

基于地下水化学特征的水封油库水幕系统有效性评价

彭振华, 乔丽苹, 黄安达, 王者超, 李 成

Evaluation of water curtain system effectiveness for underground crude oil storage caverns based on hydrogeochemical characteristics

PENG Zhenhua, QIAO Liping, HUANG Anda, WANG Zhechao, and LI Cheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305049>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制

Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring

张春潮, 侯新伟, 李向全, 王振兴, 桂春雷, 左雪峰 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 62-71

基于水化学和氢氧同位素的兴隆县地下水演化过程研究

Evolutional processes of groundwater in Xinglong County based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes

杨楠, 苏春利, 曾邯斌, 李志明, 刘文波, 康伟 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 154-162

同位素技术解析安阳河与地下水相互作用

Isotope analyses of the interaction between the Anyang River and groundwater

张敏, 平建华, 禹言, 黄先贵, 朱亚强, 程玉刚 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 31-39

利用电导率测井与压水试验联合评价岩体渗透性的方法

Method of evaluating the permeability of rock mass by the combination of packer test and flowing fluid electrical conductivity log

张必昌, 胡成, 陈刚, 张, 段丹丹 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 62-62

地下水井水位及化学组分的同震差异响应特征分析

An analysis of the coseismic differential response characteristics of well water levels and chemical components : A case study triggered by the Qinghaijiang earthquake

顾鸿宇, 王东辉, 李胜伟, 郑万模, 刘港, 向元英, 李丹, 陈能德 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 44-53

基于GSFLOW的镜湖湿地地表水与地下水耦合数值模拟

Numerical simulation of coupling surface water and groundwater based on GSFLOW for the Jinghu Wetland

郜会彩, 肖玉福, 胡云进, 陈柳安, 周如杰 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 182-191



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305049

彭振华, 乔丽苹, 黄安达, 等. 基于地下水化学特征的水封油库水幕系统有效性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 34-42.
PENG Zhenhua, QIAO Liping, HUANG Anda, et al. Evaluation of water curtain system effectiveness for underground crude oil storage caverns based on hydrogeochemical characteristics[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3): 34-42.

基于地下水化学特征的水封油库水幕系统 有效性评价

彭振华¹, 乔丽苹², 黄安达², 王者超², 李 成²

(1. 中海油石化工程有限公司, 山东 青岛 266101; 2. 东北大学辽宁省深部工程与智能技术
重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 水幕系统有效性是地下水封油库安全稳定运行的重要基础条件, 然而目前评价水幕系统有效性的方法并不高效便捷。以我国首个大型地下水封油库工程为背景, 采集油库运行期现场水样和岩样进行水质检测分析和电镜扫描试验, 获取库址区地下水水化学类型和岩石的矿物成分组成特征。采用数理统计方法, 基于地下水水化学特征获得了不同部位地下水之间的水力联系, 开展水幕系统有效性评价。研究表明: 油库运行初期库址区地下水主要为 $\text{HCO}_3\text{—Na}\cdot\text{Ca}$ 型水, 围岩中的钾长石、钠长石和钙长石发生水化学反应, 地下水中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 浓度总体呈上升趋势, pH 值总体呈下降趋势; Cl^- 浓度低于造成钢筋腐蚀的浓度, 地下水对洞库支护系统无明显腐蚀作用; 洞库周边监测孔地下水与水幕供水的水化学特征相似, 说明水幕系统与油库围岩之间存在较好的水力联系, 形成良好的水封效果。该研究可为判断地下水封油库运行情况提供重要依据, 并为评价水幕系统有效性提供了一种科学方法。

关键词: 地下水封油库; 水幕系统有效性; 地下水水化学特征; 水-岩相互作用; 聚类分析; 主成分分析

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)03-0034-09

Evaluation of water curtain system effectiveness for underground crude oil storage caverns based on hydrogeochemical characteristics

PENG Zhenhua¹, QIAO Liping², HUANG Anda², WANG Zhechao², LI Cheng²

(1. CNOOC Petrochemical Engineering Co.Ltd., Qingdao, Shandong 266101, China; 2. Key Laboratory of
Liaoning Province on Deep Engineering and Intelligent Technology, Northeastern University, Shenyang,
Liaoning 110819, China)

Abstract: Water curtain system effectiveness is important for the safe and stable operation of underground crude oil storage caverns; however, current methods on evaluating the water curtain systems effectiveness are not efficient and convenient. Based on the first large water sealing petroleum storage caverns in China, this study analyzed the hydrogeochemical feature and the mineral composition characteristic of rock mass by water quality tests, SEM analysis, and statistical analysis. The groundwater curtaining system effectiveness were then assessed based on the hydraulic connection analysis. The results show that groundwater is dominated by $\text{HCO}_3\text{—Na}\cdot\text{Ca}$

收稿日期: 2023-05-10; 修订日期: 2023-07-28

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42177157); 辽宁省应用基础研究计划项目(2022020363-JH2/1013)

第一作者: 彭振华(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地下洞库技术研究。E-mail: peng_zhenhua_cn@163.com

type water in the early stage of oil storage running. With the interaction between groundwater and mineral components in rock, such as potassium feldspar, albite, and anorthite, the concentration of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , and HCO_3^- increases, and pH decreases. The concentration of Cl^- maintained in the allowable range, indicating no groundwater corrosion on the support system. The similarity of hydrogeochemical characteristics between water in the water curtaining system and background groundwater shows that water from the system has a hydraulic connection with the background groundwater, forming a good containment for the storage. This study provides an important basis for safe and effective operation of oil storage and a scientific method for judging the water curtain system effectiveness.

