

汾河下游地表水环境特征及污染源解析

李 皎, 孙从建*, 陈 伟, 张齐飞, 刘 显, 周思捷, 林若静

山西师范大学 地理科学学院, 太原 030031

摘 要: 水资源是区域发展的重要战略资源, 地表水作为区域水资源的重要组成, 其整体环境变化对于区域经济社会可持续发展具有重要的影响。本研究基于汾河下游 15 个水质监测断面 2013—2017 年的 16 项水质指标, 采用水污染指数法 (WPI) 和多元统计方法, 以水质定量评价为基础, 评估了汾河下游地表水水环境特征及其变化的主要控制因素。结果表明: (1) 汾河下游水质以《GB 3838—2002, 地表水环境质量标准》中劣 V 类水为主, WPI 值的多年平均值为 74.1—636.2; (2) 水质的年际变化上, 2015 年 V 类和劣 V 类水的占比最高, 水质状况最差; (3) 在空间上, 位于汾河干流尧都区段及滹沱河的 6 个监测断面污染程度高于其他区域; (4) 研究区营养盐 (TP、NH₃-N) 和耗氧有机污染物 (COD_{Mn}、COD_{Cr}) 等典型污染物主要来自城市生活污水、农业废水, 霍州市和洪洞县的水质恶化受工业废水排放的影响最大。污染程度具有从北向南、从上游向下游逐渐减弱的特征。研究显示: 汾河下游水环境污染严重, 汾河干流道美桥—尧都段和滹沱河应当作为区域水环境治理的重点。

关键词: 水环境; 时空特征; 污染源; 汾河下游

Characteristics of surface water environment and source identification of water pollutants in the downstream of Fenhe River

LI Jiao, SUN Congjian*, CHEN Wei, ZHANG Qifei, LIU Xian, ZHOU Sijie, LIN Ruojing

School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China

Abstract: *Background, aim, and scope* As an important water resource, surface water plays a significant role in the economic and social development of the region. Fenhe River is the second largest tributary of the Yellow River and is considered the mother river of the Shanxi people. Due to global climate change and rapid urbanization, the water environment of the river basin has deteriorated significantly, and as a result of water pollution, the economy and society of the region have been seriously hindered in their efforts to develop sustainably. This study investigated the characteristics of the surface water environment and the sources of pollutants in the downstream of the Fenhe River. *Materials and methods* An analysis of 16 parameters from 15 monitoring sections in the study area during 2013—2017 was conducted using the water pollution index (WPI), hierarchical cluster analysis (HCA), discriminant analysis (DA), and factor analysis (FA). *Results* The value of the multi-year average of WPI varies

收稿日期: 2022-01-15; 录用日期: 2022-04-24; 网络出版: 2022-05-08

Received Date: 2022-01-15; Accepted Date: 2022-04-24; Online first: 2022-05-08

基金项目: 2021 年山西省研究生教育改革研究课题 (2021YJJG133)

Foundation Item: Graduate Education Reform Project of Shanxi Province in 2021 (2021YJJG133)

通信作者: 孙从建, E-mail: suncongjian@sina.com

Corresponding Author: SUN Congjian, E-mail: suncongjian@sina.com

引用格式: 李 皎, 孙从建, 陈 伟, 等. 2022. 汾河下游地表水环境特征及污染源解析 [J]. 地球环境学报, 13(4): 380–392.

Citation: Li J, Sun C J, Chen W, et al. 2022. Characteristics of surface water environment and source identification of water pollutants in the downstream of Fenhe River [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(4): 380–392.

between 74.1 and 636.2. In accordance with GB 3838—2002, environmental quality standards for surface water, the water quality of 66.7% of monitoring sections is generally worse than that of Class V. In Zhaocheng, the WPI value is the highest and the water pollution is the most severe. **Discussion** Among the interannual variations in water quality, 2015 had the lowest quality, with 93% of Class V and inferior Class V water. As a result of the water treatment of Fenhe River, major pollutants such as COD_{Cr} , $\text{NH}_3\text{-N}$, TP and COD_{Mn} have been significantly reduced in surface waters after 2015. In the downstream of the Fenhe River, water environment treatment and ecological restoration will be focused on sections of Daomei Bridge, Zhaocheng, Hongtong, Ganting and Gaohe Bridge where water quality fluctuates significantly from year to year. Water quality of the monitoring sections located upstream of Yaodu section of Fenhe River and Laoju River is affected by the spatial distribution of geographical locations, with high nutrients (TP and $\text{NH}_3\text{-N}$), high oxygen-consuming organic matter (COD_{Mn} and COD_{Cr}), and high toxic organic matter (VP and CN) and low DO concentrations. Surface water is typically polluted by TP, F^- , DO, and oxygen-consuming organic matter, followed by Hg and $\text{NH}_3\text{-N}$, which are also affected by heavy metal pollution. The pollution degree gradually weakens from north to south and from upstream to downstream. The downstream of the Fenhe River is heavily polluted by domestic sewage and agricultural non-point source pollution, while industrial pollution has the greatest impact in Huozhou and Hongtong, where the water quality is the worst. **Conclusions** The research results demonstrate that the water environment of the downstream of Fenhe River is seriously polluted. More attention should be given to the restoration of the water environment along the Daomei Bridge—Yaodu section of the trunk stream of the Fenhe River and Laoju River. **Recommendations and perspectives** The results of this study can serve as a scientific basis for the comprehensive management of the water environment in Fenhe River Basin.

Key words: water environment; temporal-spatial characteristics; pollutants source; downstream of Fenhe River

水资源作为区域发展的重要战略性资源,其变化对区域的可持续、高质量发展具有重要的影响(曹建文等, 2021)。随着我国经济建设的高速发展、城市化进程的加速以及大量人口的迁移和聚集,部分流域水污染加重、水环境恶化,严重阻碍了区域经济社会的可持续发展。黄河流域是我国重要的生态安全屏障和重要的经济地带,也是打赢脱贫攻坚战的重要区域(于法稳和方兰, 2020)。近年来,由于国家加大了水污染治理和水环境保护的力度,黄河流域水质总体呈逐年好转趋势,根据《2020年中国生态环境状况公报》(<https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/>)的数据,黄河流域在监测的137个水质断面中Ⅰ—Ⅲ类水占比达到84.7%,已全面消除劣Ⅴ类断面。然而,目前黄河流域的水环境改善态势并不稳固,部分支流水生态系统受损,水质较差,水环境风险防范压力大,亟需加强对黄河流域重点支流水环境时空变化的监测和研究,从而有针对性地制定区域水污染治理策略。

自2000年以来,随着工农业及生活废污水排放量的增加,黄河、长江等流域多次发生水体

严重污染事件(吕振豫和穆建新, 2017; 景朝霞等, 2019),严重危害区域工农业生产生活,特别是大江大河的污染关乎人民的饮用水安全,因此,在对水环境变化特征科学评估的基础上解析污染物来源已成为国内外研究者关注的焦点。目前,多元统计分析方法中的聚类分析、判别分析、因子分析、绝对主成分多元线性回归分析等被广泛应用于流域水环境变化特征和潜在污染源识别上,为长江干流(秦延文等, 2018; Deng et al, 2021)、岷江(Zhang et al, 2020)、汉江(景朝霞等, 2019; Kuo et al, 2019)、黄河(赵萌萌等, 2018; Hong et al, 2020; Zhao et al, 2020)、海河(王超等, 2015)、沱河(后希康等, 2021)、湟水河(邱瑀等, 2017)、恒河(Kumar et al, 2021)等流域的水环境治理提供了科学依据,对于区域水资源的高效利用具有重要的意义。

