

基于主成分分析的北洛河水质时空分布特征及污染源解析

张翔¹, 李愆²

(1.生态环境部黄河流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 河南 郑州 450003; 2.河南工业贸易职业学院, 河南 郑州 450003)

摘要: [目的] 对2014—2020年北洛河干流4个监测断面的水质状况进行分析和评价, 为进一步改善该流域水环境状况提供理论依据。[方法] 根据北洛河水量的年内分配规律, 对丰水期、平水期和枯水期进行划分, 采用主成分分析和综合水质标识指数法, 对北洛河主要污染指标进行筛选和评价。[结果] COD, 氨氮和氟化物是影响北洛河水体水质最显著的指标。从沿程分布上看, 北洛河干流上中游水质最好, 下游水质相对较差; 从时空分布上看2018年之后北洛河干流水质改善明显, 基本满足水功能区Ⅲ类水质要求。[结论] 北洛河上中游河段主要污染源来自于沿岸城镇生活污水和畜禽养殖废水排放; 下游河段煤化工等企业工业废水和氮肥施用引起的农业面源污染是影响河道水质的主要因素。

关键词: 北洛河; 主成分分析; 综合水质标识指数; 水质分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0153-08

中图分类号: X824, TV11

文献参数: 张翔, 李愆. 基于主成分分析的北洛河水质时空分布特征及污染源解析[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 153-160. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.020; Zhang Xiang, Li Su. Spatial and temporal distribution characteristics of water quality in Beiluo River and pollution sources based on principal component analysis [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 153-160.

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Water Quality in Beiluo River and Pollution Sources Based on Principal Component Analysis

Zhang Xiang¹, Li Su²

(1. Ecological Environment Monitoring and Scientific Research Centre of Yellow River Basin Ecology and Environment Administration Ministry of Ecology and Environment, Zhengzhou, He'nan 450003, China; 2. He'nan Industry and Trade Vocational College, Zhengzhou, He'nan 450003, China)

Abstract: [Objective] The water quality of four monitoring sections of the main stream of the Beiluo River from 2014 to 2020 were evaluated and analyzed in order to provide a basis for further improving the water environment of the river basin. [Methods] The main pollution indicators of the Beiluo River were screened and evaluated using principal component analysis and a comprehensive water quality identification index method according to the law of intra-annual distribution of water volume in the Beiluo River. A given year was divided into the wet season, the flat water season, and the dry season. [Results] Chemical oxygen demand, ammonia nitrogen, and fluoride were the most significant indicators affecting the water quality of the Beiluo River. From the distribution along the course of the river, the water quality in middle reaches of the main stream of Beiluo River was the best, followed by the upper reaches. The water quality in the lower reaches was relatively poor. The water quality in the main stream of the Beiluo River improved significantly after 2018, basically meeting the requirements of water functional area Ⅲ water quality. [Conclusion] The main source of pollution in the upstream and midstream sections of Beiluo River came from the discharge of

收稿日期: 2021-12-24

修回日期: 2022-03-08

资助项目: 生态环境部财政拨款项目“区域水生态环境保护责任落实与项目管理”(WX2021-0775)

第一作者: 张翔(1989—), 男(汉族), 河南省郑州市人, 硕士, 工程师, 主要从事生态环境监测与评价研究。Email: zhangx198903@163.com。

通讯作者: 李愆(1992—), 女(汉族), 河南省郑州市人, 硕士, 助教, 主要从事环境空间规划设计。Email: 18530099109@163.com。

domestic sewage and livestock breeding wastewater from coastal towns. Industrial wastewater from the coal chemical industry and other enterprises in the downstream section of the river and agricultural surface source pollution caused by nitrogen fertilizer application were the main factors affecting the water quality of the river.

Keywords: Beiluo River; principal component analysis; comprehensive identification index; water quality analysis

北洛河是渭河的一级支流,也是陕西省境内最长的河流,同时还是黄河中游水土流失最严重的区域之一,其水土流失面积达 $1.67 \times 10^4 \text{ km}^2$,多年输沙量 $6.50 \times 10^7 \text{ t}$ 。近年来随着科学技术的飞速发展,北洛河流域的能源优势地位逐步凸显,上游地区目前已探明石油储量 $5.80 \times 10^8 \text{ t}$ [1-2]。与此同时,煤炭石油的开采也导致水环境污染问题日益突出。目前对北洛河的研究多集中在水土流失和泥沙径流时空演变等方面,而对干流整体水质状况及污染物的溯源分析略显不足。单因子评价法目前是我国地表水水质状况评价中采用的方法,但是其以单项指标的最差等级代表断面的综合水质类别,以偏概全不能真实反映水体类别。其他常见评价方法有模糊评价法、层次分析法、综合水质标识指数法,其中模糊评价以矩阵形式表征评价结果,结论不够直观;层次分析法数学运算复杂,易受主观因素影响[3-4]。综合水质标识指数法计算过程相对简单,能够定量和定性地对水质状况进行评价,区分同一水质类别情况下,水体质量的高低[5-7]。因此,本研究采用综合水质标识指数法对2014—2020年北洛河干流水质时空水期分布特征和主要污染指标进行研究,旨在全面掌握北洛河水体水

质状况,为“十四五”期间打好污染防治攻坚战和进一步改善流域水环境状况提供基础依据。

1 研究区概况

北洛河发源于陕北定边县白于山,从北向南依次流经吴旗、富县、白水、澄城、蒲城,在大荔县韦林镇的仓西村汇入渭河,全长 680 km [8]。根据水文特征和地貌特点,并结合《全国重要江河湖泊水功能区划(2011—2030年)》,北洛河被划分为4个水功能区。其中源头至延安市甘泉县为上游河段,属于北洛河吴旗源头水保护区(代表断面吴旗),其地貌特征为黄土丘陵沟壑区;甘泉县到渭南市白水县属于中游段,属于北洛河延安农业用水区(代表断面交口),该区域是黄土高原沟壑区。北洛河上中游河段两岸地形破碎,河道两岸沟坡相间,塬面高出河谷 300 m 左右,是黄河流域水土流失最严重的区域之一。白水县以下为下游河段,地处关中平原区,所属水功能区为北洛河延安渭南农业用水区(代表断面状头)受潼关高程的影响,在汛期下游河道淤积严重;北洛河汇入渭河前,设有北洛河入渭口断面,属于北洛河大荔农业用水区(表1)。

