

陈瑞凯,康瑾,赵琰鑫,等.2003~2024年长江流域水质时空演变特征[J].中国环境科学,2025,45(4):2171-2182.

Chen R K, Kang J, Zhao Y X, et al. Spatial and temporal evolution of water quality in the Yangtze River Basin from 2003 to 2024 [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2171-2182.

2003~2024年长江流域水质时空演变特征

陈瑞凯¹,康瑾²,赵琰鑫³,郭琰琪¹,徐晓林¹,王永桂^{1*} (1.中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,区域生态过程与环境演变湖北省重点实验室,湖北武汉430074; 2.湖北省生态环境科学研究院,湖北武汉430072; 3.生态环境部环境规划院,北京100012)

摘要: 揭示三峡水库蓄水以来,长江流域水质时空格局是流域综合治理的基础.基于多元线性逐步回归分析,筛选出2003~2024年间影响长江流域水质的关键指标为TP、COD_{Mn}、NH₃-N、Pb和DO.单因子评价和WQI_{min}指数评价表明长江全流域平均水质达到优秀水平,乌江流域、岷沱江流域以及太湖水系是长江流域污染较为严重的二级流域,其中TP与NH₃-N污染较为突出,水质状况空间异质性显著;使用线性回归分析与季节性Kendall趋势检验,发现长江流域整体水质状况提升趋势显著,具有明显的时间异质性,除汉江外其他二级流域水质状况均有显著上升趋势;三峡水库蓄水以来,上游嘉陵江、乌江流域和宜宾至宜昌干流的TP浓度以及中游洞庭湖、鄱阳湖水系和上游乌江流域NH₃-N浓度出现先上升后下降趋势.从长江全流域耦合二级支流,开展多尺度长序列多指标的水质时空演变特征研究,能为长江流域精准治污提供支撑.

关键词: 三峡水库; 长江流域; 水质评价; 时空演变; 异质性

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)04-2171-12

Spatial and temporal evolution of water quality in the Yangtze River Basin from 2003 to 2024. CHEN Rui-kai¹, KANG Jin², ZHAO Yan-xin³, GUO Yan-qi¹, XU Xiao-lin¹, WANG Yong-gui^{1*} (1.Hubei Key Laboratory of Regional Ecology and Environmental Change, School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2.Hubei Academy of Eco-Environmental Sciences, Wuhan 430072, China; 3.Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2025,45(4): 2171~2182

Abstract: The spatiotemporal evolution of water quality in the Yangtze River Basin since the impoundment of the Three Gorges Reservoir is critical for formulating comprehensive basin management strategies. Using stepwise multiple linear regression analysis, key water quality indicators influencing the basin from 2003 to 2024 were identified as total phosphorus (TP), permanganate index (COD_{Mn}), ammonia nitrogen (NH₃-N), lead (Pb), and dissolved oxygen (DO). Evaluations via the single-factor method and the WQI_{min} index demonstrated that the average water quality across the entire Yangtze River Basin has reached an excellent level. However, secondary basins—including the Wu River Basin, Min-Tuo River Basin, and Taihu Lake water system—exhibited relatively severe pollution, with TP and NH₃-N being the most prominent contaminants. Significant spatial heterogeneity in water quality was observed. Linear regression and seasonal Kendall tests indicated a statistically significant upward trend in the overall water quality of the Yangtze River Basin. All secondary basins, except the Han River Basin, demonstrated significant improvements. Following the Three Gorges Reservoir impoundment, TP concentrations in the upper reaches of the Yangtze River (specifically the Jialing River Basin, Wu River Basin, and the mainstream section from Yibin to Yichang) initially increased and subsequently declined. Similarly, NH₃-N concentrations in the middle reaches (e.g., Dongting Lake and Poyang Lake water systems) and the Wu River Basin located in the upper Yangtze River exhibited comparable trends of initial rise followed by reduction. Conducting research on the spatiotemporal evolution characteristics of water quality across the entire Yangtze River Basin, incorporating secondary tributaries through multi-scale, long-term time series, and multi-indicator analyses, provides critical scientific support for precise pollution mitigation strategies in the region. Such an integrated approach enables a comprehensive understanding of water quality dynamics, identifies pollution hotspots, and informs spatially differentiated management actions, thereby enhancing the efficacy of basin-wide environmental governance.

Key words: Three Gorges Reservoir; Yangtze River Basin; water quality assessment; space-time evolution; heterogeneity

收稿日期: 2024-09-30

基金项目: 湖北省自然科学基金三峡创新发展联合基金(2024AFD371);国家重点研发计划(2022YFC3203502);湖北省科技重大专项(2023BCA003)

* 责任作者, 副教授, wangyg@cug.edu.cn

自 2003 年三峡水库蓄水以来,长江流域经济社会发展迅速,城镇化水平大幅跃升,GDP 占全国比重不断上升^[1].经济社会的持续发展对水环境造成的压力不断加大,加剧了水质的恶化^[2-4].蓄水所引起的水文条件变化和社会经济发展对水质时空格局的叠加影响是长江流域综合治理关注的重点问题.

近来有众多学者开展了相关研究.在全流域尺度:学者们通过单因子评价法和修正水质指数(WQI-DET)等方法,发现自 2008 年以来,长江流域溶解氧(DO)浓度不断上升,氨氮(NH₃-N)浓度不断下降,流域水体耗氧污染明显减轻,河流水体富营养化有所缓解;长江流域中河流级别越低水质相对越差,总磷(TP)已经成为长江流域主要超标指标^[5-8].在子流域尺度:学者们发现上游沱江、乌江流域的 NH₃-N 与 TP 已成为当地的主要污染物^[9-10];中游洞庭湖流域的主要污染物为总氮(TN)与 TP^[11],三峡水库蓄水以来洞庭湖 TN 呈显著增加、TP 呈显著下降趋势^[12];下游太湖流域水质评价为“中等”^[13],流域水质改善明显,TN 浓度显著下降,TP 变化不明显^[14].从研究方法上看:水质评价的主流方法是单因子评价法^[6-7,9,15]与水质指数法(WQI)^[5,13,16-17],其中单因子评价法简单方便,是我国《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[18]所使用的方法,WQI 方法评价结果准确、直观,能够反映水质整体状况.水质的时空异质性演变,主要为线性回归分析^[19]、图表及描述性分析方法^[20],水质序列数据通常具有非正态性、周期性、较

多异常值和缺失值等特点,而非参数统计方法(如 Spearman 秩相关分析、Mann-Kendall 检验、季节性 Kendall 检验)等不要求样本遵循正态分布、且受异常值影响较小,适用面广泛、结论客观准确,因此被广泛应用于水质时间序列趋势的分析^[21-23].随着《长江经济带发展规划纲要》、《长江保护法》、《“十四五”重点流域水环境综合治理规划》、《长江保护修复攻坚战行动计划》等规划、法律以及重要指示相继提出,“共抓大保护、不搞大开发”,要求我们认识长江流域的整体情况,并能识别出重点管控子流域,以支撑在有限的经费与精力条件下,让长江流域水环境保护与综合治理能够更快见到成效.这就要求同时以长江流域为整体,并兼顾子流域开展研究.虽然关于长江流域水质评价已取得丰富成果,但现有研究或以长江流域为一个整体开展研究^[5-8],或选择部分支流进行分析^[9-14],二者兼顾的研究还需要进一步开展.

基于以上背景,本文利用单因子评价法和 WQI_{min} 方法对 2003 年三峡水库蓄水以来长江流域进行多年水质评价,并通过线性回归分析、季节性 Kendall 趋势检验探究长江流域及其二级流域的水质时空异质性演变特征,以便更好地认识长江流域的水质状况,为长江流域综合治理提供科学支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

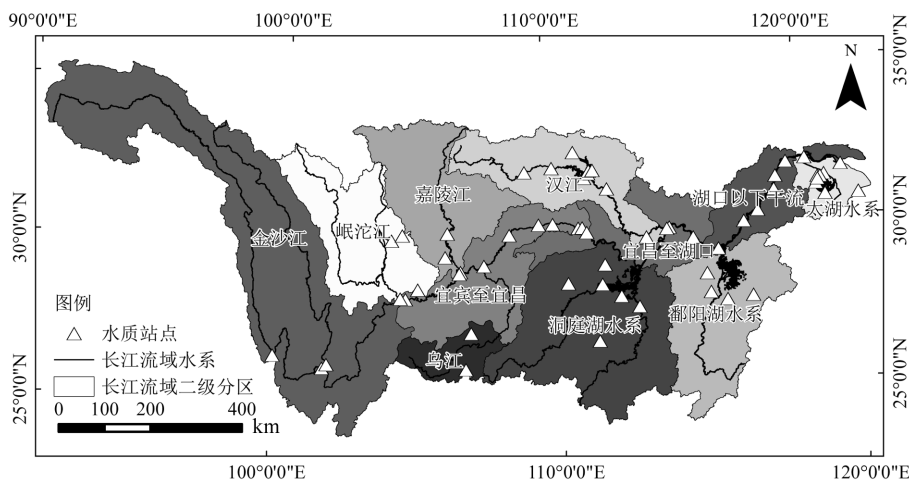


图 1 长江流域分区及水质站点分布

Fig.1 Distribution of zones and water quality stations in the Yangtze River Basin