黄河中游地处我国半干旱半湿润区的过渡带,区域水资源供需矛盾尖锐,地表水作为区域重要的水资源对于整个地区的经济社会高质量发展具有重要意义。受到生态补给水量减少、流域

生态环境退化及煤矿产业布局的影响,黄河中游的水质状况明显劣于上游和下游(吕振豫和穆建新,2017)。基于此,研究者在黄河中游地区开展了大量水质评价和分析工作。在渭河流域,河道水质在经过综合治理后呈现出明显好转,但在宝鸡断面 COD_{Cr} 的污染物浓度有持续上升趋势(胡德秀等,2018);在沁河流域,丹河的污染程度重于沁河, TN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 表征的工业点源排放是相应子流域的重点控制污染物(王翠榆等,2012);在无定河流域,干流水质达到相应水质功能标准要求,而支流榆溪河存在轻度污染,污染物以 COD_{Cr} 、 BOD 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 为主(杨飞等,2018);在三川河流域,综合污染指数呈逐年下降趋势,水质明显好转,主要污染物为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Cr} 、 BOD_5 和 TP (胡海翔,2021)。对于黄河的第二大支流汾河,前人采用主成分分析法、综合水质指数法、熵权-TOPSIS 法(吕安等,2012;秦聪和郭华,2020)等开展了水质综合评价,但上述工作局限于对污染物的筛选,研究时段多在 2010 年前,且时间不连续。近年来,在汾河流域各河段开展了一系列的生态修复工程,系统地开展近期汾河流域水环境时空变化特征和污染源特征的研究,对于评估水治理工程的成效和优化科学水管理的需求具有重要的实际意义。

汾河下游地区是我国黄土高原地区重要的粮棉生产基地,也是我国三大优质主焦煤基地之一,在全球气候变化和工农业生产生活的共同影响下,流域水环境恶化、水资源短缺和水污染问题严重阻碍了区域经济社会的可持续发展。随着《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》(http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/08/content_5641438.htm)的发布,查明区域水环境的时空变化特征及其影响因素已成为该区生态环境保护与高质量发展的迫切需要。基于此,本文选取汾河下游临汾市境内的 15 个水质监测断面 2013—2017 年 16 项水质指标,采用水污染指数法和多元统计分析方法,开展流域水质时空变化特征和污染源解析的研究,从而为汾河下游的水生态环境修复、流域综合管理提供科学依据。

1 研究区概况

汾河是山西省天然径流量最大的河流,干流全长 716 km,流域总面积 39471 km^2 。汾河临汾

段位于汾河下游,流经临汾市霍州市、洪洞县、尧都区、襄汾县、侯马市、曲沃县、翼城县 7 个县,全长 161.53 km,占汾河总长的 23%,流域面积 10127 km^2 ,是该区域工农业生产的主要水源。该区水资源贫乏,水资源总量为 15.2 亿 m^3 ,水资源人均占有量仅 350 m^3 。研究区地处暖温带大陆性半干旱气候区,年均气温 10℃,年均降水量 430—530 mm,降水季节性显著(林若静等,2021)。截至 2020 年研究区常住人口 303 万人, GDP 为 1017.7 亿元(<https://www.yearbookchina.com/naviBooklist-n3021122302-1.html/>),区域主要产业为煤炭、冶金、电力、新型材料、焦化、装备制造业等,是山西省新型能源和工业基地建设的重要组成部分。研究区域地表水监测断面共 15 个,其中:7 个位于汾河干流,8 个位于汾河支流的涝洳河、曲亭河、浍河(图 1)。

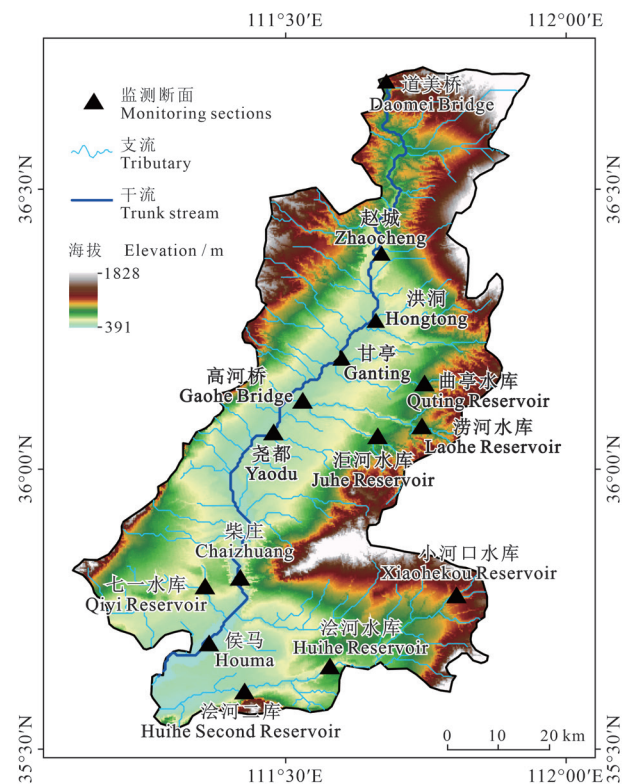


图 1 汾河下游水质监测断面分布图

Fig.1 Distribution of water quality monitoring sections at the downstream of Fenhe River

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本研究采用临汾市水文水资源勘测分局提

供的辖区内 15 个监测断面 2013—2017 年的年平均水质数据,共 75 个监测样本。各断面每月监测 1 次,监测过程、水样采集和分析测试依据《HJ/T 91—2002,地表水和污水监测技术规范》(国家环境保护总局,2003)及《环境水质监测质量保证手册(第二版)》(中国环境监测总站,1994)规范操作。水质评价标准依据《GB 3838—2002,地表水环境质量标准》(国家环境保护

总局和国家质量监督检验检疫总局,2002)。本研究选用的水质指标共计 16 个: pH 值、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、铜(Cu)、锌(Zn)、氟(F⁻)、砷(As)、总汞(Hg)、镉(Cd)、六价铬(Cr⁶⁺)、铅(Pb)、氰化物(CN)及挥发酚(VP),数据统计描述见表 1。

表 1 汾河下游 2013—2017 年水质指标统计
Tab. 1 Statistical description of water quality parameters in the downstream of Fenhe River from 2013 to 2017

统计值 Statistics	水质指标 Water quality parameters															
	pH	DO	COD _{Mn}	COD _{Cr}	NH ₃ -N	TP	Cu	Zn	F ⁻	As	Hg	Cd	Cr ⁶⁺	Pb	CN	VP
最小值 Minimum	7.34	0	2.1	10.0	0.15	0.043	0.0020	0.001	0.42	0.0001	0	0.0010	0.0020	0.004	0	0
下四分位数 Lower quartile	7.72	3.7	5.4	23.0	0.85	0.101	0.0020	0.002	0.97	0.0001	0.00001	0.0010	0.0020	0.008	0.0003	0.0009
中位数 Median	7.88	4.8	13.4	56.1	4.00	0.257	0.0035	0.011	1.15	0.0003	0.00002	0.0010	0.0020	0.010	0.0010	0.0019
上四分位数 Upper quartile	8.01	5.7	22.4	95.0	8.83	0.469	0.0040	0.042	1.33	0.0008	0.00006	0.0020	0.0020	0.010	0.0020	0.0032
最大值 Maximum	8.40	7.5	250.0	1272.0	727.00	2.135	0.0220	0.129	5.41	0.0080	0.00130	0.0100	0.0030	0.100	0.0220	0.0219
均值 Mean	7.89	4.5	24.5	124.0	33.12	0.374	0.0037	0.026	1.24	0.0008	0.00010	0.0015	0.0020	0.010	0.0026	0.0032
标准差 Standard deviation	0.21	1.6	40.9	214.8	109.58	0.428	0.0030	0.033	0.70	0.0012	0.00023	0.0012	0.0002	0.011	0.0041	0.0039
变异系数 Coefficient of variation	0.03	0.4	1.7	1.7	3.31	1.144	0.8172	1.289	0.57	1.4986	2.24253	0.8142	0.0973	1.071	1.5591	1.2362

pH 无量纲,其余水质指标单位为 mg·L⁻¹。

pH is dimensionless, and other water quality parameters are in mg·L⁻¹.

