

2013—2019 年陕北矿区饮用水源地水质特征及驱动因素

董颖¹, 吴喜军^{1,2}, 李怀恩², 张亚宁¹, 武宏梅³, 刘静¹, 张范平¹

(1. 榆林学院 建筑工程学院, 陕西 榆林 719000; 2. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 榆林高新区水务有限责任公司, 陕西 榆林 719000)

摘要: [目的] 分析陕北矿区饮用水源地尤家崾水库的水质变化特征和驱动因素, 为中国同类地区饮用水的保护和处理提供技术依据。[方法] 于 2013—2019 年对榆林市饮用水源地尤家崾水库水质进行连续监测, 获取了 20 项水质指标数据, 并采用主成分分析法 (PCA) 和 PCA-熵值结合法对监测数据进行分析。[结果] ① 浊度、色度、锰含量是影响尤家崾水库水质的主要驱动因子, 高锰酸盐指数、氨氮次之。水质净化的首要任务是除锰。② 尤家崾水库 2014 年水质最差, 2015, 2016 年水质较好; 年内冬季水质最好, 夏季最差, 与降水量、气温变化有明显的相关性。③ PCA 是一种切实可行的水质主要驱动因子识别方法, 与 PCA-熵值结合法的计算结果基本一致。[结论] 锰污染是尤家崾水库水质恶化的主导因素, 夏季锰浓度明显升高, 应相应调整水处理工艺或增大药剂投加量, 以满足民生饮水安全。

关键词: 主成分分析法; 熵值法; 陕北矿区; 饮用水源; 水质特征; 驱动因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)01-0284-06

中图分类号: X824

文献参数: 董颖, 吴喜军, 李怀恩, 等. 2013—2019 年陕北矿区饮用水源地水质特征及驱动因素[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 284-289. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 20210203. 001; Dong Ying, Wu Xijun, Li Huaian, et al. Water quality characteristics and driving factors of drinking water source in Northern Shaanxi mining area during 2013—2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 284-289.

Water Quality Characteristics and Driving Factors of Drinking Water Source in Northern Shaanxi Mining Area During 2013—2019

Dong Ying¹, Wu Xijun^{1,2}, Li Huaian², Zhang Yaning¹, Wu Hongmei³, Liu Jing¹, Zhang Fanping¹

(1. School of Civil Engineering, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China;

2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology,

Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. Yulin High-tech Zone Water Co., Ltd., Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: [Objective] The water quality change characteristics and driving factors of Youjiamao reservoir, which is a drinking water source of mining area in Northern Shaanxi Province were analyzed to provide a technical support for the protection and treatment of drinking water in similar areas. [Methods] The water quality of Youjiamao reservoir was continuously monitored from 2013 to 2019, and 20 water quality indicators were obtained. The principal component analysis (PCA) and PCA-entropy method were used to analyze the monitoring data. [Results] ① Turbidity, chroma, manganese were the main driving factors of water quality in Youjiamao reservoir, followed by permanganate index and ammonia nitrogen. The primary task of water purification was to remove manganese. ② The water quality of Youjiamao reservoir was the worst in 2014, and was better in 2015 and 2016. Water quality was the best in winter and the worst in summer, which had obvious correlation with the precipitation and temperature. ③ PCA was a feasible method to identify the main driving factors of water quality, which was basically consistent with the calculation result of PCA-entropy method. [Conclusion] Manganese pollution is the key factor for the deterioration of water quality in Youjiamao reservoir, and the manganese concentration is significantly higher in summer. Therefore, water treatment technology should be adjusted or chemicals dosage should be increased to meet the drinking water safety.

