污水排放量统计数据,2021 年 1 月至 2024 年 7 月片区内 95 个泵站的污水排放总量、时长及污染物含量等数据;⑥降雨数据,为 2021—2024 年研究片区日降水记录。

2.2 感潮河网水质水动力模型

采用一维水动力模型模拟蒹南片区的河网水动力,水动力模拟控制方程为圣维南方程组。

模拟范围覆盖蒹南片区镇级及以上河道、各边界河流,河网水质水动力模型的边界控制点设置为米市渡、吴淞口、黄渡站和淀西闸,采用水位站的实时水位数据进行驱动计算,模拟时间范围为 2021 年 1 月 1 日至 2024 年 6 月 28 日。模型采用 2021 年 1 月的实测数据进行参数率定,时间步长设为 1 min。经现场考察和反复验证,确定河道糙率范围为 0.028~0.034。采用 2022 年 1 月实测数据对率定后的模型开展进一步验证,结果显示,模拟值误差小于 0.2 m 的合格率达 86%~98%,确定性系数为 0.92~0.96;部分水位站水位验证结果如图 2 所示。验证结果表明,模型精度符合要求,可用于本文水动力模拟与研究。

2.3 底泥采样与物质含量测定

为探明蒹南片区污水直排对河道底泥中总氮(TN)与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的影响,选取 11 个采样点,包括边界河道、口门区及河道上下游等典型区域,在

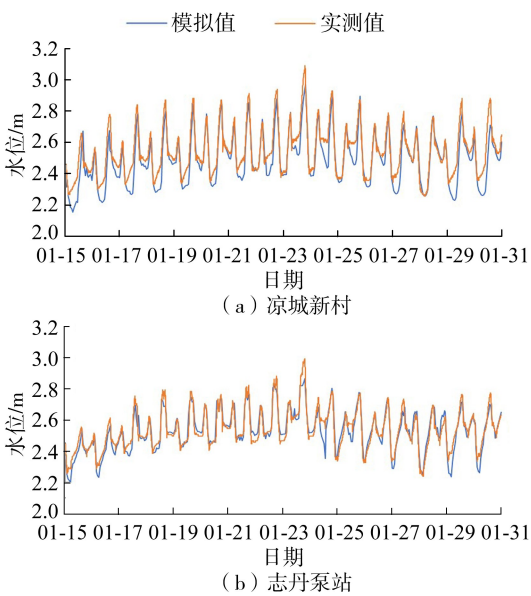


图 2 部分水位站验证情况

Fig. 2 Validation status of partial water level stations

2024 年汛期后进行泥沙采集与检验分析,采用箱式采样器采集表层底泥,并依据 HJ 634—2012《土壤氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的测定 氯化钾溶液提取-分光光度法》以及 HJ 717—2014《土壤质量 全氮的测定 凯氏法》,分别采用凯氏法、分光光度法测定底泥 TN 含量。采样点 1~11 号具体位置如图 3 所示,分别为黄浦江,哈尔滨路桥,俞泾浦,走马塘,西泗塘,苏州河,东茭泾,桃浦河口门、上游、中游和下游,其 TN 质量比分别为 1 158、1 315、1 319、1 997、2 087、2 972、2 088、2 177、3 260、1 886、1 736 mg/kg,可见,黄浦江、虹口港和俞泾浦 3 个采样点的 TN 质量比相对较低(1 300 mg/kg 左右),片区内 TN 质量比较高的采样点主要分布在下游的走马塘、西泗塘、东茭泾河段;此外,桃浦河上、中、下游各采样点的 TN 质量比平均值为 2 294 mg/kg,处于较高水平。

