

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

近海地下石油储备库海水入侵风险研究

曲建军,曹 彪,宋大钊,杨连枝,何生全

Study on the risk of seawater intrusion in offshore underground oil reserve

QU Jianjun, CAO Biao, SONG Dazhao, YANG Lianzhi, and HE Shengquan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202212006

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水力屏障和截渗墙在海水入侵防治中的数值模拟研究

A numerical simulation study for controlling seawater intrusion by using hydraulic and physical barriers 吕盼盼, 宋健, 吴剑锋, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 32-40

海水入侵模拟方法VFT3D及应用

Development and application of sea water intrusion models 王佳琪, 郭芷琳, 田勇, 范林峰, 曾文科, 王晓丽, 苏, MicheleLancia, 郑春苗 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 184-194

基于高斯过程回归的地下水模型结构不确定性分析与控制

Quantification and reduction of groundwater model structural uncertainty based on Gaussian process regression 钟乐乐,曾献奎,吴吉春 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 1-1

水库滑坡地下水动态响应规律及浸润线计算模型

Dynamic response and phreatic line calculation model of groundwater in a reservoir landslide: Exemplified by the Shiliushubao landslide 汤明高, 吴川, 吴辉隆, 杨何 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 115–125

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50

系统维度对变密度溶质运移的影响研究

Effect of the system dimensionality on variable-density solute transport 叶逾, 蔡芳敏, 谢一凡, 井淼, 鲁春辉 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 146-153



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202212006

曲建军,曹彪,宋大钊,等. 近海地下石油储备库海水入侵风险研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 184-192. QU Jianjun, CAO Biao, SONG Dazhao, *et al.* Study on the risk of seawater intrusion in offshore underground oil reserve[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 184-192.

近海地下石油储备库海水入侵风险研究

曲建军¹,曹 彪², 宋大钊², 杨连枝², 何生全² (1. 中化能源物流有限公司, 浙江舟山 316000; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要:地下石油储备库于近海处建立,可降低石油运输成本,同时有较强的军事意义。但是临近海岸线,海水易入侵库区, 导致库区内金属结构腐蚀,使储备库的使用年限降低。以某近海地下石油储备库工程为背景,构建了综合断层、节理密集 带、导水通道等15种地质结构的精细化三维水文地质模型,研究了库区自然状态下和运行期的地下水渗流场及溶质运移 场,模拟海水入侵风险。研究表明:(1)自然状态下地下石油储备库无海水入侵。(2)运行期只在洞库顶部以上25m处设 置四周超出洞室50m、水幕孔间距为10m、孔径0.11m的水平水幕时,不能有效防治海水入侵。(3)洞库运行 9a时,3#洞室东南侧CF物质的量浓度超过7mol/m³,海水开始入侵洞室群;运行22~23a时,海水入侵速率最快;运行 41a时,3#洞室东南侧CF物质的量浓度超过143mol/m³,海水入侵达到对钢筋的强腐蚀程度;运行50a时,除1#洞室外其余 所有洞室均受到海水入侵,3#、4#洞室有部分区域达到强腐蚀程度,海水入侵最严重。建议增设垂直水幕等设施,以增强对 海水入侵的防治。研究成果可为近海地区地下石油储备库抑制海水入侵提供借鉴。

关键词: 地下石油储备库; 海水入侵; 渗流场; 溶质运移场; 水幕系统

中图分类号: P641 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2023)06-0184-09

Study on the risk of seawater intrusion in offshore underground oil reserve

QU Jianjun¹, CAO Biao², SONG Dazhao², YANG Lianzhi², HE Shengquan²

(1. Sinochem Energy Logistics Co. Ltd., Zhoushan, Zhejiang 316000, China; 2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Underground oil reserves are established near the sea, which can reduce the cost of oil transportation and have strong military significance. However, the proximity to the coastline makes it easy for seawater to intrude into the reservoir area, resulting in corrosion of the metal structure in the reservoir area, thus reducing the service life of the reservoir. A simulation study on the risk of seawater intrusion was carried out with an offshore underground oil reserve project as the background. A refined three dimensional hydrogeological model with 15 geological structures such as integrated faults, jointed dense zones and water conduction channels was constructed, and the groundwater seepage field and solute transport field in the reservoir area under the natural state and during the operation period were studied. The study shows that (1) there is no seawater intrusion in the