收稿日期: 2020-10-18

修回日期: 2020-12-21

资助项目: 国家自然科学基金项目“陕北窟野河流域煤炭开采对河流生态健康的影响机理研究”(51969031); 陕西省重点研发计划项目(2020SF-412, 2020SF-409); 西北旱区生态水利国家重点实验室开放基金项目(2019KFKT-13); 榆林市科技局项目(2019-101-2)

第一作者: 董颖(1981—), 女(汉族), 河北省辛集市人, 教授, 从事水资源保护及水污染控制技术研究。Email: dyj1010@163.com。

通讯作者: 吴喜军(1978—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 教授, 从事水环境治理与水生态修复研究。Email: wxj0826@163.com。

Keywords: principal component analysis (PCA); entropy method; mining area in Northern Shaanxi Province; drinking water source; water quality characteristics; driving factors

陕北地区是中国重要的煤炭生产基地,为典型的半干旱内陆气候区,降水较少,地表干燥,水资源贫乏。以前该地区生态环境质量较好,但随着近些年人口的增长与矿产资源的开发,水资源减少明显^[1],生活污水、工业废水和农田排水大量流入水体,加上水土流失严重,导致饮用水源环境质量已不容乐观,甚至影响到能源化工基地的可持续发展^[2-3]。一些学者对陕北主要河流的特征污染物及水质状况进行了研究^[4],但陕北矿区水源地水质监测分析和综合评价工作开展较少。分析该地区水源水质特征,了解其水环境状况是污染防治的必要前提,已迫在眉睫。

主成分分析法(PCA)可以从众多指标中筛选出几个综合指标,是水质评价方法之一。张涵等^[5]运用主成分分析法研究了成都平原典型区地下水潜在污染源及污染源时季变化规律。孙悦等^[6]运用主成分分析法研究白洋淀冰封期水污染特征,得出水质限制因子为 TN,TP。但 PCA 在确定主成分权重时包含主观因素,而熵值法是一种客观赋权法,可以很好地解决这一问题。项颂等^[7]基于熵值法对湖泊水生态环境健康状况进行现状评价及历史变化分析,张继宇等^[8]采用熵值法对陆浑水库营养状况进行了评估,结果均表明用熵权作为权重是可行的。

尤家崮水库是陕北榆林城区的重要饮用水水源地,作为典型的深水型水库,因自然分层及混合过程的存在,导致水库水体面临沉积物内源污染释放和外源污染汇入的双重问题。并且尤家崮水库采用底层取水的供水方式,其内源污染尤为明显,深层水体周期性热分层过程使沉积物向上覆水中释放大量还原性污染物,存在较高的铁和锰超标的风险,水质状况直接影响民生饮水安全。本文根据尤家崮水库 2013—2019 年连续的月水环境调查数据,运用主成分分析法和 PCA-熵值结合法,对其水质状况进行研究,分析影响水质的主要驱动因子,研究水质的时间变化规律,并分析其原因,以期为该地区饮用水环境保护和处理对策提供理论基础和决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

尤家崮水库(38°15′00″—38°15′40″N,109°42′32″—109°43′26″E)位于榆林市榆溪河支流沙河水系下游,于 1988 年 10 月建成并投入使用,控制流域面积 97 km²,总库容 1.58×10⁷ m³,有效库容 9.70×10⁶ m³,水库水位约为 1 097 m。净水厂取水口位于水库底层,取水管道接入点管中心标高为 1 076.93 m。作

为榆林城区工业生产与居民生活用水的重要水源保护地,年供水量达到 8.00×10⁶ m³。尤家崮水库来水包括两部分:一是沙河流域来水量,二是西沙渠引用榆溪河河水进行补水,北起牛家梁镇刀则湾,南至尤家崮水库,全长 23.8 km。

1.2 水样采集与监测

1.2.1 样品采集及保存 2013 年 3 月至 2019 年 8 月对尤家崮水库实施原位监测,监测频率为每月 1~2 次。采用有机玻璃采水器对净水厂取水口点位(38°15′22″N,109°43′19″E)、取水口上 0.5 m 和取水口下 0.5 m 等 3 个不同深度水样进行采集,并置于 5 L 聚乙烯瓶中,采样结束后尽快运回实验室于 4 ℃ 冰箱保存,3 d 内完成所有指标测定试验。