2.2 研究方法

2.2.1 水污染指数法

水污染指数法(water pollution index, WPI)能够同时进行水质类别评价和水质定量评价,特别是劣 V 类水体水质的比较(刘琰等,2013;景朝霞等,2019),可以满足汾河下游水质定量研究需求。该方法对照《GB 3838—2002,地表水环境质量标准》水质类别与 WPI 值(表 2),通过内插方法计算出监测断面每个参加水质评价项目的 WPI 值,取其最高值作为该断面的 WPI 值。

当水质未超过 V 类水限值时 WPI 值的计算方法见公式(1)。其中: 6<pH<9 时, WPI_{pH}=20; DO≥7.5 mg·L⁻¹ 时, WPI_{DO}=20; 2≤DO<7.5 时, WPI 的计算方法见公式(2); 当水质超过 V 类水限值时 WPI 值的计算方法见公式(3)。其中: pH<6 时, WPI_{pH}=100+6.67×(6-pH); pH>9 时, WPI_{pH}=100+8.00×(pH-9); DO<2 mg·L⁻¹ 时, WPI_{DO}=100+(2-C_{DO})÷2×40(刘琰等,2013)。

$$WPI_i = WPI_{i_j} + (WPI_{h_i} - WPI_{i_j}) \div (C_{h_i} - C_{i_j}) \times (C_i - C_{i_j}), C_{i_j} < C_i \leq C_{h_i} \quad (1)$$

$$WPI_i = WPI_{li} + (WPI_{hi} - WPI_{li}) \div (C_{li} - C_{hi}) \times (C_i - C_{li}) \quad (2)$$

$$WPI_i = 100 + (C_i - C_{5i}) \div C_{5i} \times 40 \quad (3)$$

式中: C_i 、 C_{hi} 、 C_{li} 和 C_{5i} 分别代表第 i 个水质项目的监测浓度值、水质项目所在类别标准的上限浓度值和下限浓度值, 以及第 i 个水质项目在《GB 3838—2002, 地表水环境质量标准》中 V 类标准的浓度限值。 WPI_i 、 WPI_{hi} 、 WPI_{li} 代表各浓度值对应的水污染指数值。当《GB 3838—2002, 地表水环境质量标准》中两个水质等级标准值相同时, 按低分数值区间插值计算。

表 2 《GB 3838—2002, 地表水环境质量标准》水质类别与 WPI 值对应表 (刘琰等, 2013)

Tab. 2 WPI and water quality classification in GB 3838—2002, environmental quality standards for surface water (Liu Y et al, 2013)

水质类别 Water quality classification	WPI
I 类 Class I	20
II 类 Class II	$20 < WPI \leq 40$
III 类 Class III	$40 < WPI \leq 60$
IV 类 Class IV	$60 < WPI \leq 80$
V 类 Class V	$80 < WPI \leq 100$
劣 V 类 Inferior Class V	$WPI > 100$

2.2.2 聚类分析

聚类分析 (cluster analysis) 是根据对象距离远近或相似性大小进行分类的多元统计方法。层次聚类分析 (hierarchical cluster analysis) 通过逐次聚合的方式将距离最近或者最相似的对象聚成一个类簇, 直至最后聚成一类, 是目前应用最广泛的聚类方法 (李义禄等, 2014)。本研究利用 SPSS 软件对水质指标进行空间尺度的层次聚类分析, 在空间上识别出具有不同污染程度的区域, 聚类方法选用离差平方和法 (Ward 法), 距离测量方法使用平方欧氏距离 (squared euclidean distance), 对数据按照 Z 值的方法进行标准化。

2.2.3 判别分析

判别分析 (discriminant analysis) 的目的在于建立一种变量的线性组合来概括分类之间的差异, 从而达到根据已知样本的分类情况来判断未知分类样本归属的目的。在水质评价研究中, 判别分析可以用来验证聚类分析结果并识别显著性指标 (王翠榆等, 2012; 李义禄等, 2014)。本

文利用贝叶斯判别分析法对基于空间分组的监测数据进行判别, 同时采用交叉验证法检验此方法的判别能力。

2.2.4 因子分析

因子分析 (factor analysis) 是多元回归分析中处理降维问题的常用方法, 它将具有复杂关系的变量综合为少数几个因子, 从而再现原始变量与因子之间的相互关系, 探讨具有一定相关性的实测变量是如何受到少数几个内在的独立因子支配的。同时, 根据各个因子对原变量影响的大小, 可将原变量划分为等同于因子数目的类数 (王翠榆等, 2012)。本研究利用 SPSS 软件对研究区污染因子进行提取和识别, 在数据分析前对变量进行 Bartlett's 球形检验和 KMO 检验统计量分析, 以检验数据应用于因子分析的可行性。为消除水质指标量纲的影响, 在进行因子分析前对数据进行了标准化处理。

3 结果与讨论

3.1 地表水水质评价

采用水污染指数法评价汾河下游 15 个监测断面的水质状况。由表 3 可知: 汾河下游水质的 WPI 的多年平均值介于 74.1—636.2。水质以劣 V 类水为主, 断面占比为 66.7%, 主要分布在汾河干流、七一水库和小河口水库, 其中赵城断面的水质污染最为严重。其余水库断面的水质状况相对较好, 曲亭水库和滹河水库的水污染程度最轻。对比 2017 年各断面水质状况及保护目标, 发现除浍河水库外, 其余断面均未达到水质要求。总体来看, 汾河下游整体水质状况较差。

3.2 地表水水质年际变化特征

2013—2017 年汾河下游劣 V 类水的占比平均达 60% 以上, V 类和劣 V 类水的占比平均达 78% 以上 (图 2a)。由于缺失曲亭水库及小河口水库监测断面 2013 年的水质数据, 因此当年劣 V 类水的占比被高估。水质最差的是 2015 年, V 类和劣 V 类水的断面占比高达 93%。针对汾河水质及水生态状况恶化的实际情况, 山西省 2015 年制定出台了汾河流域生态修复规划纲要 (2015—2030 年) (https://slt.shanxi.gov.cn/sltzwgk/gzdt/tzgggs/202111/t20211110_3143417.html), 同年启动了第五次汾河流域生态修复工程, 以上举措对于改善汾河下游地区 V 类和劣 V 类水质状况, 特别是 V 类水向 IV 类水的转换有积极的作用。

表3 汾河下游监测断面水质污染指数法评价结果
Tab. 3 Evaluation results of water pollution index method for monitoring sections of the downstream of Fenhe River