Keywords: underground crude oil storage caverns; water curtain system effectiveness; hydrogeochemical characteristics; water-rock interaction; cluster analysis; principal component analysis

地下水封洞库具有安全可靠、成本低廉、运输效率高和储存容量大等优势,近几十年来已成为石油储备的首选^[1-2]。在运营地下水封油库时,最重要的任务之一就是确保水幕系统的有效性,储存物质的安全性,并防止地下水污染^[3-6]。因此,评价水幕系统有效性对确保地下水封油库安全稳定运行具有重要意义。

地下水封油库一般修建在稳定的地下水水位以下一定深度的岩体中。当裂隙中水的渗透压力大于储存介质压力时,所储介质不会从裂隙中渗出。利用油比水轻以及油水不能混合的性质,流入洞内的水沿洞壁汇集到洞底部形成水床,由潜水泵抽出。这就是地下水封油库储油的基本原理^[7-8],如图1所示。

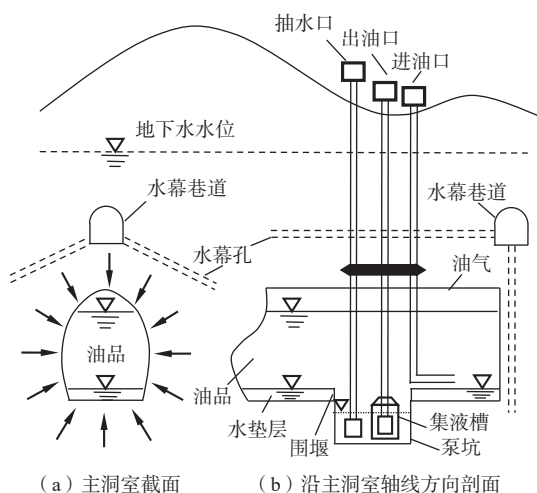


图1 地下水封油库储油原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of underground crude oil storage caverns

地下水封油库已大规模用于油气储备^[9-13]。目前相关研究主要包括地下水封油库的涌水量、水封条件以及水幕系统布置等^[14-18]。水幕系统是保证油库密封性的重要组成部分。通过水幕系统的供水在库区

周围形成稳定的渗流场,实现洞库的密封性。李术才等^[19]通过数值计算开展了地下水封油库水封性评价。Qiao等^[20]研究了国内首个大型地下水封油库的渗水量和空间分布特征,以此评估其水封性能,并详细探讨了水文地质条件对水封方式的选择、水幕系统的布局以及水幕的连通性的影响。Shi等^[21]利用监测数据的相关系数对水幕系统的有效性进行了评价。Lin等^[22]分析了水幕系统设计的基本原则以及部分参数对水幕系统性能的影响。已有研究多采用数值分析方法和理论分析方法预测洞库密封条件或判断水幕孔之间的连通性。由于工程规模大,采用上述方法通过地下水压力和流量等渗流场特征进行水幕系统有效性评价难度极大。因此,有必要提出一种高效、便捷的评价方法。

地下水在裂隙岩体中流动时,根据岩体矿物组成情况,一部分将与岩体发生化学反应,而另一部分则不会发生化学反应^[23-25]。地下水封油库运行后,水幕系统供水和地下水将通过岩体渗透至洞库中,通过监测分析库址区地下水水化学成分分布和变化情况,可以了解不同来源地下水空间分布特征,从而判断水幕系统供水的渗流范围,为评价水幕系统有效性提供依据。Ježerský^[26]在捷克的深部天然气储存洞室进行水化学研究,通过分析深部渗漏地下水的水质监测结果评估储存洞室围岩的储存性能。Ko等^[27]和Kim等^[28]对韩国地下液化石油气储存设备和放射性地下储库进行水化学分析,评估设施周围地下水水化学性质的变化和海水入侵的影响。

本文依托国内首个大型地下水封油库工程,在该油库运行后现场采集水样,分析地下水水化学性质,研究该项目区地下水水化学特征及演变规律,利用聚类分析、主成分分析等数理统计方法,探究各个部分

地下水之间的水力联系,进而对水幕系统的有效性做出准确评估,为油库的安全可靠运行提供保证。

1 工程概况

该地下水封油库项目是国内首个大型地下原油储备项目,东西宽度约为 600 m,南北长度约为 838 m,设计使用寿命为 50 a。工程由地下部分和地上辅助设施 2 部分组成。地下部分包括 9 个主洞室、4 条施工巷道和 5 条水幕巷道,见图 2。工程在 2010 年 11 月开始建设,2014 年 4 月完成,2015 年 6 月正式投入使用。

该区域造山带主要发育韧性剪切带及脆性断裂带,褶皱构造的发育程度相对较低。根据地质时期、岩石类型和工程特征的差异,地层岩性可以划分为 4 类:第四系残坡积和洪积层,下白垩统二长花岗岩,新元古界花岗片麻岩,下白垩统煌斑岩和闪长岩。片麻岩占围岩的 80% 以上,其外观以浅肉红色至浅青灰色为主,其中包括石英、钾长石、钠长石、钙长石等,岩体较为破碎,但仍然保持着相当的坚硬度。

库区含水层岩性主要为新元古界花岗片麻岩。地下水主要类型为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水(图 3)。地下水主要靠大气降水补给。2010—2019 年年均降水量为 605.95 mm。围岩渗透率为 0.12~12 mD,代表值为 1.2 mD。根据勘察资料,该区域地下水类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水。