收稿日期: 2022-12-03;修订日期: 2023-03-01 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目:国家自然科学基金项目(51774023)

²²⁾

第一作者:曲建军(1972-),男,高级工程师,主要从事地下石油储运研究。E-mail: qujianjun@sinochem.com

通讯作者: 曹彪(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事地下石油储运研究。E-mail: caobiao0323@163.com

undergroundoilreserve in the natural state. (2) During the operation period, a horizontal water curtain with a distance of 10 m and a diameter of 0.11 m was only set at 25 m above the top of the cavern reservoir, exceeding the cave by 50 m around, which could not effectively prevent seawater intrusion. (3) When the cave reservoir was running for 9 a, the Cl⁻mole concentration on the southeast side of 3# cavern room exceeded 7 mol/m³, and seawater began to invade the cavern group; when it was running for 22 a to 23 a, the seawater invasion speed was the fastest; when it was running for 41 a, the Cl⁻mole concentration on the southeast side of 3# cavern room exceeded 143 mol/m³, and the seawater invasion reached the strong corrosion degree of steel; when it was running for 50 a, all the cavern rooms except 1# cavern room were invaded by seawater, 3# and 4# cavity rooms have some areas to reach strong corrosion degree, seawater invasion is the most serious. It is suggested to set up additional facilities such as vertical water curtain to enhance the prevention and control of seawater intrusion. The research results can provide reference for the suppression of seawater intrusion in underground oil reserves in offshore areas.

Keywords: underground oil reserve; seawater intrusion; seepage field; solute transport field; water curtain system

作为重要战略性资源,石油在全球地区间的分布 并不均衡。2020年中国的石油进口量达5.582×10⁸t, 占世界各国进口总量的26.4%,是世界第一大石油净 进口国¹¹,亟需新建立一批石油储备库以保障国家能 源安全^[2]。地下石油储备库具有防灾能力强、隐蔽性 好、建设运营费用低、使用寿命长、节省地面空间等 优点,已成为重要的石油储备方式^[3],是国内外石油储 备的主要发展方向和研究对象^[4]。地质条件适宜的近 海处适合建设地下石油储备库,方便原油的运输和存 储^[5],但地下石油储备库建设在近海地区,存在较高的 海水入侵风险。海水侵入洞室区后,海水中的 CI⁻等 溶质易腐蚀地下结构设施,影响地下水封洞库的长期 稳定性及使用寿命^[6]。因此,有必要对地下石油储备 库的海水入侵问题进行深入研究。

地下石油储备库海水入侵风险研究的重点为确 定咸淡水分界面、研究海水入侵影响因素,以及研究 不同防治方案对海水入侵的抑制作用,国内外学者做 了大量的相关研究。

关于地下石油储备库海水入侵风险研究中咸淡水分界面的确定,郇恒飞等^[7] 通过布置音频大地电磁测深(AMT)剖面,采用改进非线性共轭梯度(NLCG) 法反演,得出研究区咸淡水分界线位置。束龙仓等^[8] 基于 CF与电阻率的关系,用高密度电阻率法快速、准确地确定咸淡水界面的空间分布。Kim 等^[9]、Jo 等^[10] 通过 CF浓度表征海水入侵程度,得出近海地下石油储备库易受海水入侵影响的结论。Lim 等^[11] 通过水 文地球化学和同位素指标分析了海水通过裂隙基岩 侵入储油洞室的风险,得出水文地质异质性是造成库

区不同位置海水入侵程度差异的原因,通过物探和化 学元素可分析确定咸淡水交界面分布。

关于海水入侵风险的研究, Lee 等^[12] 通过现场监测和数值模拟,得出影响洞库 CF浓度时空变化的重要因素包括石油储备库位置、渗水量、破碎带等。 Park 等^[13] 通过监测和试验,得出海水侵入裂隙基岩含水层的主要原因是地下开采活动,海水入侵的程度取决于导水裂隙的类型及其水力连通性。张康等^[14] 运用数理统计、空间插值和水力学方法,分析了基岩海岛地下水与海水相互作用的特征和影响因素,得出降水和开采是影响地下水、海水相互作用的主要因素。 Huyakom 等^[15] 研究得出当淡水水头低于海水水头时,易导致海水入侵。地质条件、开采活动、降水、地下水与海水的相互作用都会影响海水入侵程度。

