

基于不同综合水质评价方法的长江流域水质 时空差异性对比分析

王飞宇¹, 李肖杨¹, 贾军伟⁴, 左凌峰¹, 于雪静⁵, 张彦^{2,3*}

(1.中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2.中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 3.郑州大学 水利与交通学院,

郑州 450001; 4.中电建华东勘测设计研究院(郑州)有限公司, 郑州 450000;

5.江苏省水文水资源勘测局南通分局, 江苏 南通 226006)

摘要:【目的】探究不同综合水质评价方法在长江流域水质评价的运用, 并进一步分析长江流域干流及主要支流水质变化特征及时空差异性。【方法】基于长江流域 16 个代表性监测断面 2008—2018 年的水质数据, 利用水质综合指数法、水污染指数法和综合水质标识指数法对长江干流及其主要支流的流域水质状况进行综合评价, 并采用 M-K 趋势检验、聚类分析和判别分析对流域水质的时空分布特征开展研究。【结果】在汛期和非汛期, 乐山岷江大桥监测断面 DO 质量浓度最小分别为 2.86 mg/L 和 3.16 mg/L, 南昌滁槎断面 COD_{Mn} 和 NH₃-N 质量浓度最大分别为 10.00 mg/L 和 6.45 mg/L、2.23 mg/L 和 4.48 mg/L; 非汛期时南昌滁槎断面采用水污染指数法评价, 水质标准 IV 类及以上监测次数的占比最大为 31.82%, 乐山岷江大桥断面采用水质综合指数法评价, 处于水质标准 IV 类及以上监测次数的占比最大为 19.70%; 水质评价结果的良好程度为综合水质标识指数法>水质综合指数法>水污染指数法; 乐山岷江大桥、长沙新港和南昌滁槎等断面水质评价结果的变化趋势最为显著且趋于好转; 水质评价结果在空间上具有一定的差异性, 乐山岷江大桥、长沙新港和南昌滁槎等断面的水质评价结果相对较差, 岷江、湘江和赣江相较于长江其他河流的水质状况略差。【结论】不同综合水质评价方法对长江流域主要监测断面水质的评价结果具有一定差异性, 且水质综合指数法的评价结果更能体现水质现状情况。

关键词: 长江流域; 水质评价; 时空差异; 聚类分析

中图分类号: X824

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023102

OSID:



王飞宇, 李肖杨, 贾军伟, 等. 基于不同综合水质评价方法的长江流域水质时空差异性对比分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(10): 74-84.

WANG Feiyu, LI Xiaoyang, JIA Junwei, et al. Comparative Analysis of Spatiotemporal Variability in Water Quality of the Yangtze River Based on Different Water Quality Evaluation Methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(10): 74-84.

0 引言

【研究意义】长江流域作为我国的第一大流域, 其在全国经济社会发展中具有重要的地位, 在生态环境保护越来越受到重视的背景下, 长江流域水环境保护成为长江大保护的重要内容, 因此开展长江流域水质评价对长江流域水环境管理与保护具有重要意义^[1-2]。【研究进展】河流水质评价是采用特定方法定量描述水体质量优劣程度的分析手段, 目前河流水质评价的方法主要有单因子评价法、内梅罗污染指数法、模糊综合评价法、粗糙集-贝叶斯网络

评价法、熵权-偏序集模型评价法、灰色聚类分析法、水质综合指数法、水污染指数法以及综合水质标识指数法等^[3-6]。相关学者运用不同的评价方法对长江流域水质状况进行了评价分析, 如董春燕等^[7]和王逸可等^[8]利用模糊综合评价法对长江中游和南京市长江子汇洲水源地的水质进行评价; 白云等^[9]基于智能互补思想提出了粗糙集-贝叶斯网络的水质评价方法并评估了嘉陵江流域重庆段的水质状况; 陈慧文等^[10]利用灰色聚类分析法对上海市长江口水质状况进行了评价; 部分研究^[11-16]利用水污染指数法分别对长江黄石段、汉江中下游干流、赣江上游桃江流域、沱江流域、湘江长沙段支流、澜沧江西藏段水质状况进行评价; 朱叶华等^[17]采用水质综合指数法评价了长江沙市江段的水质状况; 有研究^[18-23]利用综合水质标识指数法评价了汉江中下游、嘉陵江白庙子段、重庆市主城区 8 条河流、汉江流域硫

收稿日期: 2023-03-16 修回日期: 2023-06-25 网络出版日期: 2023-10-18
基金项目: 美丽中国生态文明建设科技工程专项资助项目(XDA23040304);
河南省自然科学基金项目(212300410310)
作者简介: 王飞宇(1992-), 女, 博士, 主要从事流域水循环模拟研究。
E-mail: wangfy.14s@igsrr.ac.cn
通信作者: 张彦(1989-), 男, 助理研究员, 主要从事水资源与水环境研究。E-mail: zhangyan09@caas.cn
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

铁矿区厚子河支流、长江徐六泾断面和长江口主要入海通道断面的水质状况。【切入点】虽然相关研究运用各种评价方法对长江流域水质进行评价，但由于不同的水质评价方法对河流水质状况的评价结果略有不同，为了更加精准地描述长江流域水体状况，本研究选择不同综合水质评价方法对长江流域水质进行评价并分析其时空差异性特征。【拟解决的关键问题】本研究基于 2008—2018 年长江流域干流及主要支流代表性监测断面的水质数据，利用水质综合指数法、水污染指数法和综合水质标识指数法对长江流域水质状况进行评价，并结合 Mann-Kendall 趋势检验法、聚类分析等方法探究流域水质的时空差异性特征，以期为长江流域水生态环境绿色健康发展提供相应支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区及数据来源

1.1.1 研究区概况

长江流域（24°N—35°N、90°E—122°E）是我国第一大流域，干流全长约 6 300 km，自西向东流经青海、四川、西藏、云南、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海等 11 个省（自治区、直辖市），流域面积约 180 万 km²（图 1），其中，汉江^[24]是长江最大的支流，全长约 1 577 km，流域面积约为 15.9 万 km²。流域大部分地区属亚热带季风气候，夏季高温多雨，冬季寒冷干燥，降水年内分布不均。长江流域作为我国经济的重心，年均接纳废污水量约占全国的 1/3，目前随着水生态环境治理力度的加强，长江流域水质整体上呈较好的变化趋势。根据中国生态环境统计年报，2019、2020 年和 2021 年长

江流域处于 I—III 类水质断面的占比分别为 91.7%、96.7%和 97.1%，但仍有部分支流水质状况相对较差且流域内仍有湖库存在水体富营养化现象。水质状况是长江水生态环境健康的重要表征^[25-26]，明晰长江流域干流及主要支流水质状况对流域生态资源安全具有重要意义。



图 1 长江流域主要监测断面分布示意图

Fig.1 Spatial distribution of the main monitoring sections in the Yangtze River Basin

1.1.2 数据来源

水质指标数据主要来源于中国环境监测总站编制的《全国主要流域重点断面水质自动监测周报》，文中选取长江干流及主要支流（岷江、沱江、嘉陵江、湘江、赣江、汉江、丹江口水库和夹江）16 个监测断面的 4 项水质指标，监测断面位置及基本信息见图 1 及表 1。水质指标为全国主要流域重点断面水质自动监测周报中监测指标，包括 pH、溶解氧（DO）、高锰酸盐指数（COD_{Mn}）和氨氮（NH₃-N），指标数据分析执行《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）^[27]。水质指标监测时间为 2008 年 1—12 月，指标监测频次为每周 1 次。