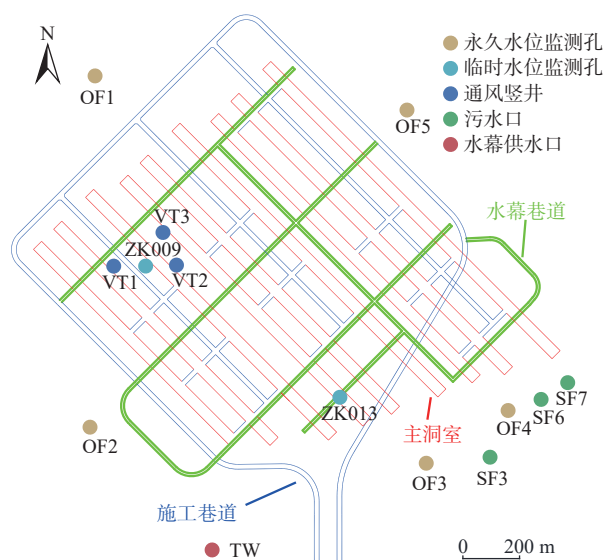


图 2 地下水封油库取样点布置图

Fig. 2 Groundwater sampling locations in the underground crude oil storage caverns

2 研究方法

2.1 水样采集与检测

分别于 2015 年 7 月、2016 年 1 月和 7 月共 3 个阶段,在油库库址区一共采集了 37 份水样。水样的采集按照相关规范要求^[29-30],取样点位置见图 2。水幕供水来自市政管道供水。取样点的范围基本覆盖项目区,不同类型的钻孔都进行取样。检测的项目和

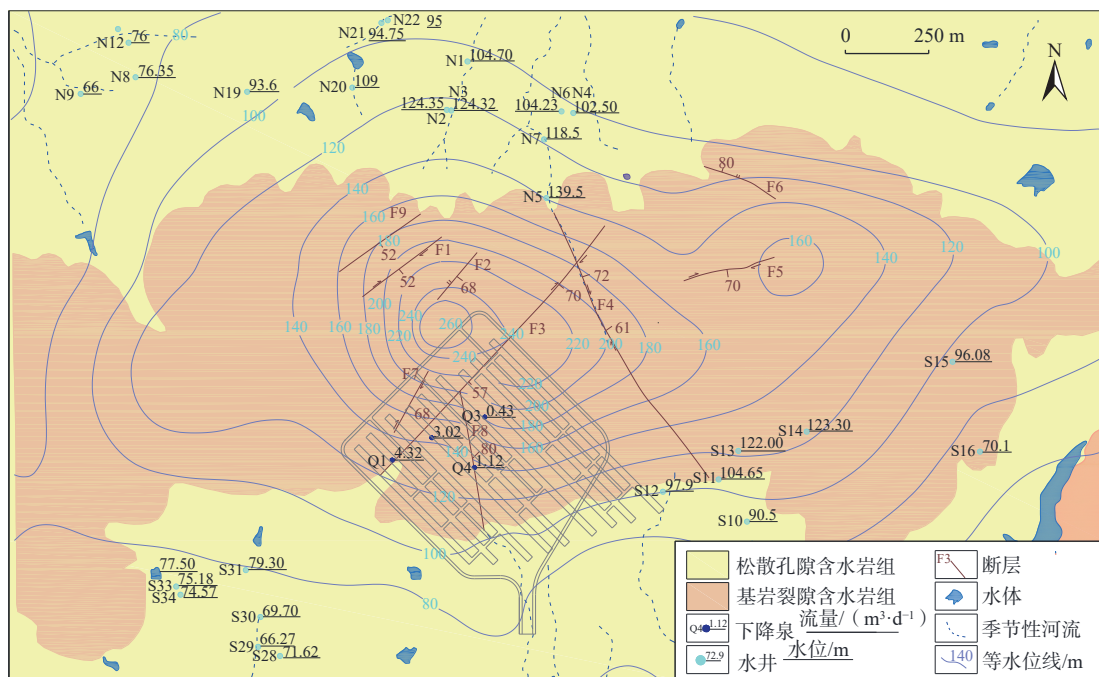


图 3 库址区的水文地质简图

Fig. 3 Hydrogeological settings of the project site

指标为 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 NO_3^- 、TDS、总硬度和 pH 值^[31]。地下水水化学特征在一年中没有明显的变化, 因此本文并未考虑自然变化的波动。

2.2 岩石矿物成分分析

为了深入了解地下水封油库的岩石矿物组成, 从不同位置收集了岩芯样品, 将其切割成薄片, 干燥处理后进行电镜扫描试验 (scanning electron microscope, SEM), 得到岩石的化学元素组成和岩石表面微观结构等试样的物理和化学性质。

2.3 数理统计分析

通过数理统计分析方法, 判断水样之间的水力关联性, 评估该地下水封油库的水幕系统的有效性。本文采用聚类分析和主成分分析方法。

聚类分析是一种根据样本之间的距离或相关系数衡量样本之间的相似程度的统计方法^[32]。进行聚类分析时, 样本或指标分成不同的组, 被分到一组的样本之间差异较小, 不同组的样本之间差异较大。

主成分分析是一种对高维数据进行可视化和预处理的统计方法。通过主成分分析, 可以有效地将原始数据中的相关变量转换为具有独立性的新变量, 从而更好地理解数据的结构和特征。这种方法可以有效地减少数据的复杂度, 提高数据的准确性和可靠性。

3 库址区地下水水化学特征

3.1 地下水水化学成分特征

水样的水质检测结果见表 1。地下水中的主要离子有 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 。 Na^+ 是最主要的阳离子。 HCO_3^- 是最主要的阴离子。图 4 为 2016 年 1 月至 2016 年 7 月水样中离子浓度变化量。随着油库的运行, 地下水中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的浓度均有所增加, 而 SO_4^{2-} 的浓度有所减少。