对于不同防治方案对海水入侵的抑制作用,国内 外学者做了大量的相关研究。刘琦等^[16]研究得出增 设人工水幕能减少渗流,增大水力梯度,并提供较为 稳定的地下水位。梁斌等^[17]通过数值模拟方法,得出 有水幕的条件下相较无水幕水位线扩展速率更小,表 明无水幕条件比有水幕更容易产生地下水漏斗。王 敬奎等^[18]结合国内外地下石油储备库的工程经验,通 过数值模拟,得出不设置水幕,地下水位线易降到主 洞室顶板以下,导致发生石油泄漏的可能性增大。彭 振华等^[19]通过有限元数值模拟的方法,得出设置水幕 系统后会在洞室上方形成较大厚度的地下水覆盖层, 进而可以满足地下石油储备库对水封条件的要求。 Wang 等^[20]通过现场监测和统计分析,得出地下水对 储油岩洞水幕系统的响应与设施的几何布局均和水 文地质条件有关,水幕系统可起到补水作用,抬高地 下水位。张奇华等^[21] 通过数值模拟,得出 10 m 间距 的水幕孔能在洞室上方形成稳定且具有一定水力梯 度的渗流场。蒋中明等^[22] 通过数值模拟方法对洞库 运行期渗流场进行分析,得出水幕系统设置 2 m 水头 的注水压力可满足运行期储油水封的需要。Li等^[23] 基于多物理场耦合理论,采用数值模拟方法分析了潮 汐环境下地下水密封储油洞中海水入侵的动态特性, 得出水幕系统可起到抑制海水入侵的作用。设置水 幕系统可抑制海水入侵,水幕的几何布局、孔间距、 孔压力都会对防治效果产生影响,并可通过模拟方式 研究防治效果。

相关模拟研究中使用的模型和参数受物探、钻 探、试验等数据的限制,模型建立多较为简单、参数 设定多采用经验值。同时以往研究的地下石油储备 库大多距海水有一定的距离,本文研究的近海地下石 油储备库面临更严峻的海水入侵风险,相关研究较少。

本文在前人研究基础上,以某近海地下石油储备 库工程为背景,构建了包含断层破碎区、不同岩性、 不同降雨分区等因素的精细化三维水文地质模型,应 用数值模拟方法模拟了地下石油储备库渗流场和溶 质运移场,研究了在天然状态和运营期渗流场的特征 及 CI物质的量浓度场演化规律,分析了各阶段海水 入侵风险,可为近海地区地下石油储备库建设海水入 侵风险问题的研究提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

地下石油储备库位于近海地区,由相互独立的11 条储油洞室组成。储油洞室间距为30.8 m,洞室的顶 面标高为-62 m,底面标高为-92 m,洞室长度为464~ 576 m,断面尺寸为22 m×30 m。洞室埋深为92~ 212 m。储油洞室顶部以上25 m处设置四周超出洞 室 50 m、间距为10 m的水平水幕。

1.2 工程地质条件

库区东部基岩主要为燕山晚期岩浆侵入的二长 花岗岩,中部基岩主要为燕山晚期岩浆侵入的辉长 岩,西部主要为前泥盆纪片麻状花岗岩,地表层主要 为第四系残坡积土和人工填土。地质勘查揭露的石油 储备库周围断层有 NE 向的 F1、F2、F3、F16, NW 向断 层 F7、F18, NWW 向断层 F8, 近东西向断层 F9、F12、F15、 F17, NNE 向断层 F10(F11)、F13、F14。断层分布和 7 条连续分布的节理密集带(WJ1~WJ7)如图 1 所示。



Fig. 1 Distribution of faults and dense zone of joints in the reservoir area

1.3 水文地质条件

地下石油储备库库区南侧与陆地相连,东、北、 西3面与海水相连,库区周边没有明显水系发育。地 下水接受大气降水的垂直补给,主要以大气降水为补给源。 地下水排泄以蒸发和侧向径流排泄方式为主。根据 气象站资料统计,地区的多年平均降水量为977.5~ 1316.6 mm。50 a 一 遇低潮位为-3.96 m,高潮位为 +5.06 m。

