

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.03.017

萍水河水质空间分布特征及水质评价对比研究

章艳红^{1,2},汪金坤^{1,2},陈俊华³,马文洁^{1,2},葛勤^{1,2},刘斌⁴

1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,南昌 330013;
2. 东华理工大学水资源与环境工程学院,南昌 330013;
3. 广西北投环保水务集团有限公司,南宁 530000;
4. 江西复正环境科技有限公司,南昌 3301031)

摘要:流域水质直接关系到人体健康和生态安全。以萍水河向阳湖至何雁桥段为研究对象,分析其水质空间特征,综合4种方法进行水质评价,进一步利用多元统计和级别差方法对比分析水质评价结果。结果表明:1)COD、NH₃-N、TP和TN的最高浓度位于赤山桥处;上游(向阳湖-桥头村)和下游(赤山桥-何雁桥)总体水质较好,部分采样点TN、Fe和Mn轻度超标,污染程度明显弱于中游(桥头村-赤山桥)。2)最差水质级别均为V类或劣V类水,污染程度属严重污染及以上;单因子评价法确定总氮(TN)为首要污染指标;主成分分析法确定2个主成分,可解释为营养盐污染指标和地质沉积环境指标。3)4种方法两两之间呈显著正相关,相关系数为0.937~0.994,但水质级别表现出明显的差异性;级差法结果表明,3种综合水质评价方法的水质级别顺序为:内梅罗污染指数法<综合污染指数法<主成分分析法。研究成果可为流域水质评价工作和研究提供参考,同时为流域水资源开发利用和水环境保护及综合治理提供科学依据。

关键词:萍水河;水体污染;空间分布;水质评价;主成分分析

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2024)03-0125-09

Spatial Distribution Characteristics of Water Quality and Comparative Study on Water Quality Evaluation in the Pingshui River

ZHANG Yanhong^{1,2}, WANG Jinkun^{1,2}, CHEN Junhua³,
MA Wenjie^{1,2}, GE Qin^{1,2}, LIU Bin⁴

1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
3. Guangxi Beitou Environmental Water Group Co., Ltd., Nanning 530000, China;
4. Jiangxi Fuzheng Environmental Technology Co., Ltd., Nanchang 330103, China)

Abstract: The water quality of the river basin is directly related to human health and ecological safety. Taking section from Xiangyanghu to Heyanqiao of the Pingshui River as the research object, its spatial characteristics of water quality were analyzed, four methods were used to evaluate water quality, and multivariate statistical method and level difference method were applied to comparatively analyze the results of four commonly used assessment methods. The results show that: 1) The highest concentrations

收稿日期:2023-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42107093,42062017);国家自然科学基金重点项目-核技术创新联合基金资助项目(U1967209);东华理工大学核资源与环境国家重点实验室开放基金项目(NRE1927)

作者简介:章艳红(1985-),女,博士,讲师,硕士生导师

of COD, NH₃-N, TP and TN are found near Chishanqiao; water qualities of upstream (Xiangyang Lake-Qiaotoucun village) and downstream (Chishanqiao bridge-Heyanqiao bridge) are relatively good. Contents of TN, Fe and Mn in some sampling points slightly exceed standards, pollution degree in the middle area (Qiaotoucun village-Chishanqiao bridge) is significantly weaker than other areas. 2) The worst water quality grade is class V or inferior class V, with pollution degree of serious pollution or more than serious pollution; single factor evaluation method determines TN as the main pollution index, principal component analysis identifies two principal components, which can be interpreted as nutrient pollution index and geological sedimentary environment index. 3) There is a significant positive correlation between four methods, and correlation coefficients vary from 0.937 to 0.994, but it shows an obvious difference in the water quality level. The results of level difference method show that water quality grades of three comprehensive water quality evaluation methods are listed in order as follows: Nemerow pollution index method < comprehensive pollution index method < principal component analysis method. The results can provide reference for the related work and research of water quality assessment in the basin, and provide scientific basis for the development and utilization of water resources, water environment protection and comprehensive treatment in the basin.

Key words: the Pingshui river; water body pollution; spatial distribution; water quality evaluation; principal component analysis

随着社会和经济的高速发展,国内外地表水体水环境污染问题日益严重,水质的好坏直接关系到人体健康和生态安全,受到社会公众的广泛关注^[1-7]。水质评价是合理开发利用和保护水资源的一项基本工作,国内外常用的水质评价方法主要有单因子评价法^[8-9]、综合污染指数法^[8-9]、内梅罗污染指数法^[9]、综合水质标识指数法^[5,7,9-10]、主成分分析法^[8-9,11-13]、模糊综合评价法^[14]、支持向量机^[15]和神经网络法^[16]等。上述评价方法各有优缺点。作为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中规定的水质评价方法,单因子评价法计算简单,但评价结果不能全面考虑各指标的影响;综合污染指数法难以客观合理地设置指标权重,分级标准具有主观性,可能导致评价结果有偏差;内梅罗指数法由于运算过程简单方便,物理概念清晰,可以突出污染较重的污染物的作用,是目前水质评价中常用的方法,分级亦没有统一标准;主成分分析方法是近年来在水环境质量评价中被广泛应用和研究的科学计算方法,成为一种研究多因素影响系统的有效科学分析方法,避免了主观随意性。不同评价方法的评价结果不尽相同,不合适的评价方法会造成评价结果偏离实际情况,极大地影响了水环境治理和保护策略的制定。为了科学合理地确定流域水质的好坏,不但需要综合使用多种评价方法进行水质评价,而且需要对多种评价方法进行对比分析研究,目前对评价结果的对比分析主要集中在定性描述分析^[9,17],难以客观评判