表 1 北洛河水功能区监测点位置

水功能区名称	断面名称	经度	纬度	水质目标
北洛河吴旗源头水保护区	吴旗	108°11'4"E	36°53'21"N	Ⅲ
北洛河延安农业用水区	交口	109°21'18"E	35°38'56"N	Ⅲ
北洛河延安渭南农业用水区	状头	109°50'1"E	35°2'1"N	Ⅲ
北洛河大荔农业用水区	北洛河入渭口	110°8'15"E	34°41'27"N	Ⅲ

2 评价项目与方法

2.1 评价指标的选择

根据《地表水资源质量评价技术规程(SL395-2007)》的相关要求,河流水质评价指标为《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》基本项目中除水温、总氮、粪大肠菌群以外的 21 项。但并非所有指标都会对河流水体状况产生显著影响,因此客观公正的遴选评价指标是水质评价的关键。主成分分析(PCA)是一种多元统计学方法,在保留原始数据信息的前提下,对数据做降维处理,从 21 项评价指标中筛选出贡献率最大、最能代表数据集合的主要评价指标[9]。运用 SPSS 23.0 软件进行主成分分析,首先对原始数据

进行标准化处理,消除各指标间的量纲影响;其次采用 KMO 和巴特利特(Bartlett)球形度检验对水质监测指标的相关性进行验证,判断原始数据是否适合进行主成分分析,当 KMO 系数值大于 0.50, Bartlett 球形度显著性小于 0.05 时,原始变量适宜采用主成分分析。最后提取主要评价指标,根据主成分特征值的大小和贡献率的百分比,一般选取特征值 > 1 且累计方差贡献率高于 70% 的因子作为主要评价指标[10]。

2.2 水质评价方法

根据《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》,常规水质评价包括 21 项指标,是一个复杂的评价系统。采用单因子水质标识指数既可以定量判断水体水质类别,还可以定性分析不同的水质因子在同一类别中

的优劣程度,消除主观误差,从而更加客观反映各评价指标的贡献度。其计算公式如下,当水体水质为劣 V 类时,采用公式(2),其余情况用公式(1)计算:

$$P_i = K_i + \frac{C_i - S_{i下}}{S_{i上} - S_{i下}} \quad (1)$$

$$P_i = 6 + \frac{C_i - S_{i上}}{S_{i上}} \quad (2)$$

式中: P_i 表示单因子水质标识指数,无量纲; K_i 为第 i 项指标在《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》中所属的水质类别; C_i 为该指标的实际监测结果(mg/L); $S_{i下}$ 为第 i 项指标在《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》中所属类别的下限值(mg/L); $S_{i上}$ 为第 i 项指标在《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》中所属类别的上限值(mg/L)。

综合水质标识指数法是在各单因子水质标识指数的基础上,对其进行加权处理,综合水质标识指数分级标准详见表 2,其计算公式^[11-12]为:

$$I = X_1 \cdot X_2 X_3 X_4 X_5 \quad (3)$$

$$X_1 \cdot X_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (4)$$

式中: I 表示综合水质标识指数,无量纲; $X_1 \cdot X_2$ 为水质类别; X_3 为参与评价的指标中劣于地表水 III 类水质目标的个数; X_4 为 I 与地表水 III 类水质目标的比较结果,若 I 满足 III 类水质目标,则 X_4 等于 0,若 I 劣于 III 类水质目标,则 $X_4 = I - 3$; X_5 为参与评价

的指标个数; P_i 为参与评价的单因子水质标识指数值; n 为参与评价的指标个数。

表 2 综合水质标识指数类别划分标准

判断标准	水质类别	判断标准	水质类别
$1.0 \leq X_1 \cdot X_2 \leq 2.0$	I	$4.0 < X_1 \cdot X_2 \leq 5.0$	IV
$2.0 < X_1 \cdot X_2 \leq 3.0$	II	$5.0 < X_1 \cdot X_2 \leq 6.0$	V
$3.0 < X_1 \cdot X_2 \leq 4.0$	III	$6.0 < X_1 \cdot X_2 \leq 7.0$	劣 V

3 结果与分析

3.1 北洛河水期划分

为了探究北洛河不同水期水量对河流水体水质的影响,对北洛河状头水文站 1958—2005 年的水文数据统计分析(表 3)。北洛河年均流量为 $11.58 \text{ m}^3/\text{s}$,径流年内分配受降雨量影响明显,其中 7 月水量最大为 $34.87 \text{ m}^3/\text{s}$,占全年来水量的 25.1%;其次为 9 月,其来水量占全年的 16.2%,3 月流量最小,仅占全年总量的 2.7%。根据《水文基本术语和符号标准(GB/T50095-2014)》,按照年内北洛河不同月份流量与年均流量的大小关系,将其划分为丰、平、枯 3 个水期^[13],即月均流量大于 $11.58 \text{ m}^3/\text{s}$ 为丰水期,月均流量显著小于 $11.58 \text{ m}^3/\text{s}$ 为枯水期,介于两者之间的为平水期。因此可知,7—9 月为北洛河的丰水期,其来水量占全年总量的 57.3%;1—6 月为枯水期,其来水量仅占全年总量的 21%;10—12 月为平水期。

表 3 北洛河状头水文站逐月流量统计结果

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
月均流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	5.08	4.74	3.72	4.13	4.92	6.55	34.87	22.27	22.57	11.44	9.56	9.14
各月流量占总量比值/%	3.7	3.4	2.7	3.0	3.5	4.7	25.1	16.0	16.2	8.2	6.9	6.6