2 研究方法

2.1 水文地质模型构建

在充分考虑断层破碎带、蚀变岩体存在的空间范 围和裂隙场发育情况的基础上,结合水文监测和水位 监测结果,综合采用 Midas GTS、COMSOL 软件构建 了如图 2 所示地下石油储备库库区精细化三维水文 地质模型。采用四面体网格进行划分,共1613143 个 域单元、346 873 个边界单元和 81 246 个边单元。图 3 为库址区断层及节理密集带的有限元网格。图 4 为洞







图 3 断层及节理密集带有限元网格

Fig. 3 Finite element mesh of fault and dense zone of joints



Fig. 4 Schematic diagram of horizontal water curtain system arrangement around the cavern

室四周水平水幕系统布置示意图,从左下至右上方分 别为1#—11#洞室共11条,水平水幕标高为-37m,四 周超出洞室50m,水幕孔间距为10m,孔径0.11m。

2.2 控制方程

海水入侵模型分为地下水流运动方程和溶质运 移方程。对于多孔岩土介质,水的流动可以用达西定 律来描述,根据质量守恒原理可以推导出描述多孔介 质中饱和-非饱和流动方程,用下式表示^[24]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \nabla \cdot \rho \left[-\frac{\kappa}{\mu} (\nabla p + \rho g \nabla H) \right] = Q_{\rm m} \tag{1}$$

式中: *ρ*——流体密度/(kg·m⁻³);

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (Cv) - \nabla \cdot (D\nabla C) = 0$$
(2)

式中: C——溶质质量浓度/(kg·m-3);

v——流速/(m·s⁻¹); D——水动力弥散系数/(m²·s⁻¹)。

2.3 模型参数

模型中共包括断层、碎石土等 15 种材料。压水试 验获得场区渗透系数范围在 2.54×10⁻¹¹ ~ 3.24×10⁻⁶ m/s, 场区东侧靠近海岸线区域渗透系数偏高,集中在 1.0×10⁻⁸ ~ 7.0×10⁻⁷ m/s。各材料的渗流计算参数取 值见表 1,其中渗透系数值为模拟反演值,孔隙率为工 程经验值,分子扩散系数从文献中获取^[26],纵向弥散 度和横向弥散度则根据现场弥散试验结合文献^[27]得 出。淡水密度为 1 000 kg/m³,海水密度为 1 030 kg/m³。

表 1 渗流场和溶质运移场各材料参数 Table 1 Parameters of each material in the percolation and solute transport fields

		-			
***	渗透系数	孔隙率	分子扩散系数	纵向弥	横向弥
4/3 /197	$/(m \cdot s^{-1})$	/%	$/(m^2 \cdot s^{-1})$	散度/m	散度/m
断层	8.54E-7	10.0	2E-7	2	0.5
节理密集带	1.00E-7	10.0	2E-7	2	0.5
碎石节理带	1.00E-7	15.0	2E-7	2	0.5
碎石土	8.54E-7	15.0	2E-7	2	0.5
强风化二长花岗岩	8.54E-7	12.0	2E-7	2	0.5
强风化片麻状花岗岩	5.00E-7	12.0	2E-7	2	0.5
强风化辉长岩	5.00E-7	12.0	2E-7	2	0.5
中风化二长花岗岩	4.00E-7	2.0	2E-8	1	0.1
中风化片麻状花岗岩	1.00E-7	2.0	2E-8	1	0.1
中风化辉长岩	1.00E-7	2.0	2E-8	1	0.1
微风化二长花岗岩	9.00E-8	0.2	2E-8	1	0.1
微风化片麻状花岗岩	8.50E-9	0.2	2E-8	1	0.1
微风化辉长岩	8.50E-9	0.2	2E-8	1	0.1
大陆架	1.00E-8	5.0	2E-8	1	0.1
导水通道	2.00E-6	10.0	2E-7	50	1.0

2.4 边界条件设置

渗流场和溶质运移场计算模型都包括内陆边界、 海水边界、内陆顶部边界、内陆底部边界、水幕边界 等。计算过程,以稳态渗流场作为初始自然条件,在 此基础上计算运行期渗流场及溶质运移场。

