

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221841

2010~2020年太湖无锡水域水质时空变化及原因分析

刘佳玥, 姜翠玲, 耿 慧

(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 分析太湖无锡水域水质时空变化对于区域富营养化控制、水污染防治有重要意义。基于2010~2020年太湖无锡水域逐月水质数据和入湖河流水质数据,采用综合污染指数和综合营养状态指数评估了湖区水质和富营养化状态的时空变化特征,分析了主要水质指标的年际年内变化规律和空间格局,探究了湖区水质与入湖河流污染物浓度及通量的相关性。结果表明,2010~2020年太湖无锡水域水质明显改善,全湖综合污染指数和综合营养状态指数分别下降了25%、10%。除总磷浓度无明显变化趋势外,湖区其余水质因子浓度均呈下降趋势。季节变化方面,高锰酸盐指数、总磷和叶绿素a浓度在夏秋季保持较高值,总氮和氨氮浓度则在冬春季保持较高值。空间上,营养盐浓度由西北部、北部湖区向东南部、东部湖区递减。2013~2020年入湖河流水质变化与湖区水质变化趋势基本一致,其中湖区总氮和氨氮浓度分别与入湖河流总氮浓度和氨氮入湖通量呈显著正相关关系,空间格局响应基本一致,入湖河流的外源输入是影响湖区水质时空变化的重要因素。

关键词: 太湖; 无锡水域; 水质; 时空变化; 影响因素

中图分类号: X52; [TV11]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0049-05

1 概况

太湖是中国第三大淡水湖,位于长江三角洲东南部,水域面积2 338 km²,平均水深约2 m。太湖无锡水域位于太湖西北部,湖面面积613 km²,主要包括贡湖湾、梅梁湾、竺山湾、宜兴西部沿岸区等湖湾。该水域呈半封闭状,水体流动性及自净能力相对较弱,同时该区域高度城市化,人口逐年增加,工农业生产和人类活动将大量营养物质输入湖中,造成水体污染,其中竺山湾、梅梁湾和西部沿岸是历年太湖藻类暴发的主要区域。目前,针对太湖水体营养盐污染特征的研究成果较丰富,然而现有研究大部分针对太湖全水域的水质变化^[1,2],未对污染严重区域进行长时序深入分析,还有一些仅分析湖区氮磷等营养盐的变化特征^[3,4],未能综合考虑入湖河流与湖泊水质间的相互作用。因此,本文通过分析2010~2020年太湖无锡水域湖区和入湖河流的逐月监测数据,评估水质与富营养化状态的时空变化特征,揭示

湖区水质与入湖河流污染物浓度、通量间的相关关系,以期为太湖无锡水域的富营养化防控、水污染防治提供支撑。

2 研究方法

将太湖无锡水域分为5个区域,分别为梅梁湾、贡湖湾、竺山湾、湖心区、湖西沿岸,选用该水域具有代表性的15个湖泊水质监测点、17个入湖河道水质监测点(图1)数据。采用综合污染指

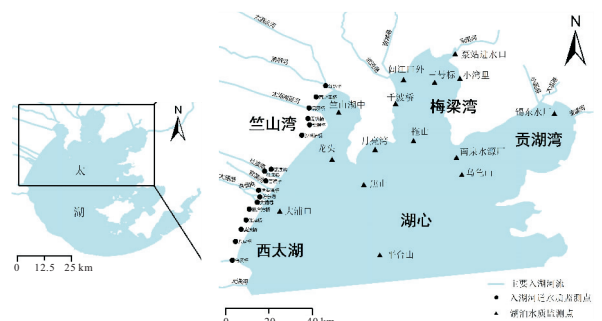


图1 太湖无锡水域监测点位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of monitoring sites in Wuxi water area of Taihu Lake

收稿日期: 2022-09-05, **修回日期:** 2022-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(32171563)