和定量说明各评价方法的优劣,难以科学合理地指导水质评价工作、为水资源开发利用和水环境综合治理及保护提供科学依据。因此,为了科学合理地评价流域水质好坏,急需对不同水质评价方法进行定性、定量研究,为水质评价相关工作和研究提供参考。

萍水河是江西省萍乡市居民的生活用水和工农业用水的主要来源,但是关于萍水河的水质状况研究报道相对较少^[19]。萍水河何雁桥—向阳湖断面承担着沿河汇水区域的排污任务,沿线村庄较多,部分河段穿村而过,河水受到污染可能性极大,但污染状况不明。因此,以萍水河向阳湖至何雁桥段面为例,在研究区布设了17个地表水采样点并进行采样实测分析,分析其水质污染特征,综合单因子指数法、综合污染指数法、内梅罗污染指数法和主成分分析法4种方法对其水质进行评价,在此基础上利用相关性分析和级别差法对评价结果进行定性定量对比分析,以期为萍水河流域水质提升、水资源保护和水环境管理提供科学参考依据,同时为水质评价方法的选取提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

萍水河是萍乡市最主要的水系,处于湘赣两水系分水岭地带,源于杨岐山,有多条支流汇入,中部贯穿整个萍乡城,主河道长94.1 km,流域面积

1 435 km²,其中萍乡市境内流域面积 1 325.27 km²,占比 92.35%^[19]。境内以丘陵、山地为主,平均海拔 233.7 m,属中亚热带季风性湿润性气候,温和多雨,四季分明,年平均气温 17℃,年平均降雨量 1 550 mm。研究区为向阳湖-何雁桥段,河长约 17.5 km,依次流经赤山镇和东源乡两个行政乡镇,主要污染源为农村生活污水、农业废水面源污染和生活垃圾。

采样点布设主要考虑废水排放口的位置和污染物的排放情况,形成了整体上游布点较疏下游布点密集的布点方案。2019年11月,在萍水河何雁桥断面至向阳湖断面一共布设 17 个采样点(编号为 No.01~No.17),具体位置见图 1。根据调查目的,将取样点分成三类,分别为河水(河道控制点)、农田水入河点和排污口入河点。样品的采集和处理均严格按照《地表水和污水监测技术规范(HJ/T 91—2002)》及《水与废水监测分析方法 第四版》操作,使用聚氯乙烯瓶采样器采集距河边较远(或中心位

置),深约 0.5 m 的表层水样,将采集到的水样分别装入 2 个洁净的 500 mL 聚乙烯塑料盛样瓶中,其中 1 瓶加入 3 mL 左右的硝酸,调节水样 pH 至 2 以下。水样采集处理后利用封口膜进行密封处理,存放于低温箱中,运输至实验室后置于 4℃ 条件下保存,并立即分析。研究区水环境功能区主要是渔业用水区、农业用水区和饮用水水源保护区,确定具体监测指标分别为:pH、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、总氮(TN)、Fe 和 Mn,共 8 个。测试分析采用空白样和平行样进行质量控制,将测定值和标准值比较,所有待测元素的相对标准偏差(RSD)均小于 15%,相对误差(RE)均小于 20%,标准曲线的 R² 大于 0.999 9,数据的精度及准确程度均符合要求。最终确定评价指标为:pH、DO、COD、NH₃-N、TP、TN、Fe 和 Mn,除 Fe、Mn 外水质评价标准限值采用 GB 3838—2002 中的第Ⅲ类标准限值。