1.2.2 样品测定 尤家崮水库为榆林城区的饮用水水源地,根据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006),实验室测定项目选定 pH 值、色度、浑浊度、臭和味、肉眼可见物、总硬度(以 CaCO₃ 计)、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、溶解性总固体、高锰酸盐指数、硫酸盐、氯化物、氟化物、铁、锰、砷、六价铬、细菌总数、总大肠菌群共 20 项指标。各指标的测定均按照国家《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750-2006)进行。其中 pH 值采用玻璃电极法测定,色度采用光电比色法,浑浊度采用散射法,总硬度采用乙二胺四乙酸二钠滴定法,氨氮采用纳氏试剂比色法,高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾滴定法,氟化物采用氟试剂比色法,锰采用过硫酸铵比色法。

1.3 数据分析方法

水质分析数据取 3 个不同深度采样点监测结果的平均值。其中亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、溶解性总固体、硫酸盐、氯化物、铁、砷、六价铬、细菌总数、总大肠菌群等远低于《生活饮用水水源水质标准》(CJ 3020-1993)中的二级水源水质标准,不作主成分分析。选取 pH 值、色度、浑浊度、总硬度、氨氮、高锰酸盐指数、氟化物、锰这 8 个主要指标进行分析,数据取各个季度的平均值(春季:3—5 月,夏季:6—8 月,秋季:9—11 月,冬季:12—2 月)。将数据标准化后,应用 SPSS 20.0 软件进行计算,通过主成分分析法识别影响该地区水源水质的主要驱动因子^[9-11],然后运用 PCA 和 PCA-熵值结合两种方法分析水质的时间变化规律^[12-13],并分析其原因。

1.3.1 主成分分析法 主成分分析是数学上对数据降维的一种方法。其基本思想是设法将原来众多的具有一定相关性的指标,重新组合成一组较少个数的

互不相关的综合指标来代替原来指标,并且使其能最大程度地反映原变量所代表的信息^[14-15]。每个主成分所提取的信息量用其方差来度量,方差越大,包含的信息越多。计算步骤如下:

- (1) 将原始数据标准化,以消除量纲的影响;
- (2) 计算相关系数矩阵;
- (3) 计算特征值与特征向量;
- (4) 计算主成分贡献率及累积贡献率,取特征值 $\lambda_i \gg 1$ 所对应的主成分进行分析;
- (5) 计算主成分载荷^[16];
- (6) 计算各主成分得分及主成分综合得分。

1.3.2 主成分—熵值结合法 熵值法是一种客观赋权法,根据指标的离散程度确定权重,可以避免人为因素带来的偏差,但存在忽略指标本身的重要程度和不能减少维数等缺点。所以,可以在主成分分析之后,用熵权作为各个主成分的权重进行综合评价,降低计算结果的主观性^[17-18],即本研究中提到的 PCA-

熵值结合法。计算步骤如下:

- (1) 数据平移,对主成分得分数据进行非负化处理;
- (2) 数据标准化;
- (3) 计算指标信息熵值 e 和信息效用值 d ;

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m Y_{ij} \ln Y_{ij} \quad (1)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (2)$$

- (4) 计算熵权;