长江发源于唐古拉山脉各拉丹冬峰,干流全长 6300 余 km,是中国第一长河,流域面积约 180 万 km²,

占我国陆地总面积的 18.8%。长江流域划分为金沙江石鼓以上(占流域总面积的 12.15%)、金沙江石鼓以下(14.41%)、岷沱江(9.13%)、嘉陵江(9.05%)、乌江(2.59%)、宜宾至宜昌(8.01%)、洞庭湖水系(14.71%)、汉江(8.62%)、鄱阳湖水系(9.10%)、宜昌至湖口(5.34%)、湖口以下干流(4.84%)、太湖水系(2.05%)12 个水资源二级区。本研究将金沙江石鼓以上、石鼓以下合并为一个二级流域——金沙江流域,研究对象为 11 个二级流域(图 1)。

1.2 研究数据

(1) 水质数据

数据来源于国家地表水水质手工月度监测数据。从所获得的数据中筛选出 2003~2024 年监测站点位置未发生较大变化、且监测方式与指标均未发生改变的 58 个国控站点(图 1)。选取监测持续时间长、数据质量好、具有代表性的 pH 值、 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、 BOD_5 、DO、As、 Cr^{6+} 、Pb、挥发酚、Cu、氰化物 12 项水质指标。

(2) 基础地理信息数据

长江流域 1:25 万流域分级矢量数据,由国家地球系统科学数据中心-湖泊-流域分中心(<http://lake.geodata.cn>)提供。

1.3 研究方法

1.3.1 单因子评价法 本文按照我国《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[18]和《地表水环境质量评价办法(试行)》(环办〔2011〕22 号)规定的水质标准对长江流域水质进行单因子评价。当流域水质指标浓度超过Ⅲ类标准时,计算其污染物的超标倍数。超标倍数公式如下:

$$B = \frac{\rho - \rho_{\text{III}}}{\rho_{\text{III}}} \quad (1)$$

式中: B 为某评价指标超标倍数; ρ 为某评价指标的质量浓度,单位为 mg/L ; ρ_{III} 为该指标Ⅲ类水质标准限值,单位为 mg/L 。溶解氧不计算超标倍数。

1.3.2 WQI_{min} 指数评价法 采用由 Pesce 和 Wunderlin 于 2000 年提出 WQI 计算公式^[24],如下:

$$\text{WQI} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2)$$

式中: n 为参与计算的水质指标个数; C_i 为第 i 个水质指标的归一化值; P_i 为第 i 个水质指标的权重, P_i 由该水质指标对水质的影响程度确定,影响最大的指标

权重设为 4,最小为 1,相关数值见表 1^[24-26]。

WQI 是一个代表整体水质状况的无量纲数,范围为 $[0,100]$,分值越高代表水质状况越好。为更好地将 WQI 评价结果和单因子评价法进行匹配,参考《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[18]以及其他学者研究成果^[26-29],对 C_i 的阈值进行划分,并将 WQI 值分成五个区间,分别对应五个水质等级:优秀(80~100)、良好(60~80)、中等(40~60)、差(20~40)、极差(0~20)。

表 1 水质指标的归一化值和权重

Table 1 Normalized values and weights of water quality indices

水质指标	单位	权重 (P_i)	归一化值(C_i)					
			100	80	60	40	20	0
pH 值	/	1	6~9					
COD_{Mn}	mg/L	3	≤ 2	≤ 4	≤ 6	≤ 10	≤ 15	≥ 15
$\text{NH}_3\text{-N}$	mg/L	3	≤ 0.15	≤ 0.5	≤ 1	≤ 1.5	≤ 2	≥ 2
TP	mg/L	4	≤ 0.02	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.3	≤ 0.4	≥ 0.4
BOD_5	mg/L	3	≤ 3	≤ 3	≤ 4	≤ 6	≤ 10	≥ 10
DO	mg/L	4	≥ 7.5	≥ 6	≥ 5	≥ 3	≥ 2	≤ 2
As	mg/L	2	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.1	≤ 0.1	≥ 0.1
Cr^{6+}	mg/L	2	≤ 0.01	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.1	≥ 0.1
Pb	mg/L	3	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.1	≥ 0.1
挥发酚	mg/L	3	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.005	≤ 0.01	≤ 0.1	≥ 0.1
Cu	mg/L	2	≤ 0.01	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≥ 1
氰化物	mg/L	2	≤ 0.005	≤ 0.05	≤ 0.2	≤ 0.2	≤ 0.2	≥ 0.2

为增加模型的精确度,同时构建权重模型 $\text{WQI}_{\text{min-a}}$ 和非权重模型 $\text{WQI}_{\text{min-b}}$,并比较两种模型与 WQI 的相关性。权重模型 $\text{WQI}_{\text{min-a}}$ 采用与 WQI 相同的计算公式(2),非权重模型 $\text{WQI}_{\text{min-b}}$ 根据公式(3)来计算。

$$\text{WQI}_{\text{min-b}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (3)$$

1.3.3 WQI_{min} 关键指标提取 首先将 2003~2024 年长江干流(宜宾至宜昌、宜昌至湖口、湖口以下)的水质数据进行对数转换($\lg(x+1)$),以满足正态性^[30],然后进行多元线性逐步回归分析,提取关键指标。

通过回归分析筛选出的 6 个关键参数及其线性方程如表 2 所示。结果显示, COD_{Mn} 能解释 WQI 变异的 51%; COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 共同解释 73%; COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、Pb 三者解释度为 80%。根据陈善荣^[31]、娄保锋^[32]等人的研究,TP 是长江流域近年来的主要污染物,因此将 TP 作为 WQI_{min} 的一项关键计算参数,

将以上4个参数建立权重模型 $WQI_{\min-a1}$ 与非权重模型 $WQI_{\min-b1}$, 然后考虑 DO、BOD₅ 二者各自以及共同作用对 WQI_{\min} 的影响, 将其依次提取, 建立权重模型 $WQI_{\min-a2}$ ~ $WQI_{\min-a4}$ 与非权重模型 $WQI_{\min-b2}$ ~ $WQI_{\min-b4}$ 八个模型, 解释度分别上升至 81%、83%、85%。基于决定系数 (R^2) 和百分比误差 (PE) 来评估 WQI_{\min} 模型的性能: R^2 越接近于 1, 拟合度越好; PE 越接近 0, 表示模型损失信息越少, PE 计算公式如下:

$$PE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{WQI_{\min}}{WQI} - 1 \right| \times \frac{100}{n} \quad (4)$$

表2 WQI 与水质指标的多元线性逐步回归分析

Table 2 Multiple linear stepwise regression analysis of WQI and water quality index

模型	线性方程	R^2	F	P
1	$2.100^{***} - 0.217^{***} \lg(\text{COD}_{\text{Mn}+1})$	0.51	287.9	<0.001
2	$2.081^{***} - 0.213^{***} \lg(\text{COD}_{\text{Mn}+1}) - 0.153^{***} \lg(\text{NH}_3\text{-N}+1)$	0.73	376.3	<0.001
3	$2.132^{***} - 0.151^{***} \lg(\text{COD}_{\text{Mn}+1}) - 0.178^{***} \lg(\text{NH}_3\text{-N}+1) - 0.073^{***} \lg(\text{Pb}+1)$	0.80	360.3	<0.001
4	$2.046^{***} - 0.122^{***} \lg(\text{COD}_{\text{Mn}+1}) - 0.189^{***} \lg(\text{NH}_3\text{-N}+1) - 0.074^{***} \lg(\text{Pb}+1) + 0.076^{***} \lg(\text{DO}+1)$	0.81	299.0	<0.001
5	$2.029^{***} - 0.094^{***} \lg(\text{COD}_{\text{Mn}+1}) - 0.191^{***} \lg(\text{NH}_3\text{-N}+1) - 0.071^{***} \lg(\text{Pb}+1) + 0.090^{***} \lg(\text{DO}+1) - 0.306^{***} \lg(\text{TP}+1)$	0.83	267.2	<0.001
6	$2.037^{***} - 0.073^{***} \lg(\text{COD}_{\text{Mn}+1}) - 0.135^{***} \lg(\text{NH}_3\text{-N}+1) - 0.077^{***} \lg(\text{Pb}+1) + 0.098^{***} \lg(\text{DO}+1) - 0.342^{***} \lg(\text{TP}+1) - 0.063^{***} \lg(\text{BOD}_5+1)$	0.85	242.4	<0.001

注:***表示 $P < 0.001$ 。

1.3.4 时空演变趋势分析 (1) 线性回归分析. 利用线性回归分析进行长江流域时空异质性研究. 根据最小二乘原理, 将三峡水库蓄水以来 2003~2024 年的水质数据与时间进行一元线性回归分析.

$$y = ax + b \quad (5)$$

其中自变量 x 为时间, 因变量 y 为水质数据, a 与 b 由最小二乘法计算得出. a 为斜率, 即水质要素的线性趋势, 当 a 为正时, 表明水质数据随时间有增加趋势; 当 a 为负时, 表明水质数据随时间有减小趋势; 当 a 为 0 时, 表明水质数据随时间无明显变化趋势; $|a|$ 越大, 表明变化越剧烈.

