

封闭油藏系统 CO₂ 循环地热能生产的 随机技术经济分析

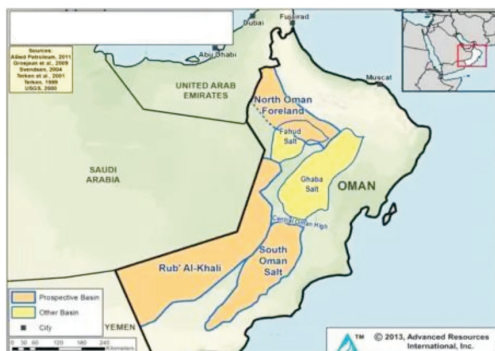
Mohammad Mahdi Rajabi, Mingjie Chen, Ali Bozorgpour, et al

(塔比特莫达勒斯大学, 德黑兰 伊朗)

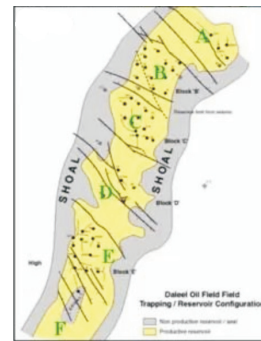
随着油气储层的枯竭, 许多井被废弃, 低焓地热能可以从这些废弃井中提取。CO₂ 由于其良好的热力学性质, 已被提出并研究作为开采此类地热能源的工作流体。本研究的目的是开发一种基于不确定性的模拟优化方法, 以分析封闭储层系统中 CO₂ 循环地热生产的技术经济可行性。在这样做的过程中, 我们解决了在阿曼北部前陆盆地发现的特殊地热储层条件, 那里有几个大型油气田。

该地区的地热储层条件可表现为倾斜和薄层、部分至完全断层阻塞、相对均匀和低渗透地层。尚未在 CO₂ 循环地热生产的背景下对此类条件进行研究。这项工作的另一个关键新奇之处是, 分析了一个专为这种薄层全封闭油藏设计的三重水平井布置。该方法的主要组成部分是非等温、多相、多组分数值油藏模拟器、基于神经网络的元模型、蒙特卡罗模拟和遗传算法的应用。研究结果表明, 建议的井网在技术上可行, 在经济上可行, 可以从北阿曼地区发现的枯竭型储层中获取低焓地热能。

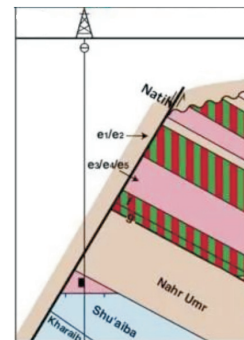
Z 放大了 6.25。1.2km 长的水平注采井平行放置在 Y 中间范围的顶部网格层上, 延伸 3km。注



(a) 阿曼及其石油盆地的位置图 (ARI, 2013)



(b) Daleel 油田, 显示了阿曼北部前陆盆地的断块 a-F 油藏 (Zhao 等人, 2012)



(c) Fahud 油田 (Moretini 等人, 2005) 的横截面示意图

图 1 阿曼北部油藏的典型地质结构和层序地层学

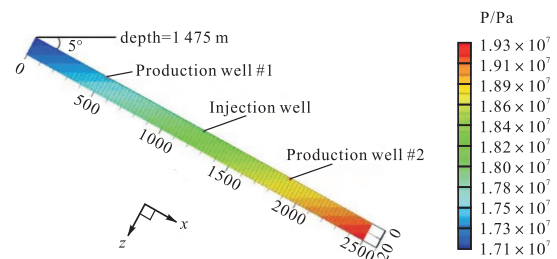


图 2 储层模型域、网格和初始压力的中间 Y 截面

入井的位置固定在 X 的中间, 但两个生产井的位置因每个模型模拟而异。

2 结果讨论

图 3 说明了输入参数成对组合在寿命 (H_p) 内平均产热率的变化。成对分析中未考虑地热热源和 L_{LPW2}/L_{LP1} 分数。如图所示, $H_p > 40\text{MW}$ 仅限于输入参数的非常具体的组合(如图 3a 中孔隙度 > 0.33 和渗透率 $> 11\text{mD}$), 大多数组合导致 $H_p < 20\text{MW}$ 。图 3 表明, 非常低的产热速率($H_p < 5$)与井距的最高值以及孔隙度和超压的最低值一致。产热速率随孔隙度和超压的增加而呈指数增长, 随井距的增加呈指数下降。 H_p 与渗透率之间的关系几乎是线性的。更高的渗透率产生更高的 CO_2 注入能力和循环速率, 从而产生更高产热速率。注入井的超压决定了注入井和生产井之间的压力梯度, 从而影响了流体产量。