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (3)$$

- (5) 利用熵值法赋权计算综合得分。

2 结果与讨论

2.1 监测结果

尤家岭水库 2013—2019 年 pH 值、色度、浑浊度、总硬度、氨氮、高锰酸盐指数、氟化物、锰等 8 个指标的监测结果如图 1 所示。

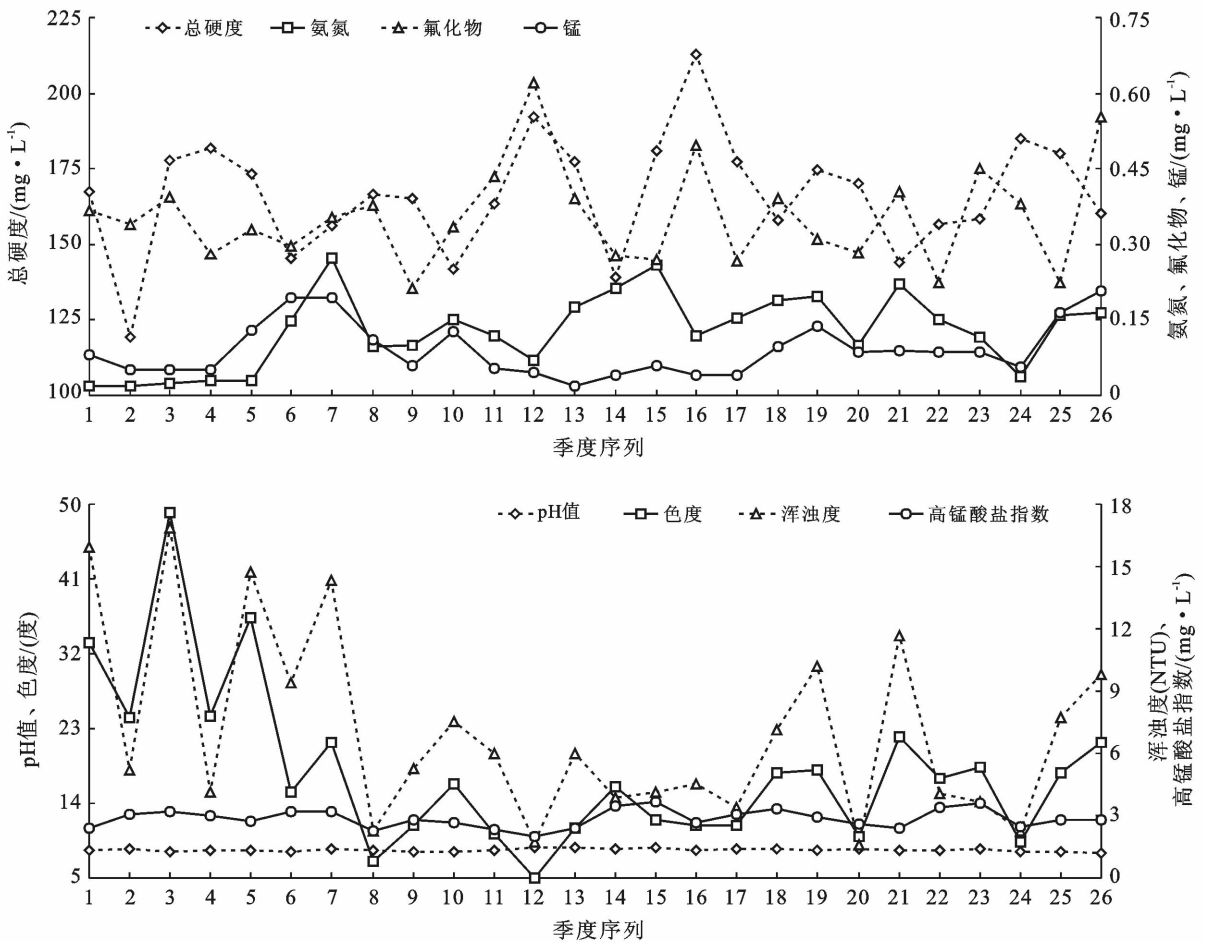


图 1 尤家岭水库 2013—2019 年各季度水质监测数据

如图 1 所示,2013—2019 年,尤家岭水库水质不断恶化,出现季节性锰超标(锰最高含量 0.43 mg/L,色度最高 50.00 度)与水体富营养化趋势,氨氮含量

较高(氨氮最高 0.52 mg/L),pH 值介于 7.80~8.88 之间,总硬度、高锰酸盐指数、氟化物等含量满足《生活饮用水水源水质标准》(CJ 3020-1993)中的二级水

源水质标准要求。在夏季枯水期,水体伴有鱼腥味、沤泥味、土霉味等不良现象与雨季翻库等。

2.2 影响水质的主要驱动因子识别

因子分析之前,首先要进行 KMO 和 Bartlett 的检验。KMO 检验是用于比较变量间简单相关和偏相关系数的指标,Bartlett 用于检验数据分布以及各变量间的独立情况。KMO>0.5,Bartlett 的显著性概