表 1 监测断面基本信息

Table 1 Basic information of the monitoring sections

水系	编号	监测断面	水系	编号	监测断面
干流	S1	攀枝花龙洞	沱江	S10	泸州沱江二桥
	S2	川-渝省界重庆朱沱	嘉陵江	S11	陕-川省界广元清风峡
	S3	三峡水库出口宜昌南津关	湘江	S12	长沙新港
	S4	岳阳城陵矶	赣江	S13	南昌滁槎
	S5	鄂-赣省界九江河西水厂	汉江	S14	武汉宗关
	S6	安庆皖河口	夹江	S15	南阳陶岔
	S7	皖-苏省界南京林山		S16	扬州三江营
岷江	S8	乐山岷江大桥	-	-	-
	S9	宜宾凉姜沟	-	-	-

1.2 研究方法

1.2.1 水污染指数法

水污染指数法是以《地表水环境质量标准》（GB3838—2002）中推荐的单因子评价法为基础，选取最严重的指标作为水质类别的判断依据。根据水质类别与水污染指数（WPI）对应表（表 2），利用内插法计算监测断面每个评价指标的 WPI 值并进

行比选，在各监测断面分别取各指标对应的 WPI 最大值作为该断面的 WPI 值^[28-29]。其具体计算过程如下所示：

当水质为 I—V 类水质标准时，WPI 计算式见式（1）；若 DO ≥ 7.5 mg/L，其 WPI 取 20；若 2 ≤ DO < 7.5 mg/L，WPI 计算式见式（2）；当水质超过 V 类水质标准时，WPI 计算式见式（3）。

$$WPI(i) = WPI_t(i) + \frac{WPI_h(i) - WPI_t(i)}{C_h(i) - C_t(i)} \times [C(i) - C_t(i)],$$

$$C_t(i) < C(i) \leq C_h(i), \quad (1)$$

$$WPI(i) = WPI_t(i) + \frac{WPI_h(i) - WPI_t(i)}{C_t(i) - C_h(i)} \times [C_t(i) - C(i)], \quad (2)$$

$$WPI(i) = 100 + \frac{C(i) - C_5(i)}{C_5(i)} \times 40, \quad (3)$$

式中： $C(i)$ 、 $C_t(i)$ 、 $C_h(i)$ 、 $C_5(i)$ 分别为第*i*个水质监测浓度值、水质监测浓度值所在类别标准的下限浓度值、水质监测浓度值所在类别标准的上限浓度值和第*i*个水质监测浓度值在地表水水质标准中V类标准浓度限值； $WPI(i)$ 、 $WPI_t(i)$ 、 $WPI_h(i)$ 分别为各水质监测浓度值对应的水污染指数值；若地表水水质标准中2个水质等级标准值相同，则按低分数值区间插值计算。pH的WPI值一般取20，此外，若pH<6， $WPI=100+6.67 \times (6-[pH])$ ；若pH>9， $WPI=100+8 \times ([pH]-9)$ ；若DO<2 mg/L， $WPI=100+40 \times (2-[DO])/2$ 。

1.2.2 水质综合指数法

水质综合指数^[30]（WQI）的计算式为：

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i w_i) / \sum_{i=1}^n (w_i)}, \quad (4)$$

式中： n 为监测断面水质指标总数， C_i 为监测断面各水质指标的归一化数值， w_i 为各水质指标的权重。其中，水质指标的权重值依据监测断面不同水质指标对水质影响的程度确定，影响程度较小的水质指标权重为1，影响程度最大的指标权重为4。水质综合指数法根据WQI值将水质状况分为5个等级，分别为优（80~100）、好（60~80）、良（40~60）、中（20~40）、差（0~20），具体如表2所示。

表2 不同水质评价方法评价结果与水质类别对应

Table 2 Corresponding table of evaluation results of different water quality evaluation methods and water quality categories

评价方法	指标	评价结果类别					
		I	II	III	IV	V	劣V
水污染指数法	WPI	20	20~40	40~60	60~80	80~100	>100
水质综合指数法	WQI	90~100	70~90	50~70	25~50	0~25	-
综合水质标识指数法	I_{wq}	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	>6

1.2.4 聚类分析和判别分析

聚类分析^[28,33]是根据研究对象的特性，进行定量分析的一种多元统计方法。在本研究中聚类分析主要是在水质指标间定义距离，或在水质指标间定义相似系数，距离或相似系数代表水质指标间的相似程度，并按照相似程度的大小进行聚集，进而形成关系图谱。本研究利用SPSS21.0软件进行长江流域水质评价结果的时间和空间尺度的聚类分析，聚类距离测量方式为平方欧氏距离，水质评价中常按照监测时间和监测断面的地理位置进行聚类，分析长江流域水质的时空变化特征。判别分析^[34]主要是

1.2.3 综合水质标识指数法

综合水质标识指数^[31-32]能完整标识水质类别、水质情况以及是否达到水环境功能区目标值等信息。该方法主要包括单因子水质标识指数的计算，综合水质标识指数计算以及水质等级的确定3个步骤。通常标识指数由整数位和3位或4位小数组成，其结构为：

$$I_{wq} = X_1.X_2X_3X_4, \quad (5)$$

式中： $X_1.X_2$ 为综合水质指数，即单项水质指数的平均值； X_3 和 X_4 为标识码，由 $X_1.X_2$ 判断得出。其中， X_1 为河流总体的综合水质类别； X_2 为综合水质在 X_1 类水质变化区间内所处位置，根据四舍五入的规则确定，且可实现在同类水中进行水质优劣比较； X_3 为参与综合水质评价的水质指标中，劣于水环境功能区目标的单项指标个数； X_4 为综合水质类别与水体功能区类别的比较结果，视综合水质的污染程度，1位或2位有效数字，当综合水质优于或者等于水环境功能区目标时其为0。

综合水质标识指数中的综合水质指数部分 $X_1.X_2$ ，既反映了综合水质类别，又反映了同一水质类别中综合水质的连续性和综合水质污染程度， $X_1.X_2$ 数值越大，综合水质越差。 $X_1.X_2$ 具体计算式为：

$$X_1.X_2 = \frac{1}{m} \sum (P_1 + P_2 + \cdots P_m), \quad (6)$$

式中： m 为参加综合水质评价的水质单项指标的数目； P_1 、 P_2 、 P_m 分别为第1、2、 m 个水质因子的单因子水质指数，为对应单因子水质标识指数中的整数位和小数点后第1位（单因子水质标识指数中的 $X_1.X_2$ ）。其综合水质标识指数与水质类别对应情况如表2所示。

根据聚类分析结果进而识别具有显著性的水体污染物指标，其是按照一定的判别原则建立判别函数，进而通过水体污染物数据系列确定判别系数，并计算判别指标。

2 结果与分析

2.1 水质指标统计结果

长江流域主要监测断面2008—2018年不同时期水质指标统计情况如图2所示，可知在汛期和非汛期各监测断面的pH值均处于6~9之间。对于DO，在汛期时南京林山（S7）、乐山岷江大桥（S8）、泸州沱

江二桥 (S10)、长沙新港 (S12)、南昌滁槎 (S13)、武汉宗关 (S14)、南阳陶岔 (S15) 和扬州三江营 (S16) 等监测断面DO质量浓度的最小值分别为4.76、2.86、4.29、3.98、2.87、4.26、4.87、3.69 mg/L, 达到了IV类水质标准及以上; 在非汛期时乐山岷江大桥、长沙新港和南昌滁槎等断面DO质量浓度的最小值分别为3.16、4.86、3.81 mg/L, 达到了IV类水质标准。对于COD_{Mn}, 在汛期时攀枝花龙洞 (S1)、乐山岷江大桥、宜宾凉姜沟 (S9)、泸州沱江二桥、南昌滁槎和扬州三江营等断面COD_{Mn}质量浓度的最大值分别为6.60、7.10、7.00、10.00、6.20、6.60 mg/L, 达到了IV类水质标准; 在非汛期时南昌滁槎断面COD_{Mn}质量浓度的最大值为6.45 mg/L, 达到了IV类