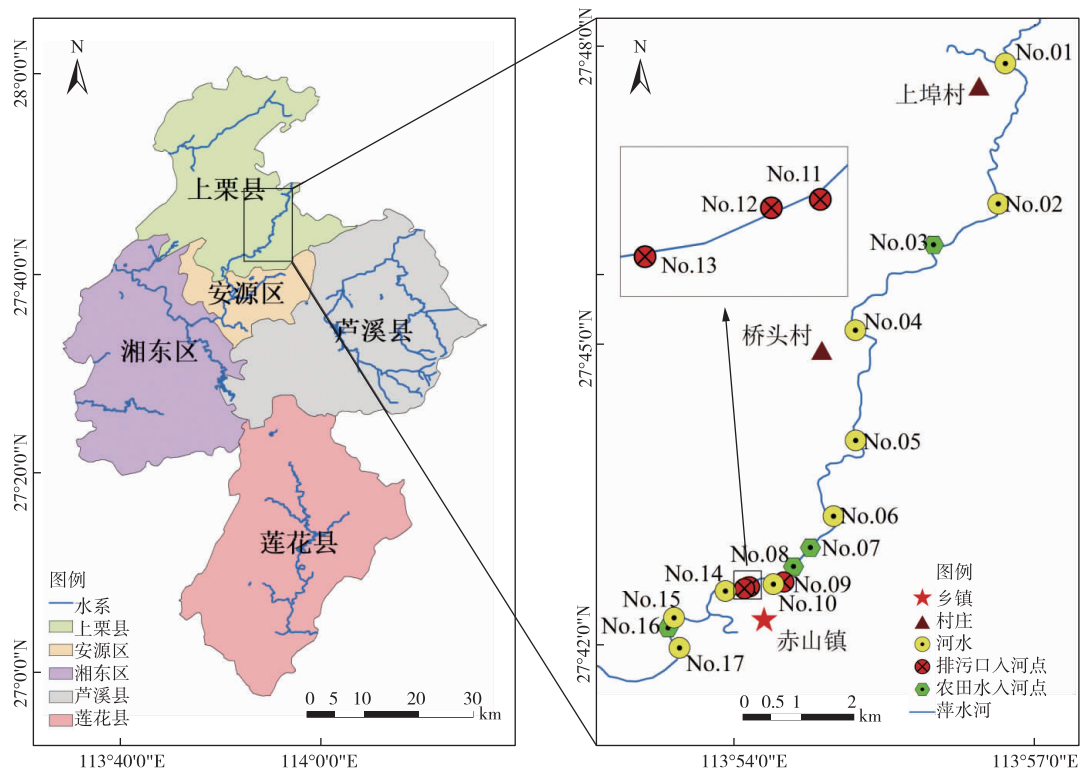


图 1 采样点位置图

Fig. 1 Location map of sampling points

1.2 研究方法

1.2.1 水质污染指数法(WQPI)

选择单因子指数法(SFI)、综合污染指数法(CPI)

和内梅罗污染指数法(NPI)3种水质污染指数法进行水质评价,3种方法的基本思想、具体计算公式和优缺点分析具体见表1,水质分级标准见表2。

表 1 3种不同水质污染指数法对比分析

Table 1 Comparative analysis of three different water pollution index methods

方法名称	基本思想	计算公式	优缺点分析
单因子指数法	在所有参评水质指标中以水质最差指标的水质类别作为最终水质评价结果	$P_i = C_i/C_s$, P_i 为单项污染指数; C_i 为水质指标 i 的实测浓度值(mg/L); C_s 为水质指标 i 的评价标准限值(mg/L)。本公式不可直接用于 DO 和 pH	优点:直观反映超标指标和污染区域,更利保护人体和生态环境;缺点:过于严格,难以反映整体水体环境质量
综合污染指数法-算术平均值法	通过算术平均的方式得出综合污染指数作为水质评价标准	$P_{com} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$, P_{com} 为某断面综合污染指数; P_i 为第 i 项水质指标的污染指数; n 为水质指标总数	优点:消除选用评价参数和权重对结果的影响,全面反映水环境质量整体状况;缺点:各个指标权重相等,无法区分不同指标的影响程度
内梅罗污染指数法	考虑极值和平均值的计权型多因子评价指数	$P_N = \sqrt{(P_{ave}^2 + P_{max}^2)/2}$, P_N 为内梅罗污染指数; P_{ave} 为不同污染物的单因子污染指数平均值; P_{max} 为采样点单因子污染指数最大值	优点:突出浓度最大的污染物的影响和作用;缺点:不同指标的影响程度不清晰,无法剔除指标间的重叠信息

表 2 水质污染指数分级标准

Table 2 Classification standard for water pollution indexes

分级	P_{com}	P_N	主成分得分, F	污染程度
I	<0.20	<0.80	<-2.04	清洁
II	[0.20,0.40)	[0.80,2.50)	[-2.04,-1.71)	轻度污染
III	[0.40,1.00)	[2.50,4.25)	[-1.71,-1.21)	中度污染
IV	[1.00,2.00)	[4.25,7.20)	[-1.21,-0.17)	重度污染
V	≥ 2.00	≥ 7.20	[-0.17,1.26)	严重污染
劣V			≥ 1.26	极严重污染

1.2.2 主成分分析法(PCA)

主成分分析法一方面避免了遗漏重要信息,考虑了尽可能多的指标,另一方面避免了信息的大量重叠,降低了问题的复杂性,揭示事物的真正特征与内在规律。主要步骤有:1)建立原始变量矩阵;2)原始变量矩阵标准化处理;3)计算相关系数矩阵,检验待分析的变量是否适合做主成分分析;4)进行主成分分析计算,求协方差矩阵及其特征根,确定主成分个数;5)确定主成分表达式;6)确定综合评价函数-主成分得分 F ,评价函数主成分得分 F 的具体分级标准^[7]见表 2。

1.2.3 数据统计分析

利用 Excel 软件根据公式(表 1)分别计算单因子评价指数、综合污染指数和内梅罗污染指数;采用 SPSS 软件(SPSS 22.0)进行数据描述性统计和主成分分析。级别差方法是应用不同评价方法的水质划分为相同的数量级别,在每个采样点计算每两种方法得到的水质级别差值,统计每个级别差的个数及百分比,判定不同方法计算的水质分级的高低程度,具体的步骤和公式可参考文献[20-21]。

2 结果与分析

2.1 水质污染空间特征

图 2 为 17 个采样点的 8 个水质指标的含量分

布箱线图。8 个水质指标分别为:pH 7.04~7.39、DO 3.9~8.0 mg/L、COD 5~70 mg/L、NH₃-N 0.13~8.42 mg/L、TP 0.01~1.78 mg/L、TN 0.47~9.56 mg/L、Fe 0.00~0.62 mg/L 和 Mn 0.01~0.24 mg/L。pH 和 DO 基本服从正态分布,均值与中位数基本相等,DO 受一个异常值(3.9)的影响出现了略微的左偏,其他监测指标均出现了较大的异常值,均表现为右偏的正态分布,平均值大于中位数。以《地表水环境质量标准》中规定的 III 类水的标准限值为标准,17 个水样点的 pH 和 DO 均未超标,COD、NH₃-N、TP、TN、Fe 和 Mn 的最大值分别为对应标准限值的 3.50、8.42、8.90、9.56、2.05 和 2.37 倍,超标率分别为 17.65%、11.76%、17.65%、29.41%、23.53%和 29.41%。