对于渗流场计算边界条件,南侧边界、底部边界 设置为无流动边界。内陆顶部边界根据气象站年降 水量统计,取降水量平均值为1000 mm,考虑降水入 渗和蒸发,将内陆顶部边界作为流量边界处理,具体 流量值结合钻孔的实测水位及数值模拟反演确定。 模型的东侧、西侧、北侧和大陆架顶部边界为海水边 界,海水水位50 a 一遇设计高潮位+5.06 m,因而设置 海水边界水头值为 5.06 m。自然条件下洞室内壁设置 为无流动边界,运行期计算中考虑储油自身重量,洞 室内边界设为水头边界 20 m。自然条件下水幕孔设 为无流动边界,运行期计算中设置为压力水头边界 47 m。

溶质运移场计算中选取 CI^作为海水的代表离子, 通过分析 CI^{-物}质的量浓度的变化分析海水入侵的风 险。海水边界设置为该地区海水中的 CI^{-物}质的量浓 度值,为 500 mol/m³,模型顶部大气降水及地下水 CI^{-物}质的量浓度值为 3 mol/m³,水幕溶液 CI^{-物}质的量 浓度值为 0.001 4 mol/m³。

3 结果

3.1 地下石油储备库自然状态下渗流场及海水入侵3.1.1 库址区自然状态渗流场

依据现场信息,内陆区域分区如图 5 所示。根据 现场 60 个钻孔的地下水位实测信息,采用克里格插 值法得到如图 6 所示实测地下水位等值线。洞库区 西北侧的水位远高于其他区域,东南侧的水位较低。 结合当地降水和蒸发,考虑生产生活消耗,村庄表面 流出速率设为 5×10⁻⁹ m/s、船厂和油库区的表面流出 速率设为 1.2×10⁻⁸ m/s,各区储水能力不同,将林区和 坡道的表面流入速率设为 1.6×10⁻⁸ m/s,将荒山的表面 流入速率设为 0 m/s。模拟渗流场与实测水位线的叠 加对比图如图 6 所示,整体基本吻合,其中洞室附近的 20 m 和 45 m 吻合度较高,模拟得到的地下水位最高区范围 与实测相符,基本符合现场实际情况。实测值最高值 高于模拟值,原因主要为该区域为库区海拔最高处, 现场存在部分地表积水,实测时测量范围不足以反映 真实地下水位。

3.1.2 库址区自然状态下海水入侵现状

库区施工前天然状态下海水入侵现状分析采用 溶质运移计算方法进行求解。以自然状态下渗流场 作为初始计算条件,计算至溶质运移场基本不变,模 型起始时间为0a,结束时间为140a,时间步长为1a。 根据有关规范^[28], CI⁻物质的量浓度为7 mol/m³是咸淡 水分界的最低值,因此以7 mol/m³作为海水入侵的边 界线。如图7所示洞室顶部海水入侵边界线更靠近 洞室群,洞室群内部CI⁻物质的量浓度小于7 mol/m³, 因而自然状态下库区无海水入侵风险。

3.2 地下石油储备库运行期渗流场及海水入侵风险

地下石油储备库运行期增设水平水幕,洞室内挖 空后储油。分别计算地下石油储备库运行 50 a 内渗 流场及溶质运移场,以分析运行期海水入侵风险。



Fig. 5 Precipitation zoning sketch map



图 6 自然状态库区地下水位等值线与实测水位对比图 Fig. 6 Comparison of groundwater level contours in the reservoir area in the natural state and the actual measured water level

3.2.1 库址区运行期渗流场

设置水平水幕条件下,模型区域运行期地下水位 等值线如图 8 所示,相较图 6 库区整体水头值明显降 低。洞室群区域西北侧水头下降最明显,降低近 60 m, 东南侧水头降低近 28 m,中心水头降低近 51 m。

3.2.2 库址区运行期海水入侵

图 9 是洞库运行 50 a 时库区标高为-62 m 的 Cl-物质的量浓度等值线,可以看出洞库运行 50 a 时,海水已入侵至除 1#洞室外其余所有洞室。只有洞室群东南侧有海水入侵风险。地下水腐蚀性等级评价如表 2 所示, 3#、4#洞室海水入侵最严重,部分区域Cl-超过 143 mol/m³,已达对钢筋强腐蚀程度。