寿命随相同输入参数成对组合的变化如图 4 所示。由于渗透率对寿命的影响相对较低, 在渗透

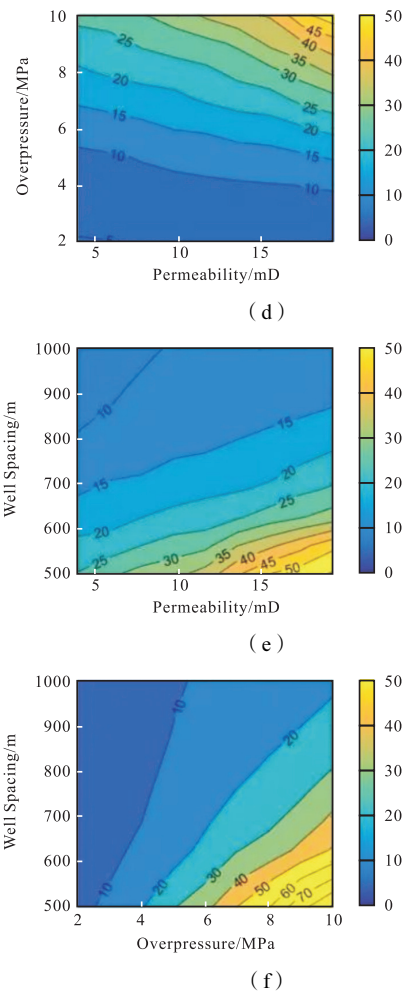
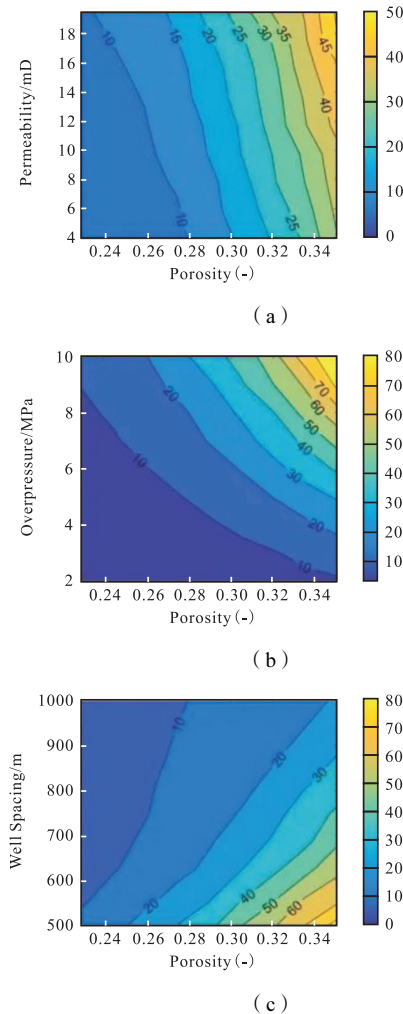


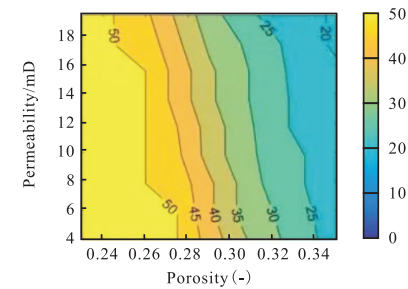
图 3 在寿命期内平均产热率[MW]的变化为以下输入参数的成对组合: 超压、井距、孔隙度和渗透率。

率与孔隙度的成对分析(图 4a)、超压(图 4d)以及井间距(图 4e)。井间距和孔隙度对寿命的影响相对相似, 因此, 寿命相等的结果线的斜率接近 45° (图 4c)。图 4f 表明, 较高的超压值必须伴随着较高的井距, 以确保储层寿命不受影响。在图 4 中的每个子地块中, 只有一小部分区域(通常对应于孔隙度、渗透率和超压的最高值相互一致或井距最小值)的寿命值小于 15 年(即经济上可行的最小寿命)。寿命从 18.5 年增加到 50 年, 井距从 500 米增加到大约 886 米, 然后几乎保持不变, 因为 50 年是模拟期的最大持续时间。