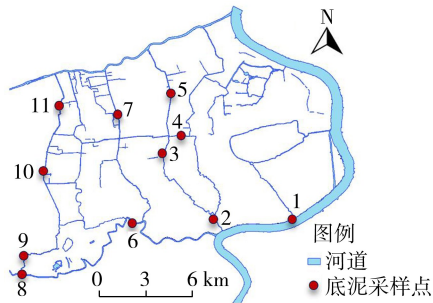


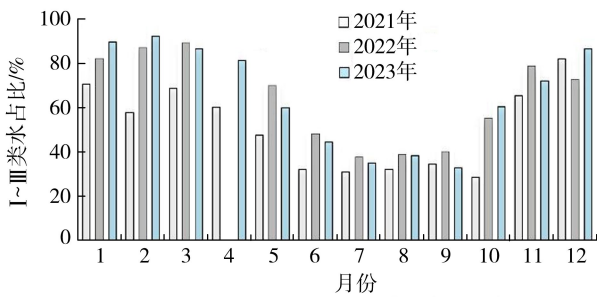
图 3 底泥采样点分布

Fig. 3 Distribution of sediment sampling sections

3 结果与分析

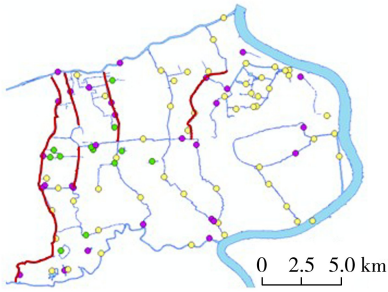
3.1 片区水质的时空分布特征

基于蒹南片区的实测水质数据,2021—2023 年的水质时空分布情况见图 4。从图 4(a)可见,



(a) 不同月份 I~III 类水断面比例

● II 类 ● III 类 ● IV 类



(b) 2021 年水质平均评级



(c) 2022 年水质平均评级



(d) 2023 年水质平均评级

图 4 2021—2023 年河道水质时空分布

Fig. 4 Spatiotemporal distribution of river water quality from 2021 to 2023

2021 年、2022 年、2023 年非汛期 I ~ III 类水采样点占比明显提升,分别为 31.3% ~ 81.3%、58.9% ~ 89.5%、65.2% ~ 93.3%,向好趋势明显;汛期占比分别为 31.3% ~ 44.4%、37.6% ~ 48.2%、32.9% ~ 44.4%。从时间分布情况可以明显看出,片区非汛期水质好、汛期水质差。图 4(b)(c)(d)为片区各采样点年平均水质等级分布情况,可见,2021—2023 年存在 IV 类水质的河道主要集中在片区东部的桃浦河、龙珠江、西弥浦,以及片区北部的东茭泾与南泗塘(图 4(b)(c)(d)标红河段)。对比各河道采样点历年的水质等级变化情况,可以发现片区水质呈现相同的分布趋势:南部河道水质优于北部,东部河道水质优于西部。

从图 1 可以看出,南泗塘、东茭泾、西弥浦距离南部苏州河与黄浦江的引水口门较远,引水路径过长,导致河道水动力较弱;进一步观察发现,桃浦河、东茭泾、西弥浦以及龙珠江均从苏州河引水,但苏州河受闸控影响,潮汐动力较弱,且引水水量不足,河道水动力特性对年度水质等级的影响显著。此外,沙泾港南段、走马塘等水动力较弱的河段,水质在年际间表现出不稳定性。

3.2 降雨和污水排放对水质变化的影响

3.2.1 直排污水污染物时空分布特征

上海市蕴南片区部分市政泵站存在雨污混接现象,部分雨水因此进入污水处理系统,挤占污水处理空间,致使部分污水无法有效输送与处理,进而引发溢流排放,影响河网水质。图 5 为蕴南片区市政泵

站的分布情况,可见,市政泵站在南部上游河道分布较密集,在片区南引北排的格局下,该分布特征对整个片区水质产生了显著影响。选取市政泵站污水溢流排放量较大的西泗塘-沙泾港-虹口港一线为研究对象,分析市政泵站溢流污水污染物的空间尺度变化特征。针对泵站排放污水,重点监测悬浮物(SS)、TP、COD、溶解氧(DO)及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标。表 1 为西泗塘-沙泾港-虹口港单日污水排放污染物分布,结果显示,沿程各泵站的污水排放量差异较大,且同一泵站不同污染物的含量也不相同。例如,该日场中(雨)泵站的 SS、TP 以及 COD 指标最差,但 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量为所有泵站中最低。

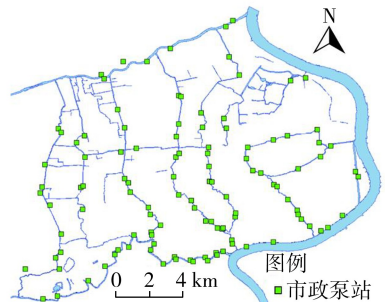


图 5 蕴南片区市政泵站分布

Fig. 5 Distribution of municipal pumping stations in the Wunnan area

选取年排放量较大的民主(雨)泵站为对象,分析其污染物指标在时间尺度上的变化特征。图 6 为 2023 年民主(雨)泵站历次溢流排放污水超 V 类水标准的情况,可见该泵站多数时段排放污水的各项

表1 西泗塘-沙泾港-虹口港单日污水排放污染物分布
Table 1 Pollutant distribution of single-day discharged sewage in Xisitang-Shajinggang-Hongkougang

泵站名称	浊度/ NTU	ρ (TP)/ (mg/L)	ρ (DO)/ (mg/L)	ρ (NH ₃ -N)/ (mg/L)
水电	41.0	2.7	57.7	13.8
大名	25.0	0.6	48.0	1.9
彭浦十期	19.0	2.2	70.0	18.0
张庙	22.0	0.6	25.0	5.6
和田	64.0	1.1	71.0	2.8
江湾西	22.0	1.5	70.0	9.7
横浜	32.7	1.8	51.3	5.0
场中(雨)	186.0	4.7	228.0	0.9
寿阳	14.0	0.5	17.0	3.6
民晏	48.0	1.8	109.0	7.5
民主(雨)	15.0	1.1	43.0	6.3
武进	41.0	0.6	57.0	3.2
溧阳(雨)	20.0	2.9	58.0	21.6
华昌	17.5	0.1	11.5	0.4

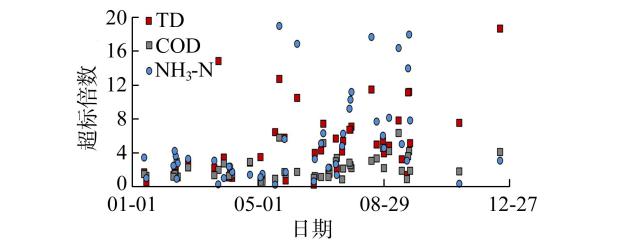


图6 民主(雨)泵站历次溢流排放污水各污染物指标超Ⅴ类标准的倍数
Fig. 6 Multiples by which various pollutant indicators in overflow-discharged sewage from Minzhu (Rainwater) Pumping Station exceed the Class V standard in all overflow instances

