

## 长江水质的空间分异及环境因子在多尺度上的影响

林豪杰<sup>1,2</sup>, 张芮青<sup>2</sup>, 王孜晔<sup>2</sup>, 乔 桥<sup>2</sup>, 闫振广<sup>2</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 中国环境科学研究院 环境基准标准与风险管控国家重点实验室, 北京 100012)

**摘 要:** 在长江流域干支流共布设69个点位, 对主要水质参数进行评估与空间自相关分析, 并探讨不同空间尺度下多环境因素对长江水质的影响。结果表明, 长江流域水质较好, 近半数采样点达到3类及以上水平, 干支流之间差异明显。DO、TP和TN在整体上有明显聚集趋势, 但局部空间中又具有特定的分布特征。另外, 不同空间尺度下水质参数与影响因素之间关系复杂, 且地理加权回归(Geographically weighted regression, GWR)模型应用效果总是优于普通最小二乘法(Ordinary least squares, OLS)模型。在全球尺度上, 降水和水体面积对水质具有积极作用, 是DO和NH<sub>3</sub>-N的主要影响因素; 而气温和夜间灯光则表现出消极作用, 是TP、TN、高锰酸盐指数和WQI(综合污染状况指数)的关键相关因素, 其中气温还对水体pH起到重要作用。在局部尺度上, 多种影响因素与水质参数之间存在着复杂关联, 在不同空间尺度上的作用存在差异, 主要体现在归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、人口密度和建设用地的影响上。综上, 本研究深入探讨了多空间尺度下水质变化的主要驱动机制, 为长江水质保护与调控提供了重要依据。

**关键词:** 长江; 水质; 影响因素; 空间尺度; 相关分析

**中图分类号:** X 522

**文献标志码:** A

良好的水质对于水资源可持续利用至关重要, 影响水质的因素复杂, 包括多种人为和自然因素<sup>[1]</sup>。如, 在人为因素方面, 前人研究表明, 人口密度与水体磷浓度之间具有强相关性<sup>[2]</sup>; 工业和生活污水的排放是导致水体中氨氮、化学需氧量和挥发性酚类等污染物浓度升高的主要原因<sup>[3]</sup>; 化肥和农药的过量使用, 不仅增加了水体中的营养物质, 还可能引发富营养化现象, 对水生生态系统构成威胁<sup>[4]</sup>; 水库建设改变了水体的自然流动模式, 上游污染物在库区累积, 可能使得沉积物中营养盐释放, 引发二次污染<sup>[5]</sup>。土地利用类型对水质影响尤为重要, 其中林地、耕地和城市用地会影响地表径流及植被过滤作用, 对水质影响最为突出, 且同一区域不同空间研究尺度, 对水质的影响都会存在差异<sup>[6-8]</sup>。

与人为因素相比, 自然因素对水质的影响研究较少, 但其对水质的影响不容忽视。如高水体

流动性能加速水体交换, 进而改善水质<sup>[9]</sup>。气候变化, 特别是降水和温度对水质有显著影响。降水量增加可能导致水体稀释<sup>[10]</sup>, 而温度升高可能增加水体的蒸发量, 同时促进沉积物和营养物的释放<sup>[11-12]</sup>。此外, 自然过程如风化、侵蚀、河流流动、季节性变化和水岩相互作用等通过改变水的物理或化学组成, 都会间接影响水质<sup>[13-15]</sup>。

人为因素与自然因素对水质的影响具有区域差异性<sup>[16-18]</sup>。陈明霞等<sup>[19]</sup>发现在湘江流域以政府干预代替经济因素成为主要影响因素, 且重金属问题主要受河流流量与历史排放影响。LIU等<sup>[20]</sup>发现人为因素对中国新疆伊比努尔湖流域水质有明显影响, 其中水质与归一化植被指数、夜间灯光亮度和耕地呈正相关, 与林地呈负相关。WANG等<sup>[21]</sup>发现人口密度、地形和降水量是营养物的主要影响因素, 而人口密度、温度和流域范围是有机污染物的主要影响因素, 并且指出

收稿日期: 2024-10-23

修回日期: 2024-12-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201005)

作者简介: 林豪杰(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态评价。E-mail: linhaojie1226@163.com

通信作者: 闫振广, E-mail: zgzyan@caes.org.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

人为因素对水质的影响是自然因素的2到3倍。

因此,评估水质状况、解析空间分布特征,以及分析不同空间尺度上人为和自然因素与水质之间的相互关系,对于流域水质保护和水资源管理至关重要。长江作为世界第三大河流,其水质状况直接影响到近五分之一的中国陆地面积和其中生活的人口。同时作为中国影响力最大的经济带,经济的快速发展也带来了一系列生态环境问题,尽管近年来长江水质有明显改善,但是磷污染依然是水体污染的主要形式<sup>[22-23]</sup>。本研究在长江流域覆盖干支流共布设69个采样点位进行水质评估,提取并分析不同空间尺度上人口、夜间灯光、土地利用、地形、气候以及植被指数等人为和自然因素对水质的影响。主要目的是:(1)整体评估长江流域水质状况;(2)识别各水质参数的空间分布特点;(3)通过研究不同空间尺度缓冲区的人为和自然因素与水质参数之间的

相互关系识别影响水质的主要因素,为长江流域水质管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

如图1所示,本次调查于2022年7月至8月在长江干流水域共采集69个水样,其中包括20个干流上游、6个中游和5个下游以及38个支流水样,按照采样的顺序和区域编号为1~69。在调查过程中,使用水质参数仪(Aqua TROLL 500)测量原位水质参数,如pH,DO。每个样本收集2 L水,冷藏保温带回实验室。根据地表水和污水监测技术规范(HJ/T91—2002),对TP、TN、NH<sub>3</sub>-N、COD、高锰酸盐指数分别通过钼酸铵分光光度法、碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法、纳氏试剂光度法、重铬酸盐法和碱性高锰酸钾法进行测定。

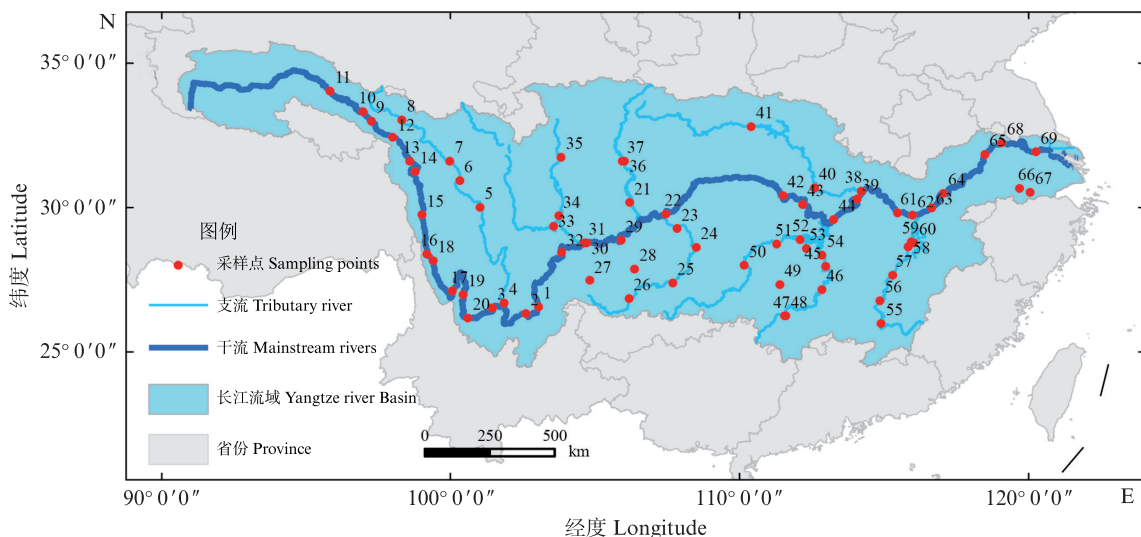


图1 研究区域及采样点分布

Fig. 1 Research area and distribution of sampling sites

### 1.2 水质影响因素分析

#### 1.2.1 水质参数的空间自相关性分析

根据采样位置和水质参数,通过全局莫兰指数(Global moran's index)<sup>[24]</sup>量化所检测的7个水质基本参数在整个研究区域上的空间自相关性。利用Arcgis10.2计算,计算方法见公式1,计算结果在-1到1之间,并结合Z值和P值判断水质参数属于集聚、离散或随机的分布类型。