Fig. 8 Groundwater level contours during operation

4 讨论

海水入侵主要由于洞室开挖造成地下水位下降,



of the underground oil reserve

表 2 钢筋腐蚀等级表^[29] Table 2 Steel corrosion grade table^[29]

腐蚀等级	微腐蚀	弱腐蚀	中度腐蚀	强腐蚀
Cl ⁻ 物质的量浓度/(mol·m ⁻³)	(0,3]	(3,14.3]	(14.3,143]	(143,+∞)

引起淡水水力坡度减小,淡水流向海水的对流作用减弱,海水与淡水之间的弥散作用逐渐增强,从而引起海水不断入侵^[30]。由于水平水幕在洞室上方和周边形成一定厚度的水覆盖层,因而洞室底部海水入侵程度较洞室顶部更大。

洞库运行期 8 a 和 9 a 时库区底部标高为-62 m 的 CI物质的量浓度等值线如图 10(a)(b)所示,可以 看出洞库运行 9 a 时, 3#洞室群东南侧 CI 物质的量浓 度超过 7 mol/m³,海水开始入侵洞室群。图 10(b)中洞



Fig. 10 Cl⁻ concentration in the bottom of the cave chamber and surrounding rock before and after the year of seawater intrusion

室群内海水入侵区域与四周海水入侵区之间存在低 CL物质的量浓度区,原因是水平水幕运行时在洞室周 边形成了一定范围的水覆盖层,阻隔了CL从海水到 洞室的直接运移。如图10(b)所示,入侵区存在节理 密集带,其渗透系数、孔隙率、弥散系数及分子扩散 系数整体高于周边材料,因而CL绕开水覆盖层,经由 节理密集带从下至上入侵洞室。

在 3#洞室海水入侵区取特征点 O(2 264, 801, -92), 研究运行期 50 a 内 CI 物质的量浓度变化情况, 如图 11 所示。运行 0—1 a 过程中, CI 物质的量浓度呈下降趋势, 原因为运行 0 a 时水幕系统并未打开, 洞库由于未 受海水入侵, CI 物质的量浓度保持在 3mol/m³; 运行 1 a 时水平水幕放出物质的量浓度为 0.001 4 mol/m³ 的 淡水在洞室周边形成了水覆盖层, 并且此时海水并未





入侵至洞室附近,因而水垫层降低了 O 点处 CI 物质的量浓度。从运行 1 a 开始至运行 50 a 为止, CI 物质的量浓度增长速率先增大后减小,在洞库运行 23 a 时海水入侵速率最快,较上一年增加 6.2 mol/m³。运行 13 a 时 O 点 CI 物质的量浓度为 15.4 mol/m³,达到中度腐蚀程度。运行 41 a 时 O 点 CI 物质的量浓度为 144.0 mol/m³,达到对钢筋的强腐蚀程度。由此可见只设置水平水幕,在有导水通道的情况下,不能确保在 50 a 运行期有效防范海水入侵。

5 结论

(1)反演得到的自然渗流场与实测的地下水位基本吻合。基于现有模拟条件,洞室群内部 CI⁻物质的量浓度小于7 mol/m³,库址区自然状态下无海水入侵风险。

(2)洞库运行 9 a 时,洞库东南侧出现海水入侵, 洞库运行 50 a 时,除 1#洞室外其余所有洞室均受到海 水入侵, 3#、4#洞室海水入侵最严重,达到强腐蚀程 度。运行 22—23 a 时海水入侵速率最快。运行 41 a 时 洞室群东南侧 CI⁻物质的量浓度超过了 143 mol/m³, 海水入侵达到对钢筋的强腐蚀程度。

(3)洞库顶部以上 25 m 处设置四周超出洞室 50 m 的水平水幕,水幕孔间距为 10 m,孔径为 0.11 m 时,不能有效防治海水入侵。需要在在洞室区周边增设垂直水幕等其他防治措施,才能确保洞库运行 50 a 不受海水入侵。

参考文献(References):