3.2 主成分分析

变量间相关性检验是主成分分析的前提,根据 2014—2020 年北洛河 4 个断面的监测数据预处理结果,铜、锌、铅、镉、汞、挥发酚等 11 项指标逐月数据均低于检出限,因此对化学需氧量(COD)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、5 d 生化需氧量(BOD_5)等其余 10 项指标进行主成分分析 KMO 和 Barlett 检验,计算结果详见表 4。从表 4 监测指标相关性分析结果可知,其 KMO 系数值 0.715 大于 0.50,Barlett 球形检验显著性小于 0.05,可对北洛河水质监测指标进行主成分分析。

表 4 KMO 和 Barlett 球形度检验

KMO 检验系数	Barlett 球形度检验		
	近似卡方	自由度	显著性
0.715	306.029	45	0.000

由表 5 可知,北洛河各监测指标特征值大于 1 的主成分有 3 个,其累计贡献率为 70.1%,说明这 3 项主成分因子基本可以全面反映北洛河水质特征信息。根据各指标的载荷矩阵结果,第 1 主成分特征值 4.172,方差贡献率 41.72% 均为最高,说明第一主成分对北洛河水质影响最大,其次为第 2 主成分,其特征值和方差贡献率分别为 1.742 和 17.42%。COD, COD_{Mn} 和 BOD_5 在第 1 主成分中载荷系数均大于 0.8,其中 COD 载荷系数最大为 0.968;其次是 COD_{Mn} 。COD 和 COD_{Mn} 被视为衡量水中有机污染物程度的重要因素^[14]。根据陕西煤炭资源及矿区划分情况,北洛河中游流经的白水县、黄陵县等分别属于渭北石炭二叠纪煤田和黄陇侏罗纪煤田,其煤炭资源约占陕西省煤炭资源的 17.4%^[15],工业污染是造成北洛河有机污染物超标的主要原因。

表 5 北洛河各监测指标主成分分析结果

指标	主成分因子载荷矩阵		
	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分
pH 值	-0.229	0.507	0.388
溶解氧	-0.428	0.356	0.115
COD _{Mn}	0.908	0.242	0.095
COD	0.968	0.084	0.065
BOD ₅	0.821	-0.390	-0.018
氨氮	0.407	0.678	-0.499
氟化物	0.256	-0.212	0.598
石油类	0.726	0.083	-0.167
总磷	0.133	0.531	-0.417
阴离子表面活性剂	0.755	0.397	0.327
特征值	4.172	1.742	1.093
方差贡献率/%	41.72	17.42	10.93
累计贡献率/%	41.72	59.14	70.07

氨氮和总磷是第 2 主成分中的主要影响指标,其载荷系数分别为 0.678 和 0.531。北洛河主要流经陕

西省延安市和渭南市,根据第 7 次人口普查数据显示,延安渭南两市常住人口比重占陕西省的 17.6%,仅次于渭河流域人口比重,居全省第 2 位,沿岸人口比重过高,市政管网雨污混流等情况尚未得到有效解决,导致生活污水处理设施负荷重,城镇居民生活污染是造成北洛河水体氨氮浓度上升的主要原因之一。由于北洛河下游位于关中平原,历史上为陕西省粮食主产区,农业面源污染也是导致北洛河氮磷浓度含量增加的主要原因之一。氟化物是第 3 主成分中的显著性影响因素,其载荷系数为 0.598。本次调查评价选取 3 个主成分因子载荷矩阵中系数最大的指标 COD、氨氮和氟化物,将其作为北洛河主要污染物进行综合水质标识指数评价。

3.3 水质分析结果

根据 2014—2020 年北洛河干流吴旗、交口、状头和北洛河入渭口断面的常规监测数据,选取 COD,氨氮和氟化物作为主要影响指标,按照丰、平、枯水期对其进行综合水质标识指数评价,结果如图 1—4 所示。