作者简介: 刘佳玥(1999-),女,硕士研究生,研究方向为生态水文与水环境保护,E-mail:liujiayue@hhu.edu.cn

通讯作者: 姜翠玲(1966-),女,教授、博导,研究方向为生态水利,E-mail:cljianghhu@163.com

数(P_w)和综合营养状态指数(T_{TLI})评价水体污染状况和富营养化水平,分别采用 Mann-Kendall 趋势检验(以下简称为 M-K 检验)和变异系数(C_v)分析各水质指标的年际年内变化趋势,最后采用 Pearson 相关系数表征水质指标之间的相关性。数据统计及分析在 IBM SPSS statistics 24 软件中进行,采用 ArcGIS 10.4 和 OriginPro 软件完成绘图。

2.1 综合污染指数

综合污染指数^[5]是一种依据水质实测数据与评价标准限值的比值进行水质评价的常用方法,选取高锰酸盐指数(I_{Mn})、叶绿素 a(Chl. a)、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH_3-N)、pH 值、溶解氧(DO)进行计算,公式为:

$$P_i = C_i / L_i \quad (1)$$

$$P_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m P_i \quad (2)$$

式中, P_i 为水质因子*i*的污染指数; C_i 为水质因子*i*的实测值,mg/L; L_i 为《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中水质因子*i*的相应标准限值,mg/L; P_w 为综合污染指数; n 为水质因子个数。

2.2 综合营养状态指数

采用综合营养状态指数^[6]评价水体富营养化状态,选择 Chl. a、TP、TN、 I_{Mn} 四个参数进行计算,公式为:

$$T_{TLI(\Sigma)} = \sum_{i=1}^m W_j T_{TLI(j)} \quad (3)$$

$$W_j = r_{ij}^2 \sum_{j=1}^m r_{ij}^2 \quad (4)$$

式中, T_{TLI} 为综合营养状态指数; m 为评价指标个数; W_j 为参数*j*的营养状态指数的权重; $T_{TLI(j)}$ 为参数*j*的营养状态指数; r_{ij} 为第*j*种参数与基准参数 Chl. a 的相关系数。

2.3 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 趋势检验法^[7]为非参数检验法,假设时间序列数据(x_1, x_2, \dots, x_n)为*n*个独立的、随机变量同分布的样本,定义统计变量*S*为:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad 1 \leq j \leq n \quad (5)$$

$$\begin{cases} (x_i - x_j) = \begin{cases} > 0 \\ = 0 \\ < 0 \end{cases} \\ \text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ -1 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

$$\sigma_s = \sqrt{[n(n-1)(2n+5)]/18} \quad (7)$$

$$\text{当 } S = \begin{cases} > 0 \\ = 0 \\ < 0 \end{cases}, Z = \begin{cases} (S-1)/\sigma_s \\ (S+1)/\sigma_s \end{cases} \quad (8)$$

*S*服从正态分布, σ_s 为标准差;当*Z*为正值时,序列呈上升趋势,反之则为下降趋势,|*Z*|越大,则说明序列的趋势变化越显著。通常,当|*Z*|≥1.960、2.567时,分别通过了置信度为95%、99%的显著性检验。

3 结果与讨论

3.1 太湖无锡水域水质时间变化特征

根据 2010~2020 年太湖无锡水域 T_{TLI} 与 P_w 变化趋势(图 2),可将其划分为两个阶段:① 2010~2014 年为显著下降阶段。 T_{TLI} 由 60.58 下降至 54.67,由中度富营养化转变为轻度富营养化, P_w 则由 1.50 下降至 1.12;② 2015~2020 年为波动下降阶段。 T_{TLI} 在 54.33~57.23 之间,整体处于轻度富营养化水平, P_w 在 1.12~1.26 之间,比值均大于 1,表明水体处于污染状态。M-K 检验显示, T_{TLI} 与 P_w 在 10 年间均呈显著下降趋势,平均每年分别下降 0.33、0.03。

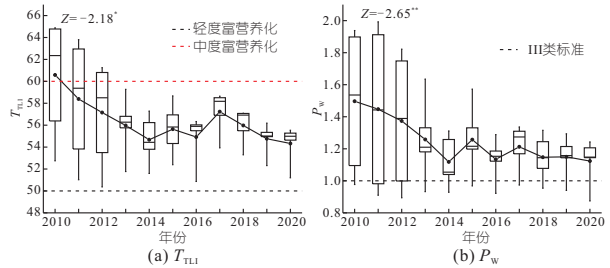


图 2 太湖无锡水域综合营养状态指数与综合污染指数时间变化趋势

Fig. 2 Time change curve of variation trends of T_{TLI} and P_w in Wuxi water area of Taihu Lake

