

# 2009—2018 年江苏省太湖西岸 主要入湖河道水质变化趋势

陆 隽<sup>1</sup>, 孔繁璠<sup>1</sup>, 张 鸽<sup>2</sup>, 李 骏<sup>2</sup>

(1. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏 常州 213022)

**摘要:** 为了解太湖西岸主要入湖河流的水质变化趋势, 选取陈东港、殷村港、太滬运河、大浦港、漕桥河 5 条主要入湖河流 2009—2018 年水质监测资料, 通过氨氮、高锰酸盐指数、总磷和总氮质量浓度年际变化分析及季节性 Kendall 检验, 分析 5 条主要入湖河流的水质变化趋势。

**关键词:** 入湖河流; 水质; 趋势; 季节性 Kendall 检验法; 太湖

中图分类号: X832

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2020)03-0005-05

## Water quality tendency of main inflow rivers entering the west bank of Taihu Lake in Jiangsu Province from 2009 to 2018

LUJun<sup>1</sup>, KONG Fanfan<sup>1</sup>, ZHANG Ge<sup>2</sup>, LI Jun<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210029, Jiangsu;

2. Changzhou Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Changzhou 213022, Jiangsu)

**Abstract:** In order to understand the water quality tendency of the main inflow rivers entering the west bank of Taihu Lake, the water quality monitoring data of five main rivers entering the lake from 2009 to 2018 was selected, including Chendong River, Yincun River, Taige Canal, Dapu River and Caoqiao River, and the tendency of water quality of 5 inflow rivers was analyzed by inter-annual variation of concentration and seasonal Kendall test of ammonia nitrogen, permanganate index, total phosphorus and total nitrogen index.

**Key words:** the Taihu Lake; inflow rivers; water quality; tendency; the seasonal Kendall test method

太湖流域地跨江、浙、沪、皖, 拥有大小城市 38 座<sup>[1]</sup>, 太湖地处太湖流域中心, 是流域水资源的调蓄水库, 不仅无锡、苏州和湖州等沿湖大中型城市主要饮用水水源地, 而且也是上海、嘉兴等下游城市的重要水源。20 世纪 80 年代以来, 随着太湖流域人口的增加、经济的高速发展, 太湖水质污染问题日益突出, 太湖全湖平均水质由原来的Ⅱ类为主下降至目前的Ⅳ~Ⅴ类。2011 年, 国务院颁布了《太湖流域管理条例》, 对太湖流域的水环境保护和治理起到了重要作用。入太湖河流是影响太湖水环境的重要因素, 其进入太湖的水量大小、水质好

坏直接影响到太湖的水量、水质变化<sup>[2]</sup>, 根治太湖污染, 关键是控制污染源头, 江苏省政府确定了“太湖先治水, 治水先治河”的工作思路, 近 10 年来, 各级政府部门大力整治入湖河道, 因此, 分析研究主要入湖河道水质变化趋势对太湖整治成效评判和长效管理具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

由于太湖西部沿岸河流地势较高, 出入湖水量均以入湖为主, 因此, 西部沿岸河流的水质直接影

收稿日期: 2019-09-24

作者简介: 陆隽(1987—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水环境监测、水资源保护工作。

响太湖湖体水质状况,西部沿岸的河流中,武进港、直湖港、雅浦港近年来均常年关闸,其余河道中,入湖水量较大的为陈东港、殷村港、太滪运河、大浦港<sup>[3]</sup>,结合《太湖流域管理条例》中提出的主要入太湖控制河道,本文选取陈东港、殷村港、太滪运河、大浦港、漕桥河 5 条河道为研究对象。

### 1.2 水质参数

近 10 年来陈东港、殷村港、太滪运河、大浦港、漕桥河水质主要为Ⅳ~Ⅴ类,各河道的氨氮( $\text{NH}_3 - \text{N}$ )、总磷(TP)超标情况严重(以Ⅲ类为标准),高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )也时有超标现象。同时,目前太湖水质以Ⅳ类为主,部分湖区为Ⅴ类,甚至劣Ⅴ类;太湖水体富营养化水平以中度富营养为主<sup>[4]</sup>,TP、TN 仍然是太湖湖体水质改善的限制性因子。因此,选取 2009—2018 年上述 5 条入湖河道  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 及 TN 的水质监测成果进行水质变化趋势分析。水质指标的评价依据《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)。

