

文章编号:0253-2778(2016)08-0680-09

# 淮北临涣采煤沉陷区水域水体污染源解析

任梦溪<sup>1</sup>, 郑刘根<sup>1</sup>, 程桦<sup>1</sup>, 喻怀君<sup>2</sup>

(1. 安徽大学资源与环境工程学院矿山环境修复与湿地生态安全协同创新中心, 安徽合肥 230601;

2. 淮北矿业(集团)有限责任公司地质测量处, 安徽淮北 235001)

**摘要:**在采煤沉陷区水资源管理与污染控制研究过程中,水质特征的分析与评价具有重要意义.选择淮北临涣采煤沉陷水域5个功能区(A、B、C、D、E区)作为研究对象,应用综合水质标识指数法对其2014年丰水期、枯水期水污染特征进行了分析和评价,并利用主成分分析法对研究区污染源进行了分析.结果表明:①主要污染物为总氮、总磷、重铬酸盐指数,水体具有富营养化风险;②不同功能区的综合水质评价结果显示,丰水期:E区(4.2409)>D区(4.1309)>C区(4.0409)>B区(3.9409)>A区(3.6309),枯水期:E区(4.3309)=D区(4.3309)>C区(4.0209)>B区(3.9209)>A区(3.6209);③污染源分析结果表明,污染源主要来自居民生活、工业、煤矿和农业生产,从丰水期到枯水期,污染源基本呈现从点源向非点源过渡的规律.

**关键词:**采煤沉陷积水区;水质评价;污染源解析;淮北

**中图分类号:**X531

**文献标识码:**A

doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2016.08.009

**引用格式:**REN Mengxi, ZHENG Liugen, CHENG Hua, et al. Pollutions source apportionment of Linhuan coal mining subsidence water area from Huaibei Coalfield [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2016, 46(8): 680-688.

任梦溪, 郑刘根, 程桦, 等. 淮北临涣采煤沉陷区水域水体污染源解析[J]. 中国科学技术大学学报, 2016, 46(8): 680-688.

## Pollutions source apportionment of Linhuan coal mining subsidence water area from Huaibei Coalfield

REN Mengxi<sup>1</sup>, ZHENG Liugen<sup>1</sup>, CHENG Hua<sup>1</sup>, YU Huaijun<sup>2</sup>

(1. Collaborative Innovation Center for Mines Environmental Remediation and Wetland Ecological Security,

School of Resource and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. Geological Survey Division, Huaibei Coal Mining Group Corporation, Huaibei 235001, China)

**Abstract:** The analysis and assessment of water quality characteristic are of great significance in the research process of water resource management and pollution control of coal mining subsidence area. Five functional areas (A, B, C, D and E) in subsidence area of the Linhuan industrial park in the Huaibei Coalfield were selected to analyze and evaluate the water pollution characteristic of wet season and dry season in 2014 using comprehensive water quality identification index method. Moreover, principle

**收稿日期:**2015-12-11; **修回日期:**2016-03-22

**基金项目:**国家自然科学基金(41373108),安徽省国土资源科技项目(2013-K-07),淮北矿业(集团)科技攻关项目(2014-HBKJ-01),煤矿生态环境保护国家工程实验室科技攻关项目(HNKY-JT-JS2013-41)资助.

**作者简介:**任梦溪,女,1989年生,硕士生.研究方向:矿区生态环境综合治理. E-mail: mengxicc@126.com

**通讯作者:**郑刘根,博士/副教授. E-mail: lgzheng@ustc.edu.cn

component analysis was applied to identify pollution sources. The results showed that: ① The dominant pollutants were total nitrogen, total phosphorus and dichromate index, indicating a risk of eutrophication of water; ② The comprehensive water quality identification index of different functional areas showed that  $E(4.2409) > D(4.1309) > C(4.0409) > B(3.9409) > A(3.6309)$  in wet season, and  $E(4.3309) = D(4.3309) > C(4.0209) > B(3.9209) > A(3.6209)$  in dry season. ③ The pollution in this study area derived mainly from resident activity, coal, chemical factory, and agriculture. These pollution sources shifted from point sources in wet season to non-point sources in dry season.

**Key words:** coal mining subsidence water area; hydrochemical assessment; source apportionment; Huaibei

## 0 引言

淮北作为华东地区主要煤炭生产开采基地,截至2007年底可采煤炭储量为6.6亿t,年产原煤1800万t<sup>[1]</sup>.长期煤炭开采导致土地大面积沉陷,预计到2018年,全市采煤沉陷土地面积将达到200km<sup>2</sup>.与此同时,高潜水位的地质条件,使得沉陷区域面积的30%~50%成为积水区,为当地提供了滞蓄水资源的空間,分别形成水塘、湖泊、湿地和平原水库等不同类型的景观水体<sup>[2]</sup>.沉陷水域潜在的生态环境效应将对矿区经济和生态环境的可持续发展产生重要影响.因此,对沉陷区水资源的认识、利用和保护,在矿区生态环境的恢复过程中占有重要的地位.