研究区水质空间分布如图 3 所示,COD、NH₃-N、TP 和 TN 的最高浓度位于点位 No.11(赤山桥处),该处河水水质指标存在明显超标现象。这是因为赤山桥位于赤山镇街道旁,人口聚居密集,主要是由于部分工业废水和餐饮废水、生活污水等未经处理直排于该处河段中,废水中携带的大量污染物导致了多项水质指标出现严重的超标现象。沿河实地调查过程中发现人口居住密集的乡村排污口分布集中,部分村庄的生活污水未处理直接排放进入田地、沟渠、河段

等,附近水质状况较差。整体而言:研究区上游(向阳湖-桥头村)和下游(赤山桥-何雁桥)总体上水质较好,存在部分采样点位 TN、Fe 和 Mn 轻度超标现象,污

染程度明显弱于中游(桥头村-赤山桥),Fe 和 Mn 超标现象在向阳湖断面处的上埠村附近较明显,可能与该区域的农业面源污染或地质沉积环境有关。

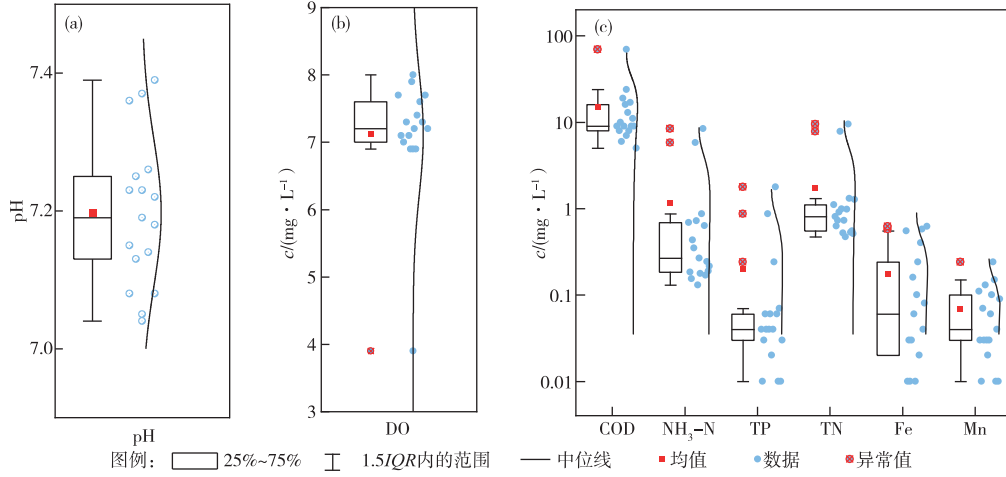


图 2 萍水河监测指标含量分布箱线图

Fig. 2 Box diagrams of content distribution of all monitoring indicators in the Pingshui River