整体来看,太湖无锡水域水质在研究期内改善明显。2007 年 5 月太湖无锡发生水污染事件后,太湖流域实施了一系列治理措施,包括升级与改造流域内的污水处理厂、关闭污染严重或不达标企业、建设高标准农田等,有效改善了入湖河流水质,从而进一步改善了太湖水环境质量。

3.2 太湖无锡水域各湖区水质指标时间变化趋势

3.2.1 水质指标年际变化趋势

2010~2020 年太湖无锡水域各湖区水质指标年际变化趋势见图 3(a)~(e)。TP 浓度多年均值为 2.52 mg/L(V 类),*Z* 值为 0,无明显变化趋势。 I_{Mn} 波动较大,*Z* 值为 -1.71,多年均值由 5.36 mg/L(III 类)降至 4.0 mg/L(II 类)。TN、 NH_3-N 和 Chl. a 浓度变化具有明显阶段性,*Z* 值

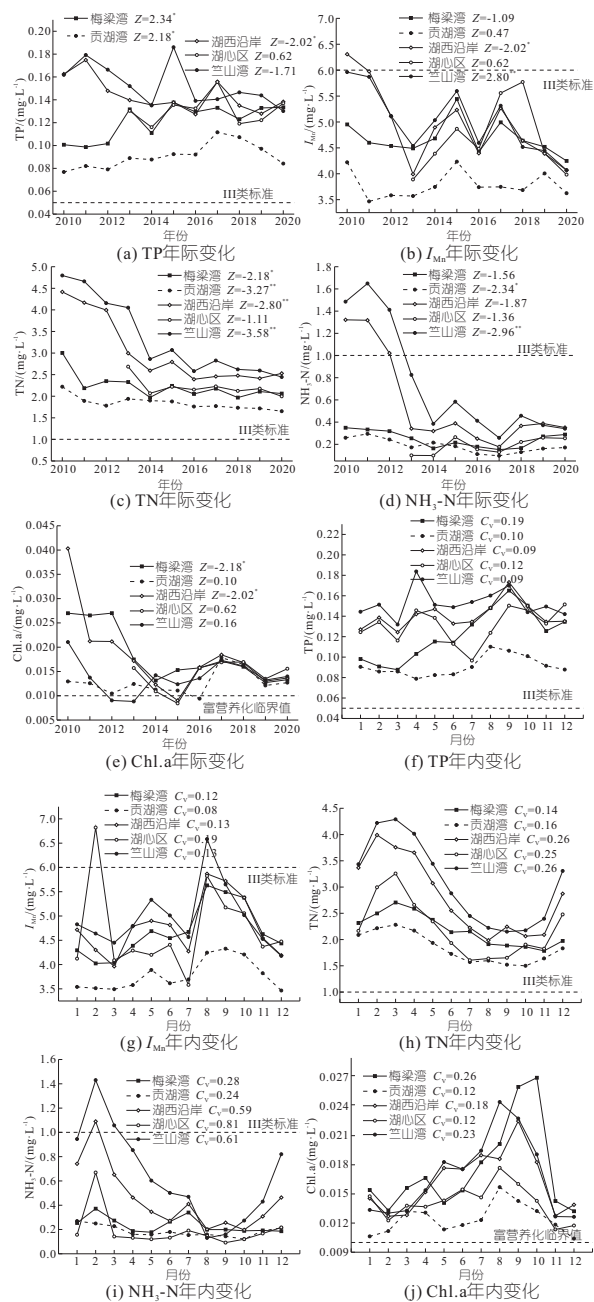


图 3 太湖无锡水域水质指标年际、年内变化曲线

Fig. 3 Time change curve and monthly change curve of water quality indexes in Wuxi water area of Taihu Lake

