

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.015

阳澄西湖入湖河道水质时空变化特征

孙瑞瑞, 吕文, 顾林森, 杨金艳, 杨惠, 杨文晶

(江苏省水文水资源勘测局苏州分局, 江苏 苏州 215042)

摘要:基于2007—2019年阳澄西湖入湖河道逐月水质监测数据,分析了阳澄西湖入湖河道水质时空变化特征。结果表明:阳澄西湖入湖河道呈现出氮磷营养盐春季含量较高的特点;氨氮、总氮和高锰酸盐指数年均质量浓度整体呈下降趋势,2019年比2007年分别下降78.7%、47.9%和34.8%;总磷年均质量浓度2015年后有较大幅度下降,2015—2019年均值比2007—2014年均值下降45.3%;阳澄西湖主要入湖河道中,水质较差的是蠡塘河和白荡,主要污染因子为氨氮、总磷及总氮。

关键词:水质;入湖河道;营养盐;时空变化;阳澄西湖

中图分类号:TV213.4;X824

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2021)04-0105-04

Spatial and temporal variation characteristics of water quality in rivers flowing into West Yangcheng Lake//SUN Ruirui, LYU Wen, GU Linsen, YANG Jinyan, YANG Hui, YANG Wenjing (Suzhou Substation of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Suzhou 215042, China)

Abstract: Based on the monthly water quality monitoring data of rivers flowing into West Yangcheng Lake from 2007 to 2019, the spatial and temporal variation characteristics of water quality in rivers flowing into West Yangcheng Lake were analyzed. The results show that the rivers flowing into West Yangcheng Lake had the characteristic of high content of nitrogen and phosphorus nutrients in spring. The annual average mass concentration of $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and permanganate index showed overall downtrend with the decline rate of 78.7%, 47.9% and 34.8% respectively in 2019 compared with 2007. The annual average mass concentration of TN declined considerably after 2015. The annual average value from 2015 to 2019 declined by 45.3% compared with that from 2007 to 2014. Water quality in Litang River and Baidang were the worst among rivers flowing into West Yangcheng Lake with the main pollution factors of $\text{NH}_3\text{-N}$, TP and TN.

Key words: water quality; rivers flowing into the lake; nutrient salt; spatial and temporal variation; West Yangcheng Lake

阳澄湖是太湖平原第三大淡水湖,位于苏南经济发达地区,是苏州市重要的饮用水源地。由于社会和经济的快速发展,富含氮磷等营养物质的工农业废水和生活污水的排入加剧了湖泊的富营养化^[1]。阳澄湖的氮磷污染及富营养化问题已越来越受到学者们的关注,如陈丽娜等^[2]构建了基于二维非稳态水动力-水质模型的湖泊水环境容量模型,计算了阳澄湖水环境容量;周静等^[3]对2015—2016年阳澄湖水水质变化原因的分析表明,湖体总氮(TN)浓度升高可能与入湖断面的总氮浓度升高有关,总磷(TP)浓度升高可能与河道内源和降水等因素有关;金文龙等^[4-5]分析了阳澄湖的氮磷营养盐的时

空变化特征,结果表明湖体总氮浓度的变化与周边入湖河道水质密切相关,其中阳澄西湖主要受湖体西线入湖河道影响;顾炉华等^[6]开展了七浦塘引水对阳澄湖河网水环境影响的模拟研究,表明七浦塘引水对北线河道的影响最为显著,阳澄湖西湖水质有所改善;何捷等^[7]基于2016—2017年监测数据对阳澄西湖及其入湖港口水质的分析表明,氮磷营养盐是湖区水质主要的污染因子,外源营养盐输入对阳澄西湖的水质具有决定性作用;杨惠等^[8]基于2010—2014年的数据对阳澄湖入湖河道水质变化及污染物通量分析表明,河道水质较2010年前有了很大改善,阳澄西湖的主要入湖河道中,污染物通量

基金项目:苏州市水利水务科技项目(2018001)