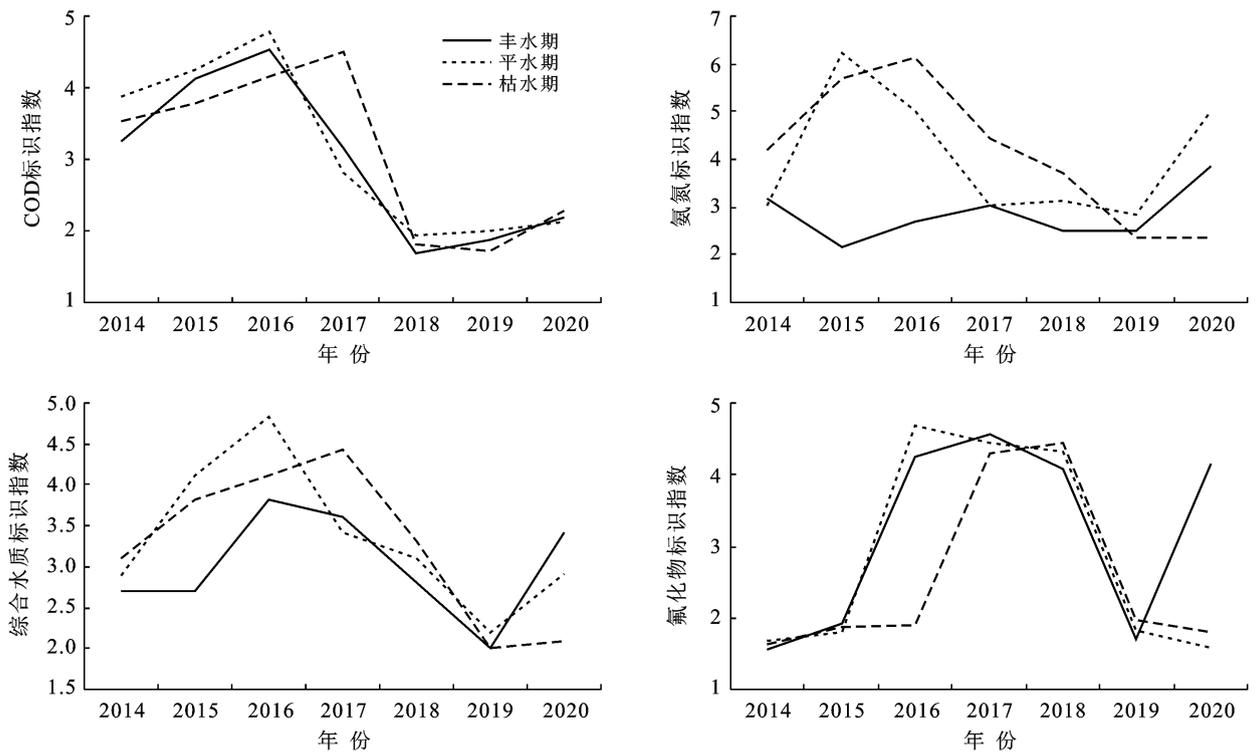


图 1 北洛河吴旗断面各水质标识指数趋势变化

3.3.1 北洛河上游水质 从图 1 可以看出,2017 年之前北洛河上游吴旗断面水体呈现恶化的趋势,多为 IV 类水;2017 年之后水质逐步改善,虽然 2020 年有所反弹,但基本维持在 III 类水水平。从各水期变化趋势上看,2016 年平水期水质最差,其次是 2017 年枯水

期,其综合水质标识指数分别为 4.831 3 和 4.431 3,均为 IV 类水;丰水期水质基本满足水功能区 III 类水质目标。陕北地区属于温带大陆性半干旱气候,降雨基本集中在汛期 7—9 月,其河道径流量占全年总量的 57.3%,其余月份河道水量较少。而每年 11 月下旬

至翌年 4 月为陕北地区土地封冻期,恰好与河道平水期和枯水期重合,严寒和偏少的流量导致河道水体自净能力降低,易导致水体污染情况的出现。根据《黄河泥沙公报》数据显示,2016 年以来北洛河年均输沙量为 1.20×10^7 t,其中上游来沙量占 87.7%。为了更加客观地分析各指标与径流泥沙量间的互相关系,采用《黄河泥沙公报》北洛河水文控制站历年水沙特征值统计数据,利用 SPSS 23.0 软件进行相关性分析,结果详见表 6。

表 6 北洛河吴旗断面各监测指标相关系数

项目名称	年径流量	年输沙量	氟化物	COD	氨氮
年径流量	1				
年输沙量	0.139	1			
氟化物	-0.135	0.655	1		
COD	-0.636	0.165	0.014	1	
氨氮	-0.715*	0.013	0.109	0.780*	1

注: * 表示在 0.05 水平上相关性显著。

从表 6 可以看出,氨氮与北洛河径流量之间呈显著负相关,其相关系数为 $-0.715 (p < 0.05)$,河道水量越大氨氮浓度越小;氨氮与 COD 浓度呈显著正相关,其相关系数为 $0.780 (p < 0.05)$ 。从图 1 各水质标识指数趋势变化情况来看,2015 年平水期和 2016 年枯水期氨氮标识指数属于劣 V 类重度污染的水平,是同期丰水期的 2.4 倍,因此氨氮是影响吴旗断面水质的最主要指标。北洛河上游氨氮污染源主要来自沿岸城镇生活污水。根据 2017 年陕西省第二次污染源普查统计,吴起县生活污染源数量共 80 个位居第一,占全市污染源总数的 42.6%^[16]。随着 2018 年污染防治攻坚战的全局打响,吴旗断面水质显著好转,平、枯水期水质基本满足地表水 III 类要求,但是 2020 年平水期氨氮浓度出现反弹,从去年同期的 II 类水平升至 V 类。氟化物各水期波动趋势基本一致,总体呈现先升后降的趋势,2014—2015 年氟化物标识指数均值为 1.75,其浓度属于 I 类水。从 2016—2018 年,吴旗断面氟化物污染趋于严重,其单因子标识指数均值为 4.11 属于地表水 IV 类水平,是 2014—2015 年氟化物浓度的 2.3 倍;2019 年以来北洛河氟化物浓度趋于好转。从相关性分析结果上看,氟化物浓度与输沙量呈中度正相关关系,相关性虽未达显著,但相关系数较高,氟化物与其余指标无相关性,说明侵蚀环境中的氟离子是引起污染的最直接原因。北洛河发源于定边县白云山,陕北定边平原地下水氟化物浓度多在 $3 \sim 7$ mg/L^[17],远高于《地下水质量标准

(GB/T14848-2017)》V 类水限值 2 mg/L。陕北榆林黄土高原地质勘探分析显示,土壤层中云母、角闪石等矿石含有氟离子,这些物质经过水合融滤作用,在丰水年向水中扩散的速率增强^[18]。因此受地下水补给的影响,加之沿岸工矿企业矿石的开采,会导致北洛河氟化物浓度较高。2018 年以来吴旗断面各水期 COD 标识指数处于 II 类水平,COD 污染影响基本消除。

3.3.2 北洛河中游水质 从图 2 可以看出,2014—2020 年中游交口断面水质整体呈先升后降的趋势,2016 年平水期综合水质标识指数最高为 3.710 3,虽然满足地表水 III 类水要求,但处于 III 类标准限值下限 71% 的位置,有潜在超标风险;2018 年以来交口断面各水期水质基本稳定在 II 类水水平。根据北洛河 1958—2005 年的水文统计资料显示,交口段的多年平均径流量 4.84×10^8 m³,占流域总量的 51.9%,泥沙量占比 11.2%^[19-20],说明中游是北洛河的主要来水区间。中游交口断面上游约 1.5 km 处有支流葫芦河汇入,下游 1.2 km 处有支流沮河汇入,其中葫芦河是北洛河的最大支流,全长 235.3 km^[19],其张村驿水文站多年平均径流量 1.14×10^8 m³;沮河全长 128 km^[21],其黄陵水文站多年平均径流量 1.13×10^8 m³,两条主要支流占北洛河中游径流总量的 46.9%。根据陕西省《水资源公报》,葫芦河入北洛河水质基本满足地表水 III 类水质标准,因此与上游吴旗断面相比,由于有支流的汇入补给,北洛河中游交口断面水质较好。从图 2 各水质标识指数趋势变化情况来看,2015 年非汛期和 2016 年平水期氨氮标识指数均在 5.0 以上,高于其他监测指标,属于 V 类水,氨氮是影响交口断面水质的最主要指标。2017 年陕西省第二次全国污染源普查资料显示,交口河镇周边存在规模化畜禽养殖场。畜禽养殖废水和城镇生活污水是氨氮污染的主要来源,其过高的浓度会加剧北洛河水体富营养化。随着畜禽养殖场废水规范化处理,2017 年之后交口断面氨氮浓度有明显的好转趋势,2020 年氨氮枯水期标识指数 2.73 与 2015 年 5.99 相比下降 54.4%。从图 2 可以看出,交口断面各水期 COD 标识指数呈上下波动趋势,其波动范围在 1.67~4.02 之间,基本满足水功能区 III 类目标要求。受支流补给的影响,中游区间氟化物浓度明显低于上游区间,2018 年氟化物丰水期标识指数最大为 1.85,各水期多年平均值为 1.65 均属 I 类水水平,满足水功能区 III 类水质目标。