分别为-3.43、-2.18、-1.71,具体表现为湖区 TN、NH₃-N 浓度在 2010~2014 年呈显著下降趋势,其中竺山湾与湖西沿岸的 TN、NH₃-N 浓度下降尤为明显,分别下降了 40%、74% 和 41%、76%,之后呈波动下降趋势,2020 年 TN 浓度均值为 2.14 mg/L(劣 V 类),NH₃-N 浓度均值为 0.3 mg/L(II 类)。湖区 Chl. a 浓度在 2010~2015 年呈显著下降趋势,2016~2020 年呈先上升后下降趋势,2017 年为拐点,2020 年则降低至 0.014 mg/L。

总体而言,太湖无锡水域因早期污染严重,采取治理措施后效果明显,2010~2014 年湖区各水

质指标浓度均呈下降趋势,尤以 TN、NH₃-N、Chl. a 浓度下降明显,这是太湖治理 8 年的有效成果。2015 年太湖流域发生洪水,大量污染物进入湖体,造成水质反弹,其中 I_{Mn}、TP 浓度回升明显。2017 年湖区水质因蓝藻严重暴发而再次恶化,其中 I_{Mn}、Chl. a、TP 浓度较 2016 年分别回升了 15%、12%、24%。

3.2.2 水质指标年内变化趋势

2010~2020 年太湖无锡水域各湖区水质指标年内变化趋势见图 3(f)~(j)。TP 浓度的 C_V 均值为 0.09,年内变化较小,春秋季节(4~11 月)保持较高浓度水平,其中 9 月出现峰值,均值为 0.15 mg/L(V 类)。除湖心区 2 月份 I_{Mn} 突增(增至 6.8 mg/L)外,I_{Mn} 年内变化较小,C_V 均值为 0.11,其中 7~9 月出现小高峰。TN 和 NH₃-N 浓度的 C_V 均值分别为 0.22、0.50,年内变化较大,具体表现为冬春季(12 月~次年 4 月)浓度较高,夏秋季(5~11 月)浓度相对较低。Chl. a 浓度的 C_V 均值为 0.18,其中夏季(5~7 月)浓度迅速升高,在 8~10 月达到峰值(0.018~0.020 mg/L),冬春季保持较低浓度水平。

3.3 综合污染指数、综合营养状态指数的关键水质指标判定

将各水质指标与 T_{TLI}、P_w 进行 Pearson 相关性分析,结果见图 4(图中圆形的面积与颜色表示相关性大小,面积越大,颜色越深,相关性越强,反之相关性越弱。* P ≤ 0.05, ** P ≤ 0.01)。T_{TLI} 与 TP 呈极显著正相关(P < 0.01),相关系数为 0.98,与 TN、I_{Mn} 呈显著正相关(P < 0.05),相关系数均为 0.94,表明水体富营养化与水体氮磷含量和有机污染程度密切相关。P_w 与 TN、TP 呈极显著正相关(P < 0.01),相关系数分别为 0.98、0.97,说明水体氮磷污染严重,其中 TN 是太湖无锡水域严重超标因子,其单项污染指数一直大于 1,造成水域总体污染指数不能达标。P_w 与 NH₃-N 呈

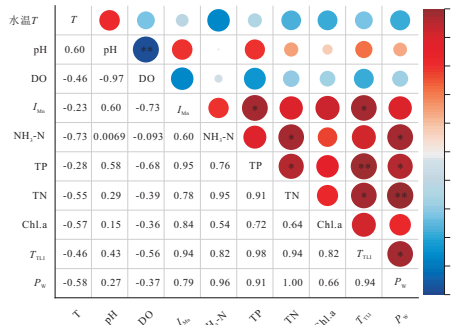


图 4 太湖无锡水域水质指数相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of water quality indexes in Wuxi water area of Taihu Lake

显著正相关($P < 0.05$), 相关系数为 0.89。

3.4 太湖无锡水域水质空间变化特征

太湖无锡水域 T_{TLI} 、 P_w 空间分布特征见图 5。由图 5 可知, 均在水域西北部与北部呈现较高值。 T_{TLI} 评价结果处于轻度富营养化, 其中竺山湾与湖西沿岸接近中度富营养化, 其 T_{TLI} 值分别是轻度富营养化限值($T_{TLI} = 50$)的 1.18、1.16 倍。 P_w 高值区主要为竺山湾与湖西沿岸, 分别达到 1.41、1.30, 贡湖湾相对清洁, P_w 为 0.86。