(2) 季节性 Kendall 趋势检验. 季节性 Kendall 趋势检验是对非参数时间序列趋势检验方法——Mann-Kendall 检验的一种推广, 由 Hirsch 等^[33]于 1982 年提出, 并经过了 Smith 等^[34]的改进. 在该检验中, 首先把历年相同月份或季节的水质数据进行比较, 若后面的值(按时间序列)高于前面的值, 则计为“+”号; 若低于, 计为“-”号; 若相等, 则计为“0”. 如果“+”号与“-”号数量一致, 则该数据序列不存在趋势; 如果“+”号个数多于“-”号, 则可能为上升趋势; 反之则为下降趋势. 季节性 Kendall 检

评估结果显示, $WQI_{\min-a4}$ 相较于其他模型具有最高的相关性 ($R^2=0.95$), $WQI_{\min-b4}$ 相较于其他模型具有最低的 PE 值 (4.98%). $WQI_{\min-b2}$ 具有与 $WQI_{\min-a4}$ 接近的相关性 ($R^2=0.93$), 且有较低的 PE 值 (8.09%), 从指标精简角度看, $WQI_{\min-b2}$ 使用了较少的指标却依旧保持与 $WQI_{\min-a4}$ 相当的相关性, 以及与 $WQI_{\min-b4}$ 相当的 PE 值, 表现更为突出. 综合考量下选择 $WQI_{\min-b2}$ 作为最终的 WQI_{\min} 模型, 即以 TP、COD_{Mn}、NH₃-N、Pb、DO 五项水质指标作为 WQI_{\min} 计算参数.

验将历年相同月份间的水质资料进行比较, 从而避免了因流量的周期性变化导致水质浓度季节性变化的影响. 同时, 由于数据比较只考虑相对排列而不考虑其大小, 故能避免水质资料中常见的漏测值问题^[35].

当 Kendall 检验统计量 $\tau > 0$, 则说明数据序列具有上升趋势, 当 $\tau < 0$, 则说明具有下降趋势, 当 $\tau = 0$ 时无趋势. 给定趋势检验显著性水平 α 为 0.05, 当 $P < 0.05$ 时, 说明序列趋势具有显著性.

本文使用 Hipel^[36]提出的方法, 借助 python 语言完成, 计算水质序列的变化趋势、斜率、显著性.

2 结果与分析

2.1 长江流域水质单因子评价

2.1.1 主要水质指标浓度及类别 如图 2(a)所示, 在三峡水库蓄水影响较大的几个流域中, 嘉陵江流域以及宜宾至宜昌干流 NH₃-N 年平均浓度呈现波动下降趋势, 而乌江流域、洞庭湖水系、鄱阳湖水系、宜昌至湖口以及湖口以下干流前期呈波动上升趋势, 后期呈波动下降趋势. 如图 2(b)所示, 嘉陵江流域、乌江流域、宜宾至宜昌干流 TP 年平均浓度前

期呈波动上升趋势, 后期呈波动下降趋势. 宜昌至湖口干流 TP 年平均浓度 2014 年之前略有上升, 但绝大部分年份低于宜宾至宜昌干流的总磷年平均浓度, 之后呈现下降趋势. 洞庭湖、鄱阳湖水系以及湖口以下干流 TP 年平均浓度自 2003 年以来均呈现波动下降趋势.

度, 之后呈现下降趋势. 洞庭湖、鄱阳湖水系以及湖口以下干流 TP 年平均浓度自 2003 年以来均呈现波动下降趋势.

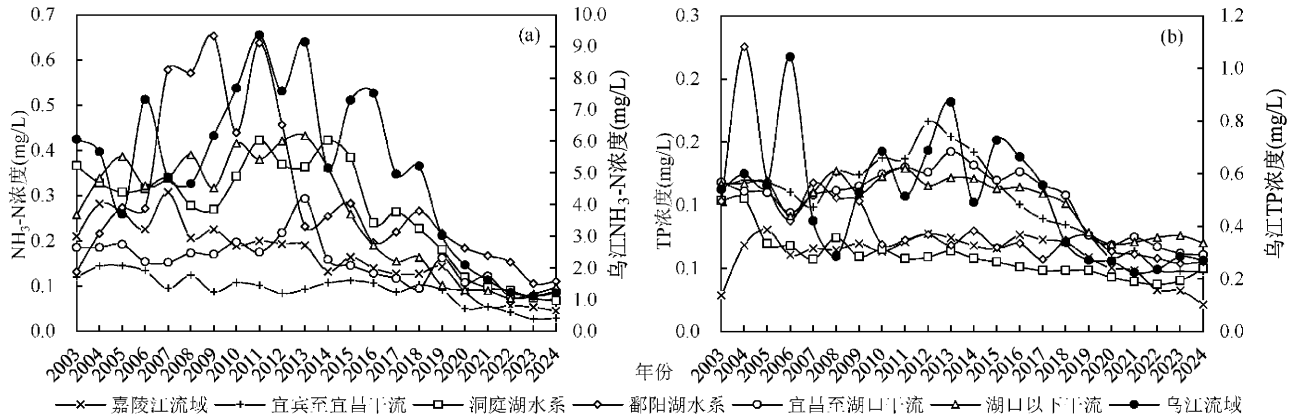


图 2 三峡工程所影响流域 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 TP 年平均浓度对比

Fig.2 Comparison of annual average concentrations of $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP in the basins affected by the Three Gorges Project