水质标准。对于NH₃-N, 在汛期时长沙新港和南昌滁槎断面NH₃-N质量浓度的最大值分别为1.15 mg/L和2.23 mg/L, 达到了IV类水质标准和劣V类水质标准; 在非汛期时南京林山、乐山岷江大桥、长沙新港、南昌滁槎和扬州三江营等断面NH₃-N质量浓度的最大值分别为1.15、1.88、1.28、4.48、1.33 mg/L, 达到了IV类水质标准及以上。整体来说, 长江流域主要监测断面在非汛期时DO和NH₃-N的平均质量浓度略大于汛期, 汛期时COD_{Mn}的平均质量浓度略大于非汛期; 乐山岷江大桥 (岷江)、长沙新港 (湘江) 和南昌滁槎 (赣江) 等断面的水质状况次于长江流域干流及其他支流监测断面的水质状况。

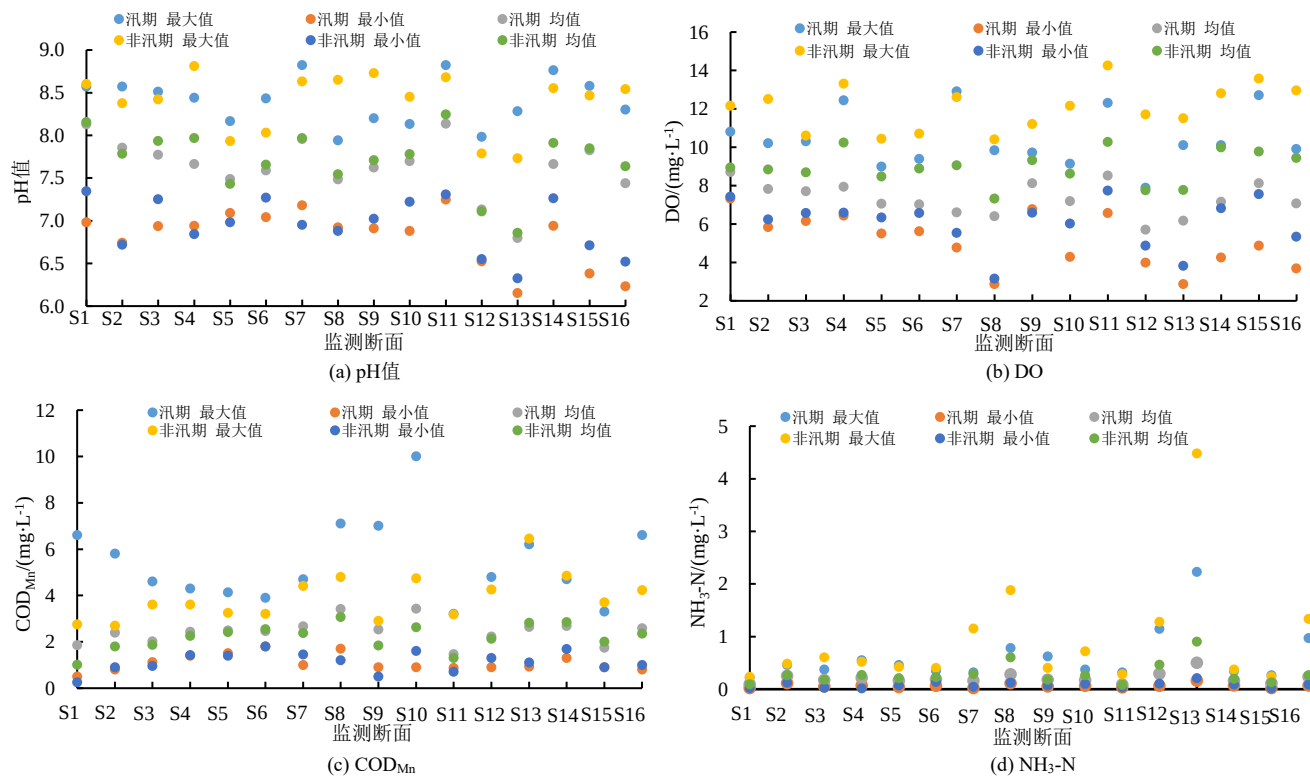


图2 长江流域主要监测断面不同时期水质指标统计情况

Fig.2 Statistics of water quality indicators in different periods at the main monitoring sections in the Yangtze River Basin

2.2 不同水质评价方法下水质评价结果对比分析

利用水污染指数法 (WPI)、水质综合指数法 (WQI) 和综合水质标识指数法 (I_{wq}) 对长江流域所选取的监测断面水质状况进行评价, 其结果对比如图3所示。可知, 长江流域各监测断面在汛期和非汛期时 WPI 值、 WQI 值和 I_{wq} 值处于水质标准III类及以下的监测次数占比均相对较高, 汛期时 WPI 值、 WQI 值和 I_{wq} 值处于水质标准III类及以下的监测次数占比分别为77.27%、90.91%和100.00%, 在非汛期时处于水质标准III类及以下的监测次数占比分别为68.18%、80.30%和100.00%。攀枝花龙洞 (S1)、南京林山 (S7)、乐山岷江大桥 (S8)、宜宾凉姜沟 (S9)、泸州沱江二桥 (S10)、长沙新港 (S12)、南

昌滁槎 (S13)、武汉宗关 (S14)、南阳陶岔 (S15) 和扬州三江营 (S16) 等断面的 WPI 值在汛期时处于水质标准IV类及以上的占比分别为1.52%、4.55%、19.70%、3.03%、7.58%、21.21%、22.73%、1.52%、1.52%和3.03%, 其中南昌滁槎的 WPI 值在汛期时处于劣V类水质标准占比为1.52%; 南京林山、乐山岷江大桥、长沙新港、南昌滁槎和扬州三江营等断面的 WPI 值在非汛期时处于水质标准IV类及以上的占比分别为1.52%、22.73%、6.06%、31.82%和1.52%, 其中南昌滁槎的 WPI 值在非汛期时处于劣V类水质标准占比为7.58%。乐山岷江大桥、长沙新港、南昌滁槎和扬州三江营等断面的 WQI 值在汛期时处于水质标准IV类及以上的占比分别为1.52%、1.52%、

9.09%、1.52%，乐山岷江大桥、长沙新港和南昌滁槎等断面的 WQI 值在非汛期时处于水质标准IV类及以上的占比分别为19.70%、1.52%和13.64%。长江流域各监测断面的 I_{wq} 值在汛期和非汛期均处于水质

标准III类及以下。整体来说，综合水质标识指数法水质评价结果表明各监测断面水质状况较好，水质综合指数法次之，水污染指数法相对较差；且汛期时水质评价结果相对于非汛期的评价结果相对较差。