3.3.3 北洛河下游水质 从图 3 可以看出,2017 年之前状头断面水质污染较严重,其非汛期水质多为 IV—V 类水;2017 年之后状头断面水质改善明显,

丰、平、枯水期水质标识指数基本稳定在 2.0~3.0 区间,基本满足地表水 II 类水质要求。从主要评价因子各水期变化情况来看,COD 是状头断面的首要污染物,2017 年之前 COD 污染程度最为严重,其标识指

数均值 6.48 为劣 V 类,是 2014—2020 年多年平均值 4.76 的 1.4 倍。其次为氨氮,2017 年之前状头断面氨氮污染也较为严重,尤其是 2016 年枯水期氨氮标识指数 6.10,为劣 V 类。

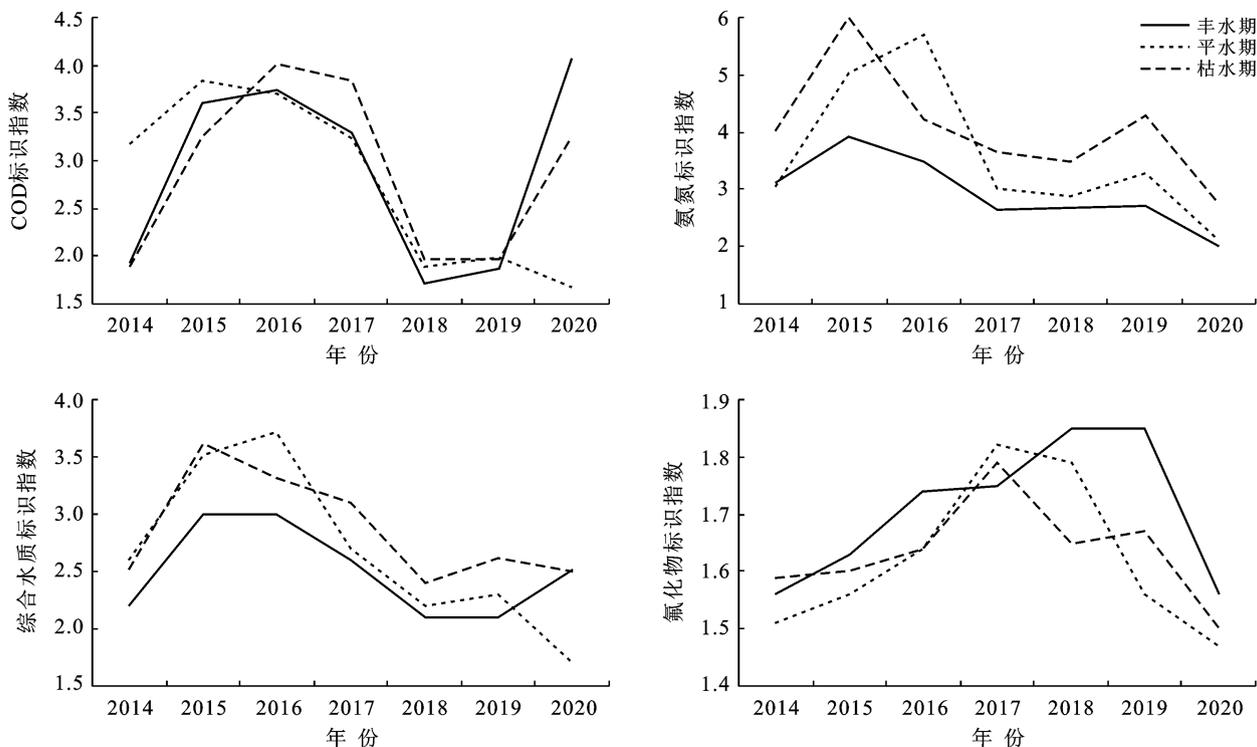


图 2 北洛河交口断面各水质标识指数趋势变化

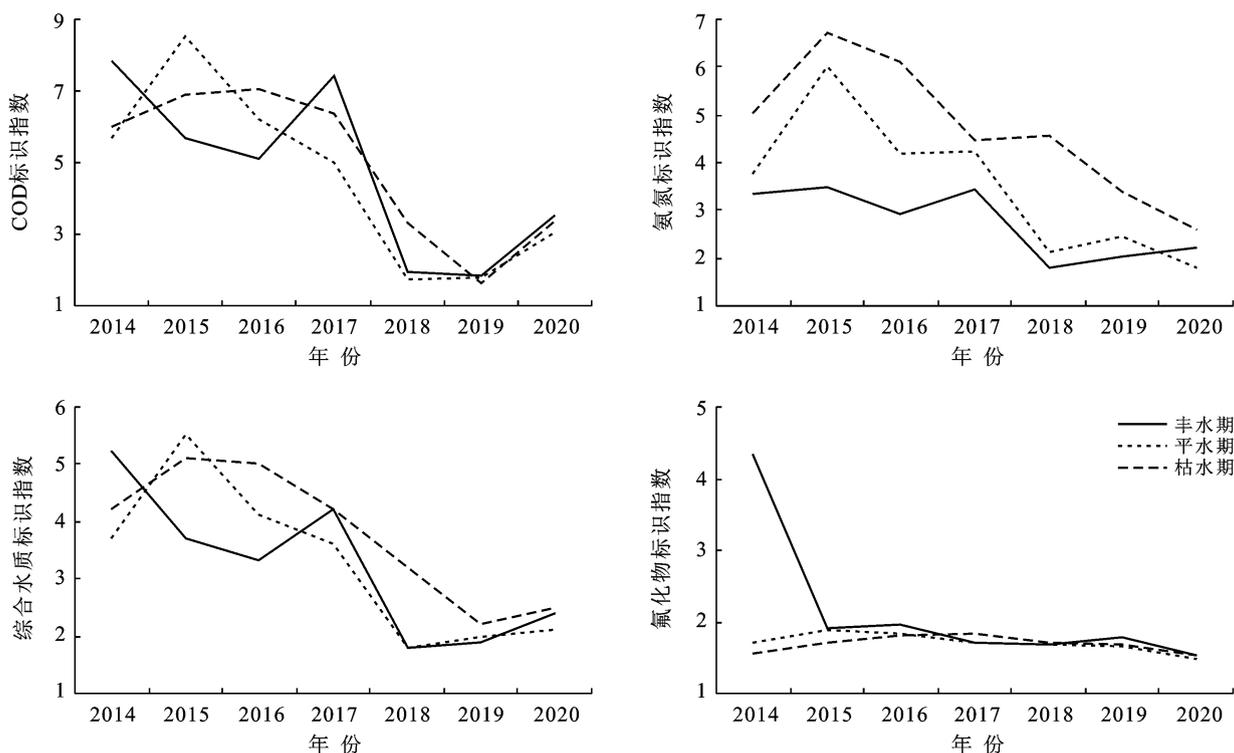


图 3 北洛河状头断面各水质标识指数趋势变化

北洛河下游状头段主要流经渭南市澄城县和蒲城县,根据 2017 年陕西省第二次全国污染源普查资料显示,蒲城县工业企业数量占全市总数的 21.6%^[17],其中的渭北煤化工业园位于北洛河右岸,园区环境影响评价公示信息显示,经处理后的污水达到《黄河流域(陕西段)污水综合排放标准(DB61/224-2011)》一级标准后排至北洛河。由于一级标准中 COD 和氨氮浓度限值分别为 50 mg/L 和 12 mg/L 依旧超过地表水 V 类限值标准,因此处理达标的污水也会对北洛河水质产生一定影响。2018 年陕西省对《黄河流域(陕西段)污水综合排放标准(DB61/224-2011)》进行了修订,进一步严格限制污水外排浓度,其中 COD 和氨氮的排放浓度分别从 50 mg/L 降至 30 mg/L,以及从 12 mg/L 降至 1.5 mg/L,能够达到地表水 IV 类水质要求。随着污染防治攻坚战进行深入进行,对沿岸工业企业外排水处理效率的不断提升和加强居民生活污水的收集处理,2018 年之后 COD 和氨氮污染改善明显,状头断面各水期 COD 标识指数基本处于 2.0~3.0 区间满足地表水 II 类水质;2019 年以来氨氮浓度基本满足水功能区 III 类水质目标。状头断面氟化物除 2014 年有超标情况外,其余时间基本满足水功能区 III 类水质目标。