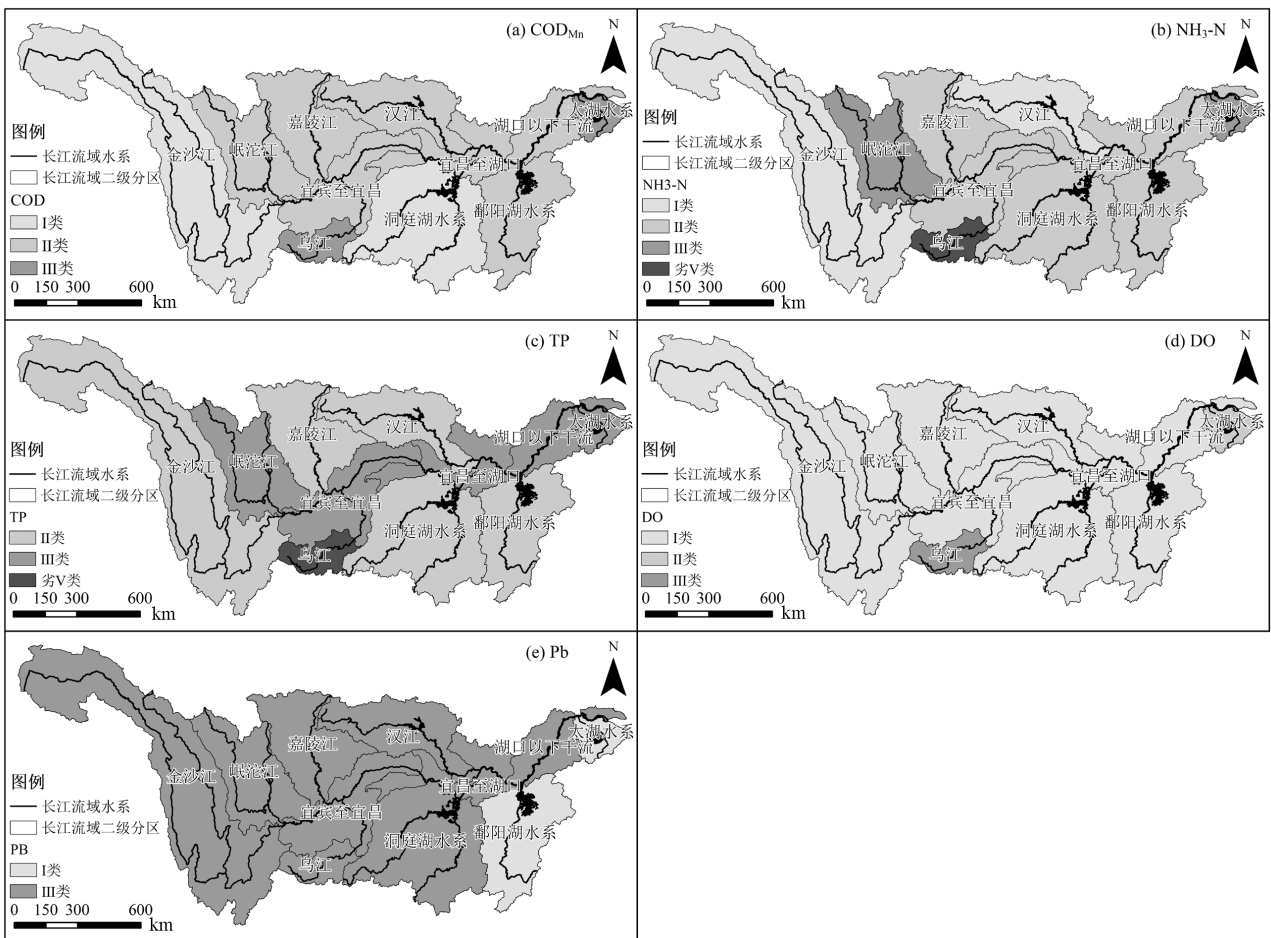


图 3 2003~2024 年长江流域主要水质指标均值单因子评价空间分布

Fig.3 Spatial distribution map of single-factor evaluations for mean values of key water quality indicators in the Yangtze River Basin from 2003 to 2024

三峡水库蓄水改变了库区的下垫面性质,影响库区及周围的降雨,有研究表明,三峡大正式蓄水以来,库区极端降雨数量呈现上升的趋势^[37],库区 TP 污染来源多以面源为主^[10,38-39],强降雨导致 TP 入河量增加,是三峡水库蓄水前期上游嘉陵江流域、乌江流域、宜宾至宜昌干流 TP 浓度不断上升的重要原因之一.乌江流域 $\text{NH}_3\text{-N}$ 主要来源于易受降水影响的生活污水以及农业面源污染^[10],极端降雨数量增多导致乌江流域 $\text{NH}_3\text{-N}$ 入河量增加.三峡大坝建成后,作为磷载体的泥沙被大量拦截,对下游的宜昌至湖口、湖口以下干流的总磷输送通量减少.大量清水下泄使得三峡大坝以下的河床被不断冲刷下切,长江入洞庭湖水量减少^[40],使得洞庭湖水环境容量减少,在 2003~2011 年间 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度出现波动上升现象.因三峡水库蓄水的影响,鄱阳湖丰水期缩短、枯水期延长^[41],使得鄱阳湖水体自净能力减弱,在

2003~2019 年 $\text{NH}_3\text{-N}$ 年平均浓度呈现明显上升趋势,与他学者研究结果一致^[42].

基于筛选出的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、 COD_{Mn} 、DO、Pb 五项影响长江流域水质的关键指标,对长江流域水质进行单因子评价.三峡水库蓄水以来长江全流域 2003~2024 年平均 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、DO、Pb 浓度分别达到了 II 类、III 类、III 类、I 类、III 类标准.2003~2024 年长江流域主要水质指标均值单因子评价空间分布如图 3 所示.长江各二级流域 2003~2024 年 COD_{Mn} 浓度平均值,除乌江与太湖为 III 类外,其余均达到或优于 II 类水质标准.2003~2024 年长江各二级流域 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 平均浓度仅乌江未达到 III 类水质标准,均为劣 V 类,超标倍数为 4.12 倍与 1.5 倍.长江各二级支流 2003~2024 年 DO 与 Pb 平均浓度值均未超过 III 类水质标准.方差分析结果显示,5 个水质指标的空间差异性显著($P < 0.001$).

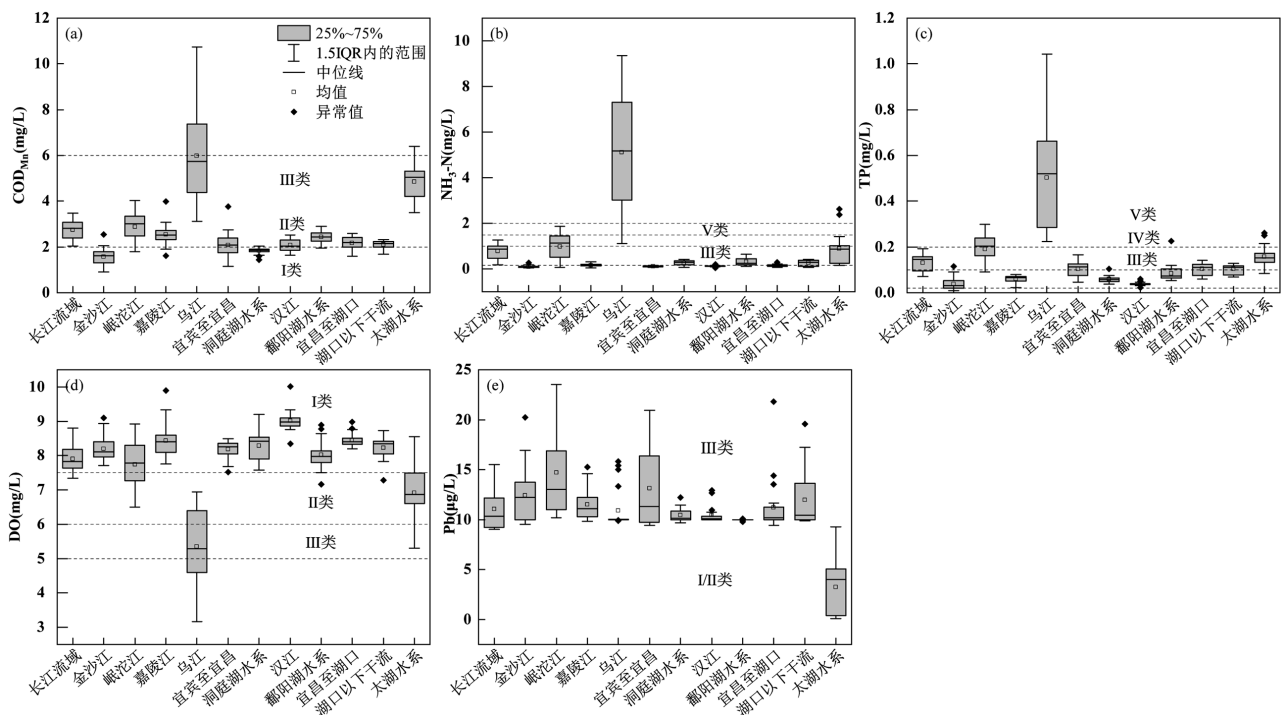


图 4 长江流域主要水质指标浓度箱型分布

Fig.4 Distribution of main water quality index concentration boxes in the Yangtze River Basin

2.1.2 主要污染指标及重点污染流域 根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[18],对长江流域 2003 年 6 月~2024 年 6 月水质监测数据作单因子评价.超标频次从高至低分别为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、 COD_{Mn} 、DO、Pb 无超标. $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标 409 月次,岷沱江、乌江、

鄱阳湖水系、宜昌至湖口、太湖水系这五个子流域有超标现象,平均超标倍数为 2.97;TP 超标 360 月次,除汉江、宜昌至湖口、湖口以下干流外,其余子流域均有超标,主要集中在上游流域,平均超标倍数为 1.28; COD_{Mn} 超标 115 月次,岷沱江、嘉陵江、乌江、

宜宾至宜昌、以及太湖水系这五个子流域超标,平均超标倍数为 0.45;DO 超标 140 月次,分别为岷沱江流域超标 1 月次,乌江流域超标 106 月次,太湖水系超标 33 月次。

如图 4 所示,乌江流域、岷沱江流域、太湖水系均为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 超标排名前三的流域,乌江流域 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 污染严重,两者浓度常年为劣 V 类,超标倍数分别达 4.80、2.10;岷沱江流域 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 浓度以 III 类为主,超标倍数分别为 0.90、0.41;太湖水系 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在 II-IV 类占比大致相当,TP 浓度以 III 类为主,超标倍数分别为 0.65、0.25。DO 和 COD_{Mn} 分别有 140、115 月次未达标,主要出现在乌江流域和太湖水系。总体来看, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 是长江流域近年来主要污染物,乌江、岷沱江、太湖水系是污染较严重的三个子流域。