### 1.3 季节性检验法

入湖河道的水质变化趋势分析方法选用水利部《地表水资源评价技术规程》(SL395—2007)所规定的季节性 Kendall 检验方法中的浓度变化趋势分析。

季节性 Kendall 检验的原理是将历年相同月或季的水质资料进行比较,如果后面的值(在时间上)高于前面的值记为“+”号,否则记作“-”号。如正号的个数比负号的多,则可能为上升趋势;反之,则可能为下降趋势。如果水质资料不存在上升或下降趋势,则正、负号的个数分别为 50%<sup>[5-7]</sup>。季节性 Kendall 检验将水质资料在历年相同月份间进行比较,避免了季节性的影响。同时,数据比较只考虑相对排列而不考虑其大小,能避免水质资料中常见的漏测值问题。

对于季节性 Kendall 检验来说,零假设  $H_0$  为随机变量与时间独立,且全年 12 个月的水质资料具有相同的概率分布。设有  $n$  年  $P$  月的水质观测资料序列  $X$  为:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots \\ X_{21} & X_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $X_{11}, \dots, X_{nP}$  为水质观测浓度月平均值。对于  $P$  月中第  $i$  ( $i < P$ ) 月的情况,令第  $i$  月历年水质序列值相比较(后面的数与前面的数之差)的正负号

之和  $S_i$  为

$$S_i = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_{ij} - x_{ik}) \quad (1 \leq k \leq j \leq n)$$

$$\text{sgn}(x_{ij} - x_{ik}) = \begin{cases} 1 & \text{当}(x_{ij} - x_{ik}) > 0 \\ 0 & \text{当}(x_{ij} - x_{ik}) = 0 \\ -1 & \text{当}(x_{ij} - x_{ik}) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

由此,第  $i$  月内可作比较的差值数据组个数  $m_i$  为

$$m_i = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n |\text{sgn}(x_{ij} - x_{ik})| \quad (3)$$

式中: $n_i$  为第  $i$  月内水质序列中非漏测值个数。在零假设下,随机序列  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, P$ ) 近似地服从正态分布,则  $S_i$  的均值和方差分别如下:

$$\text{均值: } E(S_i) = 0 \quad (4)$$

$$\text{方差: } \sigma^2 = \text{Var}(S_i) = \frac{1}{18} [n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)] \quad (5)$$

当  $n_i$  个非漏测值中有  $t$  个数相同,则方差  $\sigma^2$  的计算式变为

$$\sigma^2 = \text{Var}(S_i) = \frac{1}{18} [n_i(n_i - 1)(2n_i + 5) - \sum t(t-1)(2t+5)] \quad (6)$$

对于  $P$  月的总体情况,

令  $S = \sum_{i=1}^P S_i$ 、 $m = \sum_{i=1}^P m_i$ , 在零假设下,  $P$  月  $S$  的均值和方差如下:

$$\text{均值: } E(S) = \sum_{i=1}^P E(S_i) = 0 \quad (7)$$

方差:

$$\sigma^2 = \text{Var}(S) = \sum_{i=1}^P \sigma_i^2 + \sum_{i \neq h}^P \sigma_{ih} = \sum_{i=1}^P \text{Var}(S_i) + \sum_{i=1}^P \sum_{h=1}^P \text{Cov}(S_i, S_h) \quad (8)$$

式中: $S_i$  和  $S_h$  ( $i \neq h$ ) 都是独立随机变量的函数,即  $S_i = f(X_i)$ ,  $S_h = f(X_h)$ , 其中  $X_i$  为  $i$  月历年的水质序列,  $X_h$  为  $h$  月历年的水质序列,并且  $X_i \cap X_h = \Phi$ ; 因为  $X_i$  和  $X_h$  为分别来自  $i$  月和  $h$  月的水质资料,并且总体观测资料序列  $X$  的所有元素是独立的,故协方差  $\text{Cov}(S_i, S_h) = 0$ 。将其代入式(8)中,则:

$$\text{Var}(S) = \sum_{i=1}^P \frac{1}{18} [n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)] \quad (9)$$

当  $n$  年水质序列中有  $t$  个数相同时,同样有:

$$\text{Var}(S) = \sum_{i=1}^P \frac{1}{18} [n_i(n_i - 1)(2n_i + 5) - \sum t(t-1)(2t+5)] \quad (10)$$