3.3.4 北洛河入渭口水质 北洛河是渭河的最大支流,其入河水质的优劣将对渭河产生显著影响。从图 4 可以看出,2018 年之前北洛河入渭口断面水质较

差,尤其是 2017 年枯水期水质最差,其综合水质标识指数为 6.333 3 属于劣 V 类。2018 年之后入渭口断面水质有所改善,枯水期水质改善最为明显,从 2017 年的劣 V 类好转至 2020 年的 III 类,各水期水质均满足水功能区目标水质要求。从水期变化上看,丰水期水质最好,多年平均综合水质标识指数均值为 3.093 3,属 III 类水。氨氮是影响入渭口断面水质的主要污染物,从图 4 氨氮标识指数的趋势变化上看,丰水期水质较好,水质污染程度最严重的时段为枯水期和平水期,尤其是 2017 年枯、平水期氨氮标识指数分别为 9.05 和 6.08 均属劣 V 类。从地理位置上看,北洛河入渭口断面属于关中平原,区域内土地肥沃,全县畜禽规模养殖场数量 258 个,占全市总数的 11.5%^[17],排名第三。小麦和玉米种植一年两熟,土地复种率高达 1.48,粮食种植化肥施用强度高,2016 年全国化肥平均施用强度 443 kg/hm²,渭南市施用强度为 1 443 kg/hm²,是全国水平的 3.26 倍,属于高风险地区^[22]。由于北洛河丰水期(7—9 月)来水量占全年的 57.3%,其余 9 个月上游来水偏少,加上春秋农灌退水和畜禽养殖等面源污染的影响,平水期和枯水期易出现氨氮浓度反弹的情况。虽然 2018 年之后氨氮浓度在平、枯水期有所降低,但是仍略高于地表水 III 类水质标准。从 COD 标识指数时空趋势变化上看,北洛河入渭口断面 2018 年之前水体有机污染程度较重,其中 2015 年平水期 COD 标识指数最高为 5.92,属 V 类水。