四川省境内的岷沱江流域以及贵州省境内的乌江流域是我国磷矿主产区,磷化工产业所产生的含磷废水,是长江上游总磷污染的重要原因^[8]。随着点源污染被有效管控,农业面源污染已逐渐成为长江流域地表水体氮、磷污染的最主要来源^[39]。乌江流域 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染严重的主要原因是生活污水直接排放和农业生产过程中氮肥流失造成的面源污染以及工厂污水排放^[10]。岷沱江流域农业发达,城镇化发展较快,农业面源污染、畜禽养殖以及生活污水是其 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标的重要原因^[43-45]。太湖流域作为我国主要的综合性工业基地之一,流域内化工、印染、造纸等污水排放大的企业众多,并且太湖流域自古就有“鱼米之乡”的美誉,流域种植发达,生活污水、工业废

水的大量排放以及农业化肥的过量使用都是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标的重要原因^[46]。

2.2 基于 WQI_{min} 指数的长江流域水质评价

通过构建的 WQI_{min} 对流域水质进行综合评价,2003~2024 年长江全流域及各二级分区的 WQI_{min} 均值见表 3,空间分布见图 5。长江流域整体水质达优秀水平, $\text{WQI}_{\text{min}}=80.7$ 。就二级分区来看,太湖水系、岷沱江、乌江是水质最差的三个子流域, WQI_{min} 分别为 70.3、69.1、48.7,这也是仅有的三个低于全流域 WQI_{min} 均值的子流域。从空间分布上看,上游流域 WQI_{min} 为 76.5,中游流域为 87.4,下游流域为 76.9,中游流域水质最好。上游和下游流域相对较差,主要是因为上游的乌江流域和岷沱江流域污染较重,下游流域的太湖水系水质较差,影响了流域整体表现。

就 WQI 分项指数来说, WQI_{DO} 、 WQI_{Pb} 、 $\text{WQI}_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 、 $\text{WQI}_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 、 WQI_{TP} 五项指标依次降低。DO、Pb、 COD_{Mn} 三者的整体水质达到了优秀 ($\text{WQI}>80$),说明长江流域整体的耗氧污染物污染和重金属污染较轻; $\text{WQI}_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 、 WQI_{TP} 值较低,TP 指标最差,印证了单因子评价的结果。众多研究也表明 TP 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为长江流域主要污染因子^[7-8,15,47],说明 TP 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 是近年来需重点关注的水污染因子。

乌江是重污染流域,其中 WQI_{TP} 为差, $\text{WQI}_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 为极差水平, $\text{WQI}_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ 和 WQI_{DO} 的也是全流域最低。岷沱江与太湖水系的 $\text{WQI}_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 和 WQI_{TP} 均为中等水平,以上流域的污染突出指标应成为当地水污染治理的重点方向。

表 3 长江流域 WQI_{min} 2003~2024 年均值对比

Table 3 Comparison of the average WQI_{min} values in the Yangtze River Basin from 2003 to 2024

流域	水系	WQI_{min}		$\text{WQI}_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$	$\text{WQI}_{\text{NH}_3\text{-N}}$	WQI_{TP}	WQI_{DO}	WQI_{Pb}
		2003~2024 年均值	距平					
上游流域	金沙江	92.0	11.3	95.6	96.8	87.1	96.1	84.5
	岷沱江	69.1	-11.6	81.3	55.5	51.5	89.0	68.4
	嘉陵江	85.8	5.1	82.4	89.4	79.2	94.9	82.9
	乌江	48.7	-32	56.4	12.9	23.0	57.7	93.5
	宜宾至宜昌干流	86.9	6.2	91.9	98.3	69.9	94.3	80.0
中游流域	洞庭湖水系	88.8	8.1	95.8	83.6	79.2	93.3	92.3
	汉江	90.0	9.3	89.5	96.4	79.9	97.1	86.9
	鄱阳湖水系	85.6	4.9	82.6	81.6	74.9	91.0	98.1
	宜昌至湖口干流	86.0	5.3	85.4	91.9	68.0	94.9	89.7
下游流域	湖口以下干流	83.1	2.4	86.2	84.5	68.5	92.5	83.9
	太湖水系	70.6	-10.1	61.6	57.3	58.9	75.9	99.5
长江全流域		80.7	/	82.8	77.3	67.4	89.0	87.1

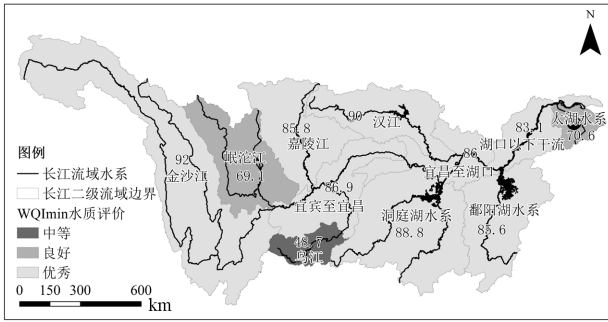


图5 长江流域 2003~2024 年 WQI_{min} 均值空间分布

Fig.5 Spatial distribution of the average WQI_{min} values in the Yangtze River Basin from 2003 to 2024

2.3 长江流域水质时空异质性演变趋势

2.3.1 全流域 自三峡水库蓄水以来,长江流域 WQI_{min} 及主要水质指标浓度变化如图 6 所示.长江流域 WQI_{min} 值从 2003 年的 75.7 逐步升至 2024 年的 88.9,提升幅度达 17.40%.线性回归分析结果显示, R^2 为 0.93,斜率为 0.7,表明长江流域 WQI_{min} 值呈显出明显的线性增长趋势,近年来长江流域水质转好态势显著.其中,在 2006 年长江流域 WQI_{min} 相比上一年出现明显下滑,主要原因是自 2006 年开始,将污染较为严重的太湖流域数据纳入计算.根据季节性 Kendall 趋势检验结果显示(图 7),长江流域 WQI_{min}、DO 有显著上升趋势,COD_{Mn}、NH₃-N、TP、Pb 有显著下降趋势,表明长江流域水质改善趋势明显.

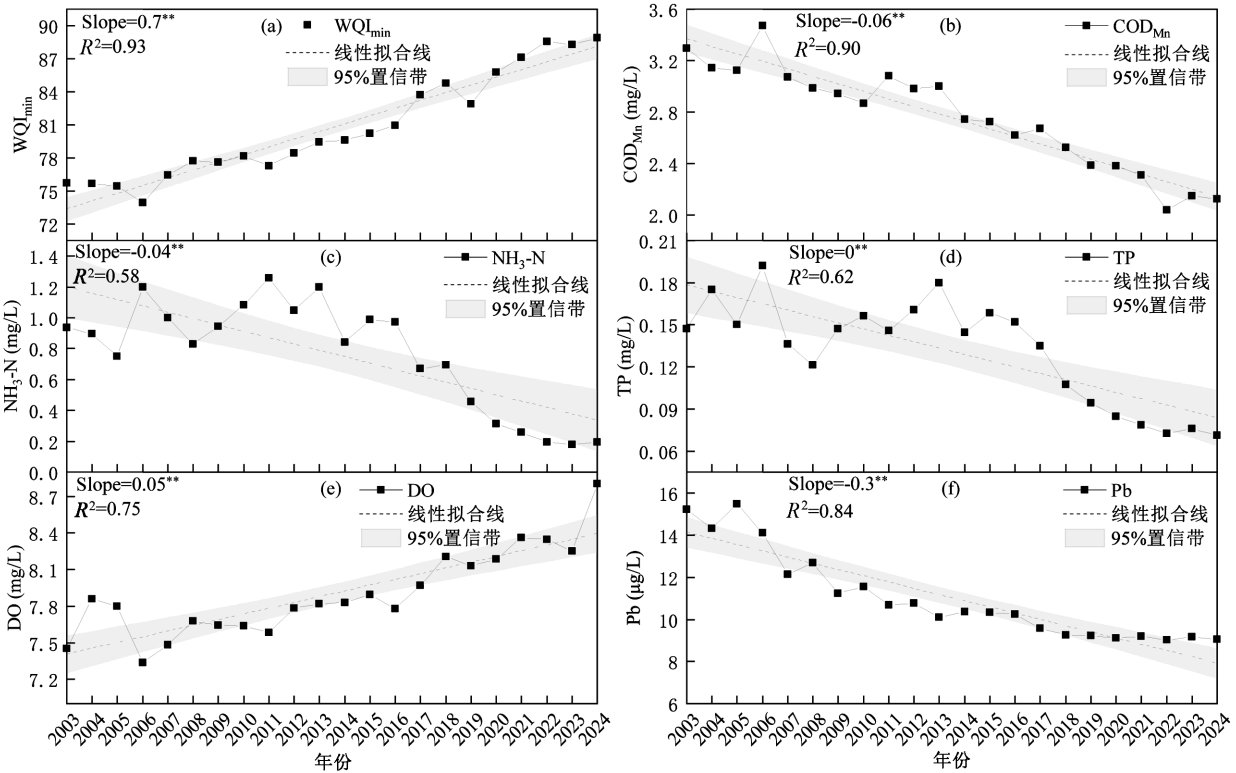


图6 长江流域 2003~2024 年 WQI_{min} 和主要水质指标浓度变化

Fig.6 Changes of WQI_{min} and main water quality index concentrations in the Yangtze River Basin from 2003 to 2024