污染物指标(TP、COD、NH₃-N)均显著劣于Ⅴ类水标准。其中,NH₃-N共有5次超标倍数达8倍以上,是污染物中超标最严重的指标;TP超标程度次之;COD超标倍数基本维持在4倍以内。从时间变化来看,5—9月各污染物指标劣于其余月份,且各污染物指标劣化程度较高的时段也多集中在5—9月。综合图5、6可以推断,市政泵站溢流排放污水的污染物含量在时空分布上具有较强的随机性与不可预测性。

3.2.2 污水排放对水质的影响

汛期降雨是引发污水溢流排放的直接原因。图7(a)为溧南片区2023年不同月份泵站污水排放量与降水量的对比,可见泵站污水月排放量与降水量变化趋势一致:6—7月降水量最高,泵站污水排放量也在该时段达到峰值,约占片区污水总排放量的2/3;非汛期降雨相对较少,污水排放量亦随之降低,可见,污水排放量与降水量呈显著正相关关系,降雨是诱发泵站污水溢流排放的主要因素,且河道

污水排放量与泵站数量呈线性关系。

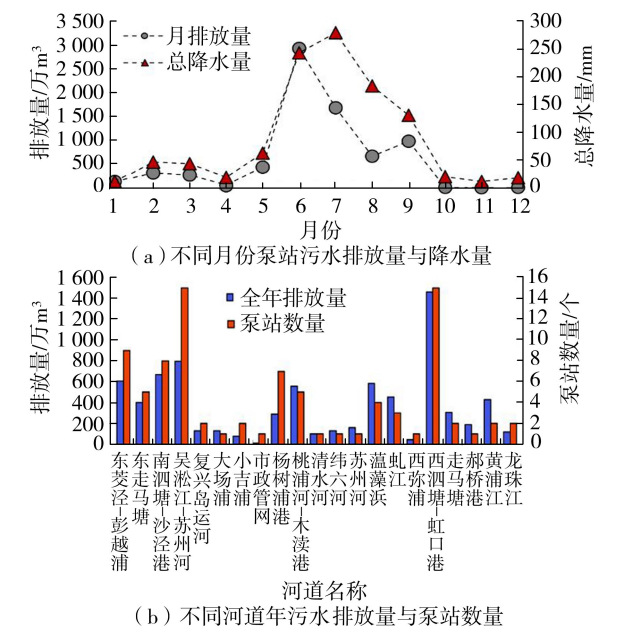
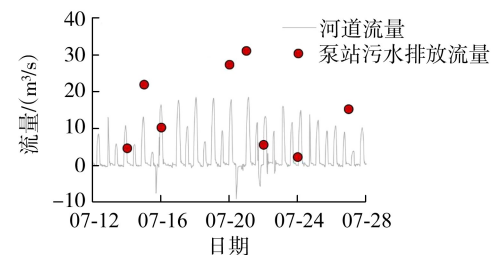


图7 泵站污染物排放时空特征统计
Fig. 7 Statistics on spatiotemporal characteristics of pumping station discharges

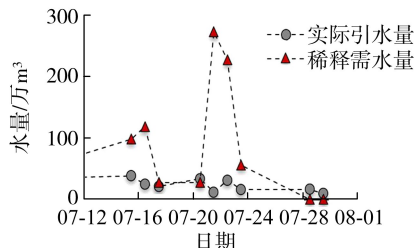
图7(b)为2023年溧南片区各河道污水排放量与泵站数量的对应关系,其中对南北贯通且相互连通的河道统一归为一组统计数据,各河道位置见图1。可见,西泗塘-俞泾浦-虹口港污水排放量最高,达1464万m³,其污水排放泵站数量也最多(15个);吴淞江-苏州河污水排放量与泵站数量均位列第2,该河道为桃浦河、彭越浦的引水水源,对该水系引水水质影响显著;南泗塘-沙泾港污水排放量排名第3,为670万m³,显著少于西泗塘-俞泾浦-虹口港;东茭泾-彭越浦与桃浦河-木渎港河段污水排放量亦超500万m³。

污水的污染物浓度与流量对河道水质有关键的影响,高浓度的污染物直接引起河网水质劣化。结合实测数据与数值模拟结果,图8(a)为2023年7月俞泾浦入口处断面的流量过程,以及俞泾浦-西泗塘沿程泵站日总污水排放流量与河道流量的关系,可见,7月21日总污水排放流量最大,达31.2m³/s,河道断面日最大流量维持在18m³/s左右。当日断面过流流量为37.9万m³/s,而污水排放总流量为89.5万m³/s,是俞泾浦河道过流流量的2.36倍。图8(b)对比了溧南片区典型河道污水排放量稀释至Ⅲ类水所需的水量与实际引水量的对比,可见,稀释水量多数情况下远大于河道的实际引水量,仅依靠畅流活水等引排调与水体自净较难实现水质的提升。