序号 No.	监测断面 Monitoring sections	河流 River	WPI		水质要求 Water quality requirements	2017 年水质 Water quality in 2017
			多年平均值 Multi-year average from 2013 to 2017	2017 年 Year of 2017		
1	道美桥 Daomei Bridge	汾河 Fenhe River	316.0	332.0	V	劣 V Inferior Class V
2	赵城 Zhaocheng	汾河 Fenhe River	636.2	255.0	V	劣 V Inferior Class V
3	洪洞 Hongtong	汾河 Fenhe River	444.2	232.0	V	劣 V Inferior Class V
4	甘亭 Ganting	汾河 Fenhe River	367.7	182.0	V	劣 V Inferior Class V
5	尧都 Yaodu	汾河 Fenhe River	262.4	204.0	V	劣 V Inferior Class V
6	柴庄 Chaizhuang	汾河 Fenhe River	218.4	196.0	V	劣 V Inferior Class V
7	侯马 Houma	汾河 Fenhe River	213.3	236.6	V	劣 V Inferior Class V
8	高河桥 Gaohe Bridge	涝洳河 Laoju River	434.0	292.0	V	劣 V Inferior Class V
9	曲亭水库 Quting Reservoir	曲亭河 Quting River	74.1	61.2	III	IV
10	涝河水库 Laohe Reservoir	涝河 Laohe River	74.1	60.4	III	IV
11	洳河水库 Juhe Reservoir	洳河 Juhe River	83.9	70.0	III	IV
12	七一水库 Qiyi Reservoir	汾河及龙子祠泉 Fenhe River and Longzici Spring	106.6	111.2	V	劣 V Inferior Class V
13	小河口水库 Xiaohekou Reservoir	浍河 Huihe River	103.3	94.0	III	V
14	浍河水库 Huihe Reservoir	浍河 Huihe River	82.5	80.0	V	IV
15	浍河二库 Huihe Second Reservoir	浍河 Huihe River	91.5	111.0	V	劣 V Inferior Class V

从主要污染物的年际变化上来看, 2017年 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 的水污染指数相较 2015 年和 2016 年有了明显降低。因此, 对汾河流域的水治理显著降低了地表水体中上述主要污染物的浓度, 有效改善了汾河下游水质状况。

对各监测断面的 WPI 值的年际变化进行分析 (图 3), 发现道美桥、赵城、洪洞、甘亭和高河桥, 整体水质较差, 水质的年际波动显著。上述断面主要位于承接废污水量较大的干流, 废污

水成分和来源复杂, 综合治理难度大, 是汾河下游水环境治理和水生态修复的重点, 应加强观测与监控。

3.3 地表水水质空间分布特征

以研究区 15 个监测断面的水质多年平均值作为基础数据, 进行水质指标空间尺度的层次聚类分析。对聚类分析结果进行了贝叶斯判别分析, 2 组分类的判别正确率为 95.4%, 3 组分类的判别正确率为 90.7%。因此, 水质监测断面应当分为 2 组

(图 4), A 组为甘亭、尧都、洪洞、赵城、道美桥和高河桥; B 组为其余断面。交叉验证正确率达 80%, 表明总体分类结果较好。结合各采样断面

WPI 值的空间分布 (图 5) 可知: A 组的监测断面主要位于汾河干流尧都断面的上游及滹沱河, 其水质情况整体上劣于 B 组。

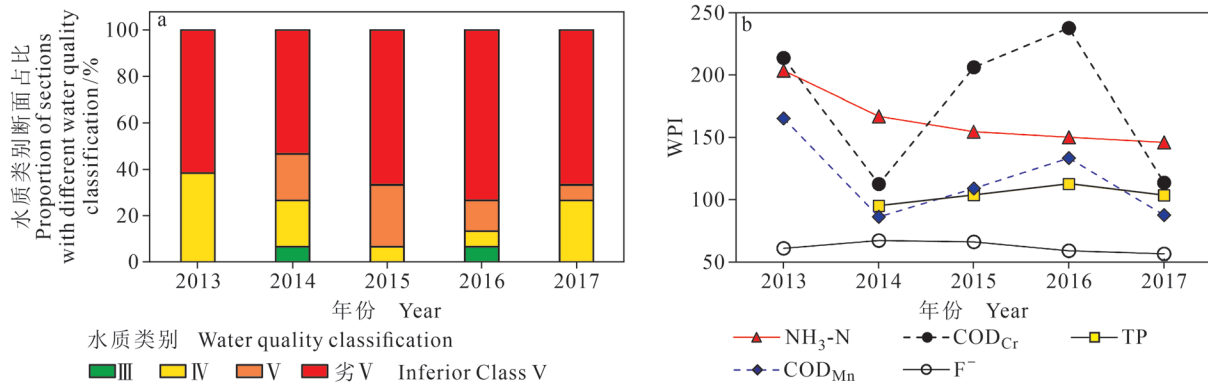


图 2 汾河下游水质年际变化图: 水质类别断面占比 (a) 及主要污染指标 (b)

Fig. 2 Interannual variations of water quality in the downstream of Fenhe River: proportion of sections with different water quality categories (a) and main pollution indexes (b)

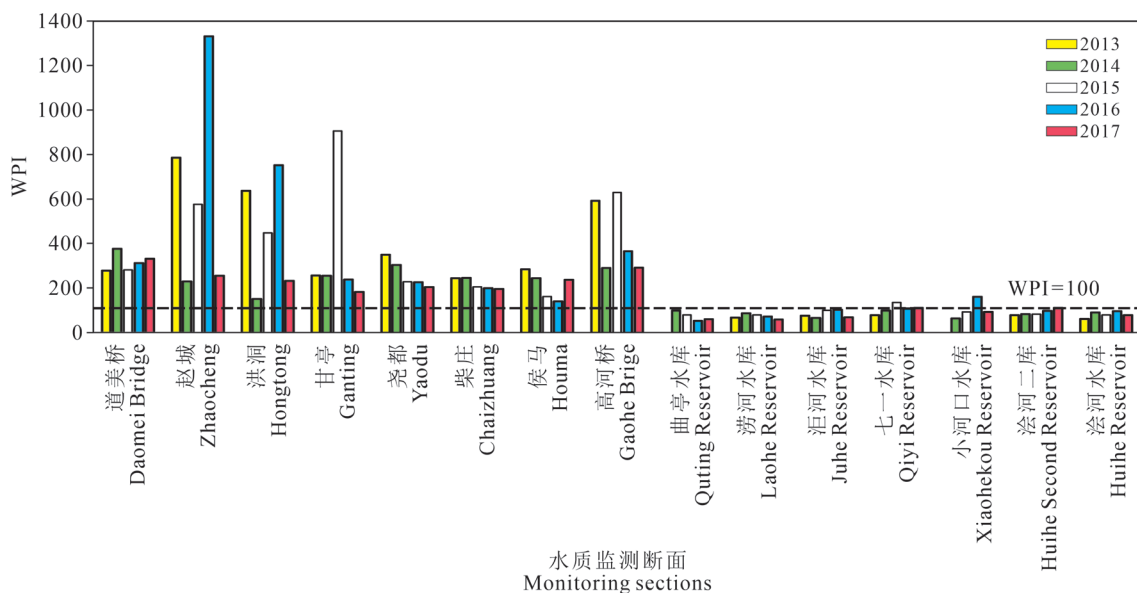


图 3 水质监测断面 WPI 指数的年际变化

Fig. 3 Interannual change of WPI of water quality monitoring sections

水质指标的箱线图能够指示汾河下游地区水质指标的空间差异性 (图 6), 总体上, A 组的营养盐类指标 (TP、NH₃-N)、耗氧有机物 (COD_{Mn}、COD_{Cr})、有毒有机物 (VP、CN)、锌、氟的浓度远高于 B 组, DO 的浓度远低于 B 组, 进一步表明水质受地理位置空间分布影响较大。A 组的监测断面主要分布在汾河干流, 承接了上游及支流的废污水。另一方面, 这些断面位于临汾市人口聚集