近年来,一些学者对采煤沉陷积水区生态环境特征进行过不同角度的研究.如邓道贵等<sup>[3]</sup>通过2005~2007年对淮北采煤沉陷区两个小型湖泊轮虫群落结构的调查,研究水温、营养盐、浮游生物量对其群落结构的影响.刘响响等<sup>[4]</sup>通过对淮南7个矿区典型的采煤沉陷区水体的研究,分析水体中氮磷的时空变化特征及其环境意义.邱浩然等<sup>[5]</sup>以淮南潘一矿塌陷区土壤和底泥沉积物为研究对象,探讨沉陷水域周围农田和底泥中PCBs含量和分布特征.目前的研究多集中于沉陷区水体水资源调查、浮游动植物群落结构研究、富营养化特征研究以及水体沉积物等方面.针对采煤沉陷区水域不同类型污染源解析的研究相对较少,已有研究主要集中于氮磷污染方面<sup>[6-7]</sup>,黄静等<sup>[8]</sup>以潘谢矿区为例对采煤沉陷区水体进行污染源分析,但其仅针对春季水体情况进行研究,无法全面反映不同水期污染源变化情况.本研究选取我国东部典型高潜水位采煤沉陷区——淮北临涣矿采煤沉陷区沉陷水域,运用综合水质标识指数法对该区域丰水期和枯水期水质进行评价,了解沉陷水域污染物特征,并采

用主成分分析法,对两期水体分别提取水质影响因素,识别不同水期可能的污染源<sup>[9]</sup>,研究结果可为采煤沉陷区水域水污染防治及水质管理提供理论依据.

## 1 样品采集和研究方法

### 1.1 样品的采集和测试

分别于2014年7月和2014年12月对淮北市临涣工业园采煤沉陷区水体进行了现场调研和采样,采样方案及方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版)<sup>[10]</sup>.临涣工业园采煤沉陷区水体南部为临涣工业园,东部有矸石山和灰场,西部为工业园废水排放区并有矸石堆积,向北通过香顺沟与浍河相连.为研究矸石堆积、废水排放、香顺沟周边农田、浍河对沉陷区主体的影响,将研究区分为五个功能区A、B、C、D、E进行探讨.每个功能区的水样数在3到5个不等,共采集17个样品,利用GPS进行定位记录(图1、表1).水样装入聚乙烯瓶中,氮磷指标测试样品加硫酸酸化至 $pH < 2$ ,微量元素测试样品加硝酸酸化,叶绿素a检测样品加碳酸镁遮光放置,运回实验室低温保存并及时检测.

参照国家地表水质量标准,选取16项指标进行检测.水温( $T/^\circ C$ )、溶解氧( $DO/mg \cdot L^{-1}$ )和pH值在采样过程中运用便携式仪器进行现场测定;样品中其他指标如重铬酸盐指数( $COD_{Cr}$ )运用重铬酸钾法进行测定,总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮( $NH_4-N$ )使用分光光度法测定,氯化物(以 $Cl^-$ 计)、氟化物(以 $F^-$ 计)、硫酸盐(以 $SO_4^{2-}$ 计)使用离子色谱法进行测定,铬(Cr)、锌(Zn)、铜(Cu)、镉(Cd)、砷(As)、铅(Pb)等微量元素指标使用电感耦合等离子体发射光谱测定.具体方法参见国家标准<sup>[10]</sup>.

### 1.2 数据分析

数据采用SPSS18.0软件统计分析,绘图和相关的插图采用Corel draw x5和Origin 8.5制作.