** : $P < 0.01$

在主要水质水质指标中,COD_{Mn}、DO、Pb 三项在线性回归分析中, R^2 均大于 0.7,拟合效果好,变化趋势明显.长江流域 COD_{Mn} 浓度自 2003 年的 3.30mg/L 下降至 2024 年的 2.12mg/L,下降幅度接近 35.76%.DO 浓度从 2003 年的 7.45mg/L 升至 2024 年的 8.81mg/L,上升幅度接近 18.26%.TP 浓度自 2003 年的 0.15mg/L 下降至 2024 年的 0.07mg/L,下

降幅度接近 53.33%,整体呈明显波动下降趋势.而长江流域 NH₃-N、TP 浓度线性回归分析结果显示,其 R^2 均小于 0.7,表明长江流域 NH₃-N、TP 浓度波动变化较大.NH₃-N 浓度自 2003 年的 0.94mg/L 下降至 2024 年的 0.19mg/L,下降幅度接近 79.79%,虽然下降幅度较大,但其浓度随时间变化出现大幅的涨落,在 2006 年、2011 年、以及 2013 年出现三个明显的峰

值。TP 浓度自 2003 年的 0.15mg/L 下降至 2024 年的 0.07mg/L, 下降幅度接近 53.33%, 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 类似, TP 浓度在 2003~2024 年间出现明显的涨落, 在 2004 年、2006 年、以及 2013 年出现三个明显的峰值。以上变化趋势表明长江流域 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 污染反复, 治理难度大。综上, 长江流域 COD_{Mn} 、DO、Pb 三项水质指标自三峡水库蓄水以来改善效果显著, 呈逐年向好趋势; 而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 两项水质指标自三峡水库蓄水以来波动较大, 污染反复, 需持续治理。

2.3.2 二级流域 长江流域季节性 Kendall 趋势检验结果 如图 7 所示。长江流域 WQI_{min} 整体呈显著上升趋势, 各二级流域除汉江流域变化趋势不显著外, 其余子流域均呈显著上升趋势, WQI_{min} 年平均变化率前三位分别为乌江(+1.54)、太湖水系(+1.52)以及岷沱江(+1.23)。 COD_{Mn} 浓度全流域呈显著下降趋势, 但下降幅度较小, 其中乌江流域 COD_{Mn} 浓度呈显著下降趋势且下降幅度最大, 而鄱阳湖水系 COD_{Mn} 浓度呈显著上升趋势, 但上升幅度较小。鄱阳湖及其支流周边工农业聚集, 人口稠密, 工农业生产所产生的污水对流域水环境影响巨大^[42], 污水中含有的大量有机污染物使得鄱阳湖流域有机污染程度加深^[48]。加之三峡水库等大型水利枢纽工程蓄水运行后, 对鄱阳湖水文情况造成影响, 枯水期提前并且延长^[49], 水体中污染物浓度升高导致水质变差。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度全流域呈显著下降趋势, 但下降幅度较小, 其中乌江流域 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度呈显著下降趋势且相较于其他二级流域下降幅度最大, 太湖水系与岷沱江流域 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度年全年平均变化率略高于除乌江流域以外的其他水系。长江流域整体 TP 浓度呈显著下降趋势, 但年均变化率较小, 各二级流域中只有乌江流域年均变化率超过 0.01(mg/(L·a)), 表明长江流域近二十余年来 TP 污染治理难度大, 各子流域治理效果差异明显。长江流域整体 DO 浓度有显著上升趋势, 除宜昌至湖口以及湖口以下干流外, 其它二级流域同样表现出显著上升趋势, 其中乌江流域 DO 浓度年全年平均变化率最高(+0.1)。长江流域 Pb 浓度整体呈显著下降趋势, 除乌江、汉江、洞庭湖与鄱阳湖水系外, 其他二级流域均呈显著下降趋势, 长江流域整体 Pb 浓度年平均变化率较高(-0.25), 子流域中太湖水系(-0.41)变化最为突出。综上, 除鄱阳湖水系 COD_{Mn} 浓度呈显著上升趋势外, 长江各二级流域的

主要水质指标时间变化趋势整体向好; 乌江、岷沱江以及太湖水系 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度下降幅度较大; 而在 TP 指标的时间变化趋势上各二级流域年均变化率较小。现有研究表明长江 TP 污染多为面源污染^[38, 50], 治理难度大。

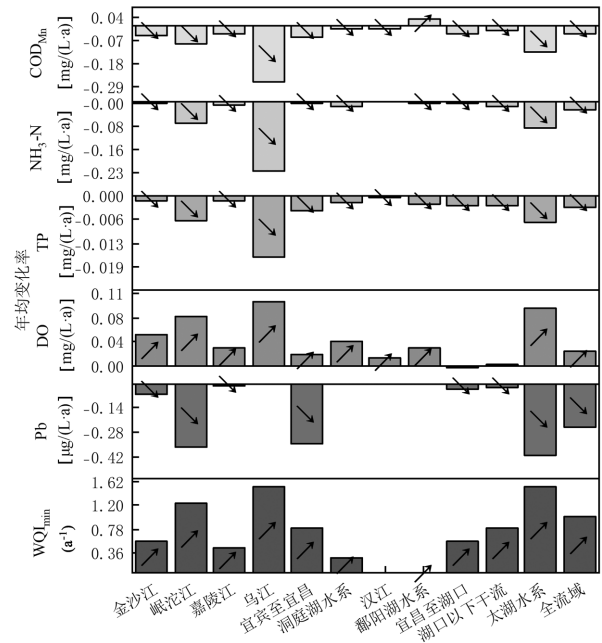


图 7 长江流域季节性 Kendall 趋势检验结果

Fig.7 Seasonal Kendall trend test result of the Yangtze River Basin

纵坐标表示斜率, “/”表示显著上升趋势, “\”表示显著下降趋势, 两者 $P < 0.05$

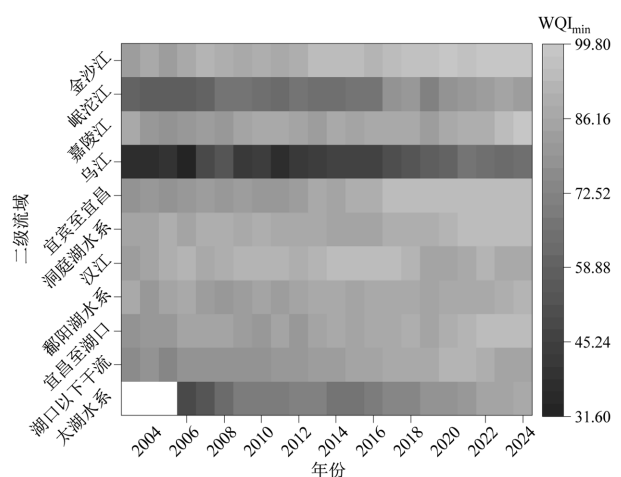


图 8 长江二级流域年均 WQI_{min} 值时间变化

Fig.8 Time variation of annual average WQI_{min} value in each secondary basin of the Yangtze River

如图 8 所示, 长江流域水质时空异质性显著。三峡水库蓄水以来, 随时间推移, 各二级流域水质不断

好转.处在上游的岷沱江、乌江与处在下游的太湖水系污染突出,与其余二级流域形成明显对比.尤其是乌江流域,污染最为严重,2003 年乌江流域 WQI_{\min} 年均值仅为 37.7,2024 年上升至 64.上游金沙江流域水质状况整体趋势优于其他二级流域.长江上游的金沙江流域地势险峻、人口及工业数量较少,所造成的污染较轻.汉江流域水质一直保持良好水平,呈现出先上升再下降再上升的趋势.除去汉江流域外的长江其他二级流域, WQI_{\min} 年均值都表现出显著增长趋势.