作者简介:孙瑞瑞(1985—),女,工程师,硕士,主要从事水质监测与分析评价研究。E-mail: rruisun@163.com

通信作者:杨金艳(1977—),女,高级工程师,硕士,主要从事水资源分析评价研究。E-mail: 184459173@qq.com

主要来自蠡塘河。

前人对阳澄湖的研究主要集中在湖体水质和营养状态的变化,采用的监测数据时间序列相对较短,针对阳澄湖入湖河道水质的分析研究较少。已有研究表明,入湖河道水质对阳澄湖湖体水质有一定程度的影响^[3],且外源营养盐输入对阳澄西湖的水质具有决定性作用^[7]。阳澄湖入湖河流主要分布在西部和西北部^[9],阳澄西湖入湖河道是阳澄湖入湖河道的主体,因此对阳澄西湖入湖河道的水质变化进行分析具有重要意义。本文基于 2007—2019 年的水质数据进行较长时间序列水质变化分析,探讨阳澄湖西湖入湖河道水质时空变化特征,以期为阳澄西湖入湖河道的治理和阳澄湖水环境的保护提供参考。

1 研究区概况

阳澄湖地处苏州市相城区、工业园区和昆山市,是苏州市重要饮用水源地和战略备用水源地^[10]。湖中 2 个东北—西南走向的狭长半岛把阳澄湖分为东湖、中湖和西湖 3 个部分,水域总面积为 117.4 km²,其中阳澄西湖约占总面积的 26.9%,平均水深约 2.9 m。阳澄西湖入湖河道主要包括白荡、蠡塘河、济民塘、北河泾、永昌泾、石益塘、中泾港、渭泾塘和界泾。入湖河道情况见表 1。

表 1 阳澄西湖主要入湖河道概况

Table 1 General situation of main rivers flowing into West Yangcheng Lake

河 流	起始位置	终止位置	长度/km	采样点
白 荡	洋泾河	阳澄湖	2.1	R1
蠡塘河	元和塘	阳澄湖	6.8	R2
济民塘	新 泾	蠡塘河	20.0	R3
北河泾	元和塘	阳澄湖	8.1	R4
永昌泾	漕 湖	阳澄湖	15.0	R5
石益塘	界泾河	济民塘	2.5	R6
中泾港	渭泾塘	济民塘	1.8	R7
渭泾塘	元和塘	阳澄湖(太平)	6.5	R8
界 泾	元和塘	阳澄湖	7.5	R9

阳澄西湖年平均气温 15~17℃,自北向南递增。根据湘城水位站多年实测水文资料,多年(1953—2019 年)平均降水量为 1 072.3 mm,其中 60% 的降水集中在 5—9 月。降水年内年际变化较大,最大与最小年降水量的比值为 2.88。多年平均水位变幅为 0.62 m,多年平均水位为 2.98 m(1951—2019 年),历年最高水位为 4.31 m(1954 年 7 月 24 日),历年最低水位为 2.22 m(1956 年 2 月 28 日)。

2 采样与分析

入湖河道从南向北共布设 9 个监测点(图 1),

采样时间为 2007 年 1 月至 2019 年 12 月,每月采样 1 次。

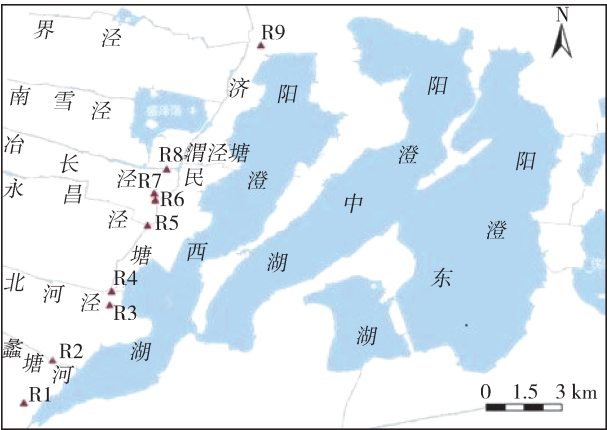


图 1 阳澄西湖主要入湖河道采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points of main rivers flowing into West Yangcheng Lake

水样采集依据 HJ/T 91—2002《地表水和污水监测技术规范》,溶解氧(DO)采用美国哈希 HQ40D 多参数数字测定仪测定,总氮、总磷、氨氮(NH₃-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})等水质指标测定方法参照《水和废水监测分析方法》^[11]。水质评价标准参考 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》。