根据GB 3838—2002《地表水水质标准》的规定,水质评价指标为DO、NH₃-N、TP、COD_{Mn},并将



(a) 俞泾浦河道流量与泵站日污水排放流量对比



(b) 沙泾港-南泗塘实际引水量与稀释至Ⅲ类水需水量对比

图 8 污水流量与水质对比

Fig. 8 Comparison of sewage flow and water quality

4 个指标所对应的最低水质等级作为综合评价等级。水质数据表明,汛期 DO 的 I ~ III 类比例最低、整体表现最差;而非汛期各指标的等级差异不显著。汛期时,泵站溢流排放的污水中含有大量的 $\text{NH}_3\text{-N}$, 消耗水体中的 DO, 导致水质等级下降。此外,污水排放还会增加有机污染物和营养物质的负荷,进一步提高耗氧量^[17-19],同时汛期较高的水温也加快了各类生化反应的速率^[20]。因此,泵站溢流排放对水质的影响主要体现在两个方面:①由于污水排放流量相对于河道流量较大,污水排入河网后显著提升了 TP、 COD_{Mn} 及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等污染物的浓度,直接造成水质等级下降;②超高浓度的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等污染物在高温条件下发生硝化等反应,大量消耗 DO,使 DO 含量降低,从而进一步降低水质等级。

3.3 汛期水动力格局对水质的影响

汛期突发性的泵站污水排放,将大量的污水排入河道,显著增加了河道的防洪压力。因此,在应对汛期污水排放时,需采取与日常调度不同的防洪调度策略,河网尽量少引多排以缓解防洪压力。具体防洪调度措施包括每日一潮适时引水,排水口门则能排尽排,并增加泵引,以降低河网水位与槽蓄水量。

为揭示水动力特征及其对水环境的影响,利用已构建的水动力模型对 2023 年 7 月污水排放期间的水动力过程进行模拟。已知蕴南片区在 7 月 15、16、20、21 日污水排放量较大,分别为 217 万、83 万、222 万、776 万 m^3 。降雨期间,蕴南片区南北向主干道的水动力特征基本一致。以南泗塘殷高路桥断面为例,图 9 为该断面在 2023 年 7 月 12—24 日的水深和流速变化曲线。可以看出,在污水排放量较

大的时段内,片区运行水位较低,例如 E、F 点的水位较前几日的最低水位降低了约 16%。值得注意的是,在水位较低的 A、B、E、F 点对应时刻,其流速均达到了当日最大值;如 H 点的流速为 0.5 m/s,而 C、D 点的流速则分别达到了 0.26、0.28 m/s。

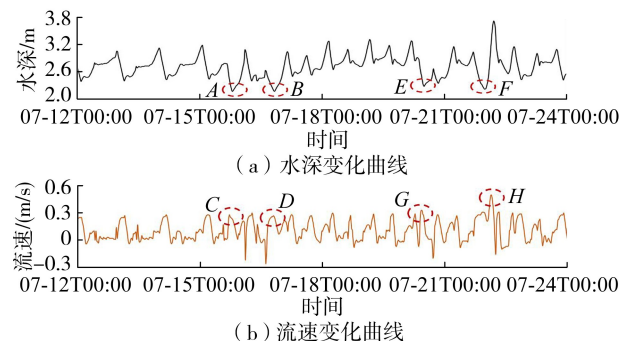
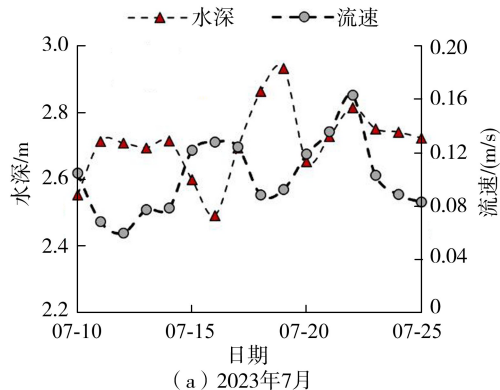


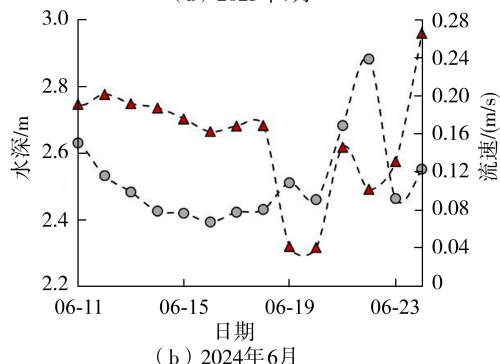
图 9 泵站污水排放期间水深与流速

Fig. 9 Discharge volume, water depth and flow velocity during the river discharge period of the pumping station

图 10 为 2023 年 7 月与 2024 年 6 月汛期泵站污水排放前后时段的逐日平均流速与平均水深变化。可见,在污水溢流排放量较大的时段,即 2024 年 7 月 15—16 日及 2024 年 6 月 20—21 日,日平均水深较前 4 d 下降了 21~36 cm,而平均流速则增加了 2~6.8 m/s,其中平均流速最大增幅达



(a) 2023年7月



(b) 2024年6月

图 10 汛期泵站污水排放期间逐日平均流速与水深变化
Fig. 10 Variation of daily average flow velocity and water depth during the river discharge period of the pumping station in flood season