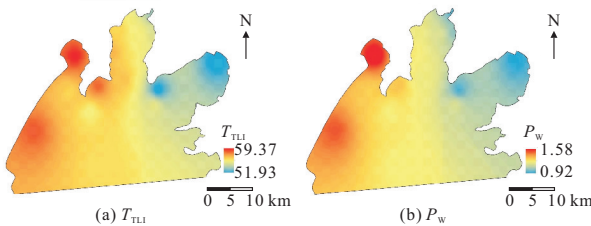


图 5 太湖无锡水域综合营养状态指数与综合污染指数空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of T_{TLI} and P_w in Wuxi water area of Taihu Lake

为进一步探究不同水质因子的空间分布特征, 具体分析太湖无锡水域不同湖区的水质和营养状态(图 6), 其中竺山湾和湖西沿岸的 TN 和 NH_3-N 浓度显著高于其他湖区, TP 和 I_{Mn} 浓度空间分布特征相似, 表现为竺山湾 > 湖西沿岸 > 梅梁湾 > 湖心区 > 贡湖湾。就 Chl. a 浓度而言, 湖西沿岸和梅梁湾为显著高值区, 竺山湾次之, 湖心区与贡湖湾则相对较低。

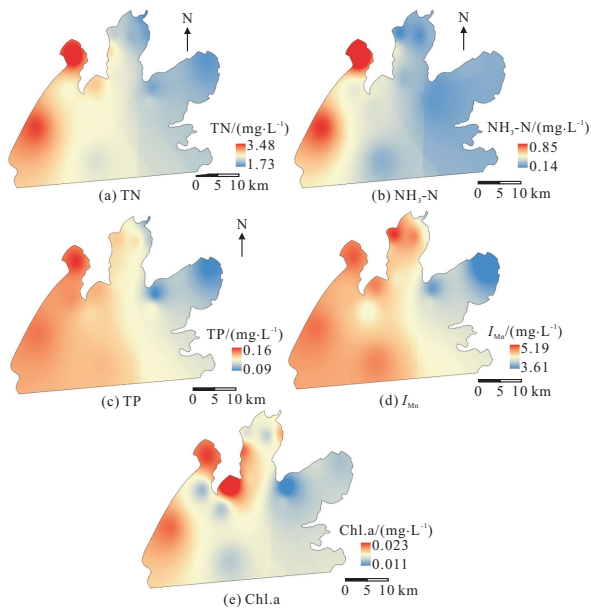


图 6 太湖无锡水域水质因子空间分布特征

Fig. 6 Spatial distribution characteristics of water quality factors in Wuxi water area of Taihu Lake

研究表明, 太湖无锡水域水质具有较大的空间异质性, 水域北部与西北部污染较严重。一方

面, 竺山湾、梅梁湾及湖西沿岸的上游有多条主要入湖河流, 入湖污染负荷较大。另一方面, 竺山湾、梅梁湾为半封闭湖湾, 水动力条件较差, 污染物不易扩散至开阔地区, 同时夏季受到盛行东南风的影响, 蓝藻容易聚集在湖湾内, 藻类大量死亡沉积导致湖体污染程度加剧。贡湖湾水质较好, 这可能与引江济太工程有关, 不仅接收了水质优良的长江水, 同时还向外排放了污水, 有效促进了湖湾的水交换, 降低了其营养负荷^[8]。

3.5 入湖河流水质及污染物通量与湖区水质响应关系

2013~2020 年太湖无锡沿岸入湖河道水质变化趋势(图 7)与湖区水质变化基本一致, 整体呈现逐步降低趋势。TN、 NH_3-N 浓度在 2013~2014 年以后逐年下降, 年均下降率分别为 6%、13%; I_{Mn} 变化较大, 范围为 4.82~5.9 mg/L, 均值为 5.24 mg/L(Ⅲ类); TP 浓度波动较大, 变化范围为 0.20~0.24 mg/L, 介于Ⅲ~Ⅳ类。