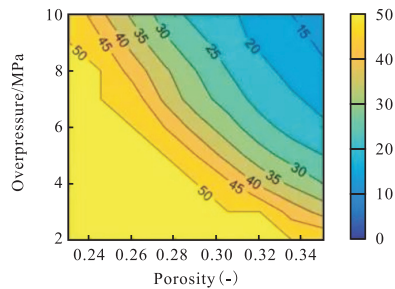
如图 5a 所示, 优化算法通过改进决策变量的选择, 逐步降低非盈利风险。在约 40 次 GA 迭代后实现收敛。决策变量的最佳组合产生 0.64 的风险和 -5.82\$mm 的平均 NPVT(标准偏差等于 13.1\$mm)。如图 5b 所示, 发电潜力在前四年增加

至约 1.92 MW, 然后在寿命结束时逐渐下降至 1.1MW。发现最佳变量为: $dP_1 = 9.9\text{MPa}$, $L_{I,PW1} = 929$, $L_{I,PW2} = 695$ 。发现最佳超压接近该参数可能的最高值。

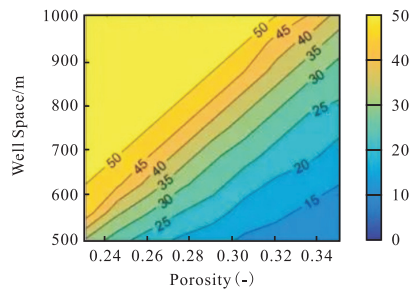
由于储层冷却, CO_2 循环期间流出温度下降。在决策变量的最佳组合下, 在采出流体的加权温度降至 65°C 以下之前, 储层的寿命约为 37 年(图 5c)。循环过程中注入的大部分 CO_2 都是产生的。当储层中储存了约 180 万吨 CO_2 时, 注入流体和



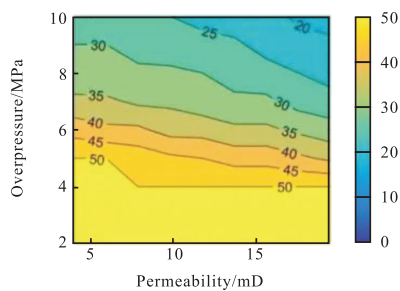
(a)



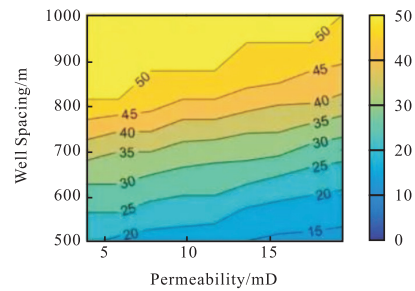
(b)



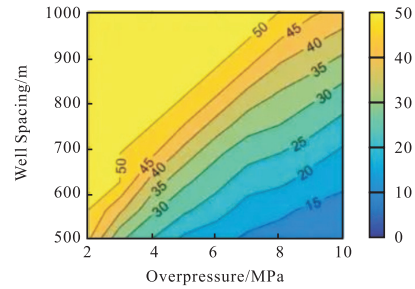
(c)



(d)

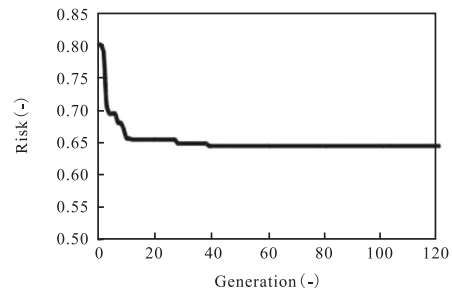


(e)

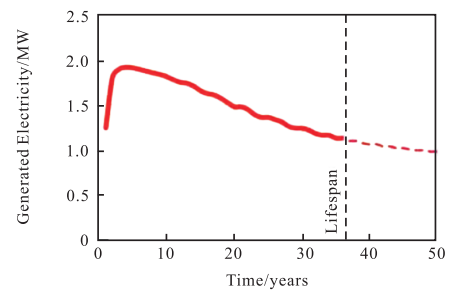


(f)

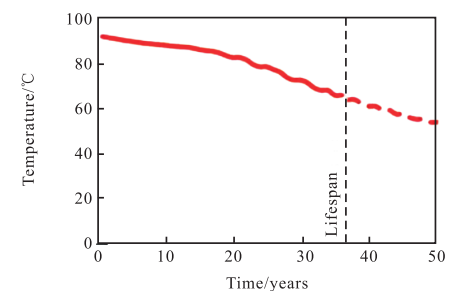
图 4 寿命变化为以下输入参数的成对组合: 超压、井距、孔隙度和渗透率



(a)