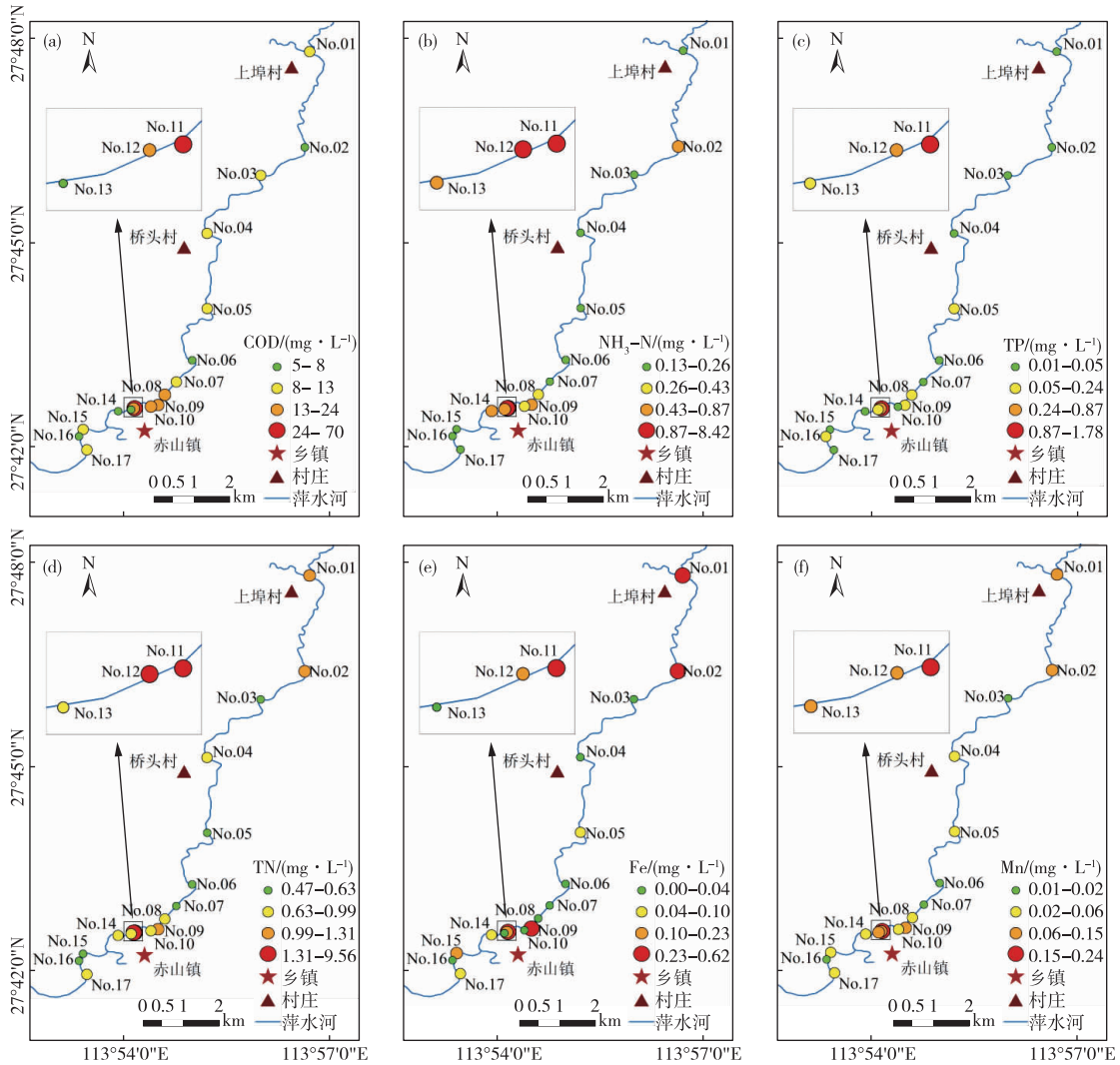


图 3 萍水河主要监测指标含量的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of main monitoring index content in the Pingshui River

2.2 水质评价

2.2.1 水质污染指数法

水质污染指数法的具体评价结果见表3,单因子污染指数法(SFI)的评价结果表明:采样点No.11、No.12和No.13处水质污染最严重,水质综合评价结果为劣V类。超标(Ⅲ类水及以上)的采样点一共有11个,其中水质最差指标为TN的有6个;水质最差指标为Fe的有3个,因Fe缺乏分级标准根据排名第二的污染指数TN进行水质分级评

定;水质最差指标为TP的有1个;水质最差指标为COD的有1个(No.06),确定研究区最主要污染指标为TN。综合污染指数法(CPI)评价结果表明采样点No.11、No.12的水质污染情况最严重,为V类水,属于严重污染;Ⅲ类水的采样点有7个,河流水质属于中度污染,占比41.18%。内梅罗污染指数法(NPI)评价结果表明水质最差(V类水)的采样点只有1个,位于No.11;重度污染(Ⅳ类水)的采样点也只有1个,位于No.11;不存在Ⅲ类水。

表3 水质污染指数法水质评价结果

Table 3 Water quality assessment results calculated by water quality pollution index methods

采样点	P_{pH}	P_{DO}	P_{COD}	P_{NH_3-N}	P_{TP}	P_{TN}	P_{Fe}	P_{Mn}	P_{max}	水质分级	P_{com}	水质分级	P_N	水质分级	F	水质分级
No.01	0.20	0.69	0.50	0.22	0.15	1.27	2.05	0.87	2.05	Ⅳ*	0.74	Ⅲ	1.54	Ⅱ	-0.01	V
No.02	0.11	0.64	0.25	0.69	0.20	1.11	1.82	1.09	1.82	Ⅳ*	0.74	Ⅲ	1.39	Ⅱ	0.21	V
No.03	0.09	0.54	0.45	0.19	0.05	0.51	0.02	0.12	0.54	Ⅱ	0.25	Ⅱ	0.42	Ⅰ	-1.08	Ⅳ
No.04	0.08	0.69	0.45	0.18	0.05	0.81	0.03	0.28	0.81	Ⅲ	0.32	Ⅱ	0.62	Ⅰ	-1.08	Ⅳ
No.05	0.13	0.61	0.55	0.24	0.35	0.55	0.27	0.44	0.55	Ⅲ	0.39	Ⅱ	0.52	Ⅰ	-1.02	Ⅳ
No.06	0.06	0.70	0.40	0.15	0.15	0.63	0.11	0.11	0.70	Ⅱ	0.29	Ⅱ	0.53	Ⅰ	-0.99	Ⅳ
No.07	0.04	1.18	0.45	0.17	0.05	0.53	0.13	0.11	1.18	Ⅱ	0.33	Ⅱ	0.87	Ⅰ	-1.05	Ⅳ
No.08	0.18	0.63	0.95	0.43	0.30	0.73	0.02	0.65	0.95	Ⅲ	0.49	Ⅲ	0.75	Ⅰ	-0.44	Ⅳ
No.09	0.04	0.67	0.85	0.64	0.30	1.31	1.94	1.50	1.94	Ⅳ*	0.91	Ⅲ	1.52	Ⅱ	0.81	V
No.10	0.19	0.72	0.80	0.35	0.20	0.91	0.1	0.30	0.91	Ⅲ	0.45	Ⅲ	0.72	Ⅰ	-0.93	Ⅳ
No.11	0.02	0.41	3.50	8.42	8.90	9.56	1.32	2.37	9.56	劣V	4.31	V	7.42	V	6.63	劣V
No.12	0.10	0.56	1.20	5.80	4.35	7.81	0.54	1.32	7.81	劣V	2.71	V	5.85	Ⅳ	2.45	劣V
No.13	0.07	0.32	0.30	0.87	1.20	0.98	0.07	0.98	1.20	劣V	0.60	Ⅲ	0.95	Ⅱ	-0.34	Ⅳ
No.14	0.12	0.62	0.40	0.72	0.20	0.99	0.19	0.32	0.99	Ⅲ	0.44	Ⅲ	0.77	Ⅰ	-0.72	Ⅳ
No.15	0.12	0.55	0.45	0.18	0.20	0.47	0.79	0.65	0.79	Ⅱ*	0.43	Ⅲ	0.63	Ⅰ	-0.75	Ⅳ
No.16	0.13	0.54	0.35	0.13	0.30	0.52	0.03	0.22	0.54	Ⅱ	0.28	Ⅱ	0.43	Ⅰ	-1.10	Ⅳ
No.17	0.02	0.59	0.65	0.27	0.10	0.73	0.34	0.34	0.73	Ⅲ	0.38	Ⅱ	0.58	Ⅰ	-0.59	Ⅳ