在地下水封油库运行的初期, 地下水的 TDS 为 200~400 mg/L。随着油库的运行, TDS 逐渐增加。在运行初期, 大多数水样的 pH 值在 7.0~8.5 之间。随着地下水封油库运行, pH 值逐渐下降。

3.2 水化学演化特征

通过绘制 Piper 三线图, 可以清晰地展示出项目区地下水的水化学特征。如图 5(a) 所示, 第 1 个阶段 (2015 年 7 月) 中, 地下水中的阳离子主要以 Na^+ 、 Ca^{2+} 为主, 地下水中的阴离子主要以 HCO_3^- 为主。第 1 个阶段主要的地下水水化学类型为 $HCO_3^-Na\cdot Ca$ 型水。

如图 5(b) 所示, 第 2 个阶段 (2016 年 1 月) 中水样

的主要阳离子没有发生变化, 阴离子变成了 HCO_3^- 和 Cl^- 。地下水中 K^+ 、 Na^+ 的相对含量比上一阶段高, 这是由于项目区的地下水系统进行的溶滤作用。第 2 个阶段主要的地下水水化学类型为 $HCO_3^-Na\cdot Ca$ 型水和 $SO_4\cdot Cl-Na$ 型水。

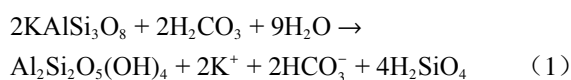
如图 5(c) 所示, 第 3 个阶段 (2016 年 7 月) 中水样的主要阳离子仍然保持不变, 阴离子与第 2 个阶段相同。从第 2 个阶段到第 3 个阶段, 地下水中 SO_4^{2-} 的相对含量减少, 这是由于项目区的地下水系统进行的溶滤作用, 此外地下水中的蒸发浓缩作用会导致 Cl^- 的浓度升高。第 3 个阶段主要的地下水水化学类型为 HCO_3^-Ca 型水和 $SO_4\cdot Cl-Na$ 型水。

综上可知, 在该地下水封油库运行初期, 地下水的水化学类型以 $HCO_3^-Na\cdot Ca$ 型水和 $SO_4\cdot Cl-Na$ 型水为主, 其中最主要的是 $HCO_3^-Na\cdot Ca$ 型水。地下水水化学成分的形成作用主要以溶滤作用和蒸发浓缩作用为主, 其中, 溶滤作用会导致 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的浓度均有所提高, SO_4^{2-} 的浓度呈下降趋势。蒸发浓缩作用则会导致 Cl^- 的相对浓度升高。

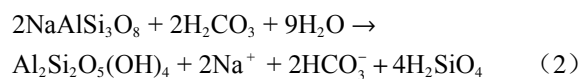
3.3 水-岩相互作用特征

在地下水封油库的不同位置收集 5 块岩样, 通过电镜扫描分析得到每块岩样中的元素组成。由表 2 可知, 库址区的岩石中含有 Si、O、Al、K、Na 和 C 等元素, 这些元素的含量都相当高, 这与典型的花岗岩相似。查阅相关勘察资料可知, 项目区围岩的主要成分是钾长石、钠长石和钙长石。当围岩与地下水接触时会发生反应, 形成矿物溶解^[33], 其反应方程式为:

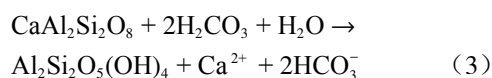
钾长石:



钠长石:



钙长石:



根据上述反应方程式, 当钾长石、钠长石和钙长石溶解于地下水中时, 将产生 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 等离子, 导致这些离子的浓度显著增加, 地下水的 pH 值显著降低。此外, 当地下水中的 Ca^{2+} 浓度升高时, 会与 SO_4^{2-} 发生反应, 生成微溶于水的 $CaSO_4$, 地下水中的 SO_4^{2-} 浓度会显著降低, 具体反应方程式为:

表 1 水质检测结果
Table 1 The water quality of samples

取样点 编号	取样 时间	pH	质量浓度/(mg·L ⁻¹)									TDS	全硬度
			K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻		
水幕 供水	2015年7月	8.4	3.0	33.0	52.2	14.2	53.1	49.1	124.9	15.0	5.1	349.6	188.7
	2016年1月	7.8	4.0	110.0	62.2	32.3	117.4	167.0	195.6	0	16.4	704.9	288.8
	2016年7月	8.3	4.9	44.3	60.0	18.4	44.4	16.7	151.4	0	0.5	340.5	211.5
OF1	2015年7月	8.0	3.7	36.0	42.2	6.7	32.3	18.7	170.6	0	3.5	313.7	133.2
	2016年1月	7.5	3.4	34.0	42.2	1.3	31.4	3.0	177.8	0	0.8	293.9	111.1
	2016年7月	6.8	4.3	40.0	46.4	13.2	26.2	3.1	196.8	0	0.1	330.0	155.6
OF2	2015年7月	8.0	2.0	18.0	41.1	5.4	24.0	29.5	115.8	0	13.4	249.1	124.9
	2016年1月	7.6	2.2	18.8	46.7	6.1	23.1	44.2	130.4	0	13.1	284.6	141.6
	2016年7月	6.9	3.6	22.1	49.0	8.3	22.2	7.4	125.2	0	3.0	240.8	147.3
OF3	2015年7月	8.1	3.0	28.2	22.2	6.1	27.1	11.3	106.6	0	1.6	206.1	80.5
	2016年1月	7.9	2.8	25.5	22.2	4.7	29.3	3.0	106.7	0	0.2	194.4	75.1
	2016年7月	7.9	4.3	27.3	24.8	8.5	26.8	40.5	115.6	0	0.6	248.3	101.3
OF4	2015年7月	7.7	4.2	47.0	31.1	6.7	32.5	41.7	163.0	0	0.6	326.8	105.1
	2016年1月	7.7	4.1	47.0	35.6	5.4	29.3	29.5	183.7	0	0.5	335.1	110.6
	2016年7月	7.3	4.3	50.5	42.7	9.8	33.0	2.6	191.3	0	0.1	334.3	128.8
OF5	2015年7月	7.7	1.1	19.8	15.6	1.4	17.7	11.3	45.7	0	6.6	119.2	44.4
	2016年1月	7.4	2.7	18.0	42.2	6.7	14.7	24.6	165.9	0	0.4	275.2	133.1
	2016年7月	7.7	4.4	22.9	47.3	12.4	14.2	11.9	180.3	0	0.1	293.5	150.1
SF3	2015年7月	7.9	19.8	72.0	10.0	2.0	43.8	86.0	60.9	0	1.1	295.5	32.3
	2016年1月	7.4	19.5	71.0	13.3	2.7	47.2	98.2	68.2	0	0	320.1	44.5
	2016年7月	7.8	27.8	97.1	38.0	8.2	39.2	71.4	177.5	0	0.5	459.7	111.6
SF6	2015年7月	8.4	16.8	63.0	4.4	0.7	32.5	66.3	38.5	8.7	17.0	247.9	14.0
	2016年1月	7.7	27.0	115.0	13.3	1.3	74.4	113.0	109.6	0	3.7	457.3	39.0
	2016年7月	8.1	13.4	90.9	46.6	8.8	87.0	28.6	172.0	0	0.1	447.4	157.4
SF7	2015年7月	7.9	20.8	72.0	15.6	2.7	50.3	81.0	71.1	0	9.5	323.0	50.0
	2016年1月	7.3	20.0	86.0	24.4	1.3	69.2	103.1	88.9	0	3.5	396.4	66.6
	2016年7月	8.2	31.4	84.5	39.2	8.1	78.4	95.2	172	0	0.3	467.8	136.6
ZK009	2016年1月	8.4	1.0	16.5	15.6	0.0	14.7	14.7	50.4	2.9	2.5	118.3	39.0
	2016年7月	6.8	1.4	17.3	13.2	2.8	17.4	21.4	55.0	0	1.8	130.4	50.3
ZK013	2016年1月	7.9	4.6	27.5	40.0	4.0	37.7	58.9	91.9	0	1.1	265.7	116.6
	2016年7月	7.1	6.4	31.9	40.0	8.5	37.8	50.0	89.4	0	0.7	264.7	121.1
VT1	2016年1月	9.1	19.5	71.0	8.9	5.4	39.8	71.2	5.9	35.0	19.4	276.1	44.0
	2016年7月	6.4	29.6	67.8	8.0	3.2	40.8	5.0	26.1	27.1	4.2	244.2	36.9
VT2	2016年1月	8.9	20.5	75.0	11.1	0.0	39.8	61.4	47.4	17.9	23.4	296.1	27.5
	2016年7月	6.6	35.3	76.5	10.5	4.5	43.8	17.1	55.0	13.3	5.3	130.4	40.4
VT3	2016年1月	8.5	17.5	56.8	11.1	0.0	29.3	34.4	83.0	2.9	21.3	256.3	27.5
	2016年7月	7.5	28.6	62.3	10.2	4.6	29.4	7.9	96.3	0	4.9	264.7	41.4



4 水幕系统有效性评价

水幕系统的有效性对于地下水封油库的正常运行至关重要。本文通过不同水样之间的水化学特征构建水力联系,根据和水幕供水存在水力联系的钻孔数量及其分布范围,分析水幕系统的有效性。

4.1 聚类分析

通过对 2016 年 7 月采集的地下水样本进行系统

聚类分析,绘制系统聚类分析的树状图如图 6。根据聚类分析树状图,可以把这些水样分成 5 组,具体分组情况见表 3。在全部水样中,TW、OF1、OF2、OF3、OF4、OF5 和 ZK013 为第 1 组,SF3、SF6 和 SF7 为第 2 组,VT1 为第 3 组,VT2 和 VT3 为第 4 组,ZK009 为第 5 组。由于同一组地下水的化学组成相近,可以推测出组中各个水样存在一定的水力关联性。

4.2 主成分分析

将水样检测结果导入到 Origin 软件中进行主成分

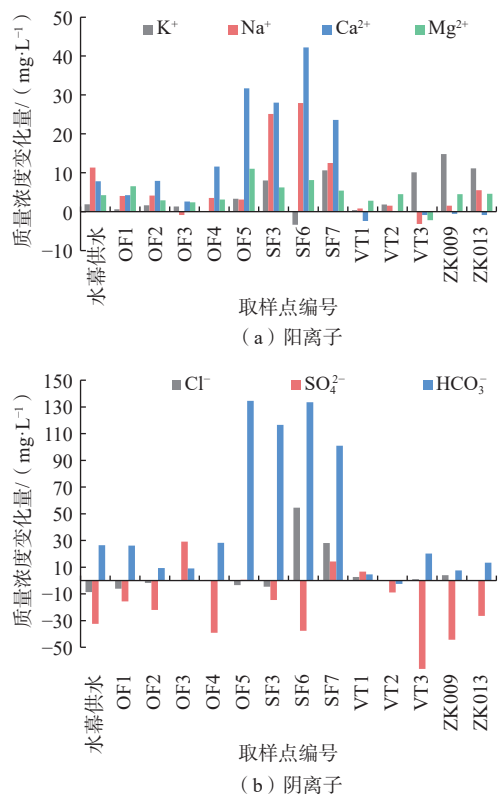


图 4 水样中主要阳离子、阴离子质量浓度变化

Fig. 4 Concentration changes in the cations and anions

分析。前 2 个主成分的累计方差贡献率为 79.4%, 足够代表原始数据。由图 7 可以知, 距离较近的点表示水样之间的水化学性质接近, 因此可以将全部水样分为 4 组: TW、OF1、OF2、OF3、OF4、OF5、ZK013 为第 1 组, SF3、SF6、SF7 为第 2 组, VT1、VT2、VT3 为第 3 组, ZK009 为第 4 组。

