

基于主成分分析法的涪江水质特征研究分析

黄蕙 熊焱川

长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局

DOI:10.12238/eep.v8i8.2800

[摘要] 涪江为长江支流嘉陵江右岸的最大支流,本文基于主成分分析法(PCA)对2020—2024年涪江干流2个断面水质变化趋势进行了分析并提取了主要污染因子,为涪江水质保护提供参考依据。结果表明:高锰酸盐指数(COD_{Mn})为涪江水质评价结果的主要污染因子;小河坝断面的水质总体优于玉溪断面的水质,涪江入境重庆市后水质有改善趋势;2个断面的水质有明显差异。

[关键词] 水质评价; 涪江; 主成分分析法

中图分类号: X824 文献标识码: A

Research and Analysis on Water Quality Characteristics of the Fujiang River Based on Principal Component Analysis

Hui Huang Yanchuan Xiong

Upper Changjiang River Bureau of Hydrological and Water Resources Survey

[Abstract] The Fujiang River is the largest tributary of the Jialing River on the right bank of the Yangtze River. This paper analyzes the water quality change trends of two sections of the Fujiang River from 2020 to 2024 based on the Principal Component Analysis (PCA) method and extracts the main pollution factors, providing a reference for the protection of the Fujiang River's water quality. The results show that the permanganate index (COD_{Mn}) is the main pollution factor in the water quality evaluation of the Fujiang River; the water quality at the Xiaheba section is generally better than that at the Yuxi section, and the water quality of the Fujiang River improves after entering Chongqing City; there are significant differences in water quality between the two sections, and the water quality shows periodic changes within the year due to the influence of water volume.

[Key words] Water quality evaluation; Fujiang River; Principal Component Analysis

引言

涪江为长江支流嘉陵江右岸的最大支流,全长668km,流域面积35881km²,是长江流域的重要组成部分,承担着沿线大量农业、工业和生活的供水任务^{[1][2]}。研究表明,水质的变化会产生跨流域的影响^[3],涪江的水质变化不仅直接影响涪江流域内的生态环境,还会通过汇流影响嘉陵江干流水质。关于嘉陵江流域水质研究已有较为丰富的成果,如刘腊美^[4]对嘉陵江流域非点源氮磷污染进行了分析,但对涪江流域的水质研究还相对较少,现有的涪江的水质研究也集中在四川省境内,如邓国海^[5]基于2022年涪江四川省考断面水质数据对四川省境内涪江水质进行了分析评价,涪江流域重庆段水质研究相对较少。因此,本文基于主成分分析法对重庆境内涪江干流玉溪及小河坝断面2020—2024年5年水质数据进行梳理分析,综合衡量多种因子的影响情况,分析探讨涪江重庆段2020—2024年水质变化特征与趋势,为涪江水环境保护与治理提供参考依据。

1 研究区域概况

涪江发源于四川雪宝顶,干流流经四川中部、四川盆地,在重庆市合川区汇入嘉陵江^[6]。涪江流域介于29.29°~33.04°N、103.75°~106.34°E之间,北接甘肃省,南接重庆市,流域总面积约为3.6×104km²。

2 研究方法

2.1 数据来源及监测设置

本文以涪江下游重庆段干流为研究范围,设置玉溪、小河坝两处地表水质监测断面。玉溪断面为涪江进入重庆的入境控制断面,小河坝断面则地处潼南城区,是流域内关键控制断面,两者水质均执行III类管理标准,断面空间分布见图1。

2020至2024年间,两断面累计开展62月次水质监测。依据重庆市气候特点及相关研究^[8],将年度划分为汛期(5~10月)与非汛期(11月至次年4月)两个时段。

研究选取8项水质指标进行分析,分别为水温(WT)、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、五日生化需氧量(BOD_5)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总氮(TN)、氟化物(F-)及粪大肠菌群(FCB)



图1 断面空间分布示意图

2.2 研究方法

主成分分析法(PCA)的核心原理是,通过解析原始变量相关矩阵的内在结构关联,从存在相关性的大量指标中筛选出起主导作用的关键指标。该方法能识别影响水质的主要驱动因子,剔除次要指标,从而精准锁定污染贡献的核心要素^[9]。其具体实施步骤如下:

(1) 依据研究目标确定待分析的水质指标体系。(2) 对原始数据矩阵进行标准化处理,以消除不同指标量纲差异带来的影响。(3) 对标准化数据执行KMO检验与巴特利特球形度检验,检验标准为KMO值>0.500,且巴特利特球形度检验结果<0.001^{[9][10]}。(4) 筛选主成分,筛选条件为特征值 $\lambda>1$,且主成分累计方差贡献率 $\geq 70\%$ ^[11]。(5) 计算所提取主成分的载荷系数,并基于该系数识别涪江重庆段的主要水质污染因子。(6) 计算F值,公式如下:

$$dj = \frac{\lambda_j}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (1)$$

$$F = \sum_{j=1}^n dj F_j \quad (2)$$

式中: n为主成分个数; λ 为各主成分特征值; d_j 为各主成分方差贡献率; F_j 为各主成分得分。

详细步骤可参考其他相关文献^{[12][13]},根据样本的F值,对2个断面的水质情况进行综合评价。研究区域水质整体评价显示,较高的F值意味着对应断面水体污染物浓度偏高,其水质表现也相对较差^[14]。

2.3 数据处理

(1) 本文选取的溶解氧指标浓度值越高表明水质越好。因此,主成分分析前需对溶解氧数据进行对称转换,转换对称点参照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)III类限值(5mg/L),转换

后数值用于PCA分析^[12]。(2) 主成分分析采用SPSS27软件计算分析。(3) 图像采用Excel软件绘制。

3 结果与分析

3.1 主成分选取

如表1所示,本研究数据矩阵的PCA检验结果满足要求(KMO>0.500,巴特利特球形度检验<0.001)。由表2可知,分析提取4个主成分,累计方差贡献率78.7%,足以体现两个断面的整体水质特征,可用于研究区域水质状况。

表1 KMO和巴特利特球形度检验

KMO取样适切性量数	巴特利特球形度检验		
	近似卡方	自由度	显著性
0.506	157.428	28	0

表2 特征值、贡献率及累计贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
PC1	2.222	27.777	27.777
PC2	1.746	21.827	49.604
PC3	1.307	16.344	65.948
PC4	1.020	12.755	78.703

3.2 污染因子

根据选取的4个主成分,计算8种水质指标与之所对应的载荷系数形成主成分得分,将8种指标的各个主成分得分与相应的方差贡献率相乘并求和得到各个指标主成分综合得分^{[15][16]},对综合得分进行排序,如表3所示前3位分别为COD_{Mn}、WT和DO,WT对PCA结果影响数据波动较大,一般不作为污染因子;由PCA结果得DO和WT之间相关性系数为0.896,表明DO和WT之间相关性较高;且COD_{Mn}的综合得分显著高于其他指标,因此本文将COD_{Mn}作为影响涪江水质的主要污染因子。

表3 水质因子得分及排序

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	综合得分	排序
COD _{Mn}	0.511	0.467	0.073	0.534	0.324	1
WT	0.939	-0.110	0.081	0.020	0.252	2
DO	0.949	-0.097	0.032	-0.066	0.239	3
FCB	0.036	0.710	0.382	-0.152	0.208	4
BOD ₅	-0.042	-0.080	0.835	0.153	0.127	5
TN	-0.262	0.689	-0.257	0.497	0.099	6
NH ₃ -N	-0.019	0.622	0.255	-0.589	0.097	7
F ⁻	0.327	0.367	-0.566	-0.300	0.040	8

3.3 断面水质综合评价得分

基于PCA的4个主成分计算各月F值后,按断面分组,将同断面的月F值进行年平均,以此作为断面水质综合得分值,玉溪断面与小河坝断面2020—2024年总平均F值分别为0.12和-0.10。计算年平均F值,如表4所示玉溪断面的年平均F值均大于小河坝断面的年平均F值。由PCA结果可知,小河坝断面水质相对较好,玉溪断面水质相对较差。玉溪断面为涪江重庆市入境断面,表明涪江入境重庆市后总体水质有变好趋势。

3.4 水质变化趋势分析

由表4可知小河坝断面与玉溪断面年均F值差值2020—2024年均小于0,表明涪江流入重庆市境内后污染物消解速率大于污染物输入速率,水质有改善趋势。2个断面年均F值均有减小趋势,表明2个断面的水质均有改善趋势;2020—2024年2个断面年平均F值差值有明显减小趋势,表明小河坝断面水质改善速率略高于玉溪断面。断面水质的改善也说明了从2021年开始实施的《中华人民共和国长江保护法》^[17]、2022年开始实施的《四川省嘉陵江流域生态环境保护条例》^[18]和其他的保护条例的实施对涪江的水质改善有较好的影响。