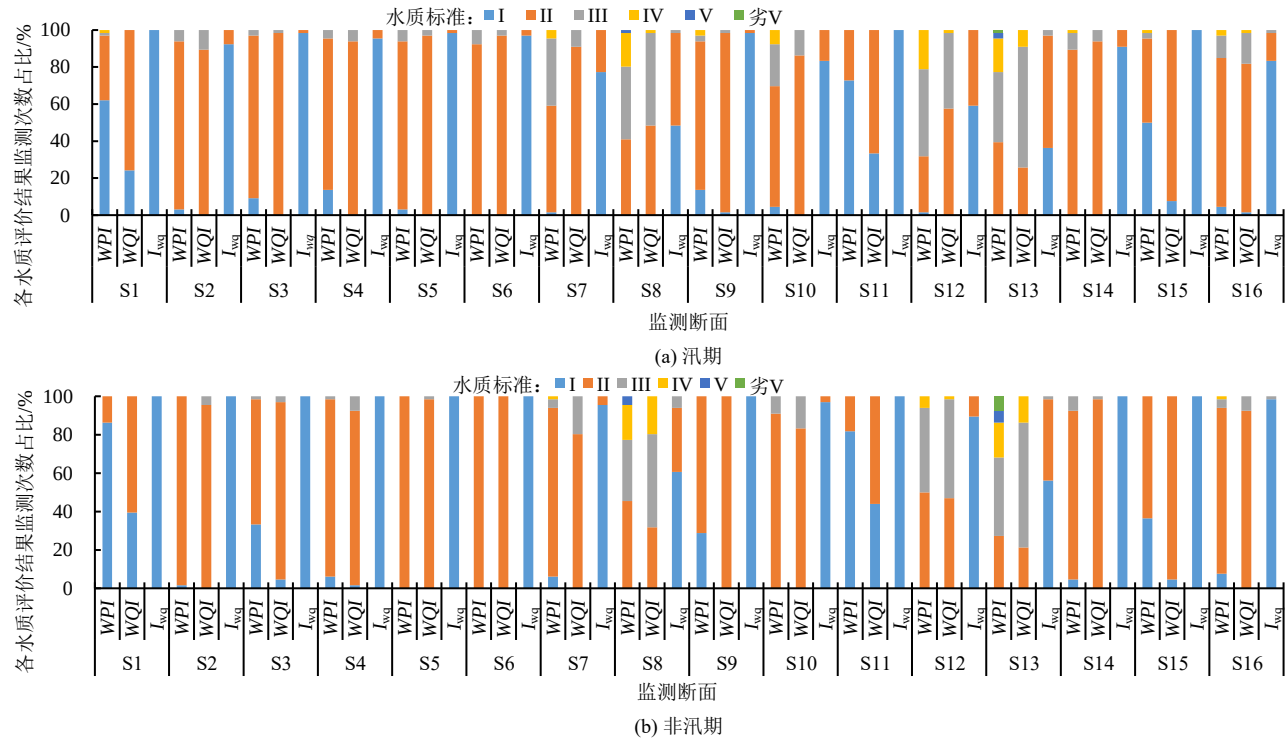


图3 长江流域主要监测断面不同时期水质评价结果对比

Fig.3 Comparison of water quality evaluation results in different periods at the main monitoring sections in the Yangtze River Basin

2.3 水质评价结果时间差异性分析

为分析各监测断面在不同水质评价方法下的评价结果的变化趋势，利用M-K趋势检验法对其评价结果的变化趋势进行检测，具体如表3所示。南京林山（S7）、乐山岷江大桥（S8）、南昌滁槎（S13）和南阳陶岔（S15）等断面在汛期时 WPI 值呈显著的减小趋势，而长沙新港（S12）在汛期时 WPI 值呈显著的增加趋势；重庆朱沱（S2）、岳阳城陵矶（S4）、南京林山、乐山岷江大桥、长沙新港和南昌滁槎等断面在非汛期时 WPI 值呈显著的减小趋势。乐山岷江大桥、长沙新港和南阳陶岔断面在汛期时 WQI 值呈显著的增加趋势，而安庆皖河口（S6）在汛期时 WQI 值呈显著的减小趋势；重庆朱沱、岳阳城陵矶、九江河西水厂（S5）、安庆皖河口、乐山岷江大桥、泸州沱江二桥（S10）、长沙新港、南昌滁槎和南阳

陶岔等断面在非汛期时 WQI 值呈显著的增加趋势，而广元清风峡在非汛期时 WQI 值呈显著的减小趋势。攀枝花龙洞（S1）、宜昌南津关（S3）、九江河西水厂、乐山岷江大桥、武汉宗关（S14）和南阳陶岔等断面在汛期时 I_{wq} 值呈显著的减小趋势，而安庆皖河口在汛期时 I_{wq} 值呈显著的增加趋势；宜昌南津关、乐山岷江大桥、长沙新港和南昌滁槎等断面在非汛期时 I_{wq} 值呈显著的减小趋势。由于 WPI 值和 I_{wq} 值越大说明水质评价结果越差，而 WQI 值越大说明水质评价结果越好，因此长江流域大部分监测断面的水质评价结果趋于变好，而安庆皖河口和广元清风峡断面分别在汛期和非汛期的评价结果趋于变差。此外，在3种水质评价方法下乐山岷江大桥、长沙新港、南昌滁槎和南阳陶岔等断面水质评价结果的变化趋势最为显著。

表3 各监测断面在不同水质评价方法下的评价结果的变化趋势

Table 3 Trend of the evaluation results under different water quality evaluation methods at each monitoring section

评价方法	时间	监测断面															
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
WPI	汛期	○	○	○	○	○	○	▽	▽	○	○	○	△	▽	○	▽	○
	非汛期	○	▽	○	▽	○	○	▽	▽	○	○	△	▽	▽	○	○	○
WQI	汛期	○	○	○	○	○	▽	○	△	○	○	○	△	○	○	△	○
	非汛期	○	△	○	△	△	△	○	△	○	△	▽	△	△	○	△	○
I_{wq}	汛期	▽	○	▽	○	▽	△	○	▽	○	○	○	○	○	▽	▽	○
	非汛期	○	○	▽	○	○	○	○	▽	○	○	○	▽	▽	○	○	○

注 ○表示增加或减小趋势不显著，▽表示呈显著减小趋势，△表示呈显著增加趋势。

对各监测断面不同时期水质评价结果的差异性分析(图4)可知,对于 WPI 值,在汛期和非汛期时乐山岷江大桥和南昌滁槎断面 WPI 值的变化幅度相对较大,分别为73.20和72.20、81.74和126.17;其变异系数分别为35.10%和35.55%、38.46%和44.14%,均呈中等变异性。对于 WQI 值,在汛期和非汛期时乐山岷江大桥、长沙新港和南昌滁槎等断面 WQI 值的变化幅度相对较大,分别为38和44、40和34、45和39;其变异系数分别为10.27%和18.24%、11.27%和11.41%、14.63%和16.16%,均呈中等变异性。相较 WPI 和 WQI ,乐山岷江大桥、长沙新港和南昌滁槎断面 I_{wq} 值在汛期和非汛期的变化幅度相对较大,分别为1.69和1.82、1.69和1.51、1.86和2.01;其变异系数分别为18.43%和25.08%、13.96%和17.01%、18.86%和21.13%,均呈中等变异性;在汛期时扬州三江营断面 I_{wq} 值的变化幅度相对较大,为2.02,其变异系数为20.18%,呈中等变异性。总体来说,长江流域各监测断面不同水质评价结果均有不同程度的差异性,而乐山岷江大桥、长沙新港和南昌滁槎等断面水质评价结果的差异性较大。