Kendall 发现,当  $n > 10$  时,  $S$  也服从正态分布,并且标准方差  $Z$  为

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} (S > 0) \\ 0 (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} (S < 0) \end{cases} \quad (11)$$

Kendall 检验统计量  $\tau$  定义为:  $\tau = S/m$ 。由此,在双尾趋势检验中,对于给定的趋势检验显著性水平  $\alpha$ ,如果  $|Z| \leq Z\alpha/2$ ,则接受零假设。这里  $\Phi(Z\alpha/2) = \alpha/2$ ,  $\Phi$  为标准正态分布函数。

通常取显著性水平  $\alpha$  为 0.1 和 0.01,当  $\alpha \leq 0.01$  时,说明检验具有高度显著性水平;当  $0.01 < \alpha \leq 0.1$  时,说明检验是显著的。在  $\alpha$  计算结果满足上述二条件情况下,如果  $\tau$  为正,则表明水质序列具有显著或高度显著上升趋势;若  $\tau$  为负时,说明水质序列趋势是下降的;当  $\tau$  为零时,表明无趋势。

趋势分析结果分为上升、下降和无趋势 3 类及高度显著上升、显著上升、无趋势、显著下降和高度显著下降 5 级。

根据显著性水平  $\alpha$  来确定水质变化趋势的显著性:  $\alpha \leq 0.01$ ,水质变化趋势高度显著;  $0.01 < \alpha \leq 0.1$ ,水质变化趋势显著;  $\alpha > 0.1$ ,水质变化无趋势。

## 2 评价结果与分析

经统计计算,陈东港、殷村港、太浦运河、大浦港、漕桥河 5 条入湖河道的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 及 TN 的质量浓度变化趋势结果见表 1。由于资料年限的系列长度完全符合季节性 Kendall 检验方法的要求,所选择的检验参数反映了入湖河道水质污染特点,并代表了入湖河道的主要污染物,因此认为分析检验结果是可信的。

### 2.1 $\text{COD}_{\text{Mn}}$

2009—2018 年湖西主要入湖河流  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  质量浓度年际变化表明,各河流之间  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  质量浓度差距较小,且均呈下降趋势。2009—2011 年间,陈东港、殷村港、太浦运河、大浦港、漕桥河的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  质量浓度基本处于 IV 类,2012—2014 年,各河道  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  月均质量浓度在 III 类左右波动,2015—2018 年,各河道  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  质量浓度持续下降,达到 III 类以上,其中,大浦港、陈东港及殷村港个别月份可达到 II 类标准(4 mg/L)(图 1)。

根据季节性 Kendall 检验结果,陈东港、殷村港、太浦运河、大浦港、漕桥河  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  质量浓度的变化趋势均为负,显著性水平  $\alpha$  值均为 0%,该指标呈高度显著下降趋势。

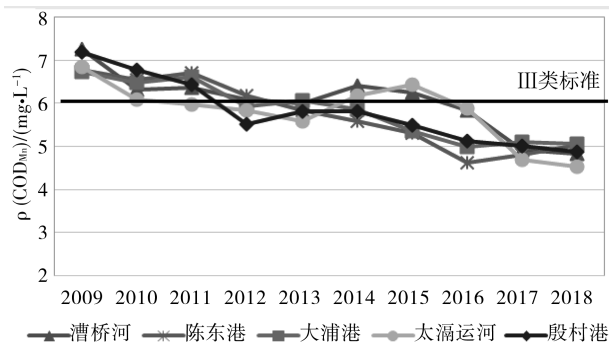


图 1  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  质量浓度变化趋势

### 2.2 $\text{NH}_3\text{-N}$

2009—2018 年湖西主要入湖河流  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度年际变化表明,漕桥河、太浦运河、殷村港的  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度较陈东港及大浦港偏高。各河流  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度变化呈下降趋势,漕桥河、太浦运河、殷村港  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度年均值在 2009 年时处于劣 V 类,至 2018 年下降至 III 类标准以下;陈东港、大浦港  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度年均值 2009 年时处于 V 类,至 2018 年下降至 III 类标准以下,接近 II 类标准(0.5 mg/L),夏、秋季月份质量浓度可低于 II 类标准(图 2)。