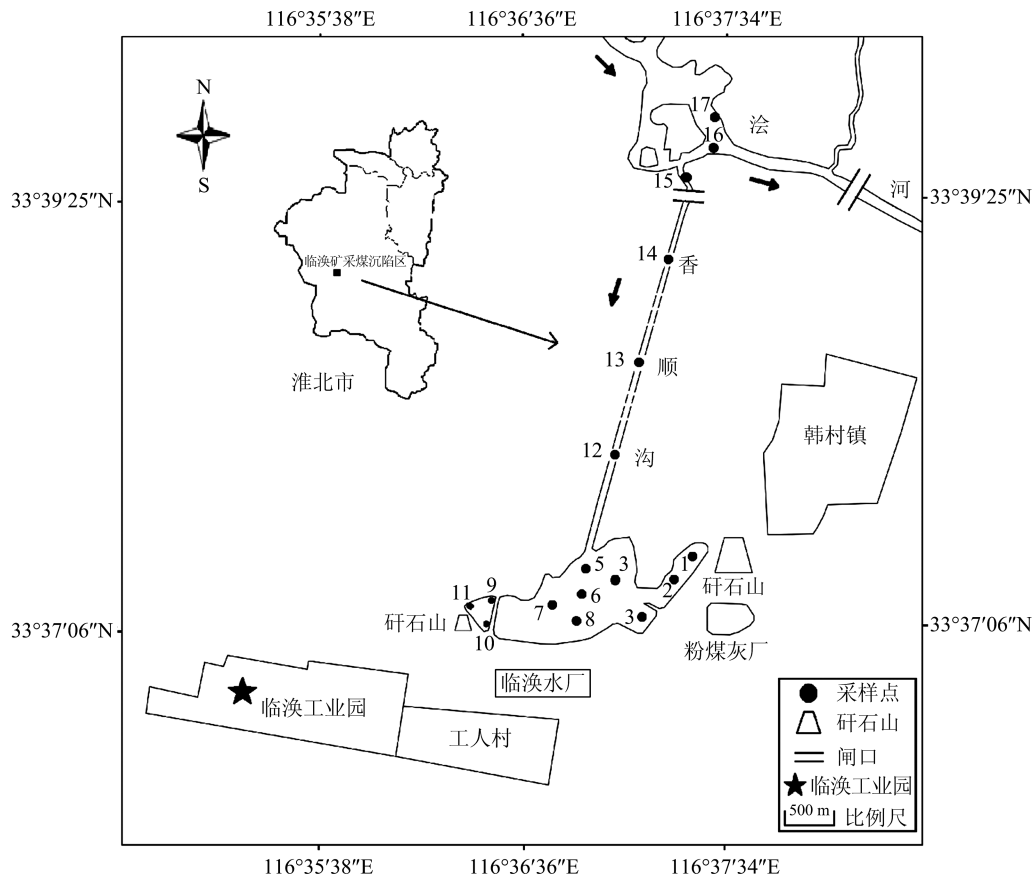


图 1 采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling point

表 1 5 个研究区的采样点设置和周围环境状况

Tab. 1 Water samples and features of the five studied sites and their surrounding environments

功能区	采样点	周围环境	功能区	采样点	周围环境	
A 区(1~3)	1	临近矸石山、粉煤灰场(夏季养殖贝类、冬季清淤)	C 区(9~11)	9	工业园工业污水排放	
	2			10		
	3			11		
	4			12		
B 区(4~8)	5	沉陷区主体(养鱼、为工业园提供工业用水)	D 区(12~14)	14	香顺沟(两侧为农田)	
	6			15		
	7			16		浍河(采样点附件有砖厂、上游有造纸厂等)
	8			17		

### 1.2.1 综合水质标识指数法

综合水质标识指数法是在单因子水质标识指数法基础上建立的,分为单因子水质标识指数和综合水质标识指数两步进行<sup>[11-12]</sup>.相较于模糊评价法、灰色系统评价法、人工神经网络法、综合营养指数法等<sup>[13]</sup>,综合水质标识指数法不仅能够结合国家水质标准,完整表现研究区水质类别<sup>[14]</sup>,还可以使研究区水体不同因子化为同一纲量对研究区水域进行综合水质状况分析.

本次评价方法选用综合水质标识指数法使不同因子化为同一纲量进行分析比较.具体方法参照文献<sup>[15]</sup>.

#### (I) 单因子水质标识指数

单因子水质标识指数  $P_i$ ,由一位整数、小数点后两位或三位小数组成,表现形式为

$$P_i = X_1 \cdot X_2 X_3 X_4.$$

式中,  $X_1$  表示第  $i$  项水质指标的水质类别;  $X_2$  为监测数据在  $X_1$  类水质变化区间中所处的位置,按照四

舍五入原则取一位有效数字,  $X_3$  表示水质类别与设定功能区类别的比较结果, 为一位或两位有效数字.

(II) 综合水质标识指数

综合水质标识指数由整数位和 4 位或 5 位小数位组成, 表现形式为

$$I = X_1 . X_2 X_3 X_4 X_5 .$$

式中,  $X_1$  表示水体综合水质类别;  $X_2$  为综合水质在  $X_1$  类水质变化区间内所处位置;  $X_3$  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, 表示综合水质的污染程度, 为一位或两位有效数字.

1.2.2 污染源解析方法

在对水体污染的研究中, 仅对污染程度进行分析是不够的, 其关键是找出水体主要污染源<sup>[16]</sup>. 本文污染源解析采用的方法是主成分分析法. 它可以反映出水体的污染程度, 主要污染物的类别、来源、成因、时空分布规律以及变化趋势, 定量、定性地了解河流水质的动态变化, 找到优先控制的监测断面或水质指标<sup>[17]</sup>. 需要说明的是, 原始数据不能直接进行主成分分析, 因为各监测指标性质、纲量不同, 分析中部分指标的作用将远大于其他指标<sup>[18]</sup>. 经过标准化处理后, 进行主成分分析.

2 结果与讨论

2.1 评价结果

本文的评价选取 2014 年两水期值运用综合水质标识指数法, 根据《地表水环境质量标准》<sup>[19]</sup> 对研究区 17 个采样点丰水期和枯水期水质情况进行评

价, 结果见表 2.