区, 人口密度大, 经济较发达, 农业资源丰富, 工业企业集中, 特别是煤炭、冶金、焦化业发达。因此, 受到生活污水、农业废水和工业废水的多重影响, 水体污染严重, WPI 值的多年平均值在 200 以上。B 组的监测断面一部分位于汾河支流, 人口密度相对较少, 工业活动较少, 水质的污染程度相对较轻; 柴庄和侯马监测断面位于汾河干流的下游, 近年来, 在洪洞至尧都屯里桥段开展的流域综

合治理提升工程缓解了该河段的污染程度, 同时由于沿程降解和支流汇入稀释作用, 汾河下游地区的水质有一定的改善。水质的空间分异特征同样表明临汾市汾河流域的水环境治理重点为汾河干道美桥—尧都段和涝汭河。

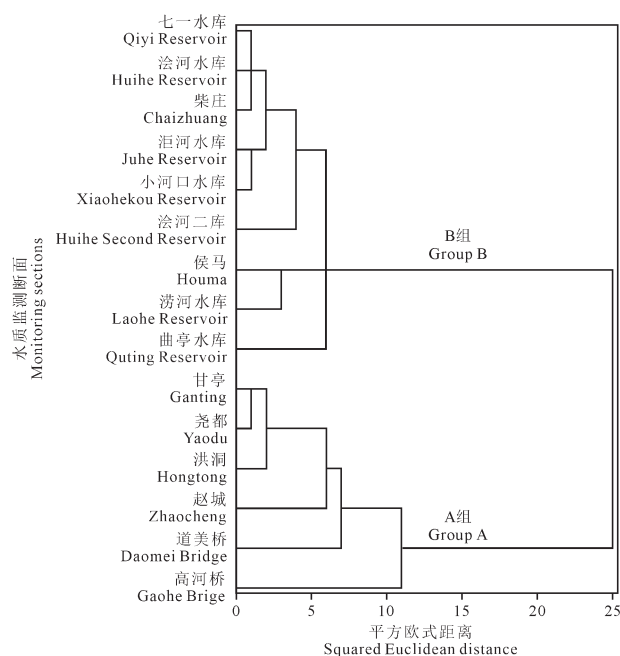


图4 汾河下游地表水水质的空间尺度聚类分析
Fig. 4 Spatial cluster analysis of water quality in the downstream of Fenhe River

3.4 污染源空间分布特征

3.4.1 污染源解析

基于临汾盆地 2013—2017 年的地表水污染监测数据, 采用因子分析法对汾河下游地表水污染源进行解析。KMO 检验值为 0.597, Bartlett 球形检验 $P < 0.05$, 表明地表水水质因子之间具有一定的相关性, 适合做因子分析。基于因子分析提取的公因子 (F1—F6), 采用 Kaiser 标准化的正交旋转法将因子载荷矩阵进行旋转, 如表 3 所示, 其累计方差贡献率为 74.40%, 包含了原始数据的绝大部分信息, 表明提取的因子符合要求。

由表 4 可知: 公因子 F1 的方差贡献率为 16.96%, TP、F⁻、DO 和 VP 所占的因子载荷较大, 其中 TP 和 F⁻ 与 F1 有很强正相关性, DO 与 F1 呈负相关关系。公因子 F2 的方差贡献率为 14.87%, COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 与 F2 有很强正相关性。公因子 F3 与特征因子 Hg 和 NH₃-N 有很强正相关性。公因子 F1、F2 和 F3 的 8 个污染指数

主要与营养盐和耗氧有机污染物有关, 其潜在的污染源包括工业废水、城市生活污水、农业排水、畜禽养殖废水和农田地表径流等。Hg 主要来自于工业排放。公因子 F4 (方差贡献率 12.06%, 特征因子 Zn、Gd 和 CN)、公因子 F5 (方差贡献率 9.52%, 特征因子 As、Cr⁶⁺ 和 Pb)、公因子 F6 (方差贡献率 8.86%, 特征因子 Cu 和 pH) 主要表征了受工业污染源影响的重金属污染。

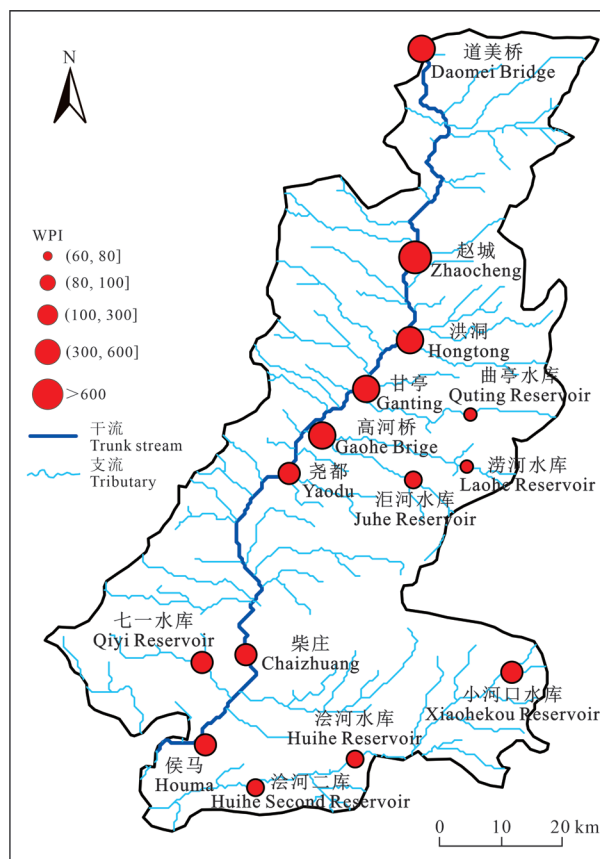


图5 水质监测断面 WPI 指数多年平均值的空间分布图
Fig. 5 The spatial distribution map of the multi-year average value of the WPI of water quality monitoring section

3.4.2 污染源空间分布特征

为进一步深入探究汾河下游地表水污染源的空间分布特征, 利用前述因子分析得到的监测断面在各主因子中的因子得分, 以各公因子所对应的方差贡献率比例作为权重, 计算出监测断面综合污染因子得分值, 综合评价该水质断面的污染程度。

公因子 F1 的高值区域主要分布在霍州市、洪洞县、尧都区及襄汾县的部分地区 (图 7)。这些区域人口集中, 河流水质一方面受到了含磷、

氟化物和挥发酚的城市中心生活污水排放的影响，在部分河段生活污水直排的现象仍然存在；另一方面，农作物生产过程中施用的化肥、禽畜养殖产生的废水会导致磷、氮等营养盐通过雨水冲刷进入地表水体（马小雪和王腊春，2014；Haji Gholizadeh et al, 2016；杨中文等，2020）。此外，该地区工业企业密集，来自食品、制药、化肥厂、木材防腐、绝缘材料、化学原料、造纸工业等生产过程中排放的废水使磷、挥发酚、氟化物富集于附近河道（解莹等，2012；秦延文等，2018；Zhao et al, 2020）。当水体中磷等营养盐及有机物含量增加时，水体中的溶解氧消耗加剧（Haji Gholizadeh et al, 2016），使水体发臭、水质变差，这也是溶解氧与 F1 呈负相关的原因。