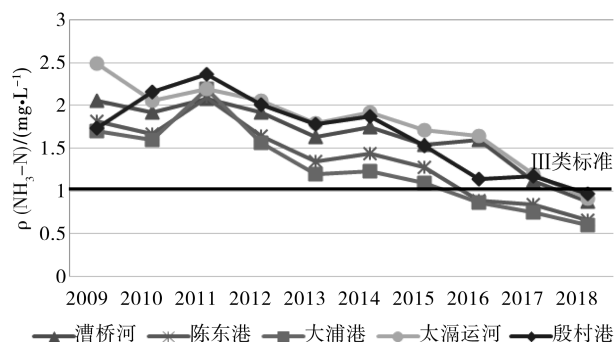


图 2  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度变化趋势

根据季节性 Kendall 检验结果,陈东港、殷村港、太浦运河、大浦港、漕桥河  $\text{NH}_3\text{-N}$  质量浓度的变化趋势均为负,显著性水平  $\alpha$  值均为 0%,该指标呈高度显著下降趋势。

### 2.3 TP

2009—2018 年湖西主要入湖河流 TP 质量浓度年际变化表明,除 2015 年陈东港、大浦港 TP 年均质量浓度低于 III 类标准以外,其余河流各年份 TP 年均质量浓度均未达到 III 类标准。2009—2010 年漕桥河、太浦运河 TP 年均质量浓度为 V 类,后逐步下降至 IV 类标准以下,虽在 2013—2014 年略有上升,但 2016 年之后持续下降。陈东港、大浦港及殷村港的 TP 年均质量浓度在 2011 年达到峰值,后逐

表 1 水质浓度变化趋势

测站名称	水质项目	变化趋势	变化率/%	显著水平( $\alpha$ )/%	评价结论
太滬运河	COD <sub>Mn</sub>	-0.167	-2.8	0.0	高度显著下降
	NH <sub>3</sub> -N	-0.147	-9.0	0.0	高度显著下降
	TP	-0.009	-3.5	0.0	高度显著下降
	TN	-0.088	-1.7	5.9	显著下降
漕桥河	COD <sub>Mn</sub>	-0.200	-3.3	0.0	高度显著下降
	NH <sub>3</sub> -N	-0.108	-7.1	0.0	高度显著下降
	TP	-0.009	-3.6	0.0	高度显著下降
	TN	-0.025	-0.5	50.2	无明显升降趋势
陈东港	COD <sub>Mn</sub>	-0.250	-4.4	0.0	高度显著下降
	NH <sub>3</sub> -N	-0.128	-10.9	0.0	高度显著下降
	TP	-0.005	-2.1	0.4	高度显著下降
	TN	-0.175	-4.7	0.0	高度显著下降
殷村港	COD <sub>Mn</sub>	-0.200	-3.5	0.0	高度显著下降
	NH <sub>3</sub> -N	-0.144	-9.7	0.0	高度显著下降
	TP	-0.002	-0.7	21.4	无明显升降趋势
	TN	-0.132	-3.4	0.0	高度显著下降
大浦港	COD <sub>Mn</sub>	-0.250	-4.4	0.0	高度显著下降
	NH <sub>3</sub> -N	-0.128	-12.2	0.0	高度显著下降
	TP	-0.001	-0.4	69.1	无明显升降趋势
	TN	-0.188	-5.0	0.0	高度显著下降

年下降,但从 2015 年开始略呈回升趋势,2018 年年均质量浓度较 2009 年仍然偏高(图 3)。

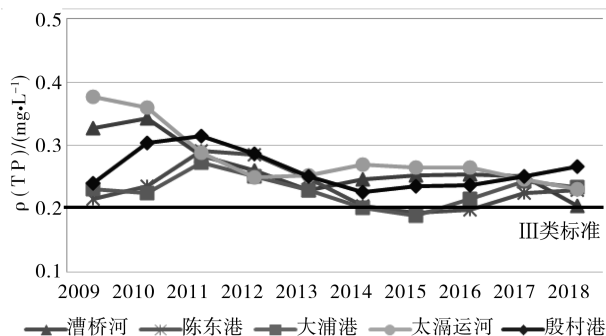


图 3 TP 质量浓度变化趋势

根据季节性 Kendall 检验结果,太滬运河、漕桥河、陈东港的 TP 质量浓度变化趋势为负,显著性水平  $\alpha$  值为 0%,呈高度显著下降趋势,其中陈东港的变化趋势绝对值相对较小,说明下降趋势不及太滬运河及漕桥河;殷村港及大浦港的 TP 质量浓度变化显著性水平  $\alpha$  值分别为 21.4%、69.1%,无明显升降趋势。