2.2 水质标识指数的分布特征

通过对 17 个采样点所有指标单因子水质标识指数的两水期平均值进行分析, 得到指标的变化趋势(图 2). 单因子评价结果显示: 总氮、总磷为主要污染物, 氟化物次之. 研究区营养盐污染严重, 存在富营养化风险, 曲喜杰等和张冰的研究中也指出淮北采煤沉陷区具有富营养化特征<sup>[20-21]</sup>. ①总氮单因子指数 ( $P_i$ ) 的范围从 5.11 到 11.43, 平均值为 9.00, 全部未达标, 为劣 V 类. 在 17 个采样点中, 总氮浓度最高的 3 个点 9 号、16 号、17 号的浓度值分别超出《地表水环境质量标准》(GB3838—2002) 中 V 类水标准 ( $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 4.65、4.70 和 4.58 倍. 说明总氮是研究区水体中最主要的污染因子. ②总

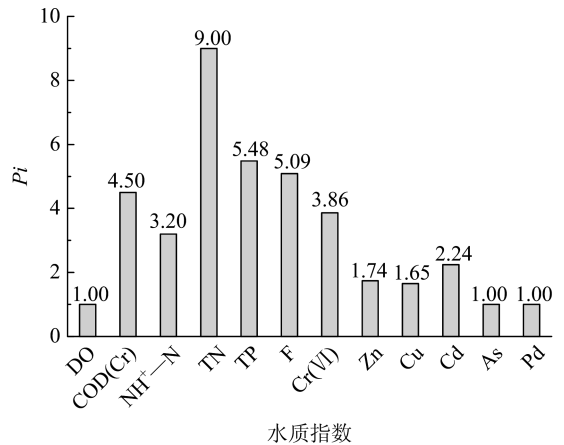


图 2 单因子水质标识指数的比较  
Fig. 2 Comparison of single factor water quality identification index

表 2 综合水质标识指数法评价结果

Tab. 2 Assessment result with comprehensive water quality identification index

采样点	综合水质标识指数法		采样点	综合水质标识指数法	
	丰水期	枯水期		丰水期	枯水期
1	III (3.730 9)	III (3.420 9)	12	III (3.730 9)	IV (4.330 9)
2	III (3.630 9)	III (3.620 9)	13	IV (4.650 9)	IV (4.640 9)
3	III (3.520 9)	III (3.720 9)	14	IV (4.130 9)	IV (4.130 9)
4	III (3.740 9)	III (3.830 9)	15	IV (4.030 9)	IV (4.130 9)
5	III (3.940 9)	III (3.720 9)	16	IV (4.440 9)	IV (4.640 9)
6	III (3.630 9)	IV (4.020 9)	17	IV (4.240 9)	IV (4.230 9)
7	III (3.720 9)	III (3.620 9)	A 区	III (3.630 9)	III (3.620 9)
8	IV (4.240 9)	IV (4.120 9)	B 区	III (3.940 9)	III (3.920 9)
9	III (3.920 9)	IV (4.230 9)	C 区	III (4.040 9)	III (4.020 9)
10	III (3.820 9)	III (3.720 9)	D 区	IV (4.130 9)	IV (4.330 9)
11	IV (4.130 9)	IV (4.030 9)	E 区	IV (4.240 9)	IV (4.330 9)

磷的指数( $P_i$ )的范围从 4.70 到 6.52, 未达标采样点达到 88.24%, 有 5 个点为劣 V 类水质, 集中在 13 号至 17 号, 16 号、17 号超过 V 类水标准的 1.5 倍, 污染严重. ③氟化物指数( $P_i$ )的范围从 1.80 到 6.22, 其中 1 号至 10 号均超过 V 类水标准, 未达标比列占 58.82%. 除此之外, 重铬酸盐指数的单因子水质标识指数评价结果仅次于总氮、总磷和氟化物, 平均值为 4.50, 9 号点、15 号点分别达到 7.03 与 7.73, 污染也较为严重.

在单因子水质指标指数基础上进行综合水质标识指数评价, 结果显示(表 3、图 3): 17 个采样点的

$I_{wq}$  年平均值为 4.030 9, 丰水期  $I_{wq}$  为 3.930 9, 枯水期  $I_{wq}$  为 4.130 9. 5 个功能区的污染程度排序如下, 丰水期表现为: E 区(4.240 9) > D 区(4.130 9) > C 区(4.040 9) > B 区(3.940 9) > A 区(3.630 9); 枯水期表现为: E 区(4.330 9) = D 区(4.330 9) > C 区(4.020 9) > B 区(3.920 9) > A 区(3.620 9). 从空间分布来看, 两季研究区水质情况表现类似, D 区(浍河)、E 区(香顺沟)水质较差, 沉陷区水域 A、B 区水质相对较好. 丰水期最差水质出现在 D 区 13 号采样点, 其  $I_{wq}$  为 4.650 9, 枯水期 E 区 16 号采样点水质最差  $I_{wq}$  为 4.640 9. 张冰在其研究中指出<sup>[21]</sup>,

表 3 两季期采样点旋转后的因子负荷矩阵<sup>a</sup>

Tab. 3 Varimax rotated factor loading in the two seasons of monitoring sites<sup>a</sup>

参数	丰水期				枯水期		
	VF1 <sup>b</sup>	VF2	VF3	VF4	VF1	VF2	VF3
溶解氧		-0.559	0.350		-0.339		
重铬酸盐指数			0.523	-0.742	0.631		0.886
总氮	-0.432		0.858		0.537	0.629	0.478
氨氮	-0.365				0.744	0.369	
总磷	-0.878			-0.310	0.920		
氯化物	0.417			0.828	-0.636	-0.639	
氟化物	0.738			0.517		0.560	
硫酸盐	0.910				-0.741	0.338	
六价铬		0.822				-0.580	
锌		0.754				0.343	0.406
特征值占方差的百分比	31.52%	20.37%	19.22%	17.57%	44.50%	22.79%	17.13%
KMO		0.591				0.682	
Sig(Bartlett)		0.000				0.000	

【注】 a. 提取方法: 主成分分析. 旋转方法: 正交旋转. 本表只列了因子负荷值 > 0.30 的数值; b. VF: 主成分.