2.4 水质评价结果空间差异性分析

为分析各监测断面在不同水质评价方法下评价结果的空间差异性,本文利用聚类分析将汛期和非汛期水质评价结果进行聚类,如图5所示。在汛期和非汛期 WPI 值和 WQI 值的空间聚类具有一致性,在空间尺度上将监测断面均分为2组且每组包含的监测断面相同,对于 WPI 值,A组的监测断面主要包括攀枝花龙洞(S1)、重庆朱沱(S2)、宜昌南津关(S3)、岳阳城陵矶(S4)、九江河西水厂(S5)、安庆皖河口(S6)、南京林山(S7)、乐山岷江大桥(S8)、宜宾凉姜沟(S9)、泸州沱江二桥(S10)、广元清风峡(S11)、长沙新港(S12)、武汉宗关(S14)、南阳陶岔(S15)和扬州三江营(S16),B组的监测断面主要包括南昌滁槎(S13);对于 WQI 值,A组的监测断面主要包括S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7、S9、S10、S11、S14、S15和S16,B组的监测断面主要包括S8、S12和S13。 I_{wq} 值在汛期时的空间聚类情况与 WQI 值的分组是一致的,在非汛期时 I_{wq} 值A组的监测断面主要包括S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7、S9、S10、S11、S12、S14、S15和S16,B组的监测断面主要包括S8和S13。综上所述,根据水质评价结果的空间聚类结果可知其与长江流域水质统计特征分析以及水质评价结果基本上是一致的,即乐山岷江大桥(岷江)、长沙新港(湘江)和南昌滁槎(赣江)等断面的水质状况相对较差。

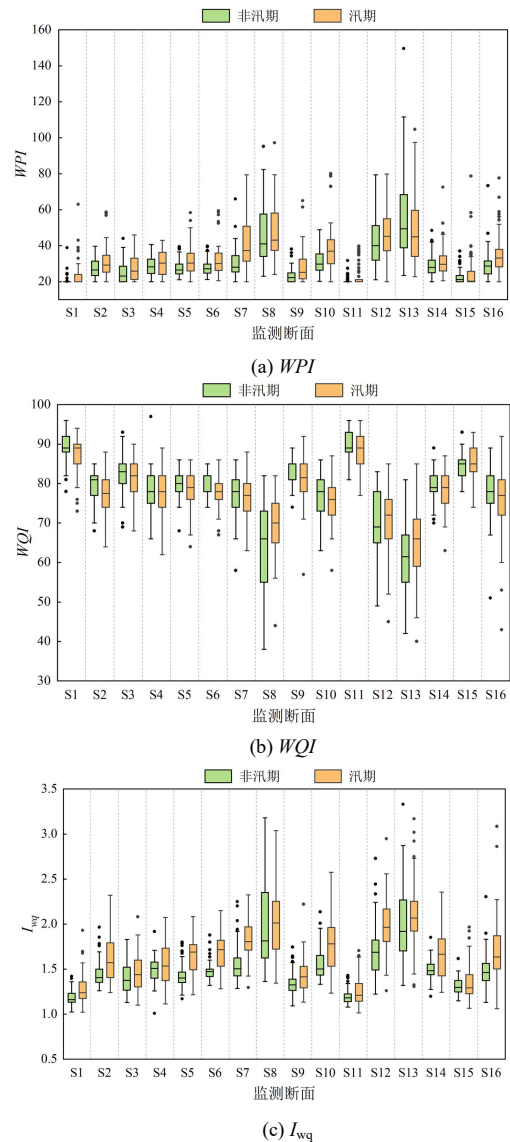


图4 长江流域主要监测断面不同时期水质评价结果的差异性

Fig.4 Differences of water quality evaluation results in different periods at the main monitoring sections in the Yangtze River Basin

对不同时期3种水质评价结果空间聚类进行判别分析如表4和表5所示。由表4可知,判别分析的判别函数基本可以解释所有水质评价结果在不同时期的信息, WPI 值在汛期和非汛期时Wilks的Lambda值分别为0.007和0,卡方系数分别为54.938和91.086; WQI 值在汛期和非汛期时Wilks的Lambda值分别为0和0,卡方系数分别为73.313和71.629; I_{wq} 值在汛期和非汛期时Wilks的Lambda值分别为0和0,卡方系数分别为75.760和69.924;在不同时期水体污染物判别函数的显著性检验值均小于0.005,说明在不同时期下水体污染物的空间聚类结果有效。另外 WPI 值在汛期和非汛期空间聚类分析结果的判别分析交叉验证正确率均达到了93.80%, WQI 值和 I_{wq} 值在汛期和非汛期空间聚类分析结果的判别分析交叉验证正确率均达到了100%(表5),可知其判别分析交叉验证正确率均超过了

90%，达到了较高的判别正确率，说明长江流域主要监测断面在 3 种水质综合评价方法下的空间聚类结果相对较好；同时对于 WQI 值，在汛期和非汛期其空间聚类分析结果与水质指标统计结果及时间差