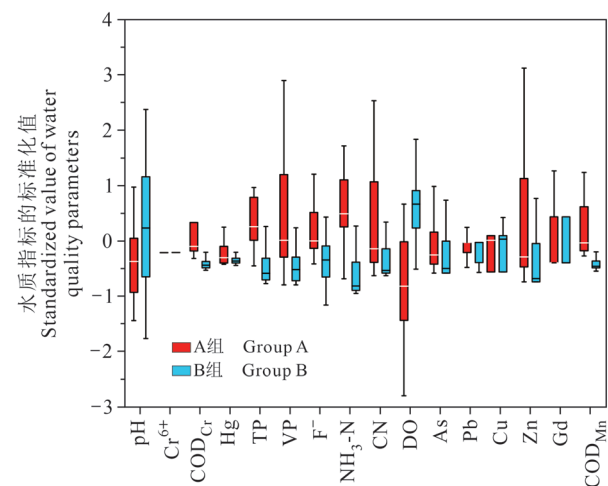


图 6 汾河下游水质指标空间尺度的差异性
Fig. 6 Spatial variation of water quality parameters in the downstream of Fenhe River

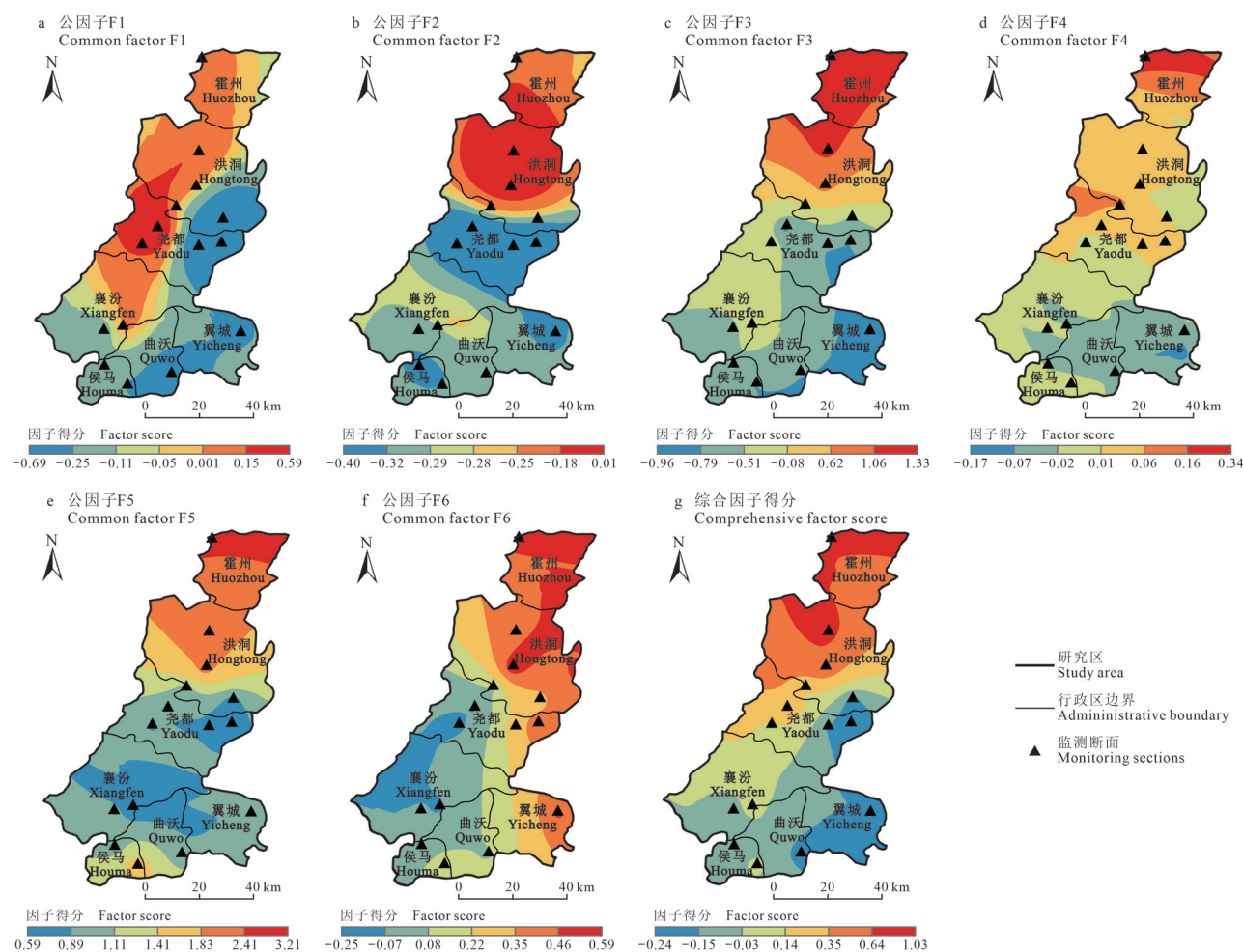
表 4 因子分析旋转因子载荷矩阵						
Tab. 4 Loading of 16 variables on significant principal components for factor analysis						
水质指标 Water quality parameters	公因子 Common factor					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
TP	0.94	0.05	0.07	-0.02	0.08	-0.06
F ⁻	0.92	-0.02	0.00	-0.01	-0.06	-0.01
DO	-0.64	-0.42	-0.41	-0.08	-0.23	0.08
VP	0.44	0.44	0.06	0.24	-0.27	0.16
COD _{Mn}	0.07	0.98	-0.02	-0.02	0.02	-0.02
COD _{Cr}	0.04	0.96	-0.04	-0.06	-0.03	-0.07
Hg	-0.06	-0.10	0.86	0.05	-0.02	-0.09
NH ₃ -N	0.43	0.06	0.75	-0.05	0.01	-0.22
Zn	-0.02	-0.05	0.10	0.84	-0.22	0.22
Gd	-0.03	-0.02	-0.20	0.83	0.25	-0.21
CN	0.12	0.05	0.42	0.62	-0.26	0.20
As	0.05	-0.09	-0.11	-0.06	0.73	0.03
Cr ⁶⁺	0.02	0.16	0.31	0.05	0.70	0.14
Pb	0.06	0.09	0.29	0.16	-0.44	0.25
Cu	0.05	0.04	-0.09	-0.01	0.05	0.85
pH	-0.39	-0.28	-0.21	0.21	-0.02	0.62
特征值 Characteristic value	2.71	2.38	1.94	1.93	1.52	1.42
方差贡献率 Variance contribution/%	16.96	14.87	12.13	12.06	9.52	8.86
累积方差贡献 Cumulative variance contribution/%	16.96	31.83	43.96	56.02	65.54	74.40

公因子 F2 和 F3 的高值分布区域相似，主要集中在霍州市及洪洞县。COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 能够指示水体的耗氧有机污染物水平，污染来源包括工业废水排放和生活污水排放（邵志江等，2020）。根据临汾市 2017 年重点排污单位名录，霍州市和洪

洞县域内主要有霍州煤电集团有限责任公司辛置煤矿、山西三维集团股份有限公司及山西焦化股份有限公司，涉及化工产品、化纤产品、焦炭、矿产资源开采等多个产业，河道承接了大量工业废水，可能是造成 COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 具有较大因子载荷的

原因。氨氮是目前汾河下游干流的主要水质污染指标, 高浓度的氨氮一般主要来自生活污水、大量使用化肥的农田地表径流、禽畜养殖等 (Zhao et al, 2020), 同时, 氨氮也指征了工业废水 (化学原料、化肥厂) 的污染 (邱瑀等, 2017; 后希

康等, 2021)。从临汾市农业气候资源的整体分布来看, 公因子 F3 的低值区优于高值区, 因此霍州市及洪洞县的氨氮的高值可能主要受到生活污水和工业废水的影响。地表水中的汞及其化合物主要来源于金属冶炼、造纸、塑料等工业废水。



图中深色代表因子得分值高, 污染程度严重; 浅色代表因子得分低, 污染程度较轻。

The dark color in the figures mean that the factor score is high and the pollution level is serious, and light color in the figures represent low factor score and slightly pollution.