 [1] 张抗, 王锋, 张立勤. 21世纪初期世界石油格局变 化及启示 [J]. 世界石油工业, 2022, 29(3): 14 - 26.
 [ZHANG Kang, WANG Feng, ZHANG Liqin. Changes and enlightenment of the world petroleum pattern in the early 21st century [J]. World Petroleum Industry, 2022, 29(3): 14-26. (in Chinese with English abstract)]

- [2] 李玉忠,马伟平.中国石油储备库设计运行技术现状及发展建议[J].天然气与石油,2021,39(3):18-23.
 [LI Yuzhong, MA Weiping. The status quo and development suggestions of design and operation of oil reserves storage depot in China[J]. Natural Gas and Oil, 2021, 39(3):18 23. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李倩冬.地下水封油库技术的发展及在我国的应用 前景[J].化工管理, 2017(25): 16-17. [LI Qiandong. Development of underground water-sealed oil depot technology and its application prospect in China[J]. Chemical Enterprise Management, 2017(25): 16-17. (in Chinese)]
- [4] DOU Mingyuan, ZOU Shuai, LI Haoming, et al. Research status and prospects of key technologies for underground water-sealed oil storage cave[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 508(1): 012097.
- [5] 袁广祥,尚彦军,史永跃,等.与地下石油储备库有关 工程地质问题研究现状和对策[J].工程地质学报, 2006,14(6):792 - 799. [YUAN Guangxiang, SHANG Yanjun, SHI Yongyue, et al. Engineering geological issues and measures for storage of oil and gas in underground rock Caverns[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(6):792 - 799. (in Chinese with English abstract)]
- [6] WERNER A D, BAKKER M, POST V E A, et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges[J]. Advances in Water Resources, 2013, 51: 3 – 26.
- [7] 郇恒飞,郭常来,崔健,等.音频大地电磁测深法在锦 州海水入侵调查中的应用[J].地质通报,2021,40(10): 1720 - 1728. [HUAN Hengfei, GUO Changlai, CUI Jian, et al. Application of audio magnetotelluric sounding to the seawater intrusion survey of Jinzhou[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(10): 1720 - 1728. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 東龙仓, 王明昭, 张惠潼, 等. 咸淡水界面位置确定的综合方法(TEcG)及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(6): 1706 1713. [SHU Longcang, WANG Mingzhao, ZHANG Huitong, et al. Comprehensive method(TEcG) of determination of the location of freshwater and saltwater interface and its application[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(6): 1706 1713. (in Chinese with

English abstract)]

- [9] KIM J H, KIM R H, LEE J, et al. Hydrogeochemical characterization of major factors affecting the quality of shallow groundwater in the coastal area at Kimje in South Korea[J]. Environmental Geology, 2003, 44(4): 478 – 489.
- [10] JO Y, LEE J, CHOI M J, et al. Characteristics of seepage water and groundwater in Incheon coastal LPG storage cavern[J]. The Journal of Engineering Geology, 2010, 20(1): 1-12.
- [11] LIM J W, LEE E, MOON H S, et al. Integrated investigation of seawater intrusion around oil storage Caverns in a coastal fractured aquifer using hydrogeochemical and isotopic data[J]. Journal of Hydrology, 2013, 486: 202 – 210.
- [12] LEE J, CHO B W. Submarine groundwater discharge into the coast revealed by water chemistry of man-made undersea liquefied petroleum gas cavern[J]. Journal of Hydrology, 2008, 360(1/2/3/4): 195 - 206.
- [13] PARK H Y, JANG K, JU J W, et al. Hydrogeological characterization of seawater intrusion in tidally-forced coastal fractured bedrock aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2012, 446/447: 77 – 89.
- [14] 张康,韩冬梅,曹天正,等.基岩海岛地下水与海水相互作用研究[J].水文地质工程地质,2023,50(1):312. [ZHANG Kang, HAN Dongmei, CAO Tianzheng, et al. Interaction between groundwater and seawater in bedrock islands[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1):3-12. (in Chinese with English abstract)]
- [15] HUYAKORN P S, ANDERSEN P F, MERCER J W, et al. Saltwater intrusion in aquifers: Development and testing of a three-dimensional finite element model[J].
 Water Resources Research, 1987, 23(2): 293 312.
- [16] 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)]
- [17] 梁斌,陈刚,胡成.某地下水封石油洞库渗流场模 拟研究及水封效果评价 [J].世界核地质科学,2018, 35(3):180 - 186. [LIANG Bin, CHEN Gang, HU Cheng. Vadose field simulation and water-sealing effect evaluation of underground petroleum storage caver[J].