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (1)$$

式中: $n$ 为采样点数量; $w_{i,j}$ 为采样点*i*和*j*之间的空间权重; $z_i$ 和 $z_j$ 为采样点*i*和*j*相关水质参数与平均值之间的差值。

同时,通过局部莫兰指数(Local moran's index)<sup>[25]</sup>深入分析各个采样点的局部空间相关性,计算方法见公式2,按结果将空间分布分为4类,分别为高值聚类(HH)、低值聚类(LL)、高值被低值围绕的高值异常(HL)以及低值被高值围绕的低值异常(LH)。

$$I_i = \frac{(n-1)z_i}{\sum_{j=1, j \neq i}^n z_j^2} \times \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} z_j \quad (2)$$

为了更全面地分析水质状况,除以上7个水质基本参数外,在空间自相关分析中,还采用了综合污染状况指数这一参数<sup>[26]</sup>,该参数由TP、NH<sub>3</sub>-N和高锰酸盐指数计算而来,计算方法见公式3。

$$WQI_i = \frac{x_i}{0.2} + \frac{y_i}{1} + \frac{z_i}{6} \quad (3)$$

式中:WQI<sub>i</sub>为*i*采样点的综合污染状况指数;*x<sub>i</sub>*、*y<sub>i</sub>*、*z<sub>i</sub>*分别为*i*采样点的TP、NH<sub>3</sub>-N和高锰酸盐指数,其中TP和NH<sub>3</sub>-N对营养状态的评估至关重要,而高锰酸盐指数则能反映出水体有机物负荷。

### 1.2.2 水质与影响因素的相关性分析

所选用的影响因素包括地形、人口、土地利用、夜间灯光、归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)以及气候。地形数据分为高程和坡度,其中高程数据来源于国家地理空间情报局提供的30 m分辨率数据(<http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>),坡度数据是根据高程数据通过Arcgis计算得出的。2020年人口数据<sup>[27]</sup>是基于中国第七次人口普查所生成的100 m分辨率的网格化人口数据集(<https://figshare.com/s/d9dd5f9bb1a7f4fd3734>)。2020年土地利用数据是中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)所提供的30 m分辨率,按照全国土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地6大主要类型。2022年夜间灯光、NDVI分别来自地球观测组(<https://payneinstitute.mines.edu/eog/>),国家生态科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn/>),空间分辨率分别为500 m, 30 m。2022年气候数据包括温度以及降水数据,是来源于国家环境信息中心(<https://www.ncei.noaa.gov/data/>)提供的全球气象监测站点数据通过对7月到8月平均值进行30 m空间分辨率的反距离插值处理后得出的。

为了研究不同空间尺度上水质参数与影响因素之间的相互关系,采用斯皮尔曼相关性分析(Spearman correlation)进行评估。作为一种非参数统计方法,能够在数据不满足正态分布的条件下,有效评估两两变量之间的相关性。取值范围在-1到1之间,值越接近1,正相关性越强,值越

接近-1,负相关性越强,值为0时则没有相关性。

进一步探讨相关性量化影响,应用普通最小二乘回归(Ordinary least squares, OLS)和地理加权回归(Geographically weighted regression, GWR)探索不同空间尺度上影响因素对各个水质参数的解释力度,两者的拟合效果通过决定系数(*R*<sup>2</sup>)进行判断,决定系数越大,模型拟合效果越好。GWR<sup>[28]</sup>是在OLS基础上通过不同空间位置建立局部回归方程来捕捉参数在空间上的非平稳性和异质性,提供更为细致的关系分析,计算方法见公式4。核函数用于定义空间权重,是GWR的关键,研究中选用Gauss函数确定空间权重。

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^n \beta_j(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中:(*u<sub>i</sub>*, *v<sub>i</sub>*)为*i*采样点的地理坐标;*y<sub>i</sub>*和*x<sub>ij</sub>*分别为该位置的因变量和第*j*个自变量;*β<sub>0</sub>*(*u<sub>i</sub>*, *v<sub>i</sub>*)和*β<sub>j</sub>*(*u<sub>i</sub>*, *v<sub>i</sub>*)分别为该位置的截距项和第*j*个自变量的回归系数;*ε<sub>i</sub>*为误差项。

### 1.2.3 数据处理与分析

在收集pH、总氮、总磷等7个关键水质参数的基础上计算相应的综合污染状况指数(WQI),对水质进行评价。利用Arcgis软件计算各水质参数的莫兰指数判断空间分布趋势,并以采样点为中心绘制大(500、400 m)、中(300 m)、小(200、100 m)3种圆形缓冲区,统计各类土地利用面积占比和其他影响因素的平均值,在SPSS软件中进行Spearman相关性分析,通过*P*值量化显著性水平。为避免共线性问题,提高模型准确性,数据经过标准化处理后,在相关性分析基础上选择了9个相互独立且与大部分水质参数都有显著相关性的影响因素,即气温、降水、人口、NDVI、夜间灯光、坡度、草地、水体和建设用地。最后,通过SPSS软件运行OLS模型以及GWR4软件运行GWR模型,对比模型并分析水质参数与影响因素之间空间关系。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水质评估

本研究收集和计算的8个参数能从不同角度反映水质情况(表1)。采用中国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)规定的5类水质分类方法对各调查点位的水质进行分类。



表1 实测水质参数统计数据  
Tab. 1 Statistical data of measured water quality parameters

参数 Parameter	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum	中位数 Median	最大值 Maximum	变异系数 Coefficient of variation/%
pH	7.93	0.65	4.26	8.04	8.77	8.17
DO/(mg/L)	6.91	1.44	2.95	7.16	12.43	20.78
TP/(mg/L)	0.02	0.02	0.01	0.02	0.10	92.01
TN/(mg/L)	1.24	0.76	0.28	1.15	3.99	61.73
NH <sub>3</sub> -N/(mg/L)	0.06	0.15	0	0.03	1.22	232.71
COD/(mg/L)	6.73	5.43	1.48	5.56	33.70	80.70
高锰酸盐指数/(mg/L)	1.98	0.80	1.03	1.74	5.54	40.28
WQI	0.51	0.27	0.23	0.45	2.20	52.44

pH在4.26到8.77之间变化,平均值7.93,水体整体上略微偏碱性。变异系数低,各采样点之间差异小。最大值在27#采样点,与过往赤水河pH在7.4到9.1之间相吻合,其原因可能是处于广泛分布碳酸盐岩的喀斯特地貌,存在着较高的碳酸氢根离子,水解过程中会产生碱性离子,导致pH较高<sup>[29]</sup>。