113%,表明在汛期泵站污水排放、降雨以及外江水位等多重因素的共同作用下,蕴南片区河网内形成了低水位-高流速的水动力格局。

与水位适宜的水动力条件可改善水质^[21],而低水位-高流速的动力格局会加速底泥孔隙水中污染物的扩散。底泥中污染物含量比自然背景值高出1至几个数量级,因此在水位更低、流速更大的情况下,水动力对底泥的扰动会使其发生再悬浮,进而释放大量的耗氧性有机物、氮磷、重金属等污染物。针对泵站污水排放情况,7月22日实测蕴南片区西泗塘某断面排空河道,导致河道约10%宽度(河道全长28 m)的底泥出露,引发了较大范围的泥沙冲刷与悬浮。为量化污水排放期间与正常引排调度期间对泥沙起动悬浮的影响,图11给出了2023年7月及2024年6月污染物排放期间,殷高路桥断面河床泥沙每日处于冲刷悬浮状态的时间比例。河床泥沙处于冲刷悬浮状态的时间,是指模拟计算得出的断面流速超过泥沙起动流速的持续时间,其中,泥沙起动流速依据模拟的断面水深和片区泥沙特性计算得到。蕴南片区河网底泥淤泥含量为90%^[22],中值粒径为0.011 mm,起动流速采用适用于统一散粒体和黏性细颗粒泥沙起动计算的唐存本公式^[23]计算。

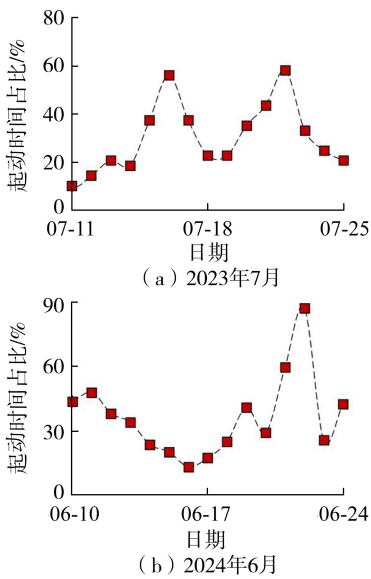


图 11 河床底泥起动悬浮时间占比

Fig. 11 Time proportion of riverbed sediment incipient motion and suspension

从图11可见,2023年7月的两次泵站污水排放时段内,河床泥沙起动冲刷最大时间占比为56.1%和58.2%,正常调度情况下冲刷时间占比则为10%~20%。同样地,2024年6月22日冲刷时间达全天的88.2%,相比6月16日最低冲刷时间占比13.1%提升了75.1%。底泥中污染物释放浓度与水

流流速以及悬浮时间成正比^[24-26],以DO为例,悬浮底泥的耗氧速率随着流速与起动流速比值的增加而线性增长,引起DO含量的降低^[22]。

2024年7月雨天条件下,受低水位-高流速水动力格局的影响,底泥悬浮耗氧量较晴天增加了139%,耗氧效应显著。可见,降雨期间的水动力格局不仅明显延长了河床淤泥的冲刷与悬浮时间,还在延长底泥污染物持续释放时间的同时加剧了溶解氧的消耗,进而加剧了水质劣化,凸显出蕴南片区防洪安全与水环境问题间的矛盾。此外,降雨期间黄浦江的潮汐类型也会影响片区水质,中大潮汐期间,外江高潮水位高、引水量大,引水对片区水质的改善效果显著;小潮汐期间,外江高潮水位低、可引水量小,引水对片区水质改善效果相对有限。以东茭泾与虬江自动水质测站2022—2023年的监测数据为例,在降雨后采样点水质恢复至雨前等级所需时间超过3 d的潮汐类型中,东茭泾与虬江的小潮汐占比分别为72.7%、61.5%,凸显了外江引水高水位变化对片区水质的影响。

3.4 非汛期底泥污染的次生危害

污水直排河道还会污染底泥,导致底泥污染物浓度偏高。2024年汛后10月,对蕴南片区内外典型河道断面进行底泥取样,测定底泥TN含量,并采用如式(1)所示的单因子污染指数法,计算TN评价指数 S_{TN} ;对应的评价等级标准为: $S_{TN}<1.0$ 为清洁, $1.0\leq S_{TN}\leq 1.5$ 为轻度污染, $1.5<S_{TN}\leq 2.0$ 为中度污染, $S_{TN}>2.0$ 为重度污染^[27]。

$$S_{TN} = C_i / C_s \tag{1}$$

式中: C_i 为评价因子*i*的实测值; C_s 为评价因子*i*的评价标准值。目前我国没有针对底泥TN含量标准限定,加拿大的环境质量评价标准中安全级TN的质量比限制为550 mg/kg,上海市土壤TN的背景值为584 mg/kg^[28],因此综合考虑取584 mg/kg作为蕴南片区TN质量比标准值。各采样点的底泥单因子污染评级如表2所示。可见,蕴南片区外源河道以及内部典型断面TN绝大多数处于严重污染的状态,从位置分布分析,口门区域的评价指数小于片区河网内部,河网内部上游河道的评价指数小于中下游,虹口港水系的评价指数小于桃浦河水系,可见,蕴南片区不同方位河道的底泥污染程度南部河道轻于北部河道,东部河道轻于西部河道。