4.3 水幕有效性评价

综合聚类分析与主成分分析的结果, 将 OF1、OF2、OF3、OF4、OF5、ZK013 中收集的地下水重新分为第 1 组, 将 SF3、SF6、SF7 中收集的地下水分第 2 组, 将 VT1、VT2、VT3 中收集的地下水分第 3 组, 将 ZK009 处收集的地下水分第 4 组, 具体分组情况见表 4。

从表 4 的结果来看, OF1—OF5 以及 ZK013 中的地下水都具有类似于水幕供水的水化学性质, 这说明它们之间有着密切的水力联系。结合图 2 中 OF1—OF5 和 ZK013 的分布, 说明水幕供水的影响基本覆盖整个地下水封洞库。结果可以反映出水幕系统中的水幕供水可以基本渗流到洞室周围, 可有效防止油品向洞室外渗漏。该地下水封洞库的水封效果良好, 水幕系统能有效运行。同时, 第 2 组均为竖井内水样,

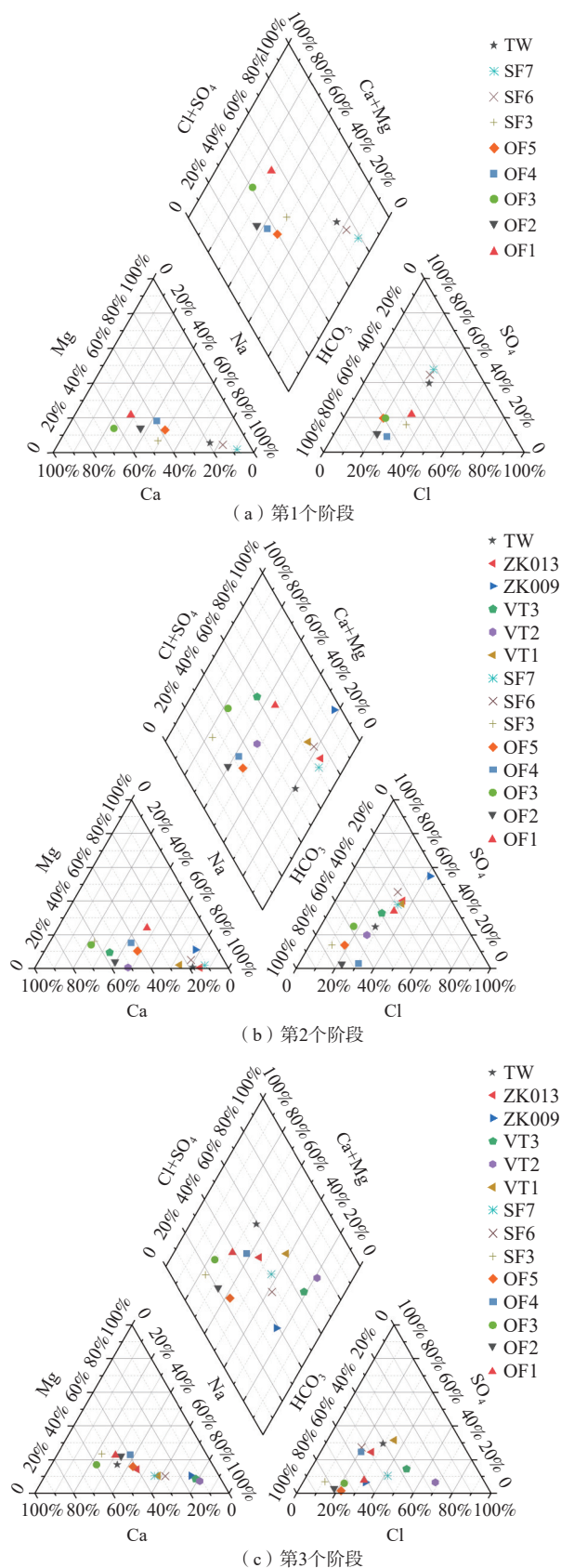


图 5 各时间段所取水样的 Piper 图

Fig. 5 Piper diagram of the water samples

表 2 各岩石试样薄片的化学元素组成

Table 2 Chemical element composition of rock slices

元素	样品1		样品2		样品3		样品4		样品5	
	百分含量平均值/%	方差	百分含量平均值/%	方差	百分含量平均值/%	方差	百分含量平均值/%	方差	百分含量平均值/%	方差
C	2.48	1.02	3.17	1.88	0.70	0.54	0.47	0.57	1.13	0.90
O	69.07	4.73	66.62	4.22	62.36	4.54	66.06	3.57	66.92	2.56
Na	0.99	1.98	2.50	2.89	0.18	0.35	2.35	2.95	0.15	0.30
Mg	0.31	0.61	0	0	0	0	0	0	0.30	0.60
Al	8.19	2.25	8.97	1.93	4.86	6.05	6.88	0.97	2.31	2.99
Si	14.42	4.06	16.25	3.75	27.23	6.79	19.97	1.77	24.37	6.07
K	0.63	0.45	0.59	0.50	3.12	3.68	3.62	2.42	1.30	2.61
Fe	2.75	2.29	0.70	1.14	0.40	0.80	0	0	2.12	4.24
Ti	0.16	0.32	0.19	0.38	0	0	0	0	0.31	0.62
Zr	1.02	0.18	0.84	0.57	0.58	0.75	0.46	0.58	1.11	0.48
Pt	0	0	0.18	0.35	0.59	0.69	0.20	0.39	0	0