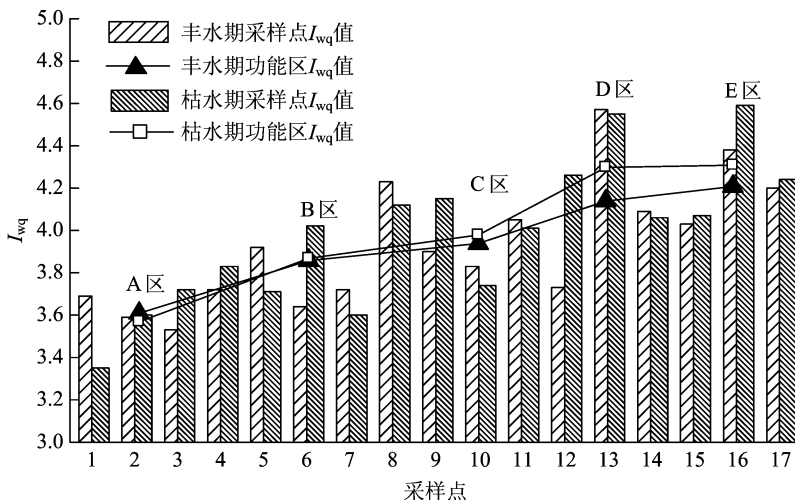


图 3 综合水质标识指数变化

Fig. 3 Variation in comprehensive water quality identification index

浍河水质较差,监测断面以V类水质为主,在实际调查中同样发现,浍河上游沿岸人口密集,造纸厂、砖厂等对浍河水域水质有重要影响。C区与沉陷区主体部分间有隔断,因此与沉陷区A、B之间相互影响较小。从时间变化分析,A、B、C三区水质情况稳定,D、E两区枯水期水质明显较丰水期差。

### 2.3 污染源解析

应用主成分分析法提取研究区丰水期和枯水期的潜在污染源。经 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 和 (Bartlett)球形方法<sup>[22-23]</sup>对地表水体标准化的监测数据进行相关矩阵检验。KMO 丰水期值为 0.591, 枯水期值为 0.682, Bartlett 检测 Sig 值均为 0, 显著,表示数据取自正态分布,适合做因子分析。此时污染指标数量即原始变量数量为 10。分析结果显示,根据特征值大于 1, 累计方差大于 80% 的标准, 丰水期提取出 4 个主成分因子, 枯水期提取出 3 个主成分因子。根据主成分分析得到各因子特征值作加权和,求得各监测点污染指标的综合得分。并依据综合得分按大小进行排列,得到各监测点污染程度排名。以便于清楚地看到对于各个因子来说每个监测点的污染情况。结果如表 4、表 5。

表 4 丰水期各采样点因子得分及污染排名

Tab. 4 Sampling points factor scores and pollution ranking in wet period

采样点	VF1	VF2	VF3	VF4	综合得分	污染排名
1	-0.026	-0.186	-1.190	0.995	-0.159	12
2	0.764	-0.234	-1.461	-0.214	-0.022	11
3	0.618	-0.245	-0.639	0.276	0.123	9
4	0.492	-0.750	-0.301	0.388	0.015	10
5	1.278	0.802	0.827	-1.192	0.774	1
6	-0.146	-0.087	1.202	0.594	0.208	6
7	0.118	-0.447	1.658	0.099	0.256	3
8	0.501	0.295	2.146	0.273	0.725	2
9	0.882	-0.698	-0.266	-0.148	0.141	8
10	0.885	-0.524	0.102	-0.524	0.209	5
11	0.971	-0.663	-0.319	0.093	0.208	6
12	-0.153	-0.176	-1.276	0.193	-0.325	13
13	0.002	1.558	-0.444	0.438	0.370	4
14	-1.075	0.311	-0.488	-0.018	-0.484	14
15	-1.199	-0.451	0.261	0.447	-0.538	15
16	-1.742	-0.123	-0.167	-3.163	-1.208	17
17	-2.171	-0.383	0.354	1.462	-0.807	16