(b)



(c)

专业监测预警仪器,如自动雨量监测仪、泥石流泥位监测仪、泥石流激光夜视监测仪以及光纤光栅实时监测解调仪、分布式光纤应变实时监测系统。在 2013 年雅安地震灾区宝兴县冷木沟和教场沟,安装布设的 13 套激光夜视监测仪等泥石流监测预警设备,实现了对两条泥石流沟的全方位、实时、自动监测预警和远程视频监控,并成功预警,为当地政府及时组织疏散群众提供了有效技术支持和依据,避免了人员伤亡和财产损失。

2019 年以来,紧密围绕降雨与地表变形监测技术难题,以提高设备可靠性和集成度、降低设备功耗和综合成本为目标,综合运用微机电系统(MEMS)、光电/压电、北斗定位、窄带物联网等智能传感与传输技术,自主研发了智能雨量监测仪、倾角/加速度监测仪、智能裂缝位移监测仪、全球导航卫星系统(GNSS)地表位移监测仪等两类 6 种第一代普适型地质灾害监测预警设备,分别在西藏昌都金沙江上游、三峡库区重庆云阳、甘肃陇南、江西赣州、湖南溆浦等地开展了野外示范应用,成功预警重庆云阳团包滑坡。

2022 年,综合运用无线组网与物联网技术、多参量数据融合技术等新技术,研制出普适型智能化实时监测预警仪,包括滑坡裂缝智能监测预警仪和智能分级雨量监测预警仪,具备重量轻、体积小、功耗低、防护等级高、安装轻便、性能稳定等特点,具有仪器-仪器、仪器-平台之间的智能联动与协同预警功能,可满足不同灾害体的裂缝位移、雨量监测需求。2022 年 4 月在甘肃舟曲选取 2 处滑坡灾害点开展野外监测示范应用,完成 10 套滑坡裂缝智能监测预警仪与 3 套智能分级雨量监测预警仪安装部署工作。截至目前,监测仪器工作运行稳定、状态良好,获取了有效监测数据,应用效果良好,有效提升专群结合的地质灾害监测预警科技水平。

2、地下水监测技术装备:形成“传感器+采集器+管理平台”全流程技术体系,服务国家地下水监测工程

从 20 世纪 80 年代开始,水环中心开展了地下水压力、温度监测技术和相关仪器的研发工作。经过 40 余年的努力,从最初人工记录、导气管补偿式地下水水位计已发展成为具备自动采集存

储、实时补偿和智能分析的地下水动态监测系统,实现了监测技术方法和仪器传感器的跨越式发展。当前地下水动态远程监测仪、管理系统及相关仪器设备具备监测数据自动采集、存储、远程传输、自动解译入库与动态监测传感器信息、通讯设备信息、监测井信息管理等功能,具有全自动无人值守工作、超低功耗运行、多种接口兼容、多级数据更新等特点,水位监测精度优于满量程的 $\pm 0.2\%$,同时可应用于一孔多层含水层的监测,获得国家发明专利、实用新型专利和软件著作权 30 余项,获省部级奖励 3 项,形成“传感器+采集器+管理平台”全流程技术体系。2014 年 11 月,由原国土资源部组织,袁道先院士为组长的鉴定委员会鉴定为“性价比优于国外同类产品,综合性能达到国际先进水平”。

地下水动态监测整套系统设备已在国内高海拔低气压、高温干燥、高温湿热、低温严寒等典型地区取得了良好的应用效果。按照国家地下水监测工程的总体要求,2015 年、2016 年,为监测工程提供 2000 余套产品,并为江苏、安徽、山东、河南等七省提供设备的安装、调试、维护,为国家地下水监测工程提供了重要的技术和设备支撑,为我国地下水资源科学管理提供了技术支撑。