DO与COD总体表现良好,大部分采样点均达到Ⅲ类标准及以上,高DO和低COD都表明水体具有较好的自净能力和较低的有机污染程度。尤其是COD除了少量点之外,其余都达到了Ⅰ类标准,进一步证实了水体普遍处于未受有机物污染的状态。但较高的变异系数仍然表明DO与COD在空间分布上存在差异。

与之相反,TN作为水质参数的重要指标之一,总体表现不乐观。在大多数采样点中均未达到Ⅲ类标准,甚至出现了劣Ⅴ类点位,值得关注。虽然TN变化是多种因素共同影响的结果,但大坝建设仍然是不容忽视的原因之一<sup>[30]</sup>。大坝建设切断河流连通性,阻挡水流流动,极大地改变了水体状况<sup>[31]</sup>,增加了沉积物的滞留时间,这可能促进了氮的循环。

WQI是以TP、NH<sub>3</sub>-N和高锰酸盐指数为基础计算获得,本研究检测值在0.23到2.20之间不等,低变异系数说明样本间有较小的波动。最高值在66#采样点,主要受该点位的高NH<sub>3</sub>-N浓度影响。尽管TP和NH<sub>3</sub>-N的变异系数高,区域差异性显著,但大部分点位都在Ⅲ类标准及以上。有研究表明,随着时间的推移,长江流域的TP和

NH<sub>3</sub>-N浓度有所下降,水质得到改善<sup>[32]</sup>,但营养物质仍分布不均<sup>[33]</sup>,与本研究的结论相类似。

采用单因子法的水质评估结果表明(图2),本次调查共有29个采样点水质达到了Ⅲ类及以上水平,而Ⅳ、Ⅴ、劣Ⅴ类水质采样点分别有22个、10个和8个,水质区域差异明显,干流上游优于中下游,干流整体优于支流<sup>[34]</sup>,其中乌江(支流)水质相对较差。前人研究<sup>[35-36]</sup>表明,除了乌江外,岷江、沱江、太湖等支流流域的水质情况也并不乐观。

## 2.2 水质参数的空间相关性识别

根据全局莫兰指数结果显示(表2),DO、TP和TN都表现出较强的正自相关性,且显著性水平均在0.01以下,表明在空间上有明显的聚集趋势。图3通过局部莫兰指数进一步揭示了聚类情况,DO在干流上游呈现高值集聚,而在下游低值集聚;TN在干流上游和雅砻江支流均为低值集聚,而在乌江支流高值集聚;TP在干流下游表现为高值集聚。这一现象可能是因为干流上游区域人类活动相对较少且湿地分布广泛,而下游和乌江支流人口密度高<sup>[37]</sup>,城市和农业活动对水体影响明显,进入河流的营养物质负荷较高<sup>[38]</sup>所引起的。

相比之下,其他参数的空间自相关性均不显著或较弱,可能受到更多分散的污染源或更广泛的环境因素影响,导致其在空间上表现出更均匀或随机的分布模式,不容易在空间上表现出自相关性。

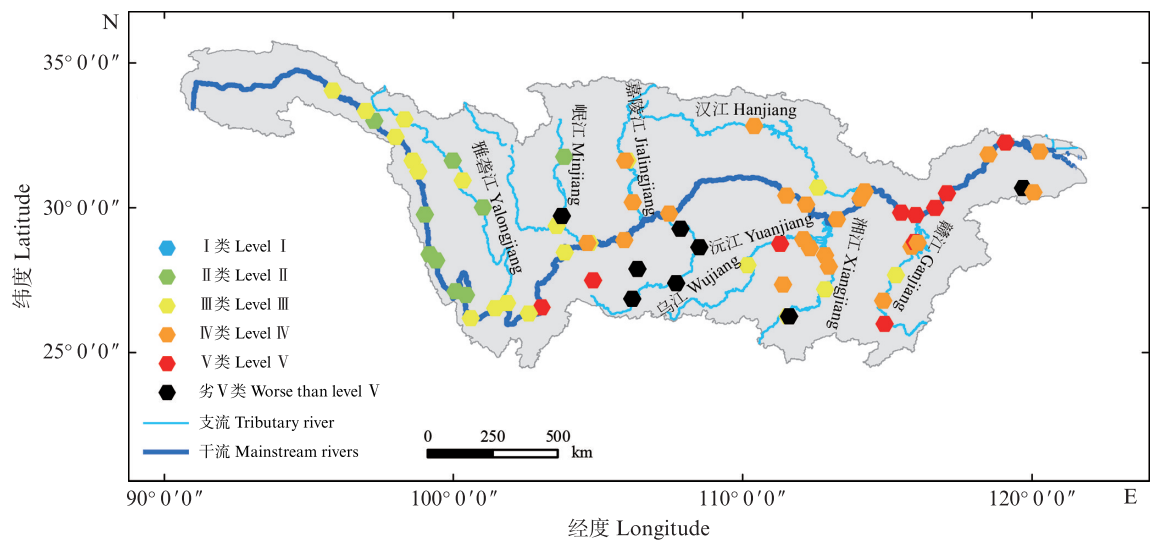


图2 长江流域水质等级状况

Fig. 2 Water quality grade status in the Yangtze River Basin

表2 各实测水质参数的全局莫兰指数

Tab. 2 Global moran's index of various measured water quality parameters

参数 Parameter	全局莫兰指数 Global moran's index	Z	P
pH	0.10	2.24	0.02
DO	0.57	10.15	0
TP	0.25	4.68	0
TN	0.39	7.00	0
NH <sub>3</sub> -N	0.01	0.95	0.34
COD	0.01	0.45	0.65
高锰酸盐指数	0.04	1.01	0.31
WQI	0.07	1.81	0.07

2.3 多空间尺度下相关性分析

Spearman 相关性研究结果显示水质参数(除 COD)与影响因素(除未利用土地)之间存在着不同尺度上的依赖性(图4)。

全局尺度上,气温和夜间灯光与 TP、TN、高锰酸盐指数和 WQI 正相关;而坡度、高程和草地则与这些水质参数负相关。此外,降水与 DO 正相关,高程与 NH<sub>3</sub>-N 正相关,而水体与 TP 正相关但与 NH<sub>3</sub>-N 负相关。值得注意的是,pH 变化与坡度和高程正相关,但与气温负相关。

相比之下,人口、NDVI、耕地、林地和建设用地的局部作用更为显著。人口在中小尺度与 TP 和 TN 正相关,NDVI 在小尺度与 DO 正相关但与 WQI 负相关,耕地在大中尺度与 TN 正相关,林地在小尺度与 TN 正相关,建设用地在中小尺度与 TN 和 WQI 正相关。

2.4 GWR 模型的优势与应用

如表3所示,在多空间尺度下,GWR 在所有水质参数上相比 OLS,决定系数( $R^2$ )得到了显著提高,OLS 的  $R^2$  为 4.1%~43.7%,GWR 为 10.5%~77.8%,前者最高  $R^2$  出现在 TP 或 TN 上,后者出现在 NH<sub>3</sub>-N 上,而两者  $R^2$  最低都在 COD 上出现,其中 NH<sub>3</sub>-N 和 WQI 提升尤其显著, $R^2$  分别上升了至少 0.418 和 0.287。因此,GWR 是比 OLS 更好研究水质参数与影响因素空间关系的高效模型,这与过往研究结果一致,其原因在于 GWR 处理空间数据时模型参数会根据位置不同而改变,从而适应各参数在空间上的异质性,这与参数固定的 OLS 有本质区别,这种灵活性不仅降低了参数估计失真,还能提供更多局部隐藏信息,进而更准确地分析水质参数与影响因素之间的复杂关系<sup>[39-41]</sup>。