#### 2.3.1 丰水期污染源解析

从丰水期的各监测点值来看,4 个主成分因子的特征值可以解释总方差的 88.68%。主成分 1 的

表 5 枯水期各采样点因子得分及污染排名

Tab. 5 Sampling points factor scores and pollution ranking in brought period

采样点	VF1	VF2	VF3	综合得分	污染排名
1	-0.168	-1.839	-1.014	-0.586	14
2	0.509	-2.002	-0.697	-0.061	8
3	-0.399	-1.425	-0.640	0.128	6
4	-1.103	0.853	-0.435	-0.704	15
5	-0.791	1.027	-0.978	-0.462	13
6	-0.648	-0.155	-0.587	-0.181	9
7	-1.266	1.307	-0.121	-0.429	12
8	-0.853	0.614	-0.088	-0.367	11
9	-1.024	-0.733	2.548	-2.559	17
10	-0.848	0.161	0.399	-0.757	16
11	-0.601	-0.183	0.164	0.006	7
12	0.924	-0.469	0.787	0.396	5
13	1.325	0.640	-1.300	1.068	2
14	1.272	0.908	-0.565	0.526	4
15	1.308	0.496	0.094	0.794	3
16	0.958	0.208	1.595	-0.260	10
17	1.406	0.591	0.837	1.073	1

特征值占总方差的 31.52%, 主成分 2、3、4 的特征值分别占总方差的 20.37%, 19.22% 和 17.57%。对主成分分析结果进行分析。

VF1(第一主成分): 与氟化物、硫酸盐、总磷有强相关性, 与总氮和氨氮的相关性稍弱。研究区地处临涣矿区, 周围有水厂、焦化厂、电厂等工矿企业, 沉陷区东侧为矸石山、北侧为农田, 由此推断主要污染来自农业污染、矿业废水以及矸石山经雨水冲刷、淋滤通过地表径流进入水体, 属于氮磷肥引起的农业面源污染与工业废水的混合污染<sup>[8, 24]</sup>。

VF2(第二主成分): 与溶解氧呈负相关, 与重金属六价铬、锌有很强的正相关性, 且在该因子上的载荷明显高于其他主成分因子, 说明两个污染物有相似的污染源。沉陷区水体重金属来源被认为主要与煤矸石淋滤有关, 由此推断 VF2 代表煤矿源污染<sup>[24]</sup>。

VF3(第三主成分): 主要由重铬酸盐指数、总氮组成。反映了水体受到有机污染物的污染状况<sup>[25]</sup>。沉陷区水域主体部分长期进行渔业养殖, 受人类生产生活影响较大, 认为该污染来自生活污水和渔业养殖共同组成的农村污水。因此, VF3 代表含大量有机营养物质的农村污水污染。

VF4(第四主成分): 与重铬酸盐指数呈负相关性, 与氯化物、氟化物呈正相关性。重铬酸盐指数反映

了研究区有机污染状况,氯化物、氟化物与工业废水相关,由此分析 VF4 代表了农村污水与工业废水的混合污染。

结合表 4 分析,可以看出每个污染因子在各点的作用情况。农业面源污染与工业废水的混合污染在 5、9、10、11 中表现突出,除 5 号点在沉陷区主体外,其余 3 点均分布在工业园废水排放区;有机营养物质形成的污染在 5、6、7、8 贡献大,应对沉陷区主体水域渔业养殖导致的有机污染进行防治;综合排名显示位于沉陷区主体水域部分的 5、7、8 位点分列第一、二、三位。充分说明,研究区丰水期的污染主要以农业面源污染和工业废水混合污染为主,煤矿源污染次之。

### 2.3.2 枯水期污染源解析

枯水期主成分分析中共提取了 3 个特征值大于 1 的公因子,总贡献率达到 84.42%,基本包含了 10 个变量的全部信息。

VF1(第一主成分):主要与重铬酸盐指数、总氮、氨氮、总磷成强正相关,与氯化物、硫酸盐呈负相关。重铬酸盐指数、总氮、氨氮、总磷主要与农业面源污染相关<sup>[26]</sup>,且枯水期雨水稀释作用及水生植物吸收作用降低,人为活动影响升高,硫酸盐含量  $515 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,远高于《地表水环境质量标准》 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的要求,因此,第一主成分主要考虑为农业、生活污水及工业废水的影响,属于农业面源污染与工业废水的混合污染。这部分占水质因素的 44.50%。

VF2(第二主成分):主要与总氮、氟化物呈正相关,与氯化物呈负相关。沉陷区主体水域浓度分布显示,总氮含量值较丰水期增加。有研究表明,这与冬季非养殖期温度低、水体污染物降解少及降水量减少有关<sup>[27]</sup>。沉陷区主体在枯水期还受到浍河水源的补给作用,因此,氮源污染主要来自渔业养殖及浍河水域的水体状况的影响。氟化物与氯化物在枯水期浓度分别为  $1.31, 172.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,低于《地表水环境质量标准》 $1.5, 250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的要求,说明该主成分中氟化物、氯化物主要与浅层地下水中背景值有一定关系。因此推断, VF2 属于农业面源污染,这部分占水质因素的 22.79%。

VF3(第三主成分):与重铬酸盐指数有明显相关性,反映了枯水期有机污染状况。由浓度分布可知,浍河区域和工业园废水排放区浓度较高,且浍河上游有造纸厂与砖厂分布。推断有机污染物主要来源于生活污水<sup>[28]</sup>、工业废水和工业废水,属于农村