注:*表示该采样点Fe的污染指数最大,因缺乏分级标准,根据排名第二的污染指数进行分级。

2.2.2 主成分分析法

为了检验数据是否适合做主成分分析,进行了Kaiser-Meyer-Olkin和Bartlett检验,结果为:KMO值为 $0.700 > 0.6$,Bartlett球形检验的显著性P值为 $0.000 < 0.05$,二者都说明数据适合做主成分分析。确定了2个特征值大于1的主成分,具体的因子载荷和方差见表4,特征值分别为 $5.488(\lambda_1)$ 和 $1.193(\lambda_2)$,前两个主成分的方差分别为68.603%和14.911%,累计方差达83.514%,原始数据信息损失小。主成分1(F_1)与COD、 NH_3-N 、TP、TN含量正相关,与DO成负相关,其中 NH_3-N 、TP和TN与水体富营养化有关,主成分1可解释为营养盐污染指标^[6];主成分2(F_2)则与Fe高度相关(0.840),与pH、Mn含量相关(0.500和0.401),Fe和Mn则主要与地质沉积环境相关,pH也是影响环境中重金属含量和赋存的主要因素,主成分2(F_2)可解释为地质沉积环境指标。

表4 主成分分析因子载荷及方差解释

Table 4 Factor load and variance interpretation for principal component analysis

评价指标	主成分1(F_1)	主成分2(F_2)
pH	-0.386	0.500
DO	-0.876	0.230
COD	0.944	-0.071
NH_3-N	0.967	-0.075
TP	0.977	-0.103
TN	0.947	-0.029
Fe	0.374	0.840
Mn	0.869	0.401
特征值	5.488	1.193
方差贡献率/%	68.603	14.911
累计方差贡献率/%	68.603	83.514

2个主成分得分的计算公式具体为:

$$F_1 = -0.165X_1 - 0.374X_2 + 0.403X_3 + 0.413X_4 + 0.417X_5 + 0.404X_6 + 0.160X_7 + 0.371X_8$$

$$F_2 = 0.458X_1 + 0.211X_2 - 0.065X_3 - 0.070X_4 - 0.095X_5 - 0.026X_6 + 0.769X_7 + 0.367X_8$$

综合评价得分 F 为:

$$F = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} F_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} F_2 = 0.821F_1 + 0.179F_2$$

水质评价的具体结果见表 3,所有采样点的水质等级均为 IV 类水及以下。

2.3 评价结果对比分析

对采用单因子评价法(SFI)、综合污染指数法(CPI)、内梅罗污染指数法(NPI)计算得到的指数值(P_{max} 、 P_{com} 和 P_N)和主成分分析法(PCA)的综合得分 F 之间的相关性进行了分析,4种方法评价结果的矩阵散点图见图 4,表明 4 种评价方法两两之间呈现高度的正相关关系。SPSS 相关性分析结果表明,4 种评价方法评价结果均在 0.01 的水平上显著相关,相关系数在 0.937~0.994。

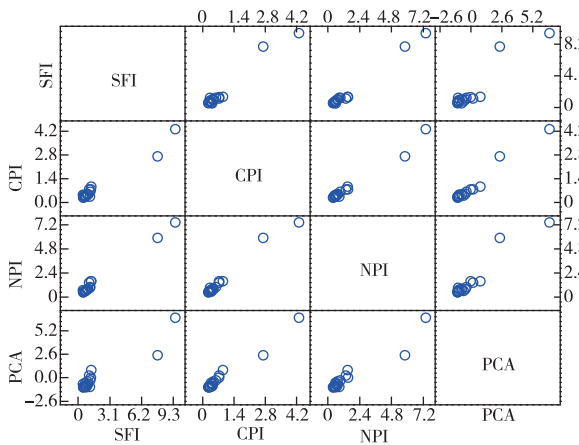


图 4 4 种方法评价结果矩阵散点图
Fig. 4 The scatterplot of the result matrix of water quality grade evaluated by four methods

将 4 种方法得到的水质级别结果进行统计并对比(图 5),统计时将劣 V 并入 V 类水中,结果表明不同评价方法得到的水质级别占比有明显差别。单因子评价法得到的水质级别主要集中在 II 类和 III 类水,没有 I 类水,其中 V 类水的比例(17.65%)在 3 种污染指数评价方法中是最高的,但是低于主成分分析的结果(29.41%),V 类水主要受到超标组分 TN 和 Fe 的影响。综合污染指数法得到的水质级别同样主要集中在 II 类和 III 类水,没有 I 和 IV 类水,V 类水的比例介于单因子评价和内梅罗污染指数法之间,水质评价结果略优于单因子评价法。内梅罗污染指数法得到的水质级别则主要集中在 I 类水(70.59%),没有 II 类水,V 类水的占比是三种污染指数法当中最少。主成分分析法得到的水质级别则只有 IV 和 V 类水,V 类水占比 29.41%,占比最高。