GWR 模型的拟合结果如图5。在全局尺度上,气温与 pH 负相关,而与 TP、TN 和 WQI 正相关,影响均随距离增加呈先减后增趋势,且整体上升;与高锰酸盐指数关系复杂,从小尺度几乎无影响到中尺度达到最高正相关后下降,在大尺度转变为负相关。可能是因为气温会通过影响水温间接影响水质参数<sup>[42]</sup>,温度升高,碳酸分解浓度下降,增加了二氧化碳溶解度,导致 pH 上升<sup>[43]</sup>。同时,垂向对流的减少加剧了水体分层,影响了微生物分解作用以及藻类或其他水生植物生长,这些因素都会加速营养盐释放<sup>[44]</sup>。

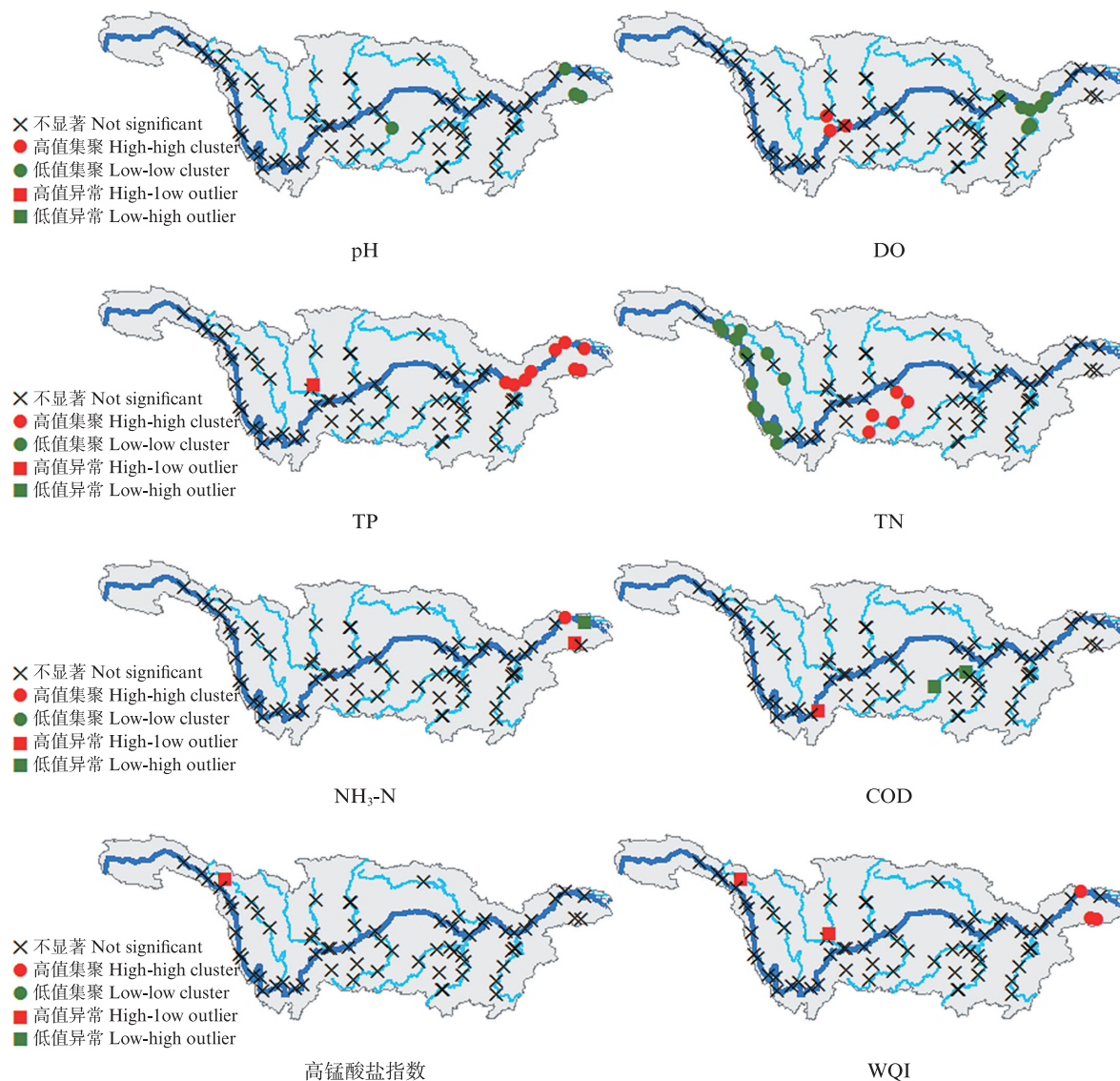


图3 各实测水质参数的局部莫兰指数  
Fig. 3 Local moran's index of various measured water quality parameters

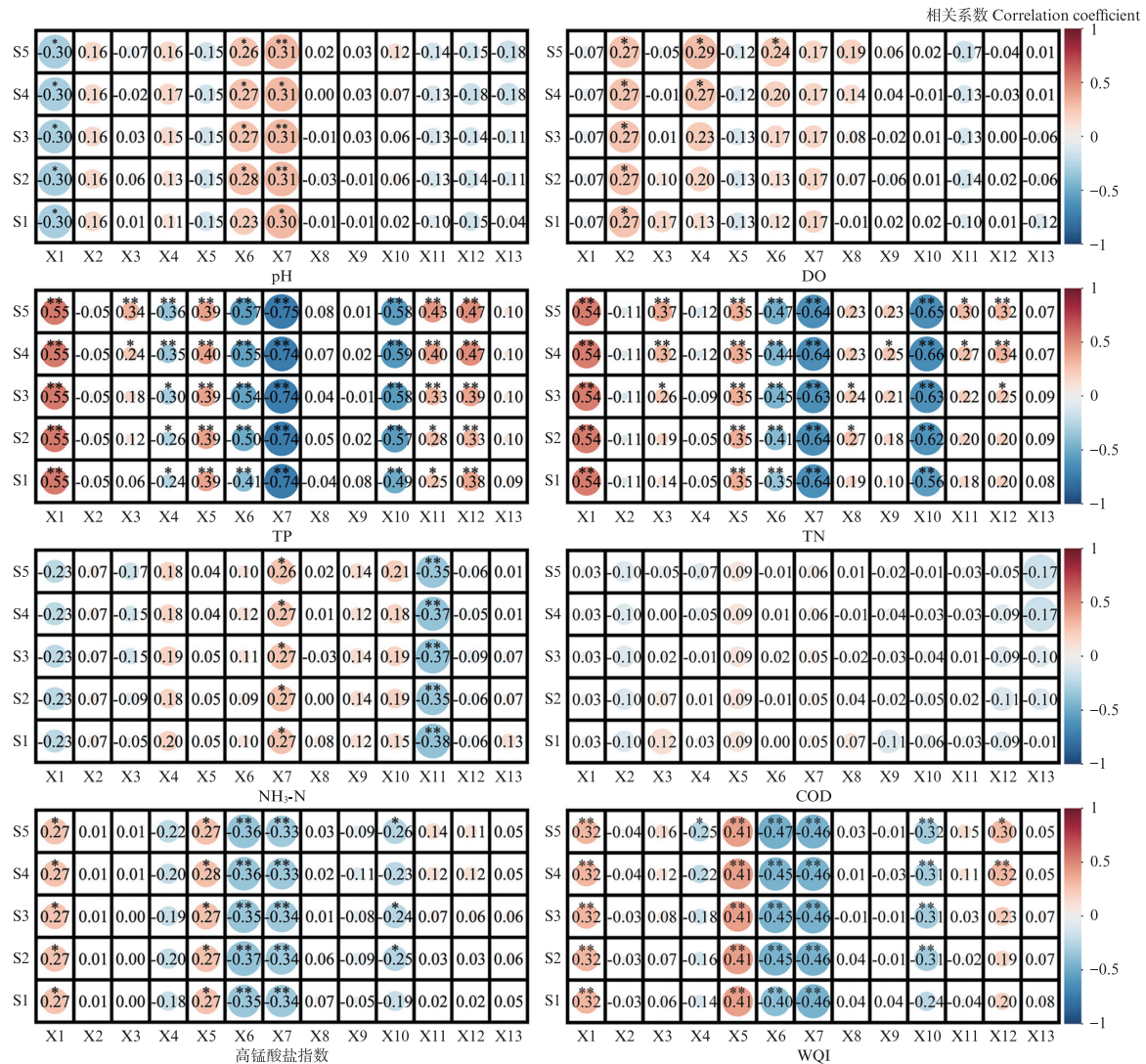
降水与 DO 正相关,影响随距离增加先减后增,但整体减少。降水能够增强水体中的湍流和混合,促进水体与大气之间的氧气交换。此外,还可以稀释水体中的营养盐浓度,减少藻类生物量从而间接降低 DO 的消耗<sup>[45]</sup>。