污水和工业废水的混合污染<sup>[29]</sup>。这部分占水质因素的 17.13%。

从表 5 中可以看出,枯水期中农业面源污染在研究区水域表现突出,其中位于浍河水域的 15、17 号采样点污染严重,浍河上游沿岸有造纸厂及砖厂分布、人口密度较大,生活污水在降水较少的冬季对该水域影响作用明显,需要对浍河水域加以重点防控;5 号、7 号点在 VF2 中污染严重,说明沉陷区主体部分在枯水期主要受到农业面源污染与工业废水的混合污染。综合排名显示,位于浍河水域和香顺沟区域的 17、13、15 号点,分列第一、二、三位,说明研究区在枯水期主要受农业面源污染,工业废水污染次之,且面源污染的影响程度较丰水期加深。

## 3 结论

① 综合水质标识指数法评价结果显示,2014 年丰水期和枯水期,研究区总体水质处于Ⅳ类水标准,两期均体现为浍河所在的 E 区水质较差。总氮、总磷、高锰酸盐指数、矿物质离子为主要污染物,尤以总氮最为严重,该污染使研究区水域水体具有富营养风险。

② 主成分分析结果研究表明,丰水期、枯水期污染源类型相似,均具有多源性,呈现农业面源污染、工业废水、煤矿源污染、农村污水混合作用的结果。丰水期主要以农业面源污染和工业废水混合污染为主,煤矿源污染次之。枯水期主要以农业面源污染为主,工业废水污染次之。从丰水期向枯水期,面源污染贡献率逐渐增加,呈现从点源向非点源过渡的趋势。

③ 从两个水期综合情况看,矸石山附近水域(A区)和工业园废水排放区(C区)受煤矿源影响较高,应对沉陷区工业废水排放及矸石山淋滤形成的地表径流加以关注;沉陷区主体部分(B区)和浍河流域(E区),两区主要受到农业面源污染的影响,且在枯水期沉陷区主体部分受浍河水水质影响较大。充分说明了农业面源污染和矿业污染是沉陷区水域污染防治的重点。

### 参考文献(References)

- [1] LU Jingli, CHANG Jiang, YANG Yang. Analysis on utilization status of coal mining subsidence land in Huaibei[J]. Coal Engineering, 2015, 4(4):118-120.  
卢璟莉,常江,杨洋.淮北市采煤塌陷地利用现状分

- 析[J]. 煤炭工程, 2015, 4(4):118-120.
- [2] ZHANG Lei, YI Qitao, LI Hui, et al. Water quality and water environmental capacity for the small subsidence lakes in the Huainan and Huaibei coal mine areas, Anhui Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(4):1 121-1 128.
- 章磊, 易齐涛, 李慧, 等. 两淮矿区小型塌陷湖泊水质特征与水环境容量[J]. 生态学杂志, 2015, 34(4):1 121-1 128.
- [3] DENG Daogui, JIN Xianwen, GE Qian, et al. Seasonal variations on community structures of rotifers in small lakes of an excavating coal subsidence region in Huaibei[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(1): 111-116.
- 邓道贵, 金显文, 葛茜, 等. 淮北采煤塌陷区小型湖泊轮虫群落结构的季节变化[J]. 湖泊科学, 2012, 24(1):111-116.
- [4] LIU Xiangxiang, CHENG Hua, ZHENG Liugen, et al. Distribution characteristics and environmental significance of nitrogen and phosphorus in the Huainan coal mining subsidence area[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(11): 926-932.
- 刘响响, 程桦, 郑刘根, 等. 淮南采煤沉陷区水体中氮磷的分布特征及环境意义[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(11): 926-932.
- [5] QIU Haoran, GAO Liangmin, YAO Suping, et al. Distribution of PCBs in soil and sediment of subsidence water in Panji No. 1 coal mine of Huainan[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 2 174-2 180.
- 邱浩然, 高良敏, 姚素平, 等. 淮南潘一采煤塌陷区土壤-底泥中多氯联苯(PCBs)分布特征[J]. 煤炭工程, 2015, 40(9): 2 174-2 180.
- [6] FAN Tingyu, GU Deming, YAN Jiaping, et al. Dynamics and correlation of nitrogen and phosphorus in surface water and shallow underground water in coal mining subsidence water area [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(6): 1 158-1 167.
- 范廷玉, 谷得明, 严家平, 等. 采煤沉陷积水区地表水与浅层地下水的氮、磷动态及相关性[J]. 环境化学, 2015, 34(6): 1 158-1 167.
- [7] GU Deming, YAN Jiaping, FAN Tingyu, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus in surface water of coal mine subsidence area in Panji of Huainan [J]. Environmental Chemistry, 2014, 23(9): 1 495-1 500.
- 谷得明, 严家平, 范廷玉, 等. 淮南潘集采煤沉陷区地表水中氮、磷特征[J]. 环境化学, 2014, 23(9): 1 495-1 500.
- [8] HUANG Jing, GAO Liangmin, LI Shaopeng. Source apportionment of subsidence water pollution in coal mining areas[J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(6): 66-69.
- 黄静, 高良敏, 李少朋. 采煤塌陷区水污染源解析研究[J]. 中国环境监测, 2013, 29(6): 66-69.
- [9] THURSTON G D, SPENGLER J D. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in Metropolitan Boston [J]. Atmospheric Environment, 1985, 19:9-25.
- [10] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] HU Cheng, SU Dan. Application of comprehensive water quality identification index in water quality assessment of Hun River [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(1):186-192.
- 胡成, 苏丹. 综合水质标识指数法在浑河水质评价中的应用[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1):186-192.
- [12] ZHANG Yuhong, HU Cheng. Application of mark index method in water quality assessment of Hun River in Fushun City [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(6G):276-279.
- 张宇红, 胡成. 单因子标识指数法在浑河抚顺段水质评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(6G): 276-279.
- [13] LU Weijun, ZHANG Tao. Comparison and analysis of several appraisal methods for river water quality[J]. Environmental Science and Management, 2009, 34(6): 174-176.
- 陆卫军, 张涛. 几种河流水质评价方法的比较分析[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(6):174-176.
- [14] ZHANG Huan, JI Guixiang. Application of comprehensive water quality identification index method to water quality assessment of park lakes[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(2):146-150.
- 张欢, 纪桂霞. 综合水质标识指数法在公园湖泊水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(2):146-150.
- [15] XU Zuxin. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(4):482-488.
- 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.
- [16] SU Dan, TANG Dayuan, LIU Lanlan, et al. Reviews on source apportionment of pollutions in water environment[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(2):749-755.
- 苏丹, 唐大元, 刘兰岚, 等. 水环境污染源解析研究进