3 结论

3.1 长江流域 2003~2024 年水质状况整体呈现良好状态,TP 和 NH_3-N 是长江流域近年来主要的水体污染物.各水质指标浓度分布空间差异显著.乌江、岷沱江、太湖水系是污染较严重的三个流域.

3.2 三峡水库蓄水以来,嘉陵江流域、宜宾至宜昌干流的 TP 浓度、乌江流域的 TP 和 NH_3-N 浓度、以及洞庭湖与鄱阳湖水系的 NH_3-N 浓度出现先升高后下降的趋势.

3.3 长江流域水质线性回归分析与季节性 Kendall 趋势检验结果显示,长江流域整体水质状况明显好转.线性回归分析表明 NH_3-N 、TP 两项水质指标波动较大,需持续治理.季节性 Kendall 趋势检验表明鄱阳湖水系 COD_{Mn} 浓度呈显著上升趋势,但上升幅度较小;乌江、岷沱江以及太湖水系 NH_3-N 浓度降幅较大,治理效果显著;长江流域整体各水质指标均有显著改善,但 TP 变化幅度较小,表明 TP 污染仍是未来长江流域污染治理的重点.

3.4 针对长江流域存在的 TP 和 NH_3-N 污染问题,应从源头治理,整治磷化工污染,提高磷石膏资源利用率;改进工业污水处理工艺,提高污水处理能力;加大养殖行业污水处理监管力度;合理降低化肥施用量.

参考文献:

- [1] 杨桂山,徐昔保,王维.长江保护与发展近 30 年基本态势、面临挑战与协同治理 [J]. 长江流域资源与环境, 2022,31(8):1653-1663.
Yang G S, Xu X B, Wang W. Basic situation, challenges and coordinated governance of protection and development for Yangtze River in past 30years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022,31(8):1653-1663.
- [2] Li J Q, Shen Z Y, Cai J Y, et al. Copula-based analysis of socio-economic impact on water quantity and quality: a case study of Yitong River, China [J]. Science of the Total Environment. 2023,859: 160176.
- [3] Zheng B F, Zhao J Y, You D. Study on the coupling relationship between water environment and social economy in Ganjiang River Basin [J]. Desalination and Water Treatment. 2018,122:14-19.
- [4] Cullis J, Rossouw N, du Toit G, et al. Economic risks due to declining water quality in the breede river catchment [J]. Water Sa. 2018, 44(3):464-473.
- [5] Huang J C, Zhang Y J, Bing H J, et al. Characterizing the river water quality in China: recent progress and on-going challenges [J]. Water Research. 2021,201:117309.
- [6] 陈前,唐文忠,许妍,等.基于溶解氧和耗氧污染物变化的长江流域水质改善过程分析(2008~2018 年) [J]. 环境工程学报, 2023, 17(1):279-287.
Chen Q, Tang W Z, Xu Y, et al. recovery process analysis of water quality in the Yangtze River Basin based on changes of dissolved oxygen and oxygen-consuming substances (2008~2018) [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering. 2023,17(1):279-287.
- [7] 陈善荣,何立环,张凤英,等.2016~2019 年长江流域水质时空分布特征 [J]. 环境科学研究. 2020,33(5):1100-1108.
Chen S R, He L H, Zhang F Y, et al. Spatiotemporal characteristics of surface water quality of the Yangtze River Basin during 2016~2019 [J]. Research of Environmental Sciences. 2020,33(5):1100-1108.
- [8] 尹炜,王超,张洪.长江流域总磷问题思考 [J]. 人民长江, 2022,53(4):44-52.
Yin W, Wang C, Zhang H. Consideration on total phosphorus problem in Yangtze River Basin [J]. Yangtze River, 2022,53(4):44-52.
- [9] 许静,王永桂,陈岩,等.长江上游沱江流域地表水环境质量时空变化特征 [J]. 地球科学, 2020,45(6):1937-1947.
Xu J, Wang Y G, Chen Y, et al. Characteristics on spatiotemporal variations of surface water environmental quality in Tuojiang River in upper reaches of Yangtze River Basin [J]. Earth Science, 2020,45(6): 1937-1947.
- [10] 郑群威,苏维词,杨振华,等.乌江流域水环境质量评价及污染源解析 [J]. 水土保持研究, 2019,26(3):204-212.
Zheng Q W, Su W C, Yang Z H, et al. Assessment of water environmental quality and analysis of pollution sources in Wujiang River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(3): 204-212.
- [11] 郭晶,连花,李利强,等.洞庭湖水水质污染状况及主要污染物来源分析 [J]. 水生态学杂志, 2019,40(4):1-7.
Guo J, Lian H, Li L Q, et al. Pollution status and source analysis of the water environment in Dongting Lake [J]. Journal of Hydroecology, 2019,40(4):1-7.
- [12] Geng M M, Wang K L, Yang N, et al. Spatiotemporal water quality variations and their relationship with hydrological conditions in Dongting Lake after the operation of the Three Gorges Dam, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,283:124644.
- [13] Wu Z S, Wang X L, Chen Y W, et al. Assessing river water quality using water quality index in lake Taihu Basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2018,612:914-922.

- [14] 秦伯强,吴海斌.长江流域湖泊富营养化发展趋势与展望 [J]. 人民长江, 2023,54(10):18-23.
Qin B Q, Wu H B. Lake Eutrophication development trend and perspectives in Changjiang River Basin [J]. Yangtze River, 2023,54(10):18-23.
- [15] 辛小康,尹 炜.长江干流 2010~2019 年主要污染物时空变化分析 [J]. 水电能源科学, 2022,40(7):66-70.
Xin X K, Yin W. Analysis of temporal and spatial variation of main pollutants in the main stream of the Yangtze River from 2010 to 2019 [J]. Water Resources and Power, 2022,40(7):66-70.
- [16] Xiang R, Wang L J, Li H, et al. Temporal and spatial variation in water quality in the Three Gorges Reservoir From 1998 to 2018 [J]. Science of the Total Environment, 2021,768:144866.
- [17] 曹艳敏,安宏雷,韩 帅.湘江流域水环境评价模型及驱动因子识别 [J]. 长江科学院院报, 2023,40(10):51-58.
Cao Y M, An H L, Han S, Water environment assessment model and driving factors identification for Xiangjiang River Basin [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023,40(10):51-58.
- [18] GB 3838-2022 地表水环境质量标准 [S].
GB 3838-2022 Environmental quality standards for surface waters [S].
- [19] 侯 露,高愈霄,刘 冰,等.汛期暴雨情景下鄱阳湖流域水质时空分布特征与污染成因分析 [J]. 中国环境监测, 2023,39(4):110-124.
Hou L, Gao Y X, Liu B, et al. Spatial-temporal distribution characteristics and pollution causes of water quality in Poyang Lake Basin under rainstorm in flood season [J]. Environmental Monitoring in China, 2023,39(4):110-124.
- [20] 夏玉宝,王 华,何新辰,等.太湖流域典型滨湖区网水动力与水质时空异质性 [J]. 湖泊科学, 2021,33(4):1100-1111.
Xia Y B, Wang H, He X C, et al. Spatiotemporal heterogeneity of hydrodynamic forces and water quality in typical lakeside river networks in Taihu Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2021,33(4):1100-1111.
- [21] Ha D W, Baek J, Jung K Y, et al. Long-term water quality fluctuations in the Seomjin River System determined using LOWESS and seasonal Kendall analyses [J]. Water Air and Soil Pollution, 2022,233(12):535.
- [22] 候林丽,郎锋祥,徐 鹏,等.万安水库水质时空变化特征及趋势分析 [J]. 人民黄河, 2020,42(S2):121-123.
Hou L L, Lang F X, Xu P, et al. Temporal and spatial variation characteristics and trend analysis of water quality in Wanan Reservoir [J]. Yellow River. 2020,42(S2):121-123.
- [23] 黄 楠,阙思思,罗晗郁,等.长江流域重点断面水质时空变异特征及污染源解析 [J]. 环境工程学报, 2023,17(8):2468-2483.
Huang Y, Que S S, Luo H Y, et al. Spatial and temporal variability of water quality at key cross-sections in the Yangtze River Basin and analysis of pollution sources [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023,17(8):2468-2483.
- [24] Pesce S F, Wunderlin D A. Use of water quality indices to verify the impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia River [J]. Water Research. 2000,34(11):2915-2926.
- [25] Kannel P R, Lee S, Lee Y S, et al. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007,132(1-3):93-110.
- [26] Nong X Z, Shao D G, Zhong H, et al. Evaluation of water quality in the south-to-north water diversion project of China using the water quality index (WQI) method [J]. Water Research, 2020,178:115781.
- [27] Hou W, Sun S H, Wang M Q, et al. Assessing water quality of five typical reservoirs in lower reaches of Yellow River, China: using a water quality index method [J]. Ecological Indicators, 2016,61:309-316.
- [28] 杨 列,闫霄珂,刘艳丽,等.基于 WQI_{min} 模型的武汉市金银湖水质时空特性 [J]. 长江科学院院报, 2022,39(4):49-55.
Yang L, Yan X K, Liu Y L, et al. Analyzing Spatio-temporal characteristics of water quality in Jinyin Lake using water quality crucial index (WQI_{min}) [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2022,39(4):49-55.
- [29] 毛德华,周 滢,周懿琳.1990~2016 年湘江流域水质时空变化及驱动因素分析 [J]. 环境科学. 2024, 45(7):3953-3964.
Mao D H, Zhou Y, Zhou Y L. Analysis of spatiotemporal variation and driving factors of water quality in the Xiangjiang River Basin from 1990 to 2016 [J]. Environmental Science, 2024,45(7):3953-3964.
- [30] 唐 琦,刘 兵,王 璞,等.改进 WQI 在川中丘陵地区典型流域水质评价中的应用——以琼江流域上游段为例 [J]. 环境工程技术学报, 2022,12(2):615-623.
Tang Q, Liu B, Wang P, et al. Application of improved WQI model in water quality assessment of typical watershed in the hilly area of central Sichuan Province: a case study in the upper reaches of Qiongjiang River Basin [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022,12(2):615-623.
- [31] 陈善荣,何立环,林兰钰,等.近 40 年来长江干流水质变化研究 [J]. 环境科学研究, 2020,33(5):1119-1128.
Chen S R, He L H, Lin L Y, et al. Change trends of surface water quality in the mainstream of the Yangtze River during the past four decades [J]. Research of Environmental Sciences, 2020,33(5):1119-1128.
- [32] 娄保锋,卓海华,周 正,等.近 18 年长江干流水质和污染物通量变化趋势分析 [J]. 环境科学研究, 2020,33(5):1150-1162.
Lou B F, Zhuo H H, Zhou Z, et al. Analysis on alteration of water quality and pollutant fluxes in the Yangtze Mainstem during recently 18years [J]. Research of Environmental Sciences, 2020,33(5):1150-1162.
- [33] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data [J]. Water Resources Research, 1982,18(1):107-121.
- [34] Smith R A, Hirsch R M, Slack J R. A study of trends in total phosphorus measurements at NASQAN stations [A]//US Geological Survey. Water Supply Paper [C]. Washington, D.C.: US Government Printing Office, 1982:1-35.
- [35] 胡国华,唐忠旺,肖翔群.季节性 Kendall 检验及其在三门峡水库水质趋势分析中的应用 [J]. 地理与地理信息科学, 2004,(3):86-88.
Hu G H, Tang Z W, Xiao X Q. Trend analysis of water quality of sanmenxia reservoir of the Yellow River [J]. Geography and Geo-Information Science. 2004,(3):86-88.
- [36] Hipel K W, Mcleod A I. Time series modelling of water resources and