时间变化特征分析采用了 2007—2019 年较长序列的数据资料,空间变化特征分析强调河道之间的现状水质差异,采用 2017—2019 年的现状数据资料。

空间分布差异采用距平系数表征,计算公式为

$$\eta = \frac{x_i - x}{x} \times 100\% \tag{1}$$

式中: η 为距平系数; x_i 为 2017—2019 年河道 i 某水质指标的平均值; x 为所有河道某水质指标的平均值。由于溶解氧是值越大水质越好,为便于比较,对于溶解氧的距平系数计算公式改为

$$\eta = \frac{x - x_i}{x} \times 100\% \tag{2}$$

3 结果与分析

3.1 时间变化特征

3.1.1 年内变化

根据多年(2007—2019 年,下同)阳澄西湖主要入湖河道逐月水质监测数据,对各项水质指标质量浓度进行逐月均值计算,结果见图 2。由图 2 可见,氨氮质量浓度逐月变化趋势与总氮基本一致,呈现 3 月为峰值、3—10 月逐渐下降、10—12 月略有回升的变化趋势。其中氨氮、总氮质量浓度峰值与谷值的比值分别为 2.1 和 1.9,多年月均质量浓度相对

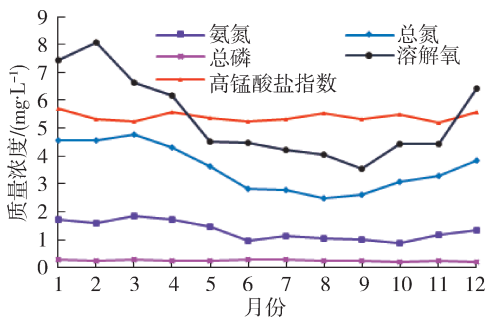


图2 阳澄西湖入湖河道水质指标年内变化

Fig.2 Annual variations of water quality index of rivers flowing into West Yangcheng Lake

标准偏差分别为 25.9% 和 23.5%, 差异较大。总磷多年月均质量浓度范围为 0.193 ~ 0.296 mg/L, 3 月出现峰值, 与氨氮、总氮一致; 但总磷质量浓度 6 月、7 月再次呈峰值状态, 之后逐渐下降。许梅等^[12]对太湖入湖河道水质监测的结果表明, 冬春季节氮含量高于夏秋季; 施陈江^[13]对阳澄西湖入湖河道的监测结果表明, 2009 年 12 月至 2010 年 2 月平均总氮质量浓度较高, 可见太湖和阳澄西湖入湖河道监测结果与本文计算结果基本一致。据张新华等^[14]分析, 相城区主要入阳澄湖河道污染物中, 农业面源污染的人河量占总入河量的 68%, 污染物排放量主要来源于农业污染^[15]。春季是农业活动繁忙时节, 大量化肥的使用加剧了农业面源污染^[16-17]。因此阳澄西湖河道氮磷营养盐春季含量较大, 但总磷在 6 月、7 月再次呈峰值状态, 可能与河道底泥释放有关, 温度升高, 有利于磷的释放^[18-19]。

高锰酸盐指数多年月均质量浓度范围为 5.2 ~ 5.7 mg/L, 相对标准偏差为 3.04%, 年内变化整体较平稳, 均符合Ⅲ类水质标准。溶解氧多年月均质量浓度为 5.4 mg/L, 符合Ⅲ类水质标准, 峰值 8.09 mg/L 出现在 2 月, 随着温度不断升高, 逐渐下降至 9 月的谷值 3.56 mg/L, 9—12 月不断上升。

3.1.2 年际变化

图 3 为阳澄西湖入湖河道各项水质指标质量浓度年际变化计算结果。氨氮、总氮和高锰酸盐指数质量浓度整体呈下降趋势。氨氮、总氮及高锰酸盐指数的多年平均质量浓度分别为 1.32 mg/L、3.5 mg/L 和 5.4 mg/L, 年均值从 2007 年的峰值波动下降至 2019 年的谷值, 分别下降 78.7%、47.9% 和 34.8%, 改善明显; 总磷质量浓度 2015 年后有较大幅度下降, 2007—2014 年与 2015—2019 年波动较平稳, 两个时段平均质量浓度分别为 0.298 mg/L 和 0.163 mg/L, 2015—2019 年均值比 2007—2014 年均值下降 45.3%。溶解氧质量浓度年际变化整体呈上升趋势, 从 2007 年的 2.65 mg/L 波动上升至 2019

年的 7.00 mg/L, 多年平均质量浓度为 5.4 mg/L, 相对标准偏差为 22.0%, 整体改善效果明显。2007—2019 年阳澄西湖入湖河道氨氮、总氮、总磷、高锰酸盐指数及溶解氧整体呈现持续向好的状态, 特别是 2016—2019 年水质指标维持在Ⅱ、Ⅲ类水质标准。