异性结果具有较大的一致性；因此，总体来说在时间和空间上水质综合指数法的评价结果更符合长江流域水质现状情况。

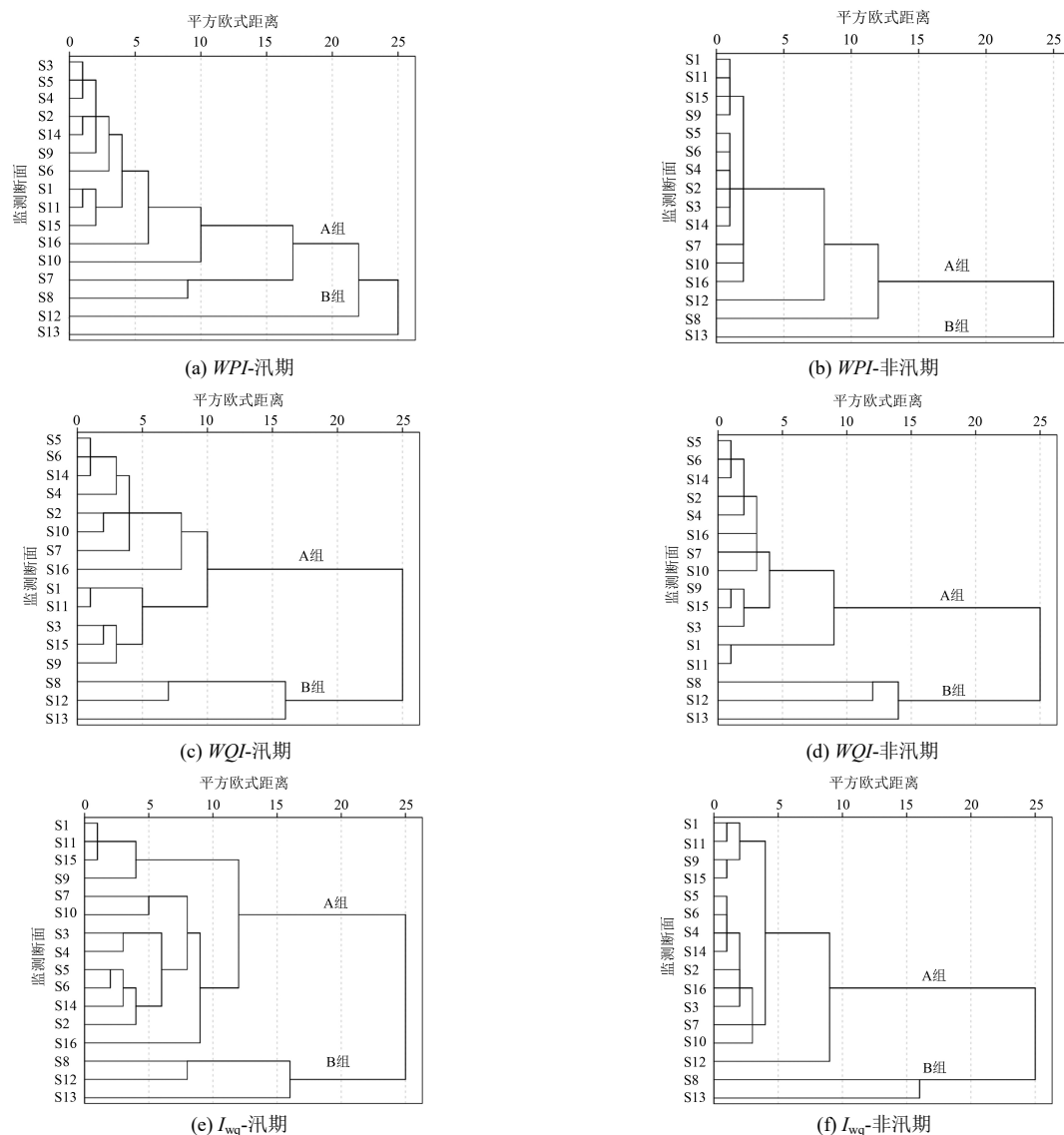


图 5 各监测断面不同时期水质评价结果的空间尺度聚类情况

Fig.5 Spatial-scale cluster of water quality evaluation results in different periods at each monitoring section

表 4 不同时期水质评价结果空间尺度上判别分析统计检验

Table 4 Statistical test of discriminant analysis on the spatial scale of water quality evaluation results in different periods

评价方法	时期	特征值	相关性	Wilks 的 Lambda	卡方	df	Sig.
WPI	汛期	146.577	0.997	0.007	54.938	6	0
	非汛期	9 031.506	0.999	0	91.086	8	0
WQI	汛期	3 447.988	0.999	0	73.313	10	0
	非汛期	2 859.66	0.999	0	71.629	10	0
I_{wq}	汛期	2 905.626	0.999	0	75.760	9	0
	非汛期	2 365.951	0.999	0	69.924	10	0

表 5 不同时期水体污染物指标空间尺度上判别分析交叉验证正确率

Table 5 Accuracy of cross-validation of discriminant analysis on spatial scales of water pollutant indicators in different periods

分组	WPI		WQI		I_{wq}	
	汛期	非汛期	汛期	非汛期	汛期	非汛期
A 组	100%	100%	100%	100%	100%	100%
B 组	0	0	0	0	0	0
合计	93.8%	93.8%	100%	100%	100%	100%

3 讨论

流域水质评价作为流域水环境保护和治理的基础工作,对流域水资源的合理开发利用具有重要意义。本文基于水质综合指数法、水污染指数法和综合水质标识指数法对长江流域干流及主要支流的水质状况进行评价。结果表明,长江流域主要监测断面水质评价结果的良好程度为综合水质标识指数法>水质综合指数法>水污染指数法,这主要是由于水污染指数法是将监测断面各水质指标对应的WPI最大值作为该断面的WPI值,即将水体污染物污染最严重的状态作为其水质评价的结果;水质综合指数法是将各水质赋予一定的权重,权重是由监测断面不同水质指标对水质影响的程度确定;综合水质标识指数法主要包括单因子水质标识指数的计算,其标识指数主要是各水质指标的单因子水质指数的平均值所得;因此长江流域主要监测断面在综合水质标识指数法下评价结果的水质状况较好,水质综合指数法次之,水污染指数法的评价结果相对较差;同时结合本研究长江流域水质统计特征分析以及水质评价结果的时间和空间差异性分析可知水质综合指数法的评价结果更能体现水质现状情况。长江流域主要监测断面DO和NH₃-N质量浓度的均值非汛期略大于汛期,这主要是由于汛期时河道径流量较大并携带了耗氧污染物进入河流,加剧了河流水体中DO的消耗。相关研究表明长江流域干流宜昌城区水体的COD_{Mn}质量浓度在丰水期内随径流量的增大而增大^[35],这与本研究汛期时COD_{Mn}质量浓度均值略大于非汛期时COD_{Mn}质量浓度均值的结果是一致的。另外,相关研究表明长江下游江段2013—2018年氨氮质量浓度大幅下降^[1],长江干流COD_{Mn}质量浓度和NH₃-N质量浓度在2010—2019年呈现出降低趋势^[36],2016—2020年岷江干流大部分断面水质类别呈好转趋势^[37],湘江流域永州段所有监测断面COD_{Mn}质量浓度均呈显著下降趋势^[38],2015—2020年岷、沱江流域成都段地表水环境质量明显改善且其大部分断面主要污染物浓度下降趋势显著^[39],长江干流地表水水质总体相对较好且上游水质好于中下游^[40],这与本研究长江流域大部分监测断面的水质评价结果趋于变好的结果是一致的;长江流域上中下游COD_{Mn}质量浓度在2017—2020年分别下降18.5%、16.0%和14.0%,同时岷沱江和中游两湖地区污染物通量对入长江的贡献较大,这与乐山岷江大桥(岷江)、入洞庭湖断面长沙新港(湘江)和入鄱阳湖断面南昌滁槎(赣江)的水质状况相对较差是一致的^[41]。

4 结论

1) 在汛期和非汛期时乐山岷江大桥监测断面DO质量浓度最小,分别为2.86 mg/L和3.16 mg/L,南昌滁槎断面COD_{Mn}和NH₃-N质量浓度最大,分别10.00 mg/L和6.45 mg/L、2.23 mg/L和4.48 mg/L;各监测断面DO和NH₃-N质量浓度的均值非汛期略大于汛期,COD_{Mn}质量浓度的均值汛期略大于非汛期。

2) 在汛期和非汛期时南昌滁槎断面在水污染指数法水质评价下处于水质标准IV类及以上监测次数的占比均最大,分别为22.73%和31.82%,南昌滁槎断面(汛期)和乐山岷江大桥断面(非汛期)在水质综合指数法水质评价下处于水质标准IV类及以上监测次数的占比最大,分别为9.09%和19.70%;水质评价结果的良好程度为综合水质标识指数法>水质综合指数法>水污染指数法,且水质综合指数法的评价结果更能体现水质现状情况。

3) 乐山岷江大桥、长沙新港和南昌滁槎等断面的水质评价结果的变化趋势最为显著且趋于好转,同时其在时间上具有较大的差异性;水质评价结果在空间上具有一定的差异性,乐山岷江大桥、长沙新港和南昌滁槎等断面的水质评价结果相对较差,岷江、湘江和赣江相对于长江其他河流其水质状况略差。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 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 Baofeng, ZHUO Haihua, ZHOU Zheng, et al. Analysis on alteration of water quality and pollutant fluxes in the Yangtze mainstream during recently 18 years[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1150-1162.
- [2] 宁阳明,尹发能,李香波.几种水质评价方法在长江干流中的应用[J].西南大学学报(自然科学版),2020,42(12):126-133.
NING Yangming, YIN Faneng, LI Xiangbo. Application of several evaluation methods for river water quality in the Yangtze River mainstream[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2020, 42(12): 126-133.
- [3] 刘荣荣,顾妮娜,李国栋,等.基于单因子标准指数法的浏河水质评价[J].江汉大学学报(自然科学版),2019,47(2):139-145.
LIU Rongrong, GU Nina, LI Guodong, et al. Water quality assessment of Liuhe River based on single-factor standard index method[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2019, 47(2): 139-145.
- [4] LI R R, ZOU Z H, AN Y. Water quality assessment in Qu River based on fuzzy water pollution index method[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 50: 87-92.
- [5] 李国华,李畅游,史小红,等.基于主成分分析及水质标识指数法的黄河托克托段水质评价[J].水土保持通报,2018,38(6):310-314,321.
LI Guohua, LI Changyou, SHI Xiaohong, et al. Evaluation of water quality of tokto section in Yellow River based on principal component analysis and water quality identification index[J]. Bulletin of Soil and