表4 玉溪与小河坝断面年平均F值差值

时间	玉溪	小河坝	年平均F值
	年平均F值	年平均F值	差值
2020	0.06	-0.03	-0.09
2021	0.38	-0.12	-0.50
2022	0.18	-0.14	-0.32
2023	-0.01	-0.13	-0.13
2024	0.10	-0.14	-0.25

4 讨论

4.1 污染因子

PCA结果表明涪江玉溪及小河坝断面主要污染因子为COD_{Mn}。

4.2 断面水质变化

PCA结果表明小河坝断面的水质总体优于玉溪断面。玉溪断面为涪江重庆市入境断面,表明涪江流入重庆市境内后水质有改善趋势。2个断面的年平均F值差值有明显减小趋势,表明小河坝断面水质改善速率略高于玉溪断面。

5 结论

通过主成分分析法(PCA)对涪江近五年水质进行了综合分析,得到如下结论:高锰酸盐指数(COD_{Mn})为涪江水质评价结果的主要污染因子;小河坝断面的水质总体优于玉溪断面的水质,涪江入境重庆市后水质有改善趋势;两个断面的水质有明显差异。

参考文献

[1] 邓小菲,杜华明,王雪梅,等.涪江流域被净出级生产力时空变化及对气候的响应[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2024,41(3):47-8.

[2] 张家铭,周鑫鑫,李清华,等.涪江下游浮游生物群落结构、多样性及水质现状研究[J/OL].西华师范大学学报(自然科学版),1-13[2025-06-24].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.169.N.20241226.1556.002.html>.

[3] RENLP,ZHOUYY,ZHANG T,et al.Water quality change in Nan-

chong section of Jialing River Basin based on multivariate statistical analysis[J].Desalination and Water Treatment,2022,253:78-87.

[4] 刘腊美.嘉陵江流域非点源氮磷污染及其对重庆主城区段水环境影响研究[D].重庆:重庆大学城市建设与环境工程学院,2009.

[5] 邓国海,陈波,向秋,等.基于主成分分析的水质考核排名研究-以涪江四川国省考断面为例[J].四川环境,2024,43(4):59-66.

[6] 王国庆,李迷,金君良,等.涪江流域径流变化趋势及其对气候变化的响应[J].水文,2012,32(1):22-28.

[7] 杨顺,黄海,田尤.涪江上游泥石流灾损土地特征及典型流域淤积危险性研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(11):1928-1935.

[8] 黄燏,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.

[9] 马乐宽,谢阳村,温勘.基于主成分分析法的现有水质评价体系改进探讨[J].环境污染与防治,2016,38(6):101-104.

[10] 王晓鹏.河流水质综合评价之主成分分析方法[J].数理统计与管理,2001,20(4):49-52.

[11] 尹炜,辛小康,梁建奎,等.基于主成分分析的丹江口水库支流水质评价[J].水电能源科学,2015,33(1):34-38.

[12] 姜波,吕凤春,王丽娜.基于主成分分析法对安肇新河水质评价的研究[J].环境科学与管理,2016,41(2):109-112.

[13] 黄兰贵,殷环环.近十年鄱阳湖出口水质变化趋势及影响因素分析[J].人民长江,2022,53(增Ⅱ):15-33.

[14] 伊元荣,海米提,依米提,等.主成分分析法在城市河流水质评价中的应用[J].干旱区研究,2008,25(4):497-501.

[15] 张红.长江秭归段水质时间分布特征分析[J].环境科学与技术,2018,41(S1):275-280.

[16] 胡冰涛,陈玉东.基于聚类分析和主成分分析的长江下游稻田氮磷监测指标筛选[J].生态与农村环境学报,2020,36(11):1495-1504.

[17] 黄蕙,左新宇.2013~2022年嘉陵江水质时空演变特征分析[J].人民长江,2025,56(S1):96-103.

[18] 中华人民共和国长江保护法[N].人民日报,2020-12-30(013).

[19] 四川省人民政府.四川省嘉陵江流域生态环境保护条例[N].2021-11-30.

作者简介:

黄蕙(1992--),女,重庆酉阳人,本科,工程师,主要从事水环境监测与评价工作。