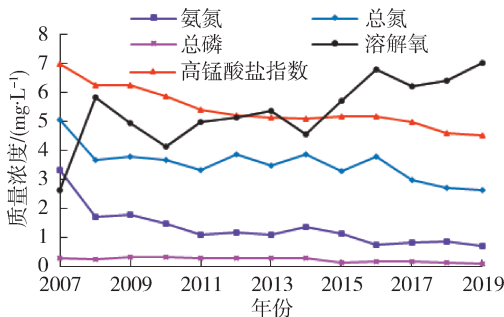


图3 阳澄西湖入湖河道水质指标年际变化

Fig.3 Interannual variations of water quality index of rivers flowing into West Yangcheng Lake

近年来苏州市采取了一系列整治措施, 如: ①关闭和淘汰污染严重的企业, 优化产业结构; ②实施工业企业清洁生产审核, 严控点源污染; ③新建扩建污水处理厂, 提升污水处理能力; ④畜禽养殖、水产、船餐整治, 削减面源污染; ⑤对主要入湖河道、河网进行排查整治, 推进河网水体有序流动; ⑥通过退渔还湿和生态岸线整治, 促进生态修复; ⑦统筹规划监测站点, 强化预警监测及区域生态补偿制度建设等, 这些措施显著改善了阳澄西湖入湖河道水质。

3.2 空间变化特征

2017—2019 年阳澄西湖主要入湖河道白荡、蠡塘河、济民塘、北河泾、永昌泾、石益塘、中泾港、渭泾塘和界泾总监测次数中入湖次数的占比分别为 75.0%、94.4%、41.7%、16.7%、30.6%、13.9%、50.0%、5.6% 和 80.6%, 考虑到 2017—2019 年北河泾、石益塘、渭泾塘 3 条河道入湖次数的占比较低, 因此选取入湖次数占比较高的主要河道进行空间变化特征分析。

白荡、蠡塘河、济民塘、永昌泾、中泾港和界泾 6 条河道的各项水质指标的距平系数计算结果见表 2。位于阳澄湖南部的白荡和蠡塘河多项水质指标距平系数为正数, 特别是氨氮距平系数高达 52.8% 和 58.7%; 中泾港和界泾多项指标距平系数为负数, 范围为 -55.9% ~ -1.3%, 因此, 6 条入湖河道中, 白荡、蠡塘河的水质最差, 主要污染因子为氨氮、总磷和总氮; 中泾港和界泾水质最好。杨惠等^[8]基于 2010—2014 年数据分析得出蠡塘河水质较差, 入阳澄湖河道中污染物主要来自蠡塘河; 周静等^[20]基于 2015—2016 年阳澄湖主要入湖河流水质数据, 发现相比其他河道蠡塘河的水质最差; 何捷

等^[7]基于2016—2017年的阳澄西湖河口监测数据,分析得出南部水质较差与外源营养负荷较大有关,与本文分析得到的结论基本一致。

表2 2017—2019年阳澄西湖主要入湖河道水质指标距平系数

Table 2 Anomaly coefficients of water quality index of main rivers flowing into West Yangcheng Lake from 2017 to 2019

河流	距平系数/%				
	溶解氧	高锰酸盐指数	氨氮	总磷	总氮
白荡	-5.6	1.6	52.8	7.3	17.5
蠡塘河	1.9	5.7	58.7	20.1	18.6
济民塘	-1.0	-1.6	7.9	-5.0	-7.0
永昌泾	15.1	-2.5	-10.6	20.2	-17.0
中泾港	-7.5	-1.8	-52.9	-16.7	-2.2
界泾	-3.0	-1.3	-55.9	-25.9	-9.9

白荡、蠡塘河的主要上游河道分别为元和塘及黄埭塘。根据2017—2019年的监测数据,元和塘总磷质量浓度为0.206 mg/L(Ⅳ类),高于白荡总磷质量浓度0.156 mg/L(Ⅲ类);黄埭塘总磷质量浓度为0.220 mg/L(Ⅳ类),高于蠡塘河总磷质量浓度0.175 mg/L(Ⅲ类),氨氮、总氮则相差不大,因此上游来水可能是白荡、蠡塘河部分水质指标偏高的原因之一。另外蠡塘河、白荡周围农田与村庄较多,并存在畜禽养殖点,因此农业面源污染可能是白荡、蠡塘河水质较差的主要影响因素。