以水质级别作为评判标准,4 种评价结果得到的水质级别有明显差别,主成分分析法得到的水质情况最差,而内梅罗污染指数得到的水质情况最优。该结论与相关性分析的结果不同评价方法两两之间呈现出显著的正相关关系不太吻合,这是因为不同评价方法的分级标准不同,因此在利用水质级别进行水质评价时急需合理科学的分类标准。

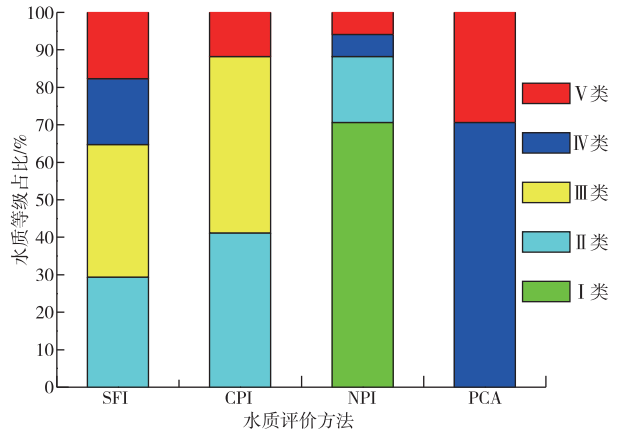


图 5 4 种方法评价结果水质级别统计对比
Fig. 5 Statistical comparison of water quality grades evaluated by four methods

级别差方法适用于水体综合水质评价的定量对比分析,应用级别差方法对 3 种综合水质评价方法两两间进行定量对比分析。基于级差法原理,将水质级别划分为 5 个水质级别(I~V),其中劣 V 类并入 V 类。级别差指水质级别差值,差值为正值说明前者的水质级别更高,水质劣于后者;负值则相反。级别差的具体范围为±4、±3、±2、±1 和 0,级别差数值越大,水质级别差别越大,具体统计结果见图 6。

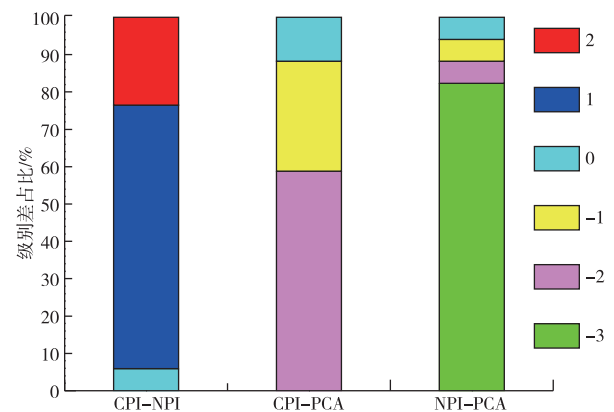


图 6 3 种综合评价方法级别差统计结果图
Fig. 6 Statistical results for grades difference of three comprehensive evaluation methods

以综合污染指数法-内梅罗污染指数法(CPI-NPI)的级别差1为例,表示该采样点CPI得到的水质级别比NPI得到的水质级别大1,比如No.01处CPI计算的水质级别为Ⅳ类,NPI计算的水质级别为Ⅲ类。17个采样点中两种综合水质评价方法得到的水质级别相同(级别差为0)的点位数量很少,综合污染指数法-主成分分析法(CPI-PCA)、采用综合污染指数法-内梅罗污染指数法(CPI-NPI)和内梅罗污染指数法-主成分分析法(NPI-PCA)分别为1个、2个和1个,占比分别为5.88%、11.76%和5.88%,说明不同综合评价方法得到的水质级别差别明显。CPI-NPI、CPI-PCA、NPI-PCA这3种组合计算得到的级别差大于0的占比分别为94.12%、0、0,小于0的占比分别为0、88.24%、94.12%。总体来说,NPI法得到的水质级别<CPI法得到的水质级别<PCA法得到的水质级别。

3 结论

1) pH和DO均未超标,COD、NH₃-N、TP、TN、Fe和Mn的最大值分别为对应标准限值的3.50、8.42、8.90、9.56、2.05和2.37倍,超标率分别为17.65%、11.76%、17.65%、29.41%、23.53%和29.41%。COD、NH₃-N、TP和TN的最高浓度位于点No.11(赤山桥处),水质指标存在明显超标现象。整体而言,上游(向阳湖-桥头村)和下游(赤山桥-何雁桥)总体上水质较好,存在部分采样点位TN、Fe和Mn轻度超标现象,污染程度明显弱于中游(桥头村-赤山桥)。

2)水质评价结果表明,研究区存在部分采样点水质级别为Ⅴ类水,属严重污染;单因子评价法结果表明,研究区最主要污染指标为TN;主成分分析法结果表明,研究区的污染因素可以概化为2个主成分,分别可解释为营养盐污染指标和地质沉积环境指标。

3)几种评价方法得到的指数值或得分两两之间呈现显著正相关,相关系数在0.937~0.994,但得到的水质级别表现出明显的差异性。级差法结果表明,内梅罗污染指数法(NPI)得到的水质级别<综合污染指数法(CPI)得到的水质级别<主成分分析法(PCA)得到的水质级别。

参考文献

[1] KABIR M, TUSGER T, HOSSAIN M, et al. Evaluation of spatio-temporal variations in water quality and suitability of an ecologically critical urban river employing water

quality index and multivariate statistical approaches: a study on Shitalakhya river, Bangladesh[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2020,28:1-28.