- Water Conservation, 2018, 38(6): 310-314, 321.
- [6] 唐萍, 王欢. 基于水质指数法的城市地表水环境质量排名研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(16): 78-81, 86.
TANG Ping, WANG Huan. Study on the ranking of urban surface water environment quality based on water quality index method[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(16): 78-81, 86.
- [7] 董春燕, 周运涛, 李君轶, 等. 基于模糊综合评价的长江中游水质分析[J]. 淡水渔业, 2021, 51(2): 55-62.
DONG Chunyan, ZHOU Yuntao, LI Junyi, et al. Water quality analysis of the Middle Yangtze River based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Freshwater Fisheries, 2021, 51(2): 55-62.
- [8] 王逸可, 方国华, 张钰, 等. 基于改进模糊综合评价的河流型水源风险评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(4): 670-681.
WANG Yike, FANG Guohua, ZHANG Yu, et al. Risk assessment of river-type water source areas based on an improved fuzzy comprehensive evaluation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(4): 670-681.
- [9] 白云, 李勇, 张万娟, 等. 基于粗糙集-贝叶斯网络的流域水质评价方法[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(5): 1-10.
BAI Yun, LI Yong, ZHANG Wanjuan, et al. Watershed water quality assessment method based on rough set and Bayesian network[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(5): 1-10.
- [10] 陈慧文, 陈锦辉. 基于灰色聚类分析的上海市长江口水质状况评价[J]. 安徽农学通报, 2022, 28(10): 130-135.
CHEN Huiwen, CHEN Jinhui. Evaluation of seawater quality in the Yangtze River Estuary based on grey clustering method[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2022, 28(10): 130-135.
- [11] 宁阳明, 尹发能. 水污染指数法和模糊综合评价法在水质评价中的应用[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 57-63.
NING Yangming, YIN Faneng. Application of water pollution index method and fuzzy comprehensive evaluation method in water quality evaluation[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2020, 48(6): 57-63.
- [12] 张怡雅, 袁飞, 张利敏, 等. 南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 14-19.
ZHANG Yiya, YUAN Fei, ZHANG Limin, et al. Variation characteristics of water quality in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 14-19.
- [13] 许燕颖, 邹杰平, 刘友存, 等. 2014—2017 年赣江上游稀土矿区典型流域水质污染变化及成因[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 300-308.
XU Yanying, ZOU Jieping, LIU Youcun, et al. Pollution change and cause of water quality in typical watersheds of rare earth mining area in upper Ganjiang River during 2014—2017[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 300-308.
- [14] 税永红, 卢永洪, 罗靖, 等. 冬春交替期沱江流域水质评价及差异分析[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(4): 56-62.
SHUI Yonghong, LU Yonghong, LUO Jing, et al. Assessment of water quality in Tuojiang River Basin in winter and spring alternate and analysis on differences[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(4): 56-62.
- [15] 彭小玉, 周理程, 吴文晖, 等. 水污染指数法在湘江长沙段支流水质评价中的应用分析[J]. 四川环境, 2021, 40(2): 172-177.
PENG Xiaoyu, ZHOU Licheng, WU Wenhui, et al. Application analysis of water pollution index method in water quality evaluation for the tributary of Xiangjiang River in Changsha city[J]. Sichuan Environment, 2021, 40(2): 172-177.
- [16] 朱挺兵, 杜红春, 胡晓娜, 等. 基于水质综合指数的澜沧江西藏段水质评价及其影响因素[J]. 淡水渔业, 2022, 52(5): 104-111.
ZHU Tingbing, DU Hongchun, HU Xiaona, et al. Evaluation and water quality influencing factors of the Tibet reach of the Lancang River based on the water quality index[J]. Freshwater Fisheries, 2022, 52(5): 104-111.
- [17] 朱叶华, 曾涛, 杨军, 等. 综合水质指数法对长江沙市江段的水质评价[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 122-124.
ZHU Yehua, ZENG Tao, YANG Jun, et al. Water quality assessment in Shashi of the Yangtze River by comprehensive water quality index[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5): 122-124.
- [18] 马京久, 喻婷, 陈燕飞, 等. 基于综合水质标识指数法的汉江中下游水质评价[J]. 人民珠江, 2020, 41(9): 63-69.
MA Jingjiu, YU Ting, CHEN Yanfei, et al. Water quality evaluation of the middle and lower reaches of Hanjiang River based on comprehensive water quality identification index[J]. Pearl River, 2020, 41(9): 63-69.
- [19] 方珂, 林敏敏, 邓飞, 等. 嘉陵江白庙子段地表水质季节变化特征及评价[J]. 广州化工, 2020, 48(18): 93-95.
FANG Ke, LIN Minmin, DENG Fei, et al. Seasonal variation characteristics and evaluation of surface water quality in baimiaozi section, Jialing River[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(18): 93-95.
- [20] 张占梅, 李媛莉, 石瑞琦, 等. 重庆市主城区八条河流水质综合评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 109-114.
ZHANG Zhanmei, LI Yuanli, SHI Ruiqi, et al. Comprehensive assessment of water quality of eight rivers in Chongqing main urban area[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(1): 109-114.
- [21] 代贞伟, 王磊, 贺小黑, 等. 汉江流域硫铁矿区厚子河支流水质评价研究[J]. 中国地质调查, 2019, 6(5): 83-88.
DAI Zhenwei, WANG Lei, HE Xiaohei, et al. Research on water quality evaluation of the Houzi River in the pyrite mining area of the Hanjiang River Basin[J]. Geological Survey of China, 2019, 6(5): 83-88.
- [22] 胡裕滔, 周才杨, 虞铭卫. 长江徐六泾近 6 年水质变化趋势及其响应机制分析[J]. 人民长江, 2019, 50(11): 49-55, 63.
HU Yutao, ZHOU Caiyang, YU Mingwei. Variation trend of water quality at Xuliujing Station of Yangtze River Estuary in recent 6 years and its emergency response mechanism[J]. Yangtze River, 2019, 50(11): 49-55, 63.
- [23] 曾一川, 曾会国, 袁伟皓, 等. 长江口入海通道水质综合分析与模型预测[J]. 环境工程, 2022, 40(5): 95-102, 108.
ZENG Yichuan, ZENG Huiguo, YUAN Weihao, et al. Comprehensive analysis and model prediction of water quality in the sea-entry channels of Yangtze Estuary[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(5): 95-102, 108.
- [24] 王飞宇, 张彦, 王偲, 等. 基于 Copula 函数的汉江流域降水径流丰枯遭遇研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(8): 95-105.
WANG Feiyu, ZHANG Yan, WANG Cai, et al. Using copula model to analyze consecutive wetting-drying occurrence in rainfall-runoff in Hanjiang Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(8): 95-105.
- [25] 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 Xiaokang, YIN Wei. 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.
- [26] 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): 1 441-1 451.
ZHAO Yanhui, LI Tao, HUANG Bo, 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): 1 441-1 451.
- [27] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [28] 张彦, 梁志杰, 邹磊, 等. 黄河干流及主要支流水质时空差异性及其变