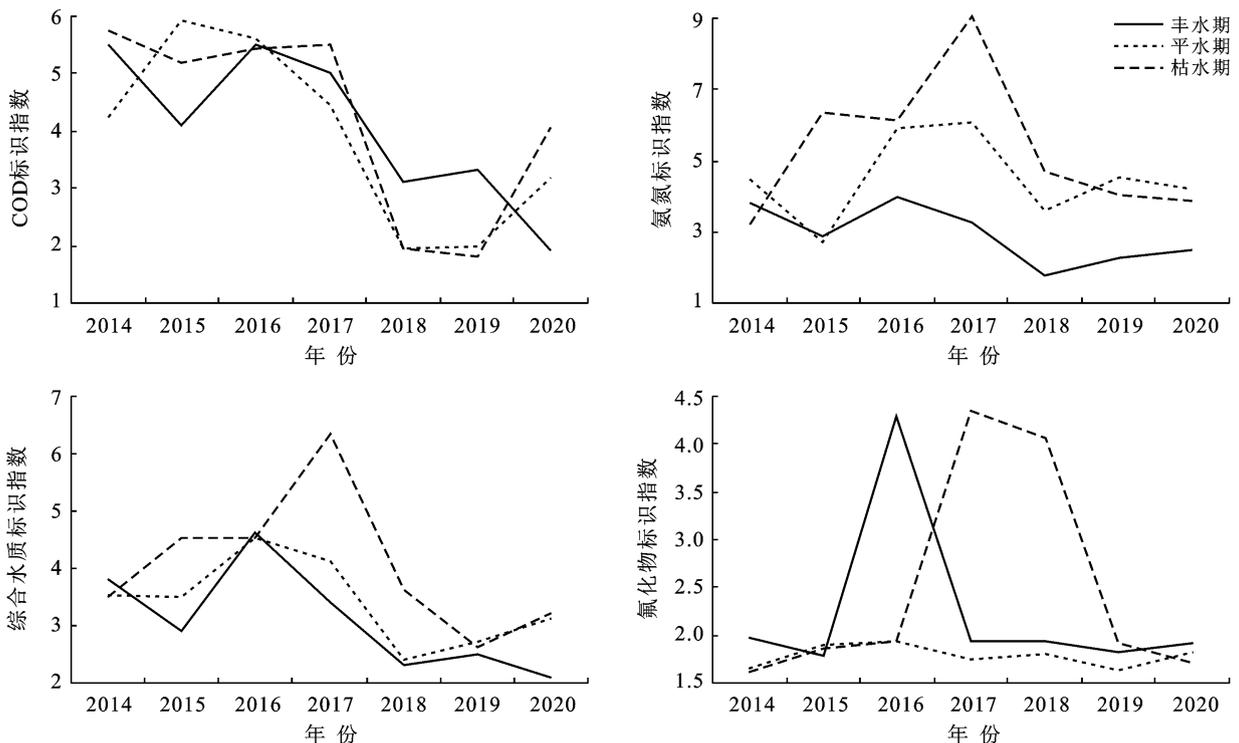


图 4 北洛河入渭口断面各水质标识指数趋势变化

根据北洛河入渭口区间的污染源调查结果,城市生活污水排放量大,污水处理厂处理能力不足,受污水管网建设能力不足的影响,城市下水管网雨污分流不彻底,大量城镇生活污水和部分企业废水未经处理达标而进入北洛河,造成北洛河入渭口断面 COD 和氨氮超标。2018 年之后随着上游来水水质的改善和污水处理设施能力的加强,北洛河入渭口断面 COD 污染程度逐步降低,枯水期水质改善最为明显,其标识指数从 2014 年的 5.77 降至 2019 年的 1.82。2020 年受状头断面来水 COD 浓度的影响,北洛河入渭口枯水期 COD 浓度出现反弹,其标识指数增至 4.07 为 IV 类水,说明大荔县周边工业企业污染源治理仍需进一步加强。从图 4 氟化物波动情况上看,平水期氟化物均满足地表水 III 类水质要求;虽然 2016 年丰水期和 2017 年枯水期氟化物波动较为明显,但是 2014 年以来丰水期和枯水期氟化物标识指数均值分别为 2.24 和 2.49,均满足地表水 III 类水质要求。

4 结论

(1) 根据北洛河水量的年内分配规律,7—9 月为北洛河丰水期,10—12 月为平水期,其余时间段为枯水期。根据主成分因子载荷矩阵分析结果,COD、氨氮和氟化物是影响北洛河干流水质的主要污染指标。从沿程分布上看,北洛河干流上中游水质最好,下游水质相对较差;从时空分布上看 2018 年之后北洛河干流水质改善明显,基本满足水功能区 III 类水质要求。

(2) 上游吴旗断面 2017 年之前水体水质多为 IV 类,2017 年之后水质逐步改善,基本满足水功能区 III 类水质目标。氨氮是影响吴旗断面水质的最主要指标,主要来自于沿岸生活污水的排放。2014—2020 年 21 次水期监测中有 7 次超标,超标率 33.3%;其标识指数多年平均值为 3.67,虽然达标但仍存在超标风险。2016—2018 年吴旗断面氟化物超标较为严重,其单因子标识指数均值 4.11 为 IV 类,其余时间段氟化物基本能满足 III 类水质目标。氟化物浓度与输沙量呈中度正相关关系,输沙量的增加在一定程度上会加速土壤层中的氟离子向水中扩散,使水体中氟化物含量增加。

(3) 中游交口断面水质较好,2018 年以来基本稳定在 II 类水。根据单因子水质标识指数的波动情况,氨氮是主要污染物。沿岸周边存在的畜禽养殖场产生的废水和城镇生活污水是氨氮污染的主要来源。

(4) 北洛河下游至入渭河口段 2018 年之前水

质污染较为严重,其中状头断面 2015 年平水期水质最差为 V 类,入渭口断面 2017 年枯水期水质最差为劣 V 类。COD 和氨氮是下游河段的主要污染物,其中状头段流经渭南市煤化工业园区,工业企业化工污水是其污染源;北洛河入渭河口段主要位于关中平原地区,农业氮肥施用和畜禽养殖等面源污染是造成该河段平水期和枯水期氨氮浓度出现波动的主要原因。2018 年之后,随着陕西省严格限制工业企业污水外排浓度和面源污染治理,下游河段水质有明显的改善,基本满足地表水 III 类水质要求。

[参 考 文 献]