夜间灯光与 TP、TN、高锰酸盐指数和 WQI 均正相关,空间变化复杂,TP、WQI 的影响整体减少,随着距离增加先增后减,TN 增减趋势相同但整体相反,高锰酸盐指数则增减趋势和整体都相反。夜间灯光可以反映地区的经济发展水平,通常与人类活动以及城市化密切相关。这种经济

活动的增加常常伴随着更密集的城市排水、工业排放和生活垃圾处理等人类活动,从而增加水体中的污染物浓度<sup>[46-47]</sup>。

坡度与 pH 正相关,影响随距离增加先增后减,整体减少;与 TP、TN、高锰酸盐指数和 WQI 均负相关,影响先增后减再增,除 TP 外,其余参数整体上升。高坡度通常位于山区,对水流的分布、方向和速度有显著影响,加速对周边岩石和土壤的侵蚀,更容易将含有碱性矿物质的岩石溶解,使 pH 上升<sup>[48]</sup>,且提升水体的复氧和自净能力,从而加速污染物的分解<sup>[49]</sup>。





S1. 100 m; S2. 200 m; S3. 300 m; S4. 400 m; S5. 500 m; X1. 气温; X2. 降水; X3. 人口; X4. NDVI; X5. 夜间灯光; X6. 坡度; X7. 高程; X8. 耕地; X9. 林地; X10. 草地; X11. 水体; X12. 建设用地; X13. 未利用地; \*.  $P < 0.05$ ; \*\*.  $P < 0.01$ .

S1. 100 m; S2. 200 m; S3. 300 m; S4. 400 m; S5. 500 m; X1. temperature; X2. precipitation; X3. population; X4. NDVI; X5. nighttime lighting; X6. slope; X7. elevation; X8. cultivated land; X9. forest land; X10. grassland; X11. water bodies; X12. construction land; X13. unutilized land; \*.  $P < 0.05$ ; \*\*.  $P < 0.01$ .

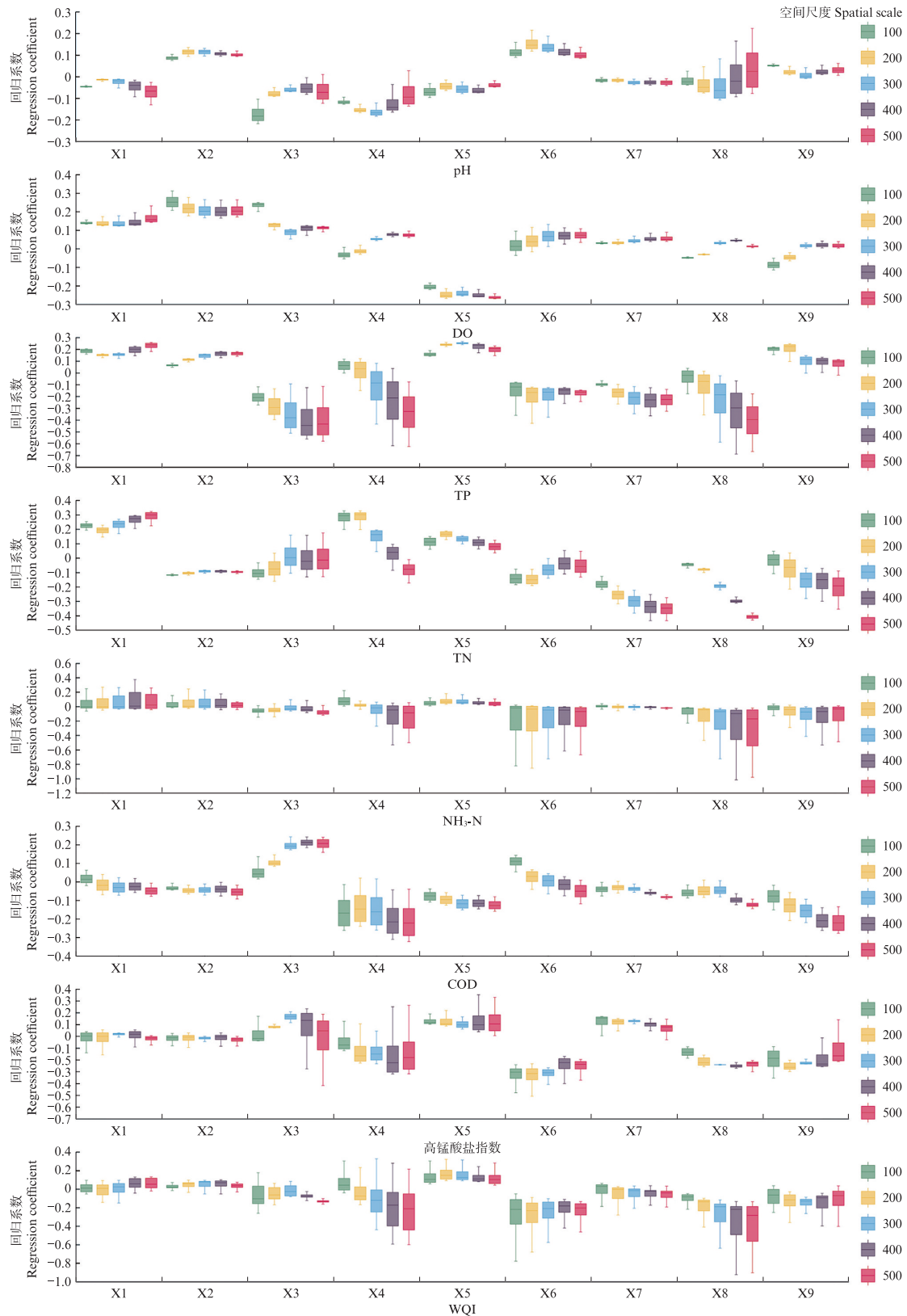
图4 多空间尺度下水质参数与环境因素之间的相关性

Fig. 4 Correlation between water quality parameters and environmental factors at multiple spatial scales

表3 多空间尺度下各水质参数OLS与GWR模型决定系数( $R^2$ )比较

Tab. 3 Comparison of determination coefficients ( $R^2$ ) of OLS and GWR models for various water quality parameters at multiple spatial scales