4 结 论

a. 阳澄西湖入湖河道氨氮、总氮及总磷质量浓度均在3月出现全年峰值,可能是因为春季大量化肥的使用加剧了农业面源污染。

b. 2007—2019年氨氮、总氮和高锰酸盐指数年均质量浓度整体呈下降趋势,2019年比2007年分别下降78.7%、47.9%和34.8%;总磷质量浓度在2015年后有较大幅度下降,2015—2019年质量浓度均值比2007—2014年下降45.3%;2016—2019年多项水质指标均保持在Ⅱ、Ⅲ类。由此可见,阳澄湖近年实施的各种整治方案对阳澄西湖入湖河道的水质改善有显著效果。

c. 阳澄西湖主要入湖河道中,水质较差的是白荡及蠡塘河,主要污染因子为氨氮、总磷及总氮。上游来水和农业污染面源可能是其水质较差的主要影响因素。

参考文献:

[1] QIN Boqiang, XU Pengzhu, WU Qinglong, et al. Environmental issues of Lake Taihu, China [J].

Hydrobiologia, 2007, 581(1): 3-14.
[2] 陈丽娜, 谈俊益, 常文婷. 湖泊水环境容量计算: 以阳澄湖为例[J]. 中国水运, 2016, 16(6): 199-200. (CHEN Lina, TAN Junyi, CHANG Wenting. Calculation of water environmental carrying capacity of lakes: a case study of Yangcheng Lake [J]. China Water Transport, 2016, 16(6): 199-200. (in Chinese))
[3] 周静, 刘松华. 2015—2016年阳澄湖水质变化原因及对策研究[J]. 四川环境, 2017, 36(6): 130-133. (ZHOU Jing, LIU Songhua. Study on the causes and countermeasures of water quality change in Yangcheng Lake in 2015-2016 [J]. Sichuan Environment, 2017, 36(6): 130-133. (in Chinese))
[4] 金龙文, 周维. 阳澄湖氮磷时空变化特征及富营养化评价[J]. 四川环境, 2019, 38(3): 58-62. (JIN Wenlong, ZHOU Wei. The spatial-temporal characteristics of nitrogen and phosphorus in Yangcheng Lake and its eutrophication evaluation [J]. Sichuan Environment, 2019, 38(3): 58-62. (in Chinese))
[5] 吕文, 孙瑞瑞, 王诚, 等. 阳澄湖西湖水源地富营养化时空变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 87-90. (LYU Wen, SUN Ruirui, WANG Cheng, et al. Spatial and temporal variation characteristics of water source eutrophication in West Lake of Yangcheng Lake [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(3): 87-90. (in Chinese))
[6] 顾炉华, 赖锡军. 七浦塘引水对阳澄湖河网水环境影响的模拟研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 88-95. (GU Luhua, LAI Xijun. Simulation study of water environment influence on Yangcheng Lake river networks by Qipu River water diversion project [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 88-95. (in Chinese))
[7] 何捷, 蔡春芳, 陈雯, 等. 阳澄西湖及其入湖港口的水质评价与分析[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(3): 26-32. (HE Jie, CAI Chunfang, CHEN Wen, et al. Assessment and analysis of water quality in west Yangcheng Lake and inlets based on principal component analysis [J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(3): 26-32. (in Chinese))
[8] 杨惠, 陈江, 谈剑宏. 阳澄湖入湖河道水质变化及污染物通量分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 129-138. (YANG Hui, CHEN Jiang, TAN Jianhong. Analysis of water quality change and pollutant flux of river channels into Yangcheng Lake [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 129-138. (in Chinese))
[9] 骆东玲. 浅水湖泊富营养化的机理与应对策略: 以阳澄湖为例[J]. 农业环境与发展, 2007, 24(3): 14-18. (LUO Dongling. The mechanism and countermeasures of eutrophication in shallow lakes: a case study of Yangcheng Lake [J]. Agro-Environment & Development, 2007, 24(3): 14-18. (in Chinese))

(下转第116页)