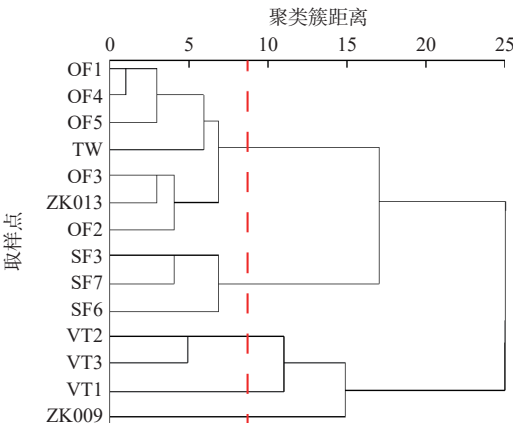


图 6 聚类分析树状图

Fig. 6 Tree diagram of the cluster analysis

表 3 聚类分析分组表

Table 3 Group system of the cluster analysis

组号	取样点编号
第1组	TW、OF1、OF2、OF3、OF4、OF5、ZK013
第2组	SF3、SF6、SF7
第3组	VT1
第4组	VT2、VT3
第5组	ZK009

受工程建设影响。第 3 组为污水水样。第 4 组为未受储油影响水样,即原位地下水。

5 结论

(1)随着地下水封油库的运行,地下水中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的浓度均有所增加,而 SO_4^{2-} 的浓度有所减少,TDS 逐渐增加,pH 值逐渐下降。

(2)随着地下水封洞库的运行,地下水会和围岩中的钾长石、钠长石和钙长石产生化学反应,造成其

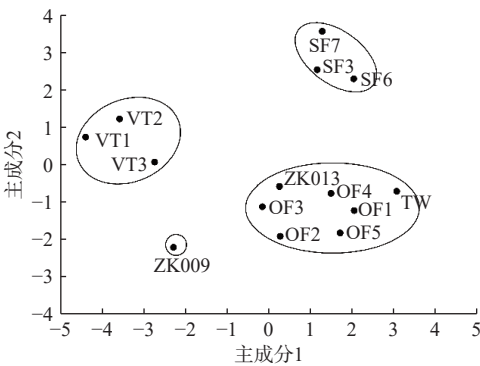


图 7 不同水样的主成分得分散点图

Fig. 7 Water samples in the principal components analysis

表 4 统计分析分类结果

Table 4 The classification of water samples

组号	取样点编号
第1组	TW、OF1、OF2、OF3、OF4、OF5、ZK013
第2组	SF3、SF6、SF7
第3组	VT1、VT2、VT3
第4组	ZK009

中的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 含量增加,pH 值下降。水中 Ca^{2+} 会和 SO_4^{2-} 反应生成沉淀,导致 SO_4^{2-} 含量降低。

(3)根据聚类分析和主成分分析的结果,全部的水样可以分为 4 组,第 1 组为水幕供水和永久性水位监测孔内水样;第 2 组均为竖井内水样,受工程建设影响;第 3 组为污水水样;第 4 组为未受储油影响水样,为原位地下水。

(4)水幕供水和永久性水位监测孔内水样之间存在着较强的水力联系。水幕供水能够有效地渗透到地下,形成水幕系统,有效阻止油品的渗漏,具有良好的水封效果,使得该系统能够正常运行。

参考文献 (References) :

- [1] 刘忠, 张业金, 张立德. 地下岩洞油库水封性高效调控策略 [J]. 油气储运, 2022, 41(9): 1036 – 1043. [LIU Zhong, ZHANG Yejin, ZHANG Lide. Efficient regulation strategy for water sealing of underground oil storage in rock caverns[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(9): 1036 – 1043. (in Chinese with English abstract)]
- [2] GOODALL D C, ÅBERG B, BREKKE T L. Fundamentals of gas containment in unlined rock caverns[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1988, 21(4): 235 – 258.
- [3] 李印, 陈雪见, 任文明, 等. 大型水封洞库水幕系统的连通性评价 [J]. 油气储运, 2015, 34(2): 167 – 170. [LI Yin, CHEN Xuejian, REN Wenming, et al. Connectivity evaluation of water curtain system of large-scale water-sealed storage cavern[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(2): 167 – 170. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 郭得福, 陈刚, 党娜. 多相流地下水封液化石油洞库水幕系统的性能评价 [J]. 油气储运, 2020, 39(9): 1002 – 1011. [GUO Defu, CHEN Gang, DANG Na. Performance assessment on water curtain system for multiphase flow water-sealed underground liquefied petroleum storage Caverns[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(9): 1002 – 1011. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 荆少东, 许国辉, 吴尚彬, 等. 基于三维精细化数值模型的地下油库水封安全评价 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 1 – 11. [JING Shaodong, XU Guohui, WU Shangbin, et al. Assessment of the water-sealed safety of underground crude oil storage based on a three-dimensional refined numerical model[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(6): 1 – 11. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 杨荣, 胡成, 陈刚, 等. 水幕系统对地下水封洞库藏品安全的影响分析 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 30 – 37. [YANG Rong, HU Cheng, CHEN Gang, et al. An analysis of the impact of the water curtain system on the safety of an underground water-sealed cavern[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(1): 30 – 37. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王者超, 李术才, 乔丽苹, 等. 地下石油洞库水封性评价方法体系及应用 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 2033 – 2042. [WANG Zhechao, LI Shucai, QIAO Liping, et al. Assessment methods for containment properties of underground crude oil storage caverns and their applications[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(11): 2033 – 2042. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王小倩. 地下水封洞库海水入侵机理与控制方法研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2021. [WANG Xiaoqian. Mechanism and control method of seawater intrusion in underground water-sealed Caverns[D]. Shenyang: Northeastern University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [9] BENARDOS A G, KALIAMPAKOS D C. Hydrocarbon storage in unlined rock Caverns in Greek limestone[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20(2): 175 – 182.
- [10] KIYOYAMA S. The present state of underground crude oil storage technology in Japan[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1990, 5(4): 343 – 349.
- [11] LEE C I, SONG J J. Rock engineering in underground energy storage in Korea[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18(5): 467 – 483.
- [12] LEE Y N, YUN S P, KIM D Y, et al. Design and construction aspects of unlined oil storage caverns in rock[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11(1): 33 – 37.
- [13] WANG Zhechao, LI Shucai, QIAO Liping, et al. Finite element analysis of the hydro-mechanical behavior of an underground crude oil storage facility in granite subject to cyclic loading during operation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 73: 70 – 81.
- [14] 刘琦, 卢耀如, 张凤娥. 地下水封储油库库址的水文地质工程地质问题 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(4): 1 – 5. [LIU Qi, LU Yaoru, ZHANG Feng'e. Hydrogeological and engineering geological problems of the site of underground oil storage caverns with water curtain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(4): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杨明举, 关宝树. 地下水封裸洞储存 LPG 耦合问题的变分原理及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 515 – 520. [YANG Mingju, GUAN Baoshu. Coupling model of underground gas-storage caverns and its application in engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(4): 515 – 520. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 王者超, 李术才, 梁建毅, 等. 地下水封石油洞库渗水量预测与统计 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1490 – 1497. [WANG Zhechao, LI Shucai, LIANG Jianyi, et al. Prediction and measurement of groundwater flow rate of underground crude oil storage caverns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1490 – 1497. (in Chinese with English abstract)]