- 展[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2):749-755.
- [17] XIE Ying, LI Xuyong, WANG Huiliang, et al. Stream pollution analysis and hydrochemical assessment of the Upper Luanhe River Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(3):645-653.  
解莹, 李叙勇, 王慧亮, 等. 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, 2012, 32(3):645-653.
- [18] MA Lan, TENG Yanguo, LIN Xueyu, et al. Sources of water pollution in the Jinjiang River Basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48(5): 471-475.  
马岚, 滕彦国, 林学钰, 等. 晋江流域水体污染源解析研究[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2012, 48(5): 471-475.
- [19] General Bureau of China National Environmental Protection. 2002. Environmental Quality Standard Surface Water [S]. Beijing: China Environmental Science Press.  
国家环境保护总局. 2002. 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- [20] QU Xijie, YI Qitao, HU Youbiao, et al. Nutrient spatiotemporal distribution and eutrophication process in subsidence waters of Huainan and Huaibei mining areas, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(11):3 249-3 258.  
曲喜杰, 易齐涛, 胡友彪, 等. 两淮采煤沉陷积水区水体营养盐时空分布及富营养化进程[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11):3 249-3 258.
- [21] ZHANG Bing. Research of water environment and pollution characteristics of Linhuan coal-mine subsided area in Huaibei[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2012.  
张冰. 淮北临涣采煤塌陷区水环境特征及污染性状研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2012.
- [22] SIMEONOV V, STRATIS J A, SAMARA C, et al. Assessment of the surface water quality in Northern Greece[J]. Water Research, 2003, 37 (17): 4 119-4 124.
- [23] MORALES M M, MARTIH P, LLOPIS A, et al. An environmental study by factor analysis of surface seawater in the gulf of Valenci ( Western Mediteranean) [J]. Analytica Chimica Acta, 1999, 394(1):109-117.
- [24] ZHANG Yuan, GUO Fen, MENG Wei. Water quality assessment and source identification of Daliao River Basin using multivariate statistical methods [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 152(1-4):105-121.
- [25] ZHAO Jie, XU Zongxue, LIU Xingcai, et al. Source apportionment in the Liao River Basin [J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 838-842.  
赵洁, 徐宗学, 刘星才, 等. 辽河河流水体污染源解析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 838-842.
- [26] LUO Yongxia, GAO Bo, YAN Xiaoyuan, et al. Estimating contribution of agricultural sources to aquatic nitrogen load in Taihu Lake Region: A case study of Yili River Catchment [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015(12):2 319-2 326.  
罗永霞, 高波, 颜晓元, 等. 太湖地区农业源对水体氮污染的贡献:以宜溧河流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2015(12):2 319-2 326.
- [27] XIN Yuting, CHEN Wei, SUN Min, et al. Calculation methods for pollution load of fresh water aquiculture [J]. Water Resources Protection, 2007, 23(6):19-22.  
辛玉婷, 陈卫, 孙敏, 等. 淡水养殖污染负荷估算方法刍议[J]. 水资源保护, 2007, 23(6):19-22.
- [28] MUSTAPHA A, ARIS A Z, JUAHIR H, et al. Surface water quality contamination source apportionment and physicochemical characterization at the upper section of the Jakara Basin, Nigeria [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(12): 4 903-4 915.
- [29] WANG W, LIU X, WANG Y, et al. Analysis of point source pollution and water environmental quality variation trends in the Nansi Lake Basin from 2002 to 2012[J]. Journal of Chemistry, 2016, 23(5):4 886-4 897.