底泥污染超标的直接原因是市政污水直排河道,而河道流速会影响底泥与水体间污染物的迁移转化,进而间接改变底泥与水体中污染物含量。图12(a)统计了2021—2023年河网水动力模型中

表 2 各监测断面底泥污染评级

Table 2 Pollution assessment grades of sediment at each monitoring section

采样点	S_{TN}	污染等级	采样点	S_{TN}	污染等级
1 号	1.98	中度污染	7 号	3.57	重度污染
2 号	2.25	重度污染	8 号	2.97	重度污染
3 号	3.41	重度污染	9 号	3.23	重度污染
4 号	3.57	重度污染	10 号	5.58	重度污染
5 号	5.09	重度污染	11 号	3.73	重度污染
6 号	2.26	重度污染	片区平均	3.42	重度污染

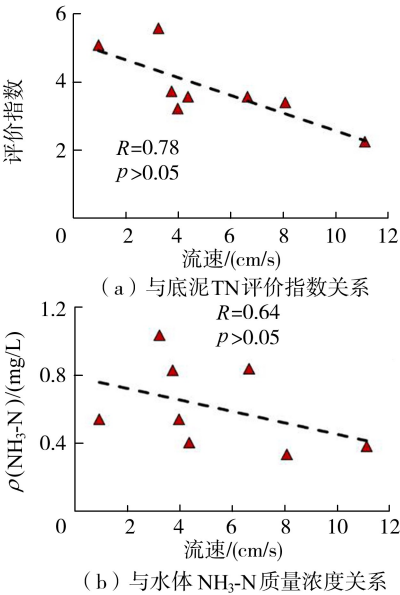


图 12 多年平均流速与底泥 TN 评价指数、水体 NH₃-N 质量浓度的关系

Fig. 12 Relationship between multi-year average flow velocity, sediment TN assessment index, and water body NH₃-N mass concentration

各底泥监测断面的平均流速与底泥 TN 评价指数的关系,可见二者呈负相关关系,表明流速缓慢、水动力不足的区域,其水体置换与净化能力较弱^[29],底泥的污染程度也更高。汛期污水溢流排放已造成严重的底泥污染,其次生影响在非汛期的弱动力区尤为显著,即便无新增污水排放,底泥污染物的持续释放仍会与换水率低、水体净化能力弱等问题叠加,导致水质劣化,Ⅰ~Ⅲ类水质达标率低。图 12(b)为 2021—2023 年各测量断面的平均流速与水体 NH₃-N 质量浓度的关系,可见水体中 NH₃-N 质量浓度与流速呈负相关关系,说明弱动力区河道断面的 NH₃-N 质量浓度更高、水质更差,底泥污染与弱水动力交织,影响了非汛期的水质状态。

综合以上对蕰南片区水质劣化影响因素的分析,解决区域水污染问题的关键在于对污染源排放、水动力格局及底泥污染三大核心环节实施协同管控治理,具体措施如下:①从源头控制污染物排放,通

过推进雨污分流改造、建设调蓄池及开展“清管行动”,减少污染物入河量;②优化片区水利工程调度,以水动力精准管控为抓手,重构与水质改善需求相适应的水动力格局;③实施片区底泥生态化治理,消除底泥污染对水体水质的潜在影响,阻断其持续释放污染物的路径。

4 结 论

- a. 蕰南片区河道水质呈现显著时空异质性,其中,非汛期水质明显优于汛期,东部与南部河道水质优于西部与北部河道。对于引水条件差、引水路径长、水动力弱的河道断面,存在年际间水质劣化与不稳定的现象。
- b. 蕰南片区河网溢流排放污水中的 NH₃-N、TP、COD 及浊度等指标严重超标,其中 NH₃-N 超标最为显著。DO 是水质等级下降的主控环境因子,而污水负荷与降水量呈显著正相关关系。
- c. 降雨引发的污水直排,导致蕰南片区底泥污染问题突出,且底泥污染程度呈现明显空间分异特征:南部河道轻于北部河道、东部河道轻于西部河道。进一步分析显示,年平均流速越小、水动力条件越弱、河道换水率越低的区域,底泥污染程度越高。
- d. 汛期泵站日污水排放量可达河道日过流水量的 2~3 倍;在以防洪为目标的工程调度下,蕰南片区形成低水位-高流速的水动力格局,这一格局显著延长了河床淤泥的冲刷时间,引发河床底泥再悬浮,进而促进污染物持续释放,导致河道水质进一步劣化。非汛期时,底泥污染物的持续释放与河网弱动力影响交织叠加,易造成水质劣化与不稳定。

参考文献:

[1] TANG Hongwu, YUAN Saiyu, CAO Hao. Theory and practice of hydrodynamic reconstruction in plain river networks[J]. Engineering, 2023, 24(5): 202-211.