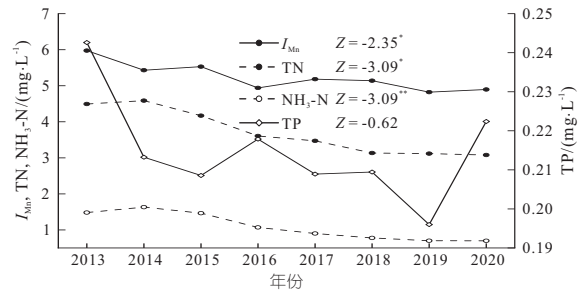


图 7 太湖无锡水域入湖河道水质指标年际变化趋势

Fig. 7 Inter-annual variation trend of water quality indexes of inflowing rivers in Wuxi water area of Taihu Lake

M-K 检验显示, I_{Mn} 、TN、 NH_3-N 浓度的 Z 值分别为 -2.35、-3.09、-3.09, 具有显著下降趋势, TP 浓度的 Z 值为 -0.62, 其变化趋势无显著性。总体而言, 尽管入湖河道各水质指标浓度均呈下降趋势, 但仍显著高于湖水水质指标浓度, 说明环湖河道入湖污染负荷会对太湖无锡水域水质造成影响。

将入湖河道污染物浓度及通量与主要湖区水质进行相关性分析, 结果见表 1。湖区 NH_3-N 与 NH_3-N 入湖通量呈显著正相关($P < 0.05$), 除梅梁湾外, 湖区 TN 与入湖河流 TN 浓度呈显著正相关($P < 0.05$), 表明 NH_3-N 与 TN 外源输入是影响太湖无锡水域氮含量的主要因素。因此, 采取相应措施减少入湖氮污染物通量对于控制太湖无锡水域氮含量具有重要意义。TP 浓度与 TP 入湖浓度及污染物通量无显著相关性, 这可能与湖泊沉积物中的内源磷释放对湖区 TP 浓度造成影响有关^[9]。 I_{Mn} 入湖通量及浓度与湖区浓度无

表 1 太湖无锡水域湖区水质与入湖河流污染物浓度及通量的相关关系

Tab. 1 Correlation between water quality in Wuxi water area of Taihu Lake and the concentration and flux of pollutants in rivers entering the lake

项目	指标	梅梁湾		湖西沿岸		竺山湾	
		相关系数	<i>P</i>	相关系数	<i>P</i>	相关系数	<i>P</i>
浓度	TN	0.375	0.359	0.731	<0.05*	0.724	<0.05*
	NH ₃ -N	0.135	0.750	0.037	0.931	0.560	0.149
	TP	0.028	0.947	0.149	0.725	-0.083	0.844
	<i>I</i> _{Mn}	0.351	0.394	0.063	0.883	0.393	0.335
通量	TN	0.565	0.113	0.493	0.177	0.277	0.471
	NH ₃ -N	0.796	<0.05*	0.899	<0.05*	0.812	<0.05*
	TP	-0.233	0.546	0.222	0.566	0.045	0.908
	<i>I</i> _{Mn}	0.170	0.748	0.296	0.569	0.156	0.768

显著相关性,这与吕文等^[10]研究结果一致。究其原因,可能是除河道外源输入外,湖区 *I*_{Mn} 还受到水位、水温等理化因子,及湖湾蓝藻水华暴发与堆积产生的内源污染等环境因子的影响^[11]。

4 结论

a. 2010~2020 年太湖无锡水域 *P*_w 与 *T*_{TL1} 均呈显著下降趋势。湖区 *I*_{Mn}、TN、NH₃-N、Chl. a 浓度呈下降趋势,TP 浓度变化趋势不明显。水质年内季节变化明显,*I*_{Mn}、Chl. a、TP 浓度在夏秋季保持较高值,TN、NH₃-N 浓度在冬春季保持较高值。

b. 空间上,营养盐浓度在水域西北部与北部呈现较高值,总体表现为竺山湾与湖西沿岸污染最严重,梅梁湾、湖心区次之,贡湖湾的污染程度相对较低。

c. 2013~2020 年太湖无锡水域沿岸入湖河流 *I*_{Mn}、TN、NH₃-N 浓度呈显著下降趋势,TP 浓

度下降不显著。湖区 TN、NH₃-N 浓度分别与入湖河流 TN 浓度和 NH₃-N 入湖通量呈显著正相关关系,表明太湖无锡水域水质不仅与入湖污染物浓度有关,还与入湖污染物通量有关。