- [25] ZHOU Ting, WU Jianguo, PENG Shaolin. Assessing the effects of landscape pattern on river water quality at multiple scales: a case study of the Dongjiang River Watershed, China [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 166-175.
- [26] 王娇, 马克明, 张育新, 等. 土地利用类型及其社会经济特征对河流水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(1): 57-65. (WANG Jiao, MA Keming, ZHANG Yuxin, et al. Impacts of land use and socioeconomic activity on river water quality[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(1): 57-65. (in Chinese))
- [27] 李艳云, 王作敏. 大辽河口和辽东湾海域水质溶解氧与COD、无机氮、磷及初级生产力的关系[J]. *中国环境监测*, 2006, 22(3): 70-72. (LI Yanyun, WANG Zuomin. The relation among dissolution oxygen(DO) to COD, inorganic nitrogen, reactive phosphate and primary yield-power in the Liaodong gulf and seaport of Daliaohe [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2006, 22(3): 70-72. (in Chinese))
- [28] 张莹莹, 张经, 吴莹, 等. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(8): 1649-1654. (ZHANG Yingying, ZHANG Jing, WU Ying, et al. Characteristics of dissolved oxygen and its affecting factors in the Yangtze Estuary[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(8): 1649-1654. (in Chinese))
- [29] 周丹丹, 马放, 董双石, 等. 溶解氧和有机碳源对同步硝化反硝化的影响[J]. *环境工程学报*, 2007, 1(4): 25-28. (ZHOU Dandan, MA Fang, DONG Shuangshi, et al. Influences of DO and organic carbon on simultaneous nitrification and denitrification [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(4): 25-28. (in Chinese))
- [30] 龚春生, 范成新. 不同溶解氧水平下湖泊底泥-水界面磷交换影响因素分析[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(3): 430-436. (GONG Chunsheng, FAN Chengxin. Effect factors analysis of phosphorus exchange across lake sediment-water interface under different dissolved oxygen concentration[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(3): 430-436. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-04-20 编辑: 熊水斌)

(上接第 108 页)

- [10] 刘唱, 刘凌, 张又, 等. 阳澄湖大型底栖动物群落结构和空间分布特征[J]. *水资源保护*, 2017, 33(2): 79-87. (LIU Chang, LIU Ling, ZHANG You, et al. Community structure and spatial distribution of macrozoobenthos in Yangcheng Lake[J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(2): 79-87. (in Chinese))
- [11] 国家环保总局. 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.
- [12] 许梅, 任瑞丽, 刘茂松. 太湖入湖河流水质指标的年变化规律[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(6): 121-124. (XU Mei, REN Ruili, LIU Maosong. Annual changes of water quality in an upstream river of Taihu Lake[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2007, 31(6): 121-124. (in Chinese))
- [13] 施陈江. 东太湖、阳澄西湖外源污染物通量及增殖放流的生态、经济效益[D]. 苏州: 苏州大学, 2011.
- [14] 张新华, 董雅文. 苏州市相城区水环境状况及污染防治对策[J]. *水资源保护*, 2006, 22(1): 73-77. (ZHANG Xinhua, DONG Yawen. Water environment conditions and measures for pollution prevention and control in Xiangcheng District of Suzhou City[J]. *Water Resources Protection*, 2006, 22(1): 73-77. (in Chinese))
- [15] 吴菲, 李健, 吴俊锋, 等. 近年来阳澄湖污染源分析研究[J]. *污染防治技术*, 2017, 30(6): 38-45. (WU Fei, LI Jian, WU Junfeng, et al. Analysis on pollution sources of Yangcheng Lake in recent years [J]. *Pollution Control Technology*, 2017, 30(6): 38-45. (in Chinese))
- [16] 桂智凡, 薛滨, 姚书春, 等. 阳澄湖水水质现状及原因探讨[J]. *地理科学*, 2011, 31(12): 1487-1492. (GUI Zhifan, XUE Bin, YAO Shuchun, et al. Water quality status and influencing factors of Yangcheng Lake [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(12): 1487-1492. (in Chinese))
- [17] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(5): 439-445. (ZHU Guangwei. Spatio-temporal distribution pattern of water quality in Lake Taihu and its relation with cyanobacterial blooms[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(5): 439-445. (in Chinese))
- [18] 郭鹏程, 王沛芳, 贾锁宝. 河流内源磷释放环境影响因子研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(3): 117-121. (GUO Pengcheng, WANG Peifang, JIA Suobao. Research progress of the environmental impact factors of internal phosphorus loading release in river systems [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2008, 32(3): 117-121. (in Chinese))
- [19] 毛新伟, 仵荟颖, 徐枫. 太湖底泥主要营养物质污染特征分析[J]. *水资源保护*, 2020, 36(4): 100-104. (MAO Xinwei, WU Huiying, XU Feng. Analysis of pollution characteristics of main nutrients in Taihu Lake sediment [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(4): 100-104. (in Chinese))
- [20] 周静, 刘松华. 阳澄湖水水质现状、存在的问题及对策研究[J]. *环境保护与循环经济*, 2017, 37(8): 47-51. (ZHOU Jing, LIU Songhua. The current situation, problems and countermeasures of water quality in Yangcheng Lake [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2017, 37(8): 47-51. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-04-23 编辑: 熊水斌)