参数 Parameter	100 m		200 m		300 m		400 m		500 m	
	OLS	GWR	OLS	GWR	OLS	GWR	OLS	GWR	OLS	GWR
pH	0.121	0.165	0.106	0.171	0.099	0.170	0.094	0.170	0.092	0.169
DO	0.206	0.260	0.185	0.231	0.186	0.231	0.200	0.242	0.213	0.251
TP	0.321	0.418	0.362	0.479	0.390	0.514	0.419	0.533	0.437	0.520
TN	0.342	0.377	0.380	0.423	0.380	0.424	0.390	0.438	0.400	0.447
NH <sub>3</sub> -N	0.135	0.712	0.155	0.766	0.188	0.778	0.243	0.751	0.277	0.695
COD	0.042	0.114	0.041	0.105	0.054	0.118	0.063	0.126	0.063	0.134
高锰酸盐指数	0.203	0.371	0.219	0.390	0.189	0.254	0.150	0.324	0.132	0.285
WQI	0.231	0.699	0.273	0.728	0.297	0.732	0.332	0.646	0.362	0.649



X1. 气温; X2. 降水; X3. 人口; X4. NDVI; X5. 夜间灯光; X6. 坡度; X7. 草地; X8. 水体; X9. 建设用地。

X1. Temperature; X2. Precipitation; X3. Population; X4. NDVI; X5. Nighttime lighting; X6. Slope; X7. Grassland; X8. Water bodies; X9. Construction land.

图5 多空间尺度下水质参数与环境因素之间GWR分析

Fig. 5 GWR analysis of water quality parameters and environmental factors at multiple spatial scales



草地与水体的相关性呈现出相似的模式。两者均与 TP 呈负相关,影响随距离增加先增后减,整体上升;草地与高锰酸盐指数正相关,影响先减后增再减,整体减少。此外,草地与 WQI 波动相关,小尺度从正相关到负相关后,影响逐渐加大,而水体与  $\text{NH}_3\text{-N}$  也呈类似转变。水体面积变化会影响其他土地利用类型进而间接影响水质,如水体面积增加会降低城市和旱地对水质的恶化作用<sup>[50]</sup>,而草地不仅可以促进水分下渗减少地表径流,而且植被根系还有吸收过滤固定作用,增强水土保持能力,通过物理、化学、生物等方式减少水体中污染物,起到“汇”的作用<sup>[51-53]</sup>。

在小尺度上,NDVI 与 DO 负相关,影响持续减少;与 WQI 波动相关,从正相关到负相关。高 NDVI 反映了较高的叶绿素浓度,可能有大量藻类繁殖导致水华,消耗大量 DO,降低水质<sup>[54]</sup>,当小尺度扩大时,可能因为水体稀释作用或周围环境变化,虽然对 DO 依然有负面影响,但总体水质有所提升。

在中小尺度上,人口与 TP 负相关,影响随着距离增加先增后减,整体上升;与 TN 波动相关,从小尺度负相关到中尺度正相关。建设用地与 TN 和 WQI 负相关,影响持续增加。尽管与以往的研究结果存在差异<sup>[55-56]</sup>,但可能因为人口尚未达到密集的程度<sup>[57]</sup>,且城市化水平高有较完善的雨污管理和污水处理技术,能有效控制和减少污染<sup>[58]</sup>,从而造成了小尺度乃至中尺度上的负相关。

### 3 结论

对长江采样点的分析表明,有将近半数点位的水质至少达到Ⅲ及以上水平,但 TN 等部分水质表现较差,这与其他研究中指出 TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和 COD 作为主要超标指标有所不同<sup>[59]</sup>,但结果都显示长江水质整体向好;进一步分析表明干流上游水质普遍优于中下游,支流水质相对较差,也得到了验证<sup>[60-61]</sup>。同时,DO、TP 和 TN 在全局空间上有明显的聚集,其中 DO 在干流上游高值集聚,下游低值集聚;TN 在干流上游和雅砻江支流低值集聚,乌江支流高值集聚;TP 在干流下游高值集聚。

不同空间尺度下水质参数与影响因素之间

关系复杂,但  $R^2$  显示 GWR 表现总是优于 OLS,降低参数估计失真,同时还提供更多隐藏信息。具体而言,全局尺度中,DO 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的分布分别受降水和水体面积的直接影 响,气温、夜间灯光、坡度均为 TP、TN、高锰酸盐指数和 WQI 的重要相关变量,其中气温和坡度又对水体 pH 起关键作用。局部尺度中,人口、NDVI 和建设用地也与个别水质参数表现出显著的相关性。此外,先前研究还指出长江流域中 TP 变化与泥沙输入有关<sup>[62]</sup>,经济发展和水库建设都会加剧有机物和营养盐的污染<sup>[63]</sup>,不同的土地利用对水质的影响是多样的,林地有利于改善水质而耕地和建设用地则截然相反<sup>[64-65]</sup>。研究结果进一步说明了水质与影响因素之间复杂的作用关系,强调了在水质管理与保护中,需考虑多尺度和多因素的综合影响。

作者声明本文无利益冲突。

### 参考文献:

- [1] 柳凤霞,史紫薇,钱会,等. 银川地区地下水水化学特征演化规律及水质评价[J]. 环境化学, 2019, 38(9): 2055-2066.  
LIU F X, SHI Z W, QIAN H, et al. Evolution of groundwater hydrochemical characteristics and water quality evaluation in Yinchuan area [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(9): 2055-2066.
- [2] MORRICE J A, DANZ N P, REGAL R R, et al. Human influences on water quality in Great Lakes coastal wetlands [J]. Environmental Management, 2008, 41 (3): 347-357.
- [3] ZHENG L Y, YU H B, WANG Q S. Application of multivariate statistical techniques in assessment of surface water quality in Second Songhua River basin, China [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(5): 1040-1051.
- [4] 郑田甜,赵祖军,赵筱青,等. 云南星云湖水质变化及其人文因素驱动力分析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 79-90.  
ZHENG T T, ZHAO Z J, ZHAO X Q, et al. Water quality change and humanities driving force in Lake Xingyun, Yunnan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(1): 79-90.
- [5] 王昱,卢世国,冯起,等. 黑河上中游水质时空分异特征及污染源解析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10): 4194-4204.  
WANG Y, LU S G, FENG Q, et al. Spatio-temporal characteristics and source identification of water