图7 公因子 TP、 F^- 、DO 和 VP (a); COD_{Mn} 和 COD_{Cr} (b); Hg 和 NH_3-N (c); Zn、Gd 和 CN (d); As、 Cr^{6+} 和 Pb (e); Cu 和 pH (f) 及综合污染因子 (g) 得分值的空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution map of common factors TP, F^- , DO and VP (a); COD_{Mn} and COD_{Cr} (b); Hg and NH_3-N (c); Zn, Gd and CN (d); As, Cr^{6+} and Pb (e); Cu and pH (f); comprehensive pollution factor score (g)

公因子 F4 和 F5 分值较高的区域集中在霍州市及洪洞县的部分地区。重金属 (Zn、Gd、As、 Cr^{6+} 和 Pb) 和有毒有机物 (CN) 主要受工业污染源的影响, 结合汾河流域工业行业类型来看, 主要源于冶金工业、煤化工企业、电镀企业废水排放 (王翠榆等, 2012; Kumar et al, 2021)。由于铜矿主要分布在塔儿山—二峰山一带的襄汾、翼

城、曲沃等县, 因此公因子 F6 的高值集中分布在两地区, 其一在霍州市和洪洞县, 另一区域出现在翼城、侯马和曲沃县的部分地区。水体的 pH 是水体物理化学特征的综合指标, 受流域基岩、土壤类型及水生植物等多方面因素影响 (郝昊等, 2015)。

结合监测断面综合因子得分值与 WPI 指数多

年平均值的空间分布图,发现汾河下游地表水的污染程度具有从北向南、从上游向下游减弱的特征,且污染源具有显著的多源性。城市生活污水、农业面源污染在汾河下游地区普遍存在,在水质最差的霍州市、洪洞县,工业污染的影响最大。因此,临汾当地管理部门应当严格控制工业污染,杜绝沿河各类企业的不达标排放,抢抓山西产业转型的机遇,调整区域产业布局,发展新兴产业,推动清洁生产,坚定走绿色、可持续的高质量发展之路。其次,通过完善城市给排水管网系统、提高污水处理效率等方式加强城乡生活污水治理。对于农业面源污染,要推广科学施肥、安全用药,建立畜禽粪污无害化处理体系,从而降低进入河网的氮、磷等污染物浓度。

4 结论

(1) 汾河下游 WPI 的多年平均值为 74.1—636.2,以《GB 3838—2002,地表水环境质量标准》劣 V 类水为主,赵城断面的水质污染最为严重。2017 年除汾河水库外,其余断面均未达到水质要求。总体来看,汾河下游水质状况较差。

(2) 2015 年水质最差,V 类和劣 V 类水的占比高达 93%,之后水质状况有所改善。水质年际波动大的道美桥、赵城、洪洞、甘亭和高河桥河段是汾河下游水环境治理和水生态修复的重点。

(3) 在空间尺度上,位于汾河干流尧都断面上游及涉汨河的甘亭、尧都、洪洞、赵城、道美桥和高河桥监测断面,具有高营养盐、高耗氧有机物、高有毒有机物及低 DO 浓度的特征,水质情况整体上劣于其他断面,应加强对上述河段的污染治理。

(4) 因子分析结果表明汾河下游典型污染物为 TP、F⁻、DO 和耗氧有机污染物(COD_{Mn}、COD_{Cr}),其次为 Hg 和 NH₃-N,同时还受到各种重金属污染的影响。污染程度的空间分布具有从北向南、从上游向下游逐渐减弱的特征。城市生活污水、农业面源污染在汾河下游地区普遍存在,在水质最差的霍州市、洪洞县,工业污染的影响最大。

参考文献

曹建文,夏日元,唐仲华,等. 2021. 粤港澳大湾区地下水资源特征及开发潜力 [J]. *中国地质*, 48(4): 1075–1093. [Cao J W, Xia R Y, Tang Z H, et al. 2021. Groundwater resources in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay

Area and its development potential [J]. *Geology in China*, 48(4): 1075–1093.]

国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. 2002. GB 3838—2002,地表水环境质量标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2002. GB 3838—2002, environmental quality standards for surface water [S]. Beijing: China Environment Science Press.]

国家环境保护总局. 2003. HJ/T 91—2002,地表水和污水监测技术规范 [S]. 北京: 中国环境科学出版社. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2003. HJ/T 91—2002, technical specifications requirements for monitoring of surface water and waste waters [S]. Beijing: China Environment Science Press.]

郝 昊,王晓昌,张琼华,等. 2015. 宜兴城市内河污染物时空分布及解析 [J]. *环境工程学报*, 9(1): 125–130. [Hao H, Wang X C, Zhang Q H, et al. 2015. Spatiotemporal distribution and analysis for pollutants in inland rivers of Yixing, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 9(1): 125–130.]

后希康,张 凯,段平洲,等. 2021. 基于 APCS-MLR 模型的沱河流域污染源解析 [J]. *环境科学研究*, 34(10): 2350–2357. [Hou X K, Zhang K, Duan P Z, et al. 2021. Pollution source apportionment of Tuohe River based on absolute principal component score-multiple linear regression [J]. *Research of Environmental Sciences*, 34(10): 2350–2357.]

胡德秀,李 立,张 艳,等. 2018. 渭河干流陕西段综合治理前后的水质变化与趋势 [J]. *水土保持通报*, 38(5): 91–96. [Hu D X, Li L, Zhang Y, et al. 2018. Water quality change before and after comprehensive treatment in Shaanxi section of Weihe main stream [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 38(5): 91–96.]

胡海翔. 2021. 吕梁市三川河水质分析评价 [J]. *山西水土保持科技*, (2): 11–13. [Hu H X. 2021. Analysis and evaluation of water quality of Sanchuan River in Luliang City [J]. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, (2): 11–13.]