率<0.05 时,认为有结构效度,才能进行因子分析。本检验结果显示,KMO 为 0.648,Bartlett 的显著性概率为 0.000,符合标准,各个变量在一定程度上相互独立,可以进行主成分分析。

应用 SPSS 软件对标准化后的监测数据进行主成分分析,8 个主要水质指标的相关系数矩阵如表 1 所示。

表 1 尤家崮水库主要水质指标的相关系数矩阵

影响因子	pH 值	色度	浑浊度	总硬度	氨氮含量	高锰酸盐指数	氟化物含量	锰含量
pH 值	1.000	-0.330	-0.372	0.051	0.347	0.249	0.013	-0.515
色度	-0.330	1.000	0.812	-0.157	-0.346	0.242	-0.056	0.462
浑浊度	-0.372	0.812	1.000	-0.147	-0.008	0.037	0.031	0.537
总硬度	0.051	-0.157	-0.147	1.000	-0.169	-0.294	0.235	-0.267
氨氮含量	0.347	-0.346	-0.008	-0.169	1.000	0.372	-0.141	0.319
高锰酸盐指数	0.249	0.242	0.037	-0.294	0.372	1.000	-0.441	0.113
氟化物含量	0.013	-0.056	0.031	0.235	-0.141	-0.441	1.000	-0.029
锰含量	-0.515	0.462	0.537	-0.267	0.319	0.113	-0.029	1.000

通过表 1 中 8 项指标的相关系数可以看出,锰与浑浊度、色度存在显著的正相关性(0.537,0.462),浑浊度与色度显著正相关(0.812),表明锰浓度的变化会对浑浊度、色度产生较大影响。pH 值与锰存在显著的负相关性(-0.515),有研究指出,酸性水会引起固体废物中金属元素的活化与迁移^[19],而尤家崮水库水体呈现弱碱性(监测期间 pH 值介于 7.80~8.88),这可能是 pH 值与锰之间存在显著负相关的原因。

根据特征值 $\lambda_i \gg 1$ 的原则提取的 3 个主成分反映了原始 8 个水质指标提供的 69.95% 的信息,基本代表了研究水体的综合水质状况。各主成分的特征值、贡献率、累积贡献率及主成分载荷如表 2—3 所示。

表 2 尤家崮水库水质评价方差分解主成分提取结果

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	2.397	29.97	29.97
2	1.982	24.77	54.74
3	1.217	15.21	69.95

主成分 1 贡献率占有所有影响因子贡献率的 29.97%,浑浊度、色度、锰含量在其中的载荷值较大,分别为 0.873,0.823,0.605,说明它们是第一主成分的主要影响因素,对研究水体水环境质量的的影响最大,为第一类主要污染源。主成分 2 贡献率为 24.77%,高锰酸盐指数、氨氮在其中的载荷值较大,分别为 0.773,0.741,说明它们是第二主成分的主要影响因素,对水环境质量的的影响次之,为第二类主要污染源。主成分 3 贡献率为 15.21%。

表 3 尤家崮水库水质评价主成分载荷矩阵

影响因子	主成分 1	主成分 2	主成分 3
pH 值	-0.613	0.422	-0.217
色度	0.823	-0.159	-0.449
浑浊度	0.873	-0.109	0.016
总硬度	-0.376	-0.494	-0.019
氨氮含量	-0.109	0.741	0.490
高锰酸盐指数	0.202	0.773	-0.356
氟化物含量	-0.148	-0.567	0.402
锰含量	0.605	0.231	0.663

因此,浑浊度、色度、锰含量是影响尤家崮水库水质的最主要的驱动因子,又由于锰含量与浑浊度、色度之间存在显著的正相关性,即锰减少的同时可以降低浑浊度及色度。所以可以得出,锰污染是主导因素,目前尤家崮水库水质净化的首要任务是除锰。