参考文献:

- [1] 胡雅杰,马静,黄国情. 基于多种方法的太湖综合水质评价比较[J]. 水利水运工程学报,2015(5): 67-74.
- [2] 毛新伟,徐枫,徐彬,等. 太湖水质及富营养化变化趋势分析[J]. 水资源保护,2009, 25(1): 48-51.
- [3] 戴秀丽,钱佩琪,叶凉,等. 太湖水体氮、磷浓度演变趋势(1985-2015年)[J]. 湖泊科学,2016, 28(5): 935-943.
- [4] 吴浩云,贾更华,徐彬,等. 1980 年以来太湖总磷变化特征及其驱动因子分析[J]. 湖泊科学,2021, 33(4): 974-991.
- [5] 代晓颖,徐栋,武俊梅,等. 2015-2019 年武汉市湖泊水质时空变化[J]. 湖泊科学,2021, 33(5): 1415-1424.
- [6] 谢慧钰,胡梅,嵇晓燕,等. 2011~2019 年鄱阳湖水水质演化特征及主要污染因子解析[J]. 环境科学,2022,43(12):5585-5597.
- [7] 刘聚涛,方少文,冯倩,等. 基于 Mann-Kendall 法的湖泊稳态转换突变分析[J]. 中国环境科学,2015, 35(12): 3707-3713.
- [8] 朱伟,薛宗璞,章元明,等. “引江济太”对 2016 年后太湖总磷反弹的直接影响的分析[J]. 湖泊科学,2020, 32(5): 1432-1445.
- [9] QIN B, PAERL H W, BROOKES J D, et al. Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007-2017) efforts [J]. Science bulletin (Beijing),2019, 64(6): 354-356.
- [10] 吕文,杨惠,杨金艳,等. 环太湖江苏段入湖河道污染物通量与湖区水质的响应关系[J]. 湖泊科学,2020, 32(5): 1454-1462.
- [11] 范成新,张路,秦伯强,等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2003,33(8):760-768.

Water Quality Spatiotemporal Variation and Cause Analysis of Wuxi Water Area of Taihu Lake from 2010 to 2020

LIU Jia-yue, JIANG Cui-ling, GENG Hui

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The spatial and temporal variations of water quality in Wuxi water area of Taihu Lake are important for regional eutrophication control and water pollution control. Based on the monthly water quality data of Wuxi water area of Taihu Lake and the water quantity data of rivers entering the lake from 2010 to 2020, the spatial and temporal variation characteristics of water quality and eutrophication status of the lake were evaluated using the integrated pollution index and integrated nutrient status index. The inter-annual variation pattern and spatial pattern of major water quality indicators were analyzed, and the correlation between the water quality of the lake and the concentration and flux of pollutants in rivers entering the lake was investigated. The results show that the water quality of Wuxi water area of Taihu Lake improved significantly from 2010 to 2020, and the integrated pollution index and integrated nutrient status index of the whole lake decreased by 25% and 10%, respectively. Except for the concentration of total phosphorus concentration with no obvious change trend, the concentration of other water quality factors in the lake area all showed a downward trend. In terms of seasonal changes, permanganate index, total phosphorus, and chlorophyll-a concentrations maintained higher values in summer and autumn, while total nitrogen and ammonia nitrogen concentrations maintained higher values in winter and spring. Spatially, nutrient concentrations decreased from the northwestern and northern lakes to the southeastern and eastern lakes. The changes in water quality of rivers entering the lake from 2013 to 2020 are basically consistent with the trends of water quality in the lake area. The concentration of total nitrogen and ammonia nitrogen in the lake area are significantly positively correlated with the concentration of total nitrogen in inflow river and the flux of ammonia nitrogen into the lake, respectively. The spatial pattern response is consistent, and the exogenous input of the inflow river is an important factor affecting the spatial and temporal changes of water quality in the lake area.

Key words: Taihu Lake; Wuxi water area; water quality; spatio-temporal variation; influencing factor