- pollutants in the upper and middle reaches of Heihe River [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(10): 4194-4204.
- [6] 郭羽羽, 李思悦, 刘睿, 等. 黄河流域多时空尺度土地利用与水质的关系[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(3): 737-748.
- GUO Y Y, LI S Y, LIU R, et al. Relationship between landscape pattern and water quality of the multi-scale effects in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(3): 737-748.
- [7] 李昆, 王玲, 孙伟, 等. 城市化下景观格局对河流水质变化的空间尺度效应分析[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(1): 343-352.
- LI K, WANG L, SUN W, et al. Spatial effect of landscape pattern on river water quality under urbanization [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(1): 343-352.
- [8] 徐启渝, 王鹏, 王涛, 等. 土地利用结构与景观格局对鄱阳湖流域赣江水质的影响[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(4): 1008-1019.
- XU Q Y, WANG P, WANG T, et al. Investigation of the impacts of land use structure and landscape pattern on water quality in the Ganjiang River, Lake Poyang Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(4): 1008-1019.
- [9] 刘丹, 王烜, 李春晖, 等. 水文连通性对湖泊生态环境影响的研究进展[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(7): 1702-1715.
- LIU D, WANG X, LI C H, et al. Eco-environmental effects of hydrological connectivity on lakes: a review [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(7): 1702-1715.
- [10] 王乐扬, 李清洲, 杜付然, 等. 20年来中国河流水质变化特征及原因[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(3): 84-88.
- WANG Y Y, LI Q Z, DU F R, et al. Characteristics and causes of water quality change in Chinese rivers during the recent 20 years [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2019, 40(3): 84-88.
- [11] ZHENG L, AN Z Y, CHEN X L, et al. Changes in water environment in Erhai Lake and its influencing factors [J]. *Water*, 2021, 13(10): 1362.
- [12] COLÓN LÓPEZ J, RESTREPO C. Water quality and socio-economic indicators are linked in a tropical watershed: emerging implications for the sustainable management of watersheds [J]. *Wetlands*, 2019, 39(6): 1303-1316.
- [13] GHAEMI Z, NOSHADI M. Surface water quality analysis using multivariate statistical techniques: a case study of Fars Province rivers, Iran [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 194(3): 178.
- [14] SHIL S, SINGH U K, MEHTA P. Water quality assessment of a tropical river using water quality index (WQI), multivariate statistical techniques and GIS [J]. *Applied Water Science*, 2019, 9(7): 168.
- [15] DUTTA S, DWIVEDI A, KUMAR M S. Use of water quality index and multivariate statistical techniques for the assessment of spatial variations in water quality of a small river [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(12): 718.
- [16] 康文华, 蔡宏, 林国敏, 等. 不同地貌条件下景观对河流水质的影响差异[J]. *生态学报*, 2020, 40(3): 1031-1043.
- KANG W H, CAI H, LIN G M, et al. Influences of landscape on river quality under different geomorphological conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 1031-1043.
- [17] 李颖, 张祯, 程建华, 等. 2012-2018年洪泽湖水质时空变化与原因分析[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(3): 715-726.
- LI Y, ZHANG Z, CHENG J H, et al. Water quality change and driving forces of Lake Hongze from 2012 to 2018 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(3): 715-726.
- [18] 杨斌, 方怀义, 许丽莉, 等. 钦州湾水质污染时空变化特征及驱动因素[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(6): 877-883.
- YANG B, FANG H Y, XU L L, et al. Spatio-temporal variation characteristics and driving factors of water pollution in Qinzhou bay [J]. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(6): 877-883.
- [19] 陈明霞, 熊贵耀, 张佳鹏, 等. 湘江流域水质综合评价及其时空演变分析[J]. *环境工程*, 2019, 37(10): 83-90, 104.
- CHEN M X, XIONG G Y, ZHANG J P, et al. Comprehensive evaluation of water quality in Xiangjiang River basin from multi-dimensional perspective and its spatial-temporal evolution analysis [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(10): 83-90, 104.
- [20] LIU C J, ZHANG F, WANG X P, et al. Assessing the factors influencing water quality using environment water quality index and partial least squares structural equation model in the Ebinur Lake Watershed, Xinjiang, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(19): 29033-29048.
- [21] WANG J X, HU M G, ZHANG F S, et al. Influential factors detection for surface water quality with geographical detectors in China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2018, 32(9): 2633-2645.
- [22] 刘录三, 黄国鲜, 王璠, 等. 长江流域水生态环境安全

- 主要问题、形势与对策[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1081-1090.
- LIU L S, HUANG G X, WANG F, et al. Main problems, situation and countermeasures of water eco-environment security in the Yangtze River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1081-1090.
- [23] 杨荣金, 孙美莹, 傅伯杰, 等. 长江流域生态系统可持续管理策略[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1091-1099.
- YANG R J, SUN M Y, FU B J, et al. Sustainable management strategy of ecosystems in the Yangtze River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1091-1099.
- [24] MORAN P A P. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. Biometrika, 1950, 37(1/2): 17-23.
- [25] ANSELIN L. Local indicators of spatial association—LISA[J]. Geographical Analysis, 1995, 27(2): 93-115.
- [26] 生态环境部办公厅, 国家发展和改革委员会办公厅, 水利部办公厅, 等. 长江流域水生态考核指标评分细则(试行)[EB/OL]. (2023-06-05). [https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk05/202308/t20230824\\_1039240.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk05/202308/t20230824_1039240.html).
- Office of the Ministry of Ecology and Environment, Office of the National Development and Reform Commission, Office of the Ministry of Water Resources, et al. Scoring rules for water ecological assessment indicators in the Yangtze River Basin (Trial) [EB/OL]. (2023-06-05). [https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk05/202308/t20230824\\_1039240.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk05/202308/t20230824_1039240.html).
- [27] CHEN Y H, XU C C, GE Y, et al. A 100 m gridded population dataset of China's seventh census using ensemble learning and big geospatial data [J]. Earth System Science Data, 2024, 16(8): 3705-3718.
- [28] 卢宾宾, 葛咏, 秦昆, 等. 地理加权回归分析技术综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1356-1366.
- LU B B, GE Y, QIN K, et al. A review on geographically weighted regression [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(9): 1356-1366.
- [29] 徐森, 李思亮, 钟君. 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 752-761.
- XU S, LI S L, ZHONG J. Effects of land use on riverine dissolved inorganic carbon (DIC) and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  in a Karst River Basin, Southwestern China [J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 752-761.
- [30] 张馨月, 马沛明, 高千红, 等. 三峡大坝上下游水质时空变化特征[J]. 湖泊科学, 2019, 31(3): 633-645.
- ZHANG X Y, MA P M, GAO Q H, et al. Spatial-temporal variations of water quality in upstream and downstream of Three Gorges Dam [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(3): 633-645.
- [31] 陈歆, 靳甜甜, 苏辉东, 等. 拉萨河河流健康评价指标体系构建及应用[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 799-809.
- CHEN X, JIN T T, SU H D, et al. Construction and application of health assessment index system for Lhasa River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 799-809.
- [32] LIU S S, FU R, LIU Y, et al. Spatiotemporal variations of water quality and their driving forces in the Yangtze River Basin, China, from 2008 to 2020 based on multi-statistical analyses [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(46): 69388-69401.
- [33] WU W T, WANG J J, WANG H, et al. Trends in nutrients in the Changjiang River [J]. Science of the Total Environment, 2023, 872: 162268.
- [34] DENG C N, LIU L S, LI H S, et al. A data-driven framework for spatiotemporal characteristics, complexity dynamics, and environmental risk evaluation of river water quality [J]. Science of the Total Environment, 2021, 785: 147134.
- [35] DI Z Z, CHANG M, GUO P K. Water quality evaluation of the Yangtze River in China using machine learning techniques and data monitoring on different time scales [J]. Water, 2019, 11(2): 339.
- [36] 景朝霞, 夏军, 张翔, 等. 汉江中下游干流水质状况时空分布特征及变化规律[J]. 环境科学研究, 2019, 32(1): 104-115.
- JING Z X, XIA J, ZHANG X, et al. Spatial and temporal distribution and variation of water quality in the middle and downstream of Hanjiang River [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(1): 104-115.
- [37] WANG A, YANG D W, TANG L H. Spatiotemporal variation in nitrogen loads and their impacts on river water quality in the upper Yangtze River basin [J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125487.
- [38] 王佳宁, 徐顺青, 武娟妮, 等. 长江流域主要污染物总量减排及水质响应的时空特征[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(3): 1065-1074.
- WANG J N, XU S Q, WU J N, et al. On temporal-spatial features for reduced pollutant exhaust emission of Yangtze River Basin [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(3): 1065-1074.
- [39] 和克俭, 黄晓霞, 丁佼, 等. 基于GWR模型的东江水质空间分异与水生态功能分区验证[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5483-5493.
- HE K J, HUANG X X, DING J, et al. Spatial variations in water quality and their correspondence with ecoregions of the Dongjiang River basin using geographically