景朝霞,夏 军,张 翔,等. 2019. 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*, 32(1): 104–115. [Jing Z X, Xia J, Zhang X, et al. 2019. Spatial

- and temporal distribution and variation of water quality in the middle and downstream of Hanjiang River [J]. *Research of Environmental Sciences*, 32(1): 104–115.]
- 李义禄, 张玉虎, 贾海峰, 等. 2014. 苏州古城区水体污染时空分异特征及污染源解析 [J]. *环境科学学报*, 34(4): 1032–1044. [Li Y L, Zhang Y H, Jia H F, et al. 2014. Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in ancient town of Suzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 34(4): 1032–1044.]
- 林若静, 孙从建, 陈 伟, 等. 2021. 汾河下游河谷地区地下水水质特征分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 35(11): 135–142. [Lin R J, Sun C J, Chen W, et al. 2021. Groundwater quality characteristics in downstream valley of Fenhe River [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 35(11): 135–142.]
- 刘 琰, 郑丙辉, 付 青, 等. 2013. 水污染指数法在河流水质评价中的应用研究 [J]. *中国环境监测*, 29(3): 49–55. [Liu Y, Zheng B H, Fu Q, et al. 2013. Application of water pollution index in water quality assessment of rivers [J]. *Environmental Monitoring in China*, 29(3): 49–55.]
- 吕 安, 邱 文, 盛若虹, 等. 2012. 汾河水质状况研究 [J]. *环境科学与管理*, 37(10): 97–101. [Lü A, Qiu W, Sheng R H, et al. 2012. Research on water quality of Fenhe River [J]. *Environmental Science and Management*, 37(10): 97–101.]
- 吕振豫, 穆建新. 2017. 黄河流域水质污染时空演变特征研究 [J]. *人民黄河*, 39(4): 66–70, 77. [Lü Z Y, Mu J X. 2017. Study on spatial and temporal evolution feature of water quality in Yellow River Basin [J]. *Yellow River*, 39(4): 66–70, 77.]
- 马小雪, 王腊春. 2014. 里下河地区主要水环境污染物的空间分布特性研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 25(6): 1–6. [Ma X X, Wang L C. 2014. Spatial distribution feature of main contaminations in aquatic environment of Lixia River [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 25(6): 1–6.]
- 秦 聪, 郭 华. 2020. 基于熵权-TOPSIS法的汾河水质评价 [J]. *水资源开发与管理*, 18(9): 34–39. [Qin C, Guo H. 2020. Evaluation of Fenhe River water quality based on EW-TOPSIS method [J]. *Water Resources Development and Management*, 18(9): 34–39.]
- 秦延文, 马迎群, 王丽婧, 等. 2018. 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*, 31(1): 9–14. [Qin Y W, Ma Y Q, Wang L J, et al. 2018. Pollution of the total phosphorus in the Yangtze River Basin: distribution characteristics, source and control strategy [J]. *Research of Environmental Sciences*, 31(1): 9–14.]
- 邱 瑀, 卢 诚, 徐 泽, 等. 2017. 湟水河流域水质时空变化特征及其污染源解析 [J]. *环境科学学报*, 37(8): 2829–2837. [Qiu Y, Lu C, Xu Z, et al. 2017. Spatio-temporal variation characteristics and water pollution sources in the Huangshui River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 37(8): 2829–2837.]
- 邵志江, 刘 莲, 汪 涛. 2020. 永定河上游张家口地区主要河流污染物来源解析 [J]. *环境污染与防治*, 42(2): 204–211. [Shao Z J, Liu L, Wang T. 2020. Source analysis of main rivers' pollutants of the upper reaches of Yongding River in Zhangjiakou area [J]. *Environmental Pollution & Control*, 42(2): 204–211.]
- 王 超, 张 洪, 唐文忠, 等. 2015. 海河流域主要污染物排放强度及其源结构解析——以2007年为例 [J]. *环境科学学报*, 35(8): 2345–2353. [Wang C, Zhang H, Tang W Z, et al. 2015. Structure analysis of river pollution source in the Haihe River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 35(8): 2345–2353.]
- 王翠榆, 杨永辉, 周 丰, 等. 2012. 沁河流域水体污染物时空分异特征及潜在污染源识别 [J]. *环境科学学报*, 32(9): 2267–2278. [Wang C Y, Yang Y H, Zhou F, et al. 2012. Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in River Qinhe Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 32(9): 2267–2278.]
- 解 莹, 李叙勇, 王慧亮, 等. 2012. 滦河流域上游地区主要河流水污染特征及评价 [J]. *环境科学学报*, 32(3): 645–653. [Xie Y, Li X Y, Wang H L, et al. 2012. Stream pollution analysis and hydrochemical assessment of the upper Luanhe River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 32(3): 645–653.]
- 杨 飞, 易文利, 董 奇, 等. 2018. 榆林市黄河水系主要河流水质现状评价与分析 [J]. *宝鸡文理学院学报(自然科学版)*, 38(1): 71–76. [Yang F, Yi W L, Dong Q, et al. 2018. Evaluation and analysis of the water quality of the main rivers in the drainage system of the Yellow River within the territory of Yulin City [J]. *Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science)*, 38(1): 71–76.]
- 杨中文, 张 萌, 郝彩莲, 等. 2020. 基于源汇过程模拟的鄱阳湖流域总磷污染源解析 [J]. *环境科学研究*, 33(11): 2493–2506. [Yang Z W, Zhang M, Hao C L, et al.

2020. Source apportionment of total phosphorus pollution in Poyang Lake Basin based on source-sink process modeling [J]. *Research of Environmental Sciences*, 33(11): 2493–2506.]
- 于法稳, 方 兰. 2020. 黄河流域生态保护和高质量发展的若干问题 [J]. *中国软科学*, (6): 85–95. [Yu F W, Fang L. 2020. Issues regarding the ecological protection and high-quality development of Yellow River Basin [J]. *China Soft Science*, (6): 85–95.]
- 赵萌萌, 范桃桃, Brown E, 等. 2018. 黄河流域夏季水质评价及管理对策 [J]. *地球环境学报*, 9(4): 305–315. [Zhao M M, Fan T T, Brown E, et al. 2018. Water quality assessment and sustainable strategy for the Yellow River in summertime [J]. *Journal of Earth Environment*, 9(4): 305–315.]
- 中国环境监测总站. 1994. 环境水质监测质量保证手册 [M]. 第二版. 北京: 化学工业出版社: 1–890. [China National Environmental Monitoring Center. 1994. Quality assurance manual for environmental water quality monitoring [M]. 2nd edition. Beijing: Chemical Industry Press: 1–890.]
- Deng C N, Liu L S, Li H S, et al. 2021. A data-driven framework for spatiotemporal characteristics, complexity dynamics, and environmental risk evaluation of river water quality [J]. *Science of the Total Environment*, 785: 147134. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147134.
- Haji Gholizadeh M, Melesse A M, Reddi L. 2016. Water quality assessment and apportionment of pollution sources using APCS-MLR and PMF receptor modeling techniques in three major rivers of South Florida [J]. *Science of the Total Environment*, 566/567: 1552–1567.
- Hong Z D, Zhao Q H, Chang J L, et al. 2020. Evaluation of water quality and heavy metals in wetlands along the Yellow River in Henan Province [J]. *Sustainability*, 12(4). DOI: 10.3390/su12041300.
- Kumar A, Matta G, Bhatnagar S. 2021. A coherent approach of Water Quality Indices and Multivariate Statistical Models to estimate the water quality and pollution source apportionment of River Ganga System in Himalayan region, Uttarakhand, India [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31): 42837–42852.
- Kuo Y M, Liu W W, Zhao E M, et al. 2019. Water quality variability in the middle and down streams of Han River under the influence of the Middle Route of South-North Water diversion project, China [J]. *Journal of Hydrology*, 569: 218–229.
- Zhang H, Li H F, Yu H R, et al. 2020. Water quality assessment and pollution source apportionment using multi-statistic and APCS-MLR modeling techniques in Min River Basin, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 27(33): 41987–42000.
- Zhao M M, Wang S M, Chen Y P, et al. 2020. Pollution status of the Yellow River tributaries in middle and lower reaches [J]. *Science of the Total Environment*, 722: 137861. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137861.