3、地热监测技术装备:形成“浅、中、深”立体监测技术体系,服务雄安新区地热资源监测监管

2016 年起,水环中心地热监测技术团队根据地热资源勘查评价、开发利用、监管保护全流程动态监测需求,创新研发了一批具有自主知识产权的自动化监测技术装备,形成了浅层地热能准分布式温度监测装备、耐温型水位-水温自动化采集与远程传输终端、流体流量-温度-压力监测设备等代表性产品,获批专利近 20 项,可适用于浅、中、深不同类型地热资源立体监测,满足 300°C 瞬态测温 and 120°C 长期监测的工作需求,温度、压力、水位、流量监测精度分别可达 2.5% 、 1% 、 0.5% 、 5% 。牵头编制完成《地热资源动态监测规程》能源行业标准,《雄安新区地热动态监测系统和专用监测井技术规程(试行)》、《雄安新区地热开采井和回灌井监测技术规程(试行)》等地方标准,已分别由国家能源局和河北雄安新区管理委员会发布实施。

2019 年,采用自主研发的地热监测设备,在雄县建立地热监测示范网。2021 年,运用自动数据采集与无线传输、大数据分析等新一代信息技术,启动雄安新区地热监测网工程建设。目前,已建设完成开采和回灌监测井 31 眼、专用监测井 19 眼,形成基本覆盖雄安新区地热集中开采区和主

要地热矿权区块的监测网点,有效支撑雄安新区地热资源精细化管理和可持续开发利用,形成了“政府主导、公益先行、创新驱动、示范引领、工程化应用”为主线,多渠道资金联合、科技研发与成果应用于一体的社会化服务新模式。

山东省地矿局第二水文地质工程地质大队 ——深耕地质专业领域 做清洁能源倡导者

地热加 报

近年来,水文二队围绕地热资源可持续勘查开发利用、碳储存、碳利用等领域开展地质技术研究及工程应用,推进科技创新,进行技术攻关,着力提升创新驱动,成为清洁能源资源勘查开发的倡导者、先行者!

1 积极探索开创清洁能源勘探先河

自 20 世纪 90 年代以来,山东省地矿局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院)在鲁西北地区连续开展了近 40 年的地下水及地质环境监测工作,先后完成各种比例尺水文地质基础调查 15364 平方公里,完成了德州、聊城、滨州农田供水水文地质勘察,探明聊城电厂、临清城市供水等大中型水源地 11 处,在黄淮海平原鲁北地区开展盐碱土改良、地下咸水改造利用等工作,在黄河三角洲、胶东半岛经济区进行了区域综合水文地质勘察,编制完成黄河流域环境地质图系等。

水文二队先后在全国 30 个省市完成地热、干热岩、页岩气、钾盐等勘探孔 600 余眼,累计完成进尺近 100 万米,积累和掌握了大口径填砾、穿越高压油气层及高层注水层、大口径花岗岩取心和定向、钾盐勘探和高温钻井液 6 项大口径钻探核心技术,研发出大口径空气潜孔锤钻进、大口径气举反循环钻进和“转盘+井底动力钻具”高效复合钻进 3 项先进钻探工艺;先后开展了“山东省地热资源调查评价”“山东省鲁西北平原地热资

源调查评价”等一系列地热勘查工作。作为山东省第一个具备 5000 米深孔施工能力的地勘单位,水文二队拥有 50LDB、ZJ-40、RPS-3200 等各类大口径钻机 16 台及相关配套设备,并完成了全国干热岩第一井等钻探工作,成为地热、锂、岩盐及深层卤水等深部能源资源勘探“王牌军”。

1997 年,成功实施第一眼地热井,拉开向地热行业进军的序幕。2002 年,在胜利油田孤岛社区完成地热井勘探工程,打响“山东地矿”地热施工品牌。2007 年,在河北霸州完成地热 5 井,为该队开拓全国市场奠定坚实基础。2008 年,开辟青海钾盐勘探市场,至今在青海完成钾盐钻探项目 26 个,累计钻探进尺 4.2 万余米。2011 年,承担国内首个干热岩勘查试验项目——山东利津干热岩调查项目。2013 年,开展干热岩勘探工作,在青海完成 DR4 干热岩钻孔。2014 年,开展页岩气勘探工作,在东营完成济页参 1 井勘探。2016 年,完成我国东南沿海深部地热科学钻探 HDR-ZK01 井施工,这是国内首个超 4000 米干热岩科学勘探孔。2017 年,仅用 8 个月在青海冷湖镇马海地区完成深层卤水钾矿预查项目勘探工程,创山东省地矿局青海钾盐全孔取心深度纪录。2021 年,实施青岛市即墨区环秀湖人才综合体清洁供暖项目地热井工程,为“中深层同轴换热技术”区域推广应用奠定了技术基础。今年,实施大同盆地重点地区深部高温地热资源详查勘探工程。