[2] 唐洪武,肖洋,袁赛瑜,等. 平原河流水沙动力学若干研究进展与工程治理实践[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 414-423. (TANG Hongwu, XIAO Yang, YUAN Saiyu, et al. Advances in research on hydrodynamics and sediment transport of plain rivers and its application in river treatment[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(5): 414-423. (in Chinese))

[3] 陈磊,周雪辉,余宇,等. 城镇建成区内涝和非点源污染联合风险评价方法[J]. 水科学进展, 2023, 34(1): 76-87. (CHEN Lei, ZHOU Xuehui, YU Yu, et al. A joint risk assessment method of waterlogging and non-point source pollution in urban built-up areas[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(1): 76-87. (in Chinese))

- [4] ZHAO Fangkai, CHEN Liding, YANG Lei, et al. Effects of land use and rainfall on sequestration of veterinary antibiotics in soils at the hillslope scale [J]. Environmental Pollution, 2020, 260: 114-112.
- [5] 谢三桃, 朱慧雯, 叶勇, 等. 环巢湖地区沙河流域污染负荷总量控制及削减措施[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 127-134. (XIE Santao, ZHU Huiluan, YE Yong, et al. Total pollution load control and reduction measures in the Shahe River Basin around Chaohu Lake [J]. Water Resources Protection, 2023, 34(1): 127-134. (in Chinese))
- [6] 陈振楼, 许世远, 徐启新, 等. 长江三角洲地表水环境污染规律及调控对策[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(4): 353-359. (CHEN Zhenlou, XU Shiyuan, XU Qixin, et al. Pollution patterns and modulating countermeasures of surface water environments in the Yangtze Delta [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2001, 10(4): 353-359. (in Chinese))
- [7] 李一平, 郑可, 周玉璇, 等. 南方城市污水处理系统效能评估与提质增效策略制定[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 50-57. (LI Yiping, ZHENG Ke, ZHOU Yuxuan, et al. Efficiency evaluation of a sewage system and strategy formulation of quality and efficiency improvement in city of southern China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 50-57. (in Chinese))
- [8] 康丽娟, 曹勇. 连续降雨条件下典型泵站放江污染特征分析[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(2): 20-26. (KANG Lijuan, CAO Yong. Effects of sewage discharge from drainage pumping station on receiving river water quality under the condition of continuous rainfall [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 40(2): 20-26. (in Chinese))
- [9] 徐祖信, 张辰, 李怀正. 我国城市河流黑臭问题分类与系统化治理实践[J]. 给水排水, 2018, 54(10): 1-5. (XU Zuxin, ZHANG Chen, LI Huaizheng. Classification and systematic treatment of black order problem in urban rivers in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(10): 1-5. (in Chinese))
- [10] 闫毓, 袁赛瑜, 唐洪武, 等. 上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 329-334. (YAN Yu, YUAN Saiyu, TANG Hongwu, et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan River network in Shanghai City [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 329-334. (in Chinese))
- [11] 刘水芹, 孙凤云, 季永兴. 上海骨干河湖悬浮物时空分布及感潮影响分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 178-185. (LIU Shuiqin, SUN Fengyun, JI Yongxing. Analysis of spatiotemporal distribution of suspended solids and its tidal influence in major rivers and lakes in Shanghai [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 178-185. (in Chinese))
- [12] VAN MAZIJK A. Modelling the effects of groyne fields on the transport of dissolved matter within the Rhine Alarm-Model [J]. Journal of Hydrology, 2002, 264(1-4): 213-229.
- [13] 陶亚, 雷坤, 夏建新. 突发水污染事故中污染物输移主导水动力识别: 以深圳湾为例[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 888-897. (TAO Ya, LEI Kun, XIA Jianxin. Main hydrodynamic factors identification for pollutant transport in sudden water pollution accident in Shenzhen Bay [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6): 888-897. (in Chinese))
- [14] 翁士创, 杨静, 廉浩. 感潮河网区突发性水污染事故预警预报关键技术探讨[J]. 水文, 2009, 29(增刊1): 137-140. (WENG Shichuang, YANG Jing, LIAN Hao. Discussion on key technology for forecasting and warning unexpected water pollution accidents in tide river network [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(Sup1): 137-140. (in Chinese))
- [15] 唐洪武, 袁赛瑜, 肖洋. 河流水沙运动对污染物迁移转化效应研究进展[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 139-147. (TANG Hongwu, YUAN Saiyu, XIAO Yang. Effects of flow and sediment on the transport and transformation of pollutants in rivers: a review [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 139-147. (in Chinese))
- [16] 邢雅囡, 阮晓红, 赵振华. 城市重污染河道环境因子对底质氮释放影响[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 120-126. (XING Yanan, RUAN Xiaohong, ZHAO Zhenhua. Effect of environmental changes on nitrogen release from sediments in polluted urban river [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 120-126. (in Chinese))
- [17] HINSON K E, FRIEDRICHS M A, NAJJAR R G, et al. Impacts and uncertainties of climate-induced changes in watershed inputs on estuarine hypoxia [J]. Biogeosciences, 2023, 20(10): 1937-1961.
- [18] SHUNK N P, MAZZINI P L, WALTER R K. Impacts of marine heatwaves on subsurface temperatures and dissolved oxygen in the Chesapeake Bay [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2024, 129(3): e2023JC020338.
- [19] IRBY I D, FRIEDRICHS M A, DA F, et al. The competing impacts of climate change and nutrient reductions on dissolved oxygen in Chesapeake Bay [J]. Biogeosciences, 2018, 15(9): 2649-2668.
- [20] 吕艳华, 白洁, 姜艳, 等. 黄河三角洲湿地硝化作用强度及影响因素研究[J]. 海洋湖沼通报, 2008(2): 61-66. (LYU Yanhua, BAI Jie, JIANG Yan, et al. Studies of nitrifying activity and impact factors of wetland in Yellow River Delta [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2008(2): 61-66. (in Chinese))
- [21] LUAN Guangxue, HOU Jingming, WANG Tian, et al. Research on hydrodynamic and water quality optimization scheduling based on optimization technology for complex of river network structures [J]. Water Resources Management, 2024, 38(4): 1339-1358.