2.3 水质时间变化特征分析

求出提取的 3 个主成分特征值的特征向量,将其与标准化数据 X_1, X_2, \dots, X_8 相乘,即可得出如下 3 个主成分表达式。

$$F_1 = -0.256X_1 + 0.343X_2 + 0.364X_3 - 0.157X_4 - 0.045X_5 + 0.084X_6 - 0.062X_7 + 0.252X_8$$

$$F_2 = 0.213X_1 - 0.080X_2 - 0.055X_3 - 0.249X_4 + 0.374X_5 + 0.390X_6 - 0.286X_7 + 0.116X_8$$

$$F_3 = -0.178X_1 - 0.369X_2 + 0.013X_3 - 0.016X_4 + 0.402X_5 - 0.292X_6 + 0.330X_7 + 0.545X_8$$

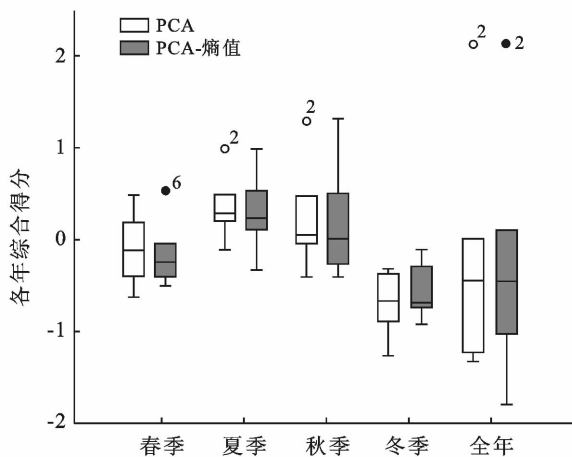
根据公式 $F = \sum_{i=1}^m (\lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i) F_i$, 用特征值赋权, 得出 PCA 法计算的各季度综合得分。用 Matlab 软件计算出熵权为 $W_1 = 0.328, W_2 = 0.331, W_3 = 0.341$, 根据公式 $F = \sum_{i=1}^m W_i F_i$, 用熵值法赋权, 得出 PCA-熵值结合法计算的各季度综合得分。然后将每年各个季度的综合得分求和, 得出两种方法的全年综合得分及排序(表 4), 分值越低, 水环境质量越好。并构建尤家崮水库各年综合得分箱线图(如图 2)。

由表 4 可以看出, 两种方法的计算结果基本一致, 2015, 2016 年水质较好, 这应该与榆林地区当年

发生的特大暴雨有关, 2014 年水质最差, 2017, 2018 年水质状况尚可, 基本保持稳定。两种方法的计算结果虽表现出相对一致性, 但也存在一定差异, 如 2013, 2015 年水质全年排序存在差别, 分析原始监测数据, 2013 年色度、浑浊度、高锰酸盐指数浓度总体高于 2015 年, pH 值、总硬度、氨氮、氟化物、锰总体低于 2015 年, 且数据相差很小, 不能直接说明水质优劣。由于两种方法的权重确定方式存在差异, 使得不同指标数据的变化所引起的水质变化程度有所不同, 但均能较好地反映实际水质状况, 在水质特征分析方面具有较好的可靠性与适用性。

表 4 尤家崮水库水质评价主成分综合得分及排序

年份	春季		夏季		秋季		冬季		全年总分		全年排序	
	PCA	PCA-熵值结合	PCA	PCA-熵值结合	PCA	PCA-熵值结合	PCA	PCA-熵值结合	PCA	PCA-熵值结合	PCA	PCA-熵值结合
2013	-0.118	-0.317	-0.119	-0.338	0.011	-0.409	-0.580	-0.743	-0.806	-1.807	3	1
2014	0.178	-0.046	0.987	0.989	1.290	1.318	-0.324	-0.117	2.131	2.143	6	6
2015	-0.132	-0.174	0.489	0.531	-0.413	-0.272	-1.275	-0.928	-1.331	-0.844	1	3
2016	-0.626	-0.506	0.205	0.111	0.086	0.086	-0.897	-0.720	-1.232	-1.029	2	2
2017	-0.403	-0.408	0.308	0.304	0.477	0.502	-0.377	-0.294	0.006	0.104	5	5
2018	0.479	0.525	0.257	0.150	-0.046	-0.078	-0.777	-0.673	-0.087	-0.077	4	4
2019	0.474	0.493	0.845	1.016								