World Nuclear Geoscience, 2018, 35(3): 180 – 186. (in Chinese with English abstract)]

- [18] 王敬奎,吴振营,徐佳,等.地下水封石洞油库设置水幕系统必要性研究[J].长江科学院院报,2014,31(1):110-113. [WANG Jingkui, WU Zhenying, XU Jia, et al. Necessity of water curtain for water-sealed underground oil storage cavern[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(1): 110-113. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 彭振华,张彬,李玉涛,等.海岛地下水封洞库围岩稳 定性及水封可靠性研究 [J].地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1875 - 1881. [PENG Zhenhua, ZHANG Bin, LI Yutao, et al. Study on surrounding rock stability and water-sealed reliability of underground crude oil storage cavern in island[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1875 - 1881. (in Chinese with English abstract)]
- [20] WANG Zhechao, LI Wei, LI Zhe, et al. Groundwater response to oil storage in large-scale rock caverns with a water curtain system: Site monitoring and statistical analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99: 103363.
- [21] 张奇华.关于黄岛国家石油储备库水封效果评价和 控制的几点认识 [J].长江科学院院报, 2014, 31(8):
 112 - 116. [ZHANG Qihua. Some ideas on assessment and control of water tightness effect in Huangdao oil storage cavern [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(8): 112 - 116. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 蒋中明,张新敏.黄岛大型水封地下石油洞库渗流场分析[C]//中国力学学会,中国石油学会,中国煤炭学会,中国岩石力学与工程学会.渗流力学与工程的创新与实践——第十一届全国渗流力学学术大会论文集.重庆:重庆大学出版社,2011:99-102.
 [JIANG Zhongming, ZHANG Xinmin. Study on seepage field of huangdao water sealing underground caverns for oil storage[C]//Chinese Society of Mechanics, Chinese Petroleum Society, Chinese Coal Society, Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering. Innovation and Practice of Seepage Mechanics and Engineering Proceedings of the 11th National Conference on Seepage Mechanics. Chongqing: Chongqing University Press, 2011: 99-102.]
- [23] LI Yutao, ZHANG Bin, SHI Lei, et al. Dynamic variation

characteristics of seawater intrusion in underground watersealed oil storage cavern under island tidal environment[J]. Water, 2019, 11(1): 130.

- [24] 徐轶, 徐青. 基于 COMSOL Multiphysics 的渗流有限元 分析 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(2): 165 -170. [XU Yi, XU Qing. Finite element analysis of seepage based on COMSOL Multiphysics[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(2): 165 - 170. (in Chinese with English abstract)]
- [25] CROUCHER A E, OSULLIVAN M J. The henry problem for saltwater intrusion[J]. Water Resources Research, 1995, 31(7): 1809 – 1814.
- [26] 孙讷正.地下水污染:数学模型和数值方法[M].北京:地质出版社,1989. [SUN Nezheng. Groundwater pollution: Mathematical model and numerical method[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 成建梅.考虑可信度的弥散度尺度效应分析 [J].水利 学报,2002,33(2):90-94. [CHENG Jianmei. Analysis on field scale effect of dispersivity in consideration of relative reliability level of data[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(2):90 - 94. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 中国地质调查局.城市环境地质调查评价规范: DD2008—03[S].北京:中国地质调查局发展研究中 心,2008. [China Geological Survey. Code for survey of urban environmental geologic problems: DD2008— 03[S]. Beijing: Development and Research Center, 2008. (in Chinese)]
- [29] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. [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, 2002. (in Chinese)]
- [30] 乔丽苹, 王小倩, 王者超, 等. 某地下水封石油洞库海水 入侵评价与控制方法研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(7): 1338 - 1344. [QIAO Liping, WANG Xiaoqian, WANG Zhechao, et al. Evaluation and control method of seawater intrusion in an underground water-sealing oil storage cavern[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(7): 1338 - 1344. (in Chinese with English abstract)]

编辑:宗 爽