- [17] 王者超, 李术才, 乔丽苹, 等. 大型地下石油洞库自然水封性应力-渗流耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1535 – 1543. [WANG Zhechao, LI Shucui, QIAO Liping, et al. Assessment of natural containment properties of an underground crude oil storage cavern using fluid flow-stress coupling method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1535 – 1543. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 时洪斌. 黄岛地下水封洞库水封条件和围岩稳定性分析与评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2010. [SHI Hongbin. Analysis and evaluation of water seal condition and surrounding rock stability for Huangdao water sealed underground petroleum storage Caverns in rock[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 李术才, 平洋, 王者超, 等. 基于离散介质流固耦合理论的地下石油洞库水封性和稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2161 – 2170. [LI Shucui, PING Yang, WANG Zhechao, et al. Assessments of containment and stability of underground crude oil storage caverns based on fluid-solid coupling theory for discrete medium[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2161 – 2170. (in Chinese with English abstract)]
- [20] QIAO Liping, WANG Zhechao, LI Shucui, et al. Assessing containment properties of underground oil storage caverns: Methods and a case study[J]. *Geosciences Journal*, 2017, 21(4): 579 – 593.
- [21] SHI Lei, ZHANG Bin, WANG Lei, et al. Functional efficiency assessment of the water curtain system in an underground water-sealed oil storage cavern based on time-series monitoring data[J]. *Engineering Geology*, 2018, 239: 79 – 95.
- [22] LIN F, LUAN H B, MA G W, et al. TEM improves groundwater inflow estimates in underground storage[J]. *Oil Gas Journal*, 2015, 113(11): 78 – 87.
- [23] 黄安达. 花岗岩裂隙反应性溶质运移规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2018. [HUANG Anda. Reactive solute transport in single granitic fractures[D]. Jinan: Shandong University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [24] WANG Zhechao, GLAIS Y, QIAO Liping, et al. Hydrogeochemical analysis of the interplay between the groundwater, host rock and water curtain system for an underground oil storage facility[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 466 – 477.
- [25] QIAO Liping, HUANG Anda, WANG Zhechao, et al. Alteration of minerals and temporal evolution of solution in reactive flow through granitic rock fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 123: 104105.
- [26] JEZERSKÝ Z. Hydrogeochemistry of a deep gas-storage cavern, Czech Republic[J]. *Hydrogeology Journal*, 2007, 15(3): 599 – 614.
- [27] KO K S, LEE J, LEE Kangkun, et al. Multivariate statistical analysis for groundwater mixing ratios around underground storage caverns in Korea[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2010, 25(1): 35 – 42.
- [28] KIM Y T, HYUN S G, CHEONG J Y, et al. Hydrogeochemistry in the coastal area during construction of geological repository[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 562: 40 – 49.
- [29] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for groundwater quality: GB/T 14848—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)]
- [30] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)]
- [31] 王者超, 孙华阳, 乔丽苹, 等. 一种地下水封油库水幕系统有效性分析与调控方法: CN108427657B[P]. 2021-05-25. [WANG Zhechao, SUN Huayang, QIAO Liping, HUANG Aada, et al. Effectiveness analysis method and regulation method of water curtain system of underground water-sealed oil depot: CN108427657B[P]. 2021-05-25. (in Chinese)]
- [32] 胡立堂, 郭建丽, 张寿全, 等. 永定河生态补水的地下水水位动态响应[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 5 – 11. [HU Litang, GUO Jianli, ZHANG Shouquan, et al. Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 5 – 11. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 乔丽苹, 刘建, 冯夏庭. 砂岩水物理化学损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2117 – 2124. [QIAO Liping, LIU Jian, FENG Xiating. Study on damage mechanism of sandstone under hydro-physico-chemical effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2117 – 2124. (in Chinese with English abstract)]