- [1] 鲁俊,朱信华,崔振华,等.北洛河流域水沙特性与变化原因[J].人民黄河,2018,40(3):20-24.
- [2] 王静.北洛河流域近年来水质分析与评价[J].水利水电,2019,3(2):114-116.
- [3] 钱凯旋,罗军刚,连亚妮,等.基于基尼系数的水质模糊综合评价模型及应用[J].水电能源科学,2020,38(1):36-39.
- [4] 李想,肖桂荣,蔡圣准.结合网络文本的模糊层次分析法评价水环境敏感性[J].地球信息科学学报,2019,21(12):1832-1844.
- [5] 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,2005,33(4):482-488.
- [6] Bengraïne K, Marhaba T F. Using principal component analysis to monitor spatial and temporal changes in water quality[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003,100(1/3):179-195.
- [7] Ban Xuan, Wu Qiuzhen, Pan Baozhu. Application of Composite Water Quality Identification Index on the water quality evaluation in spatial and temporal variations: A case study in Honghu Lake, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014,186(7):4237-4247.
- [8] 董起广,周维博,刘雷,等.北洛河径流量变化特征分析[J].人民黄河,2014,36(2):20-29.
- [9] 时文博,曹春燕,宋颖,等.基于多元统计分析的黄河山东段水质评价研究[J].人民黄河,2020,42(2):48-53.
- [10] 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.
- [11] 宁忠瑞,李虹彬.基于水质标识指数的黄河宁夏段水质评价与分析[J].灌溉排水学报,2020,39(S1):56-61.
- [12] 程卫国,李亚斌,苏燕,等.不同赋权方法的综合水质标识指数法对比分析[J].灌溉排水学报,2019,38(11):93-98.
- [13] 中华人民共和国水利部. GB/T 50095-2014 水文基本术语和符号标准[S].北京:中国计划出版社,2014.

(下转第 171 页)

- 2013 in an interior lake basin, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(10):888.
- [13] 李恒凯,刘玉婷,李芹,等.基于MCR模型的南方稀土矿区生态安全格局分析[J].*地理科学*,2020,40(6):989-998.
- [14] Ghosh S, Das Chatterjee N, Dinda S. Urban ecological security assessment and forecasting using integrated DEMATEL-ANP and CA-Markov models: A case study on Kolkata Metropolitan Area, India [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 68:102773.
- [15] 谭吉玉,刘高常.基于小波支持向量机模型的矿区生态安全评价方法研究[J].*黄金科学技术*,2020,28(6):902-909.
- [16] 赵杨秋,何刚,王莹莹,等.基于BP神经网络的工业生态安全动态评价及障碍因子诊断[J].*水土保持通报*,2021,41(3):127-136.
- [17] 李蕊,陈国清,李玮贤,等.基于遥感生态指数的神东矿区1995—2020年生态环境质量的时空变化特征分析[J].*水土保持通报*,2021,41(3):143-151.
- [18] 张合兵,张克,刘培,等.基于RS和GIS的矿区生态指标提取与安全评价:以焦作矿区为例[J].*煤炭科学技术*,2020,48(4):80-88.
- [19] 陈勇,甘勇,苗作华,等.基于云模型的地下铁矿区生态风险模糊综合评价[J].*武汉科技大学学报*,2016,39(4):289-294.
- [20] 法子薇,李新春.基于云模型的煤矿资源型城市生态风险评价研究[J].*科技管理研究*,2021,41(9):190-194.
- [21] 徐钰德,刘子金,黄嵩,等.干旱区人工绿洲水土生态环境安全演变分析[J].*水利水电技术(中英文)*,2021,52(1):105-115.
- [22] 叶辉,王金亮,赵娟娟.基于DPSIR-EES模型的北回归线(云南段)生态安全评价[J].*水土保持研究*,2021,28(3):291-298.
- [23] 吕广斌,廖铁军,姚秋昇,等.基于DPSIR-EES-TOPSIS模型的重庆市土地生态安全评价及其时空分异[J].*水土保持研究*,2019,26(6):249-258.
- [24] 江孝君,杨青山,耿清格,等.长江经济带生态—经济—社会系统协调发展时空分异及驱动机制[J].*长江流域资源与环境*,2019,28(3):493-504.
- [25] 贡力,逯晔坤,靳春玲,等.基于改进G1-和谐度方程的兰州市水生态文明评价[J].*水资源与水工程学报*,2019,30(6):6-11.
- [26] 么泽恩,蔡海生,张学玲,等.基于CRITIC-TOPSIS模型的浮梁县土地生态安全时空分异及其障碍因素分析[J].*长江流域资源与环境*,2021,30(10):2452-2463.
- [27] 林文豪,陈梅倩,周礼刚,等.一种区间Pythagorean模糊VIKOR多属性群决策方法[J].*运筹与管理*,2021,30(3):57-64.
- [28] 杨海燕,孙晓博,程小文,等.基于VIKOR法的潍坊市水资源承载力综合评价[J].*环境科学学报*,2020,40(2):716-723.
- [29] 周子英,刘伏英.基于PSR-可拓云模型的湖南省怀化市农业生态安全评价[J].*水土保持通报*,2021,41(2):267-274.
- [30] 吕广斌,廖铁军,姚秋昇,等.基于DPSIR-EES-TOPSIS模型的重庆市土地生态安全评价及其时空分异[J].*水土保持研究*,2019,26(6):249-258.

(上接第160页)

- [14] 李志亮,仲跻文.生化需氧量、化学需氧量、高锰酸盐指数三者关系简析[J].*水利技术监督*,2015,23(1):5-6.
- [15] 王丹凤.新时期陕西省煤炭资源勘查开发布局研究[J].*中国煤炭*,2021,47(12):1-6.
- [16] 陕西省第二次全国污染源普查工作办公室.陕西省第二次全国污染源普查图集[M].陕西西安:三秦出版社,2020.
- [17] 白广禄.陕西省地方性氟中毒与地理因素的关系[J].*中国地方病学杂志*,1997,16(1):57-59.
- [18] 王德耀.陕西秦岭以北地区高氟地下水的成因与防治研究[J].*陕西师范大学学报(自然科学版)*,2004,32(3):112-115.
- [19] 韩东阳.变化环境下非一致性水文干旱不确定性分析[D].河南郑州:华北水利水电大学,2019.
- [20] 尹吉国,于福亮,李传哲.北洛河天然年径流特性分析[J].*人民黄河*,2008,30(4):25-27.
- [21] 王德慈.沮河水容量与总量控制研究[D].陕西西安:西北大学,2012.
- [22] 高莹,孙喜军,吕爽,等.陕西省化肥施用时空分异及面源污染环境风险评价[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2021,49(2):76-83.