[22] 贺宝根,周乃晟,顾群. 苏州河污染底泥处理的合理措施[J]. 上海师范大学学报(自然科学版),1997(4): 54-61. (HE Baogen,ZHOU Naisheng, GU Qun. Rational division of treatment for Suzhou creek ' s polluted sediments[J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences) ,1997(4) :54-61. (in Chinese))

[23] 唐存本. 泥沙起动规律[J]. 水利学报,1963 (2) :1-12. (TANG Cunben. Sediment initiation law[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1963(2) :1-12. (in Chinese))

[24] 王庭健,夏忠林. 城市富营养湖泊沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. 环境科学研究,1994,7(4) : 12-19. (WANG Tingjian, XIA Zhonglin. The effect to water quality of phosphorus loading and its release in the sediments of urban eutrophic lakes [J]. Research of Environmental Sciences, 1994, 7 (4) : 12-19. (in Chinese))

[25] 彭进平,逢勇,李一平,等. 水动力条件对湖泊水体磷素质量浓度的影响[J]. 生态环境,2003,12(4) : 388-392. (PENG Jinping, PANG Yong, LI Yiping, et al. The effect of water dynamical condition on phosphorus in lakes [J]. Ecology and Environment Sciences,2003,12(4) : 388-392. (in Chinese))

[26] CHENG Pengda, WANG Xinquan, FENG Chun. Numerical simulation of phosphorus release from resuspended sediment[J]. Acta Mechanica Sinica,2020, 36:1191-1201.

[27] 王佩,卢少勇,王殿武,等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. 中国环境科学,2012,32 (4) : 703-709. (WANG Pei, LU Shaoyong, WANG Dianwu, et al. Nitrogen, phosphorous and organic matter spatial distribution characteristics and their pollution status evaluation of sediments nutrients in lakeside zones of Taihu Lake [J]. China Environmental Science,2012, 32(4) : 703-709. (in Chinese))

[28] 成杭新,李括,李敏,等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘,2014,21(3) : 265-306. (CHENG Hangxin, LI Kuo, LI Min, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. Earth Science Frontiers,2014,21 (3) :265-306. (in Chinese))

[29] 王思如,顾一成,杨大文,等. 长江下游典型平原城市感潮河网水动力提升分析[J]. 水科学进展,2022,33 (1) : 91-101. (WANG Siru, GU Yicheng, YANG Dawen, et al. Study on hydrodynamic improvement of urban tidal river for a typical plain cities in the lower reaches of Yangtze River[J]. Advances in Water Science,2022,33 (1) :91-101. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 11 - 26 编辑:胡新宇)

+++++

(上接第 295 页)

[33] WANG Xiaolan,SWAIL V R. Changes of extreme wave heights in Northern Hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes[J]. Journal of Climate, 2001,14(10) :2204-2221.

[34] HUDGINS L, FRIEHE C A, MAYER M E. Wavelet transforms and atmopsheric turbulence [J]. Physical Review Letters,1993,71(20) :3279.

[35] TORRENCE C,COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,1998,79(1) :61-78.

[36] 傅云飞,罗晶,王东勇,等. 夏季江淮地区降水的气候变化研究进展[J]. 暴雨灾害,2020,39(4) :317-324. (FU Yunfei, LUO Jing, WANG Dongyong, et al. Research progress on climate change of summer precipitation in the Jianghuai region[J]. Torrential Rain and Disasters,2020, 39(4) :317-324. (in Chinese))

[37] WEI Wei, ZHANG Renhe, WEN Min, et al. Relationship between the Asian westerly jet stream and summer rainfall over central Asia and North China: roles of the Indian monsoon and the South Asian high [J]. Journal of Climate,2017,30(2) :537-552.

[38] WANG Bin, WU Renguang, FU J X. Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? [J]. Journal of Climate,2000,13(9) :1517-1536.

[39] CHEN Wen, FENG Juan, WU Renguang. Roles of ENSO and PDO in the link of the East Asian winter monsoon to the following summer monsoon [J]. Journal of Climate, 2013,26(2) :622-635.

[40] LINDERHOLM H W, OU T, JEONG J H, et al. Interannual teleconnections between the summer North Atlantic oscillation and the East Asian summer monsoon [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011,116:D13.

[41] SU Zhenkuan, HAO Zhenchun, YUAN Feifei, et al. Spatiotemporal variability of extreme summer precipitation over the Yangtze River Basin and the associations with climate patterns[J]. Water,2017,9(11) :873.

[42] 杨萌洲,袁潮霞. 非典型大西洋尼诺对中国东部前、后汛期降水的影响[J]. 大气科学学报,2024,47(2) :260-272. (YANG Mengzhou, YUAN Chaoxia, . Impacts of non-canonical Atlantic Nino on Eastern China precipitation in the early and late rainy seasons [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2024, 47 (2) : 260-272. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 03 - 13 编辑:胡新宇)