## 2.4 TN

2009—2018 年湖西主要入湖河流 TN 质量浓度年际变化表明,各入湖河流的 TN 质量浓度均远高于目前太湖平均水平(1.5 mg/L),其中漕桥河、太滬运河 TN 质量浓度高于其余 3 条河流。陈东港、

大浦港 TN 质量浓度总体呈逐年下降趋势,2018 年年均质量浓度较 2009 年分别下降了 1.62 mg/L、1.57 mg/L;太浦运河、殷村港的 TN 质量浓度呈波动下降趋势,在 2010—2011 年及 2014 年分别出现 2 次小峰值,2014—2018 年逐步下降,但下降趋势趋缓;漕桥河的 TN 质量浓度则一直在 5.0~6.0 mg/L 间波动(图 4)。

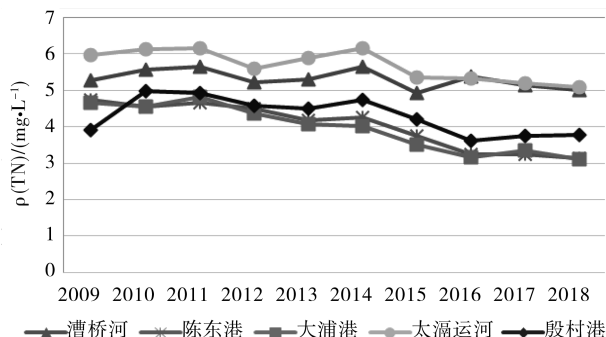


图 4 TN 质量浓度变化趋势

根据季节性 Kendall 检验结果,陈东港、殷村港、大浦港的 TN 质量浓度变化趋势为负,且显著性水平  $\alpha$  值为 0%,呈高度显著下降趋势;太浦运河的 TN 质量浓度变化趋势为负,但显著性水平  $\alpha$  值为 5.9%,呈下降趋势;漕桥河 TN 质量浓度无明显升降趋势。

### 3 结 语

近年来,无锡、常州市政府相继编制了主要入湖河流水环境综合整治实施方案,推进生态湿地建设,并建立了目标管理、责任落实、督查考核等一系列工作机制,加快产业转型升级、淘汰落后产能, COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$  等主要污染物排放量大幅削减。通过 2009—2018 年 5 条太湖湖西主要入湖河流污染

物浓度年际变化分析及季节性 Kendall 检验表明,该 5 条河流的水质均大幅好转,污染物浓度呈逐步降低趋势,说明近年来各级政府部门水环境整治效果十分显著。

但同时不能忽视的是殷村港、陈东港及大浦港近 3 年 TP 质量浓度有回升迹象,各河流的 TN 质量浓度仍然居高,且进入下降瓶颈期,进一步治理难度大,应更深入研判污染物来源,查找症结所在,制定更为精准的综合治理方案,保障太湖西岸入湖河道的水环境持续改善,逐步削减太湖氮、磷输入,以减小对太湖富营养化的影响。

### 参考文献:

- [1] 罗缙,逢勇,林颖,等. 太湖流域主要入湖河道污染物通量研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(2):131-135.
- [2] 翟淑华,张红举. 环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000—2002 年)[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3):225-230.
- [3] 马倩,刘俊杰,高明远. 江苏省入太湖污染量分析(1998—2007 年)[J]. 湖泊科学, 2010, 2(1):29-34.
- [4] 易娟,徐枫,高怡. 2007 年以来环太湖 22 条主要河流水质变化及其对太湖的影响[J]. 湖泊科学, 2016, 28(6):2267-1174.
- [5] 李建国,王永福,郭翔云,等. 季节性 Kendall 检验在白洋淀水质趋[J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(6):37.
- [6] 彭文启. 现代水环境质量评价理论与方法[M]. 北京:化学工业出版社, 2005:160-165.
- [7] 郭丽峰,郭勇,罗阳,等. 季节性 Kendall 检验法在滦河干流水质分析中的应用[J]. 水资源保护, 2014, 30(5):60-67.