注: ① 箱体顶部、底部和内部横线分别表示上四分位数、下四分位数和中位数的位置, 箱线图的上下两条横线触须表示数据的散布范围, 分别为四分位数差 1.5 倍距离的值, 超出上下两条触须范围划为异常值, 用空心点和实心点表示; ② 异常值旁边数字表示其所在年份的序号数。

图 2 尤家崮水库水质评价各年综合得分箱线图

图 2 用箱线图把批量数据的分布形状直观地表示出来, 便于进行尤家崮水库各年不同季度水质状况的比较。箱线图表明, PCA 和 PCA-熵值结合法计算的水质年内变化规律相同, 冬季水质最好, 得分均明显较低, 中位数分别为 -0.679 和 -0.697 ; 春季较好, 中位数分别为 -0.125 和 -0.246 ; 秋季一般, 中位数

分别为 0.049 和 0.004 , 且数据的散布范围较大, 不太稳定; 夏季最差, 得分均明显较高, 中位数分别为 0.283 和 0.227 。

PCA 计算结果显示在夏秋季、全年存在 3 个异常值点, PCA-熵值结合法计算结果显示, 在春季和全年出现两个异常值点, 结合表 4 数据, 该异常值均出现在 2014 年, 其得分均明显高于其他年份, 进一步说明了 2014 年水质较差, 应相应调整水处理工艺或增大药剂投加量, 也印证了两种赋权方法的可靠性。

2.4 水质变化原因分析

尤家崮水库水质呈季节性变化, 夏季水质最差, 这主要与以下几个方面有关: ① 净水厂取水口在水库底层, 夏季气温的升高使深水型水库水温分层, 从而形成温跃层, 极大地阻碍了上下层水体的物质交换, 水库底层水体溶解氧无法得到补充, 原有的溶解氧被有机物、底栖生物等所消耗, 库底严重缺氧, 逐渐出现厌氧状态, 导致沉积物在水体厌氧时期较低还原性条件下铁、锰等污染物的释放, 使上覆水中铁和锰浓度升高, 从而使得采用底层取水的尤家崮水库水质变差。同时, 高浓度铁锰饮用水还会导致一系列浊度、色度和嗅味等问题; ② 夏季水温升高会促进浮游生物、细菌等的代谢繁殖, 从而引起水中有机物的腐败变质, 并且增加了有机物、氨氮等溶解性污染物的含

量。由于存在着丰富的氮磷基质,死水区域藻类大量繁殖,当藻类繁殖超过水体可容纳量时,部分下层水体藻类会死亡腐败影响水质^[20];③与降水的季节性变化有关,夏季强降水增多,径流量增大,暴雨径流的侵蚀和动态混合作用使水库水体颗粒态污染物显著增加,两岸土壤中的农药、化肥、有机物等污染物会随着降雨径流冲刷汇入水体。且水源水库具有水体紊动性差、水力停留时间长等特点,暴雨径流产生的污染会对水库水质产生较大影响。

3 结论

(1) 运用主成分分析法将尤家崮水库多个水质指标综合为 3 个主成分,反映了 69.95% 的信息,基本代表了研究水体的综合水质状况。研究得出浑浊度、色度、锰是影响水库水质的最主要驱动因子,由于锰与浑浊度、色度之间存在显著的正相关性,故目前水质净化的首要任务是除锰。高锰酸盐指数、氨氮对水质的影响次之。