- weighted regression (GWR) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15): 5483-5493.
- [40] 项颂, 万玲, 庞燕. 土地利用驱动下洱海流域入湖河流水质时空分布规律[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(1): 160-170.
- XIANG S, WAN L, PANG Y. Spatial-temporal variation of inflow river water quality under land use effect [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(1): 160-170.
- [41] KOH E H, LEE E, LEE K K. Application of geographically weighted regression models to predict spatial characteristics of nitrate contamination: implications for an effective groundwater management strategy [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 268: 110646.
- [42] HAN Y L, BU H M. The impact of climate change on the water quality of Baiyangdian Lake (China) in the past 30 years (1991-2020) [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 870: 161957.
- [43] HAGENS M, MIDDELBURG J J. Attributing seasonal pH variability in surface ocean waters to governing factors [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(24): 12528-12537.
- [44] 王锦旗, 宋玉芝, 黄进. 水温升高对水体性质及水生生物的影响研究进展[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(1): 100-109.
- WANG J Q, SONG Y Z, HUANG J. Effects of increasing water temperature on water properties and aquatic organisms: a critical review [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(1): 100-109.
- [45] GUO H W, HUANG J J, ZHU X T, et al. A generalized machine learning approach for dissolved oxygen estimation at multiple spatiotemporal scales using remote sensing [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288: 117734.
- [46] HAN Q, TONG R Z, SUN W C, et al. Anthropogenic influences on the water quality of the Baiyangdian Lake in North China over the last decade[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701: 134929.
- [47] ZHANG Y Y, SUN M Y, YANG R J, et al. Decoupling water environment pressures from economic growth in the Yangtze River Economic Belt, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107314.
- [48] 蔡宏, 林国敏, 康文华. 赤水河流域中上游坡地景观特征对河流水质的影响[J]. *地理研究*, 2018, 37(4): 704-716.
- CAI H, LIN G M, KANG W H. The effects of sloping landscape features on water quality in the upper and middle reaches of the Chishui River Watershed [J]. *Geographical Research*, 2018, 37(4): 704-716.
- [49] SHI W, XIA J, ZHANG X. Influences of anthropogenic activities and topography on water quality in the highly regulated Huai River basin, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(21): 21460-21474.
- [50] DENG X J. Influence of water body area on water quality in the southern Jiangsu Plain, eastern China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 120136.
- [51] FANG L L, WANG L C, CHEN W X, et al. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service in the Yangtze and Yellow River Basins [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127995.
- [52] SHEHAB Z N, JAMIL N R, ARIS A Z, et al. Spatial variation impact of landscape patterns and land use on water quality across an urbanized watershed in Bentong, Malaysia [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107254.
- [53] 唐廉, 胡晓辉, 权冠中, 等. 潭江流域水质时空分布特征及其与土地利用的相关性分析[J]. *地球与环境*, 2018, 46(4): 364-372.
- TANG L, HU X H, QUAN G Z, et al. Spatiotemporal distribution of water quality in the Tanjiang River and its correlation with the land use [J]. *Earth and Environment*, 2018, 46(4): 364-372.
- [54] MA J Y, JIN S G, LI J, et al. Spatio-temporal variations and driving forces of harmful algal blooms in Chaohu Lake: a multi-source remote sensing approach [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 427.
- [55] HU D X, ZHANG C, MA B, et al. The characteristics of rainfall runoff pollution and its driving factors in Northwest semiarid region of China - A case study of Xi'an [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 138384.
- [56] CHEN S S, KIMIREI I A, YU C, et al. Assessment of urban river water pollution with urbanization in East Africa [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(27): 40812-40825.
- [57] LIYANAGE C P, YAMADA K. Impact of population growth on the water quality of natural water bodies [J]. *Sustainability*, 2017, 9(8): 1405.
- [58] 王倩, 吴亚东, 丁庆玲, 等. 西太湖入湖河流水系污染时空分异特征及解析[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(7): 2699-2707.
- WANG Q, WU Y D, DING Q L, et al. Temporospatial variations and influential factors of water quality in the flowing river systems of western Taihu Lake Basin [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(7): 2699-2707.
- [59] 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.
- [60] 陈峰, 李晓慧, 王文静, 等. 2018~2022年长江流域总磷时空变化特征研究[J]. 水利水电快报, 2023, 44(8): 91-97, 105.
- CHEN F, LI X H, WANG W J, et al. Temporal and spatial variation characteristics of total phosphorus in Yangtze River Basin from 2018 to 2022 [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2023, 44(8): 91-97, 105.
- [61] 杨盼, 卢路, 王继保, 等. 基于主成分分析的spearman秩相关系数法在长江干流水质分析中的应用[J]. 环境工程, 2019, 37(8): 76-80.
- YANG P, LU L, WANG J B, et al. Analysis of water quality trend in the main stream of the Yangtze River based on principal component analysis[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(8): 76-80.
- [62] 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 18 years[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1150-1162.
- [63] 黄橘, 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.
- [64] 刘怡娜, 孔令桥, 肖焱, 等. 长江流域景观格局变化对生态系统水质净化服务的影响[J]. 环境保护科学, 2018, 44(4): 6-13.
- LIU Y N, KONG L Q, XIAO Y, et al. Effects of landscape pattern changes on ecosystem water purification service in the Yangtze River Basin [J]. Environmental Protection Science, 2018, 44(4): 6-13.
- [65] 程国微, 陈岩, 高伟. 2016—2019年长江流域湖库群氮磷污染源解析[J]. 环境科学学报, 2022, 42(3): 207-217.
- CHENG G W, CHEN Y, GAO W. Source apportionment of nitrogen and phosphorus in the lakes and reservoirs of Yangtze River watershed from 2016 to 2019 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(3): 207-217.

## Spatial differentiation of water quality in the Yangtze River and the impact of environmental factors on multiple scales

LIN Haojie<sup>1,2</sup>, ZHANG Ruiqing<sup>2</sup>, WANG Ziyi<sup>2</sup>, QIAO Qiao<sup>2</sup>, YAN Zhenguang<sup>2</sup>

(1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** A total of 69 sites were deployed in the main and tributary streams of the Yangtze River Basin to evaluate and analyze the spatial autocorrelation of main water quality parameters and to explore the influence of multiple environmental elements on the water quality of the Yangtze River at different spatial scales. The results showed that nearly half of the sampling sites had water quality of category 3 or above, with obvious differences between the main streams and tributaries. DO, TP and TN had obvious aggregation trends on the whole, but had specific distribution characteristics in the local space. In addition, the relationship between water quality parameters and influencing factors at different spatial scales is complex, and the application of Geographically Weighted Regression model is always better than Ordinary Least Squares model. At the global scale, precipitation and water body area positively contributed to water quality and were the main factors influencing DO and  $\text{NH}_3\text{-N}$ , while temperature and nighttime lighting had negative effects and were the key correlates of TP, TN, permanganate index, and WQI (composite pollution status index), with temperature also significantly influencing water body pH. At the local scale, there were complex correlations between multiple influencing factors and water quality parameters, with differences in their roles at different spatial scales, mainly in the effects of NDVI (Normalized difference vegetation index), population density and built-up land. In summary, this study thoroughly explored the main driving mechanisms of water quality changes at multiple spatial scales, providing an important basis for the protection and regulation of water quality in the Yangtze River.

**Key words:** Yangtze River; water quality; influencing factors; spatial scale; correlation analysis