- 化特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 125-133.
- ZHANG Yan, LIANG Zhijie, ZOU Lei, et al. Spatiotemporal variation in water quality in the Yellow River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 125-133.
- [29] ZHANG Y, DOU M, LI P, et al. Spatiotemporal variation characteristics and source identification of water pollutants in Shayinghe River Basin[J]. River Research and Applications, 2021, 37(8): 1 089-1 103.
- [30] 耿姣, 王洋, 胡术刚, 等. 基于 WQI 的平原河网地区河流水质评价与时空变化分析[J]. 环境工程, 2023, 41(6): 187-193, 209.
- GENG Jiao, WANG Yang, HU Shugang, et al. WQI-based water quality assessment and spatital-temporal change in plain river network areas[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(6): 187-193, 209.
- [31] ZHANG Y, ZOU L, LI P, et al. Differential characteristics and source contribution of water pollutants before and after the extreme rainfall event in the Huaihe River Basin[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 1 003 421.
- [32] 逯林方, 王辉辉, 胡亚伟, 等. 赵口引黄灌区二期工程区域地表水水质评价[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 117-124.
- LU Linfang, WANG Huihui, HU Yawei, et al. Surface water quality in second-phase Zhaokou Yellow River irrigation district project[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 117-124.
- [33] 张彦, 梁志杰, 李平, 等. 河南省 2009—2017 年水体污染物时空分布特征解析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 91-98, 144.
- ZHANG Yan, LIANG Zhijie, LI Ping, et al. Spatiotemporal variation of pollutants in water bodies from 2009 to 2017 in Henan Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(10): 91-98, 144.
- [34] 张彦, 邹磊, 李平, 等. 卫河流域河南段水体污染物时空差异性特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 132-143.
- ZHANG Yan, ZOU Lei, LI Ping, et al. Characteristics of spatio-temporal differences of water pollutants in the Henan section of the Wei River Basin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(1): 132-143.
- [35] 何子建, 刘瑞芬, 辛小康. 近十年长江干流宜昌城区段水质变化分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(12): 112-115.
- HE Zijian, LIU Ruifen, XIN Xiaokang. Analysis of water quality change in Yichang section of Yangtze River in recent ten years[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(12): 112-115.
- [36] 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 Xiaokang, YIN Wei. 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.
- [37] 吴瑶, 段慧, 范力. 岷江干流水质状况及变化趋势分析[J]. 中国测试, 2022, 48(10): 158-165.
- WU Yao, DUAN Hui, FAN Li. Analysis on water quality status and variation trend of Minjiang River mainstream[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(10): 158-165.
- [38] 武力, 刘慧莹, 向超, 等. 湘江流域永州段水质变化趋势及突变分析[J]. 湖南农业科学, 2022(2): 72-76, 80.
- WU Li, LIU Huiying, XIANG Chao, et al. Analysis of water quality change trend and mutation in Yongzhou section of Xiangjiang River Basin[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2022(2): 72-76, 80.
- [39] 胡贺, 翟世明, 秦汉, 等. 2015—2020 年岷、沱江流域成都段水环境质量评价及变化趋势分析[J]. 四川环境, 2022, 41(6): 163-171.
- HU He, ZHAI Shiming, QIN Han, et al. Evaluation and trend analysis of water environment quality of Minjiang and Tuojiang River Basins in Chengdu from 2015 to 2020[J]. Sichuan Environment, 2022, 41(6): 163-171.
- [40] 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): 1 119-1 128.
- CHEN Shanrong, HE Lihuan, LIN Lanyu, 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): 1 119-1 128.
- [41] 郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 等. 2017—2020 年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4 279-4 291.
- GUO Chaochen, LEI Kun, LI Xiaoguang, et al. Spatiotemporal variation characteristics of main pollutant fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020[J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 4 279-4 291.

Comparative Analysis of Spatiotemporal Variability in Water Quality of the Yangtze River Based on Different Water Quality Evaluation Methods

WANG Feiyu¹, LI Xiaoyang¹, JIA Junwei⁴, ZUO Lingfeng¹, YU Xuejing⁵, ZHANG Yan^{2,3*}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 3. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 4. Huadong Engineering (Zhengzhou) Corporation Limited, PowerChina, Zhengzhou 450000, China; 5. Nantong Branch Bureau, Jiangsu Provincial Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nantong, 226006, China)

Abstract: 【Objective】A prerequisite for managing a catchment is to comprehensively understand the changes in its water quality. Using different methods, this paper comparatively analyzes the spatiotemporal variation in water quality of the Yangtze River, including its main streams and tributaries. 【Method】The study is based on water quality data collected from 2008 to 2018 from 16 monitoring sections within the basin. Various methods, including the comprehensive water quality index (WQI), water pollution index (WPI), and comprehensive water quality identification index (I_{wq}), were used to assess water quality. Additionally, statistical methods including the Mann-Kendall trend test, cluster analysis, and discriminant analysis were utilized to analyze the spatiotemporal variation in water quality. 【Result】In flooding and non-flooding seasons, the section proximal to the Leshan Minjiang Bridge had minimum dissolved oxygen (DO) concentration, which is 2.86 mg/L and 3.16 mg/L, respectively. Conversely, the Nanchang Chucha section had maximum concentration of chemical oxygen demand (COD_{Mn}) and ammonia

nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$), which was 10.00 mg/L and 6.45 mg/L, and 2.23 mg/L and 4.48 mg/L, respectively. In the non-flooding season, 31.82% of water in the Nanchang Chucha section achieved Class IV grade or higher (evaluated by *WPI*), whereas this figure reduced to 19.70% (evaluated by *WQI*) for the Leshan Minjiang Bridge section. The I_{wq} method yielded the highest water quality, followed by *WQI* and *WPI*. All three methods indicated that water quality had improved in the Leshan Minjiang Bridge, Changsha Xingang, and Nanchang Chucha sections. Water quality varied spatially, with poor quality observed in the Leshan Minjiang Bridge, Changsha Xinkang, and Nanchang Chucha sections, and slightly poor quality was found in the Minjiang, Xiangjiang, and Ganjiang sections. **【Conclusion】** The evaluation of water quality using different methods within the Yangtze River basin yielded varied results, with the *WQI* method working best.

Key words: Yangtze River Basin; water quality evaluation; spatio-temporal differences; cluster analysis

责任编辑：赵宇龙

(上接第 62 页)

Influence of Sediment Particle Size Distribution on Intermittent Infiltration of Water under Surge Irrigation

WEI Jiaxing, FEI Liangjun*, LIANG Shuang, JIE Feilong

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: **【Objective】** Water sourced from the Yellow River in China, which has been extensively used for irrigation in the northern irrigation districts of the country, is characterized by high sediment content. This paper aims to investigate the influence of sediment particle size distribution on water infiltration under surge irrigation.

【Method】 The infiltration tests encompassed four treatments with sediment content being 3%, 6%, 9%, and 12%, respectively. Each sediment treatment included four particle gradings labeled as A, B, C, and D, respectively. In each infiltration test, we meticulously measured both the infiltration rate and the variation in infiltration over time.

【Result】 The relationship between cumulative infiltration and time can be described by the Philip and Kostiakov models, regardless of sediment content and particle grading. As the number of irrigation cycles increased, the parameters K and α in the Kostiakov model, as well as the parameters S and A in the Philip model, all exhibited a declining trend. **【Conclusion】** In comparison to the infiltration of clean water, the infiltration depth of sediment-water was inversely related to the presence of physically cohesive particles. Conversely, when the infiltration depth was the same, soil water content was negatively correlated to the quantity of physically cohesive particles in the water.

Key words: surge irrigation; intermittent infiltration; laboratory test; Philip infiltration model; Kostiakov infiltration model

责任编辑：赵宇龙