(2) 应用 PCA 和 PCA-熵值结合两种方法分析了尤家崮水库水质的时间变化规律。其中 2014 年水质最差,应相应调整水处理工艺或增大药剂投加量,2015,2016 年水质较好,这可能与当年发生的特大暴雨有关,2017,2018 年水质状况尚可。水质年内呈季节性变化,春季较好,夏季最差,秋季一般,冬季最好。夏季水质最差是由于持续高温导致库中藻类大量繁殖,铁、锰、有机物、氨氮等含量增高。

(3) 通过 PCA 可以准确识别影响尤家崮水库水质的主要驱动因子。运用 PCA 和 PCA-熵值结合两种方法均可以确定水质的时间变化规律,且两种方法的计算结果具有较好的一致性,在水质特征分析方面均具有较好的可靠性与适用性。分析结果可为中国同类地区饮用水的保护和处理提供理论基础和决策依据。

[参 考 文 献]

[1] 吴喜军,李怀恩,董颖,等. 陕北地区煤炭开采等人类活动对河道径流影响的定量识别[J]. 环境科学学报,2014,34(3):772-780.

[2] 王小军,贺瑞敏,宋晓猛,等. 榆林能源化工基地供水水源问题分析[J]. 地下水,2014,36(6):139-142.

[3] Wu Xijun, Dong Ying. River runoff influence factors recognition using the stepwise regression analysis: A case of Northern China coal mining area [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2020,29(1):893-900.

[4] Liu Jing, LiuYongjun, Zhang Aining, et al. Spatial distribution, source identification, and potential risk assessment of toxic contaminants in surface waters from Yulin, China [J]. Environmental Monitoring and As-

essment, 2019,191(5):191-293.

[5] 张涵,李奇翎,郭珊珊,等. 成都平原典型区地下水污染时空异质性及污染源分析[J]. 环境科学学报,2019,39(10):3516-3527.

[6] 孙悦,李再兴,张艺冉,等. 雄安新区—白洋淀冰封期水体污染特征及水质评价[J]. 湖泊科学,2020,32(4):952-963.

[7] 项颂,庞燕,侯泽英,等. 基于熵值法的云南高原浅水湖泊水生生态健康评价[J]. 环境科学研究,2020,33(10):2272-2282.

[8] 张继宇,王国重,李中原,等. 熵值密切值法在陆浑水库营养状况评估中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(4):119-123.

[9] 龚清莲,刘颖,汤冰冰. 长江宜宾段水质时空分布特性分析[J]. 环境科学与技术,2016,39(3):111-116.

[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] 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.

[12] Zhang Bing, Song Xianfang, Zhang Yinghua, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen Plain, Northeast China [J]. Water Research, 2012,46(8):2737-2748.

[13] Liu Jing, Hang Xiaoshuai, Liang Bin, et al. Characteristics of spatial and temporal variation of water quality of sensitive waters in Taihu Lake [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(6): 628-632.

[14] 樊庆铎,杨先兴,邱微. 松花江哈尔滨段城市水环境质量评价[J]. 中国环境科学,2014,34(9):2292-2298.

[15] 杨学福,王蕾,关建玲,等. 基于多元统计分析的渭河西咸段水质评价[J]. 环境工程学报,2016,10(3):1560-1565.

[16] Heller D, Ter Veen R, Hagenhoff B, et al. Hidden information in principal component analysis of ToF-SIMS data: On the use of correlation loadings for the identification of significant signals and structure elucidation [J]. Surface and Interface Analysis, 2017,49(10):1028-1038.

[17] 朱文侠,姜在炳,赵格兰,等. 基于主成分分析法和熵值法的煤层气开采剩余资源量评价[J]. 煤矿安全,2019,50(5):162-167.

[18] Ou Weijian, Fang Xinyan. Assessment of black-start modes based on entropy value method and principal component analysis [J]. Power System Protection & Control, 2014,42(8):22-27.

[19] 张清华,韦永著,曹建华,等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价[J]. 环境科学,2018,39(4):1598-1607.

[20] 董颖,李乐,武宏梅,等. 基于水源地水质变化的KMnO₄ 预氧化技术应用研究[J]. 给水排水,2020,46(9):60-64.