[2] MAANSI J R, WATS M. Evaluation of surface water quality using water quality indices (WQIs) in Lake Sukhna, Chandigarh, India[J]. Applied Water Science, 2022,12(2):1-14.

[3] ZEHRA A, KAUR S, SINGH R, et al. Surface water quality in Punjab, India; tracking human and farm animal-specific adenoviral contamination and correlation with microbiological and physiochemical parameters [J]. Water Air and Soil Pollution, 2020,231(11):1-12.

[4] 喻成功,章艳红,陈俊华,等.抚河南昌段水化学特征及影响分析[J].有色金属(冶炼部分),2023(5):111-119.

YU C G, ZHANG Y H, CHEN J H, et al. Hydrochemical characteristics and impact analysis of Nanchang section of Fuhe River[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(5):111-119.

[5] 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.环境工程,2023,41(6):187-209.

GENG J, WANG Y, HU S G, et al. WQI-based water quality assessment and spatial-temporal change in plain river network areas [J]. Environmental Engineering, 2023,41(6):187-209.

[6] 秦欢欢,高柏,黄碧贤,等.拉萨河流域河水重金属分布特征及污染风险评价[J].有色金属(冶炼部分),2020(10):79-86.

QIN H H, GAO B, HANG B X, et al. Distribution characteristics and pollution risk assessment of heavy metals in Lhasa River Basin [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(10):79-86.

[7] 刘彦龙,郑易安.黄河干流水质评价与时空变化分析[J].环境科学,2022,43(3):1332-1345.

LIU Y L, ZHENG Y A. Water quality assessment and spatial-temporal variation analysis in Yellow River Basin [J]. Environmental Science, 2022, 43 (3): 1332-1345.

[8] 毕业亮,王华彩,夏兵,等.雨源型城市河流水污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例[J].环境科学,2022,43(2):782-794.

BI Y L, WANG H C, XIA B, et al. Pollution characterization and comprehensive water quality assessment of rain-source river: a case study of the Longgang River in Shenzhen [J]. Environmental Science, 2022,43(2):782-794.

- [9] JI X L, DAHLGREN R A, ZHANG M H. Comparison of seven water quality assessment methods for the characterization and management of highly impaired river systems [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(15): 1-16.
- [10] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(4): 482-488.
XU Z X. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005, 33(4): 482-488.
- [11] 刘潇, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(10): 3187-3192.
LIU X, XUE Y, JI Y P, et al. An assessment of water quality in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on principal component analysis[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(10): 3187-3192.
- [12] 田福金, 马青山, 张明, 等. 基于主成分分析和熵权法的新安江流域水质评价[J]. *中国地质*, 2023, 50(2): 495-505.
TIAN F J, MA Q S, ZHANG M, et al. Evaluation of water quality in Xin'anjiang River Basin based on principal component analysis and entropy weight method[J]. *Geology in China*, 2023, 50(2): 495-505.
- [13] 蔡广强, 张金松, 刘彤宙, 等. 基于主成分分析的中国南方某市水库水质评价[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(增刊2): 88-94.
CAI G Q, ZHANG J S, LIU T Z, et al. Water quality evaluation of reservoirs in the south of China based on principal component analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(Suppl. 2): 88-94.
- [14] XU S G, CUI Y X, YANG C X, et al. The fuzzy comprehensive evaluation (FCE) and the principal component analysis (PCA) model simulation and its applications in water quality assessment of Nansi Lake Basin, China[J]. *Environmental Engineering Research*, 2021, 26(2): 1-11.
- [15] 田熊长, 蒋水华, 贾卓, 等. 基于 KH-SVM 的鄱阳湖水水质评价及变化趋势分析[J]. *环境工程*, 2023, 41(1): 72-78.
TIAN X Z, JIANG S H, JIA Z, et al. Water quality evaluation and change trend analysis of the Poyang Lake based on KH-SVM[J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(1): 72-78.
- [16] 戴天骄. 桃林口水库水质评价与预测研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
DAI T J. Study on water quality evaluation and prediction of Taolinkou Reservoir[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [17] 倪健, 花延文, 及歆荣. 基于神经网络与改进 D-S 证据理论的水质评价模型研究[J]. *人民黄河*, 2023, 45(1): 99-104, 111.
NI J, HUA Y W, JI X R, et al. Research on water quality evaluation model based on neural network and improved D-S evidence theory[J]. *Yellow River*, 2023, 45(1): 99-104, 111.
- [18] 王竹, 朱士江, 刘扬, 等. 不同水质评价方法在滦河下游段的比较应用[J]. *节水灌溉*, 2019(10): 68-72, 77.
WANG Z, ZHU S J, LIU Y, et al. Comparative application of different water quality evaluation methods in the downstream section of Luanhe River [J]. *Water Saving Irrigation*, 2019(10): 68-72, 77.
- [19] 章艳红, 唐玉红, 陈俊华, 等. 萍水河地表水重金属污染特征及健康风险评价[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021(7): 116-125.
ZHANG Y H, TANG Y H, CHEN J H, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water of Pingshui River [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021(7): 116-125.
- [20] 郇环, 廉新颖, 杨昱, 等. 基于级别差法的地下水水质评价方法筛选技术研究[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(2): 402-410.
HUAN H, LIAN X Y, YANG Y, et al. Screening method for groundwater quality assessment based on level difference method [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(2): 402-410.
- [21] STIGTER T, ALMEIDA P, CARVALHO A, et al. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison on a regional scale [J]. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14(3): 79-99.