- environmental systems [M]. Canada: Elsevier Science, 1995:853-938.
- [37] 艾婉秀,赵珊珊,陈鲜艳,等.1961~2020 年三峡库区极端降水的变化特征研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2024,33(3):625-633.
- Ai W X, Zhao S S, Chen X Y, et al. Characteristics of extreme precipitation in the Three Gorges Reservoir Region during 1961~2020 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024,33(3): 625-633.
- [38] 关文海,骆国辉,王攀菲,等.嘉陵江总磷通量变化及空间来源解析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(3):1448-1456.
- Guan W H, Luo G H, Wang P F, et al. Variation of TP flux in Jialing River and spatial source apportionment. China Environmental Science, 2024,44(3):1448-1456.
- [39] 赵健,籍瑶,刘玥,等.长江流域农业面源污染现状、问题与对策 [J]. 环境保护, 2022,50(17):30-32.
- Zhao J, Ji Y, Liu Y, et al. Current situation, problems and suggestions on agricultural non-point source pollution in the Yangtze River Basin [J]. Environmental Protection, 2022,50(17):30-32.
- [40] 周建银,高菲,元媛,等.三峡水库运行前后长江中下游干流及两湖的径流过程变化 [J]. 湖泊科学, 2023,35(2):696-708.
- Zhou J Y, Gao F, Yuan Y, et al. Runoff variation in the middle and lower branches of Yangtze River and the two lakes (Dongting and Poyang Lake) before and after Three Gorges Reservoir's operation [J]. Journal of Lake Sciences, 2023,35(2):696-708.
- [41] 王圣瑞,倪兆奎,储昭升,等.江湖关系变化及其对鄱阳湖水环境影响研究——代“江湖关系变化及其对鄱阳湖水环境影响研究”专栏序言 [J]. 环境科学学报, 2015,35(5):1259-1264.
- Wang S R, Ni Z K, Chu Z S, et al. Studies on the change of the river-lake relationship and its impact on water environment in Poyang Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(5):1259-1264
- [42] 黄冬凌,倪兆奎,赵爽,等.基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例 [J]. 环境科学, 2019,40(10):4450-4460.
- Huang D L, Ni Z K, Zhao S, et al. Correlation analysis of water quality between lake inflow and outflow: a case study of Poyang Lake [J]. Environmental Science, 2019,40(10):4450-4460.
- [43] 张云霞,魏峒,汪涛.沱江流域河流氮、磷浓度时空分布特征及污染状况评价 [J]. 环境污染与防治, 2021,43(8):1028-1034.
- Zhang Y X, Wei Y, Wang T. Pollution assessment and spatiotemporal distribution of nitrogen and phosphorus concentrations of rivers in Tuojiang River Basin [J]. Environmental Pollution & Control, 2021,43(8):1028-1034.
- [44] 肖宇婷,姚婧,谌书,等.沱江流域总氮面源污染负荷时空演变 [J]. 环境科学, 2021,42(8):3773-3784.
- Xiao Y T, Yao J, Chen S, et al. Temporal and spatial evolution of non-point source pollution load of total nitrogen in Tuojiang River Basin [J]. Environmental Science, 2021,42(8):3773-3784.
- [45] Wang Y G, Song Z, Bai H, et al. Scale effects of land use on river water quality: a case study of the Tuojiang River Basin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023,30(16):48002-48020.
- [46] 尤本胜,刘伟京,操庆,等.建立促进太湖水生态健康的流域现代化治理体系的建议 [J]. 环境监测管理与技术, 2023,35(3):1-5.
- You B S, Liu W J, Cao Q, et al. Suggestions on establishing a modern watershed management system to promote the water ecological health of Taihu Lake [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2023,35(3):1-5.
- [47] 秦延文,马迎群,王丽娟,等.长江流域总磷污染:分布特征·来源解析·控制对策 [J]. 环境科学研究, 2018,31(1):9-14.
- Qin Y W, Ma Y Q, Wang L J, et al. Pollution of the total phosphorus in the Yangtze River Basin: distribution characteristics, source and control strategy [J]. Research of Environmental Sciences, 2018,31(1): 9-14.
- [48] 赵晏慧,李韬,黄波,等.2016~2020 年长江中游典型湖泊水质和富营养化演变特征及其驱动因素 [J]. 湖泊科学, 2022,34(5):1441-1451.
- Zhao Y H, Li T, Huang B, et al. Evolution characteristics and driving factors of water quality and eutrophication of typical lakes in the middle reaches of the Yangtze River from 2016 to 2020 [J]. Journal of Lake Sciences, 2022,34(5):1441-1451.
- [49] 刘志刚,倪兆奎.鄱阳湖发展演变及江湖关系变化影响 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(5):1265-1273.
- Liu Z G, Ni Z K. The influence rules of lake evolution and changing river-lake relationship in Poyang Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae. 2015,35(5):1265-1273.
- [50] 徐杨,王宇翔,汪维维,等.长江流域全面强化河湖长制的推进与探索研究 [J]. 水利发展研究, 2024,24(4):43-50.
- Xu Y, Wang Y X, Wang W W, et al. A study on the promotion and exploration of fully strengthening the river and lake chief system in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Development Research, 2024,24(4):43-50.

作者简介: 陈瑞凯(1999-),男,河南开封人,中国地质大学(武汉)硕士研究生,主要从事流域水质变化分析和地表水数值模拟研究.chenrk@cug.edu.cn.