

美国《工程索引》(Ei Compendex) 收录期刊
荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus) 收录期刊
中国科学引文数据库(CSCD) 来源期刊 EBSCO 学术数据库收录期刊
中文核心期刊 中国科技核心期刊 RCCSE中国核心学术期刊

ISSN 1001-1986
CN 61-1155/P

煤田地质与勘探

COAL GEOLOGY & EXPLORATION

地热能 专刊

客座主编: 庞忠和 研究员

侯正猛 院士

李克文 教授



1

2024

第52卷 第1期
2024年1月出版

ISSN 1001-1986



电子刊

主管 中国煤炭科工集团有限公司
主办 中煤科工西安研究院(集团)有限公司

煤田地质与勘探

第五十二卷 第一期

二〇二四年一月

《煤田地质与勘探》第六届编辑委员会

名誉主任：彭苏萍 王双明

主任：董书宁 副主任：王皓

委员（按姓名笔画排列）：

马坚伟	王刚	王赞	王广才	王文峰	王生全	王恩元	文国军
尹会永	尹尚先	田东庄	田宏亮	付梅臣	代世峰	刘财	刘启蒙
齐永安	孙亚军	杜启振	李希建	李国富	李树刚	连会青	张文泉
张平松	张传伟	张绍和	张遂安	陈文超	陈陆望	邵龙义	范立民
岳建华	周万芳	周西华	庞忠和	郑刘根	孟召平	郝世俊	施龙青
姜在炳	姚宁平	姚艳斌	秦勇	桂和荣	贾建称	柴建禄	倪小明
桑树勋	曹代勇	常象春	韩军	程建远	靳德武	戴前伟	戴振学
魏建平	James W. LaMoreaux(USA)						

《煤田地质与勘探》第一届青年编辑委员会

委员（按姓名笔画排列）：

于四伟	万继方	马银龙	王乾	王胜	王猛	王文学	王东东	王传留	王金满	王保利
王春光	王晓凯	王雪冬	王登科	王超杰	毛德强	牛庆合	孔彪	孔彦龙	孔祥国	邓亚虹
付兵	冯洁	卢守青	史锐	叶敏	甘超	申建	申艳军	乔军伟	伏海蛟	刘勇
刘士亮	刘世奇	刘东娜	刘永升	刘汉斌	刘兴业	刘旭南	刘佳佳	刘磊磊	吕文玉	孙强
孙文斌	孙平贺	安峰辰	师庆民	师素珍	朱晓峻	毕刚	郭忠虎	闫霞	闫发志	何环
何将福	吴川	吴海波	宋世杰	宋泽章	张生	张雁	张谦	张开仲	张成业	张呈国
张继锋	张超林	张鑫鑫	李冰	李贺	李涛	李博	李勇	李瑞	李松	李波
李之军	李云波	李玉伟	李全贵	李国庆	李波波	李俊乾	李敬彬	李超峰	杜艺	杜明泽
杨兆彪	杨睿月	杨德军	汪进超	肖鹏	邵振鲁	陆承达	陈健	陈刚	陈祥	陈超
陈义林	陈登红	周峰	周斌	孟艳军	武俐	范涛	范耀	郑司建	郑永红	郑凯歌
金毅	侯晓伟	侯海海	姜志海	段建华	段飘飘	皇凡生	胡泽安	胡咤咤	胡雄武	贺勇
赵欣	赵研	赵宝峰	赵春虎	赵鹏翔	郝宪杰	唐淑玲	夏太平	徐良骥	徐智敏	秦雷
莫海涛	贾海梁	贾慧敏	郭晨	郭小铭	郭玉良	郭庆彪	钱自卫	高林	高科	高明忠
崔铁军	康正明	梁超	梁春苗	章文姣	黄峰	黄亚平	黄启铭	龚爽	曾一凡	温继伟
舒彪	谢苗苗	蔡记华	薛旭升	鞠金峰	魏迎春					

支持单位

中国煤炭学会、中国地质学会煤炭地质专业委员会

中国煤炭学会钻探工程专业委员会

煤与煤层气共采国家重点实验室

中国矿业大学

安徽理工大学

中国石油大学（北京）

安徽大学

中国矿山安全学会水害防治专业委员会

中国地球物理学会地热专业委员会

中国矿业大学（北京）

山东科技大学

华北科技学院

西安科技大学

河南理工大学

地热能 专刊

院士寄语

地热是来自地球内部的本土能源，它具有绿色、环保、可再生等优点；同时地热能又是五大非碳基能源之一，与风能、太阳能等可再生能源相比较，它的最大优势在于能量的稳定连续输出，因此，能源利用效率最高，最具竞争性。地热能的开发利用对推动经济高质量发展和实现碳达峰碳中和（“双碳”）目标具有举足轻重的作用，因此日益受到人们的重视。据初步估算，我国浅层和中深层地热资源的可采资源量相当于26亿吨标准煤，在中东部沉积盆地中，中低温水热资源尤其丰富，适宜于直接热利用。

我国地热资源的开发利用始于20世纪70年代初，李四光教授提出地球是一个庞大的热库，人类应向地球要热。为了改善当时因石油危机而出现的世界性能源短缺局面，大量的地热田得以开发，尤以水热型地热资源为主，主要用于旅游康养等产业，比较单一；近20年来，地热供暖超过温泉康养，占主导地位，地热的直接利用被作为能源的新门类受到广泛重视，华北地区是地热供暖主战场。近20年来，我国地热直接利用产业始终位居全球第一。

煤田地热起源于矿山热害防治工作，自20世纪70年代初开始，原中国科学院地质研究所地热研究室与原煤炭工业部合作，先后对河北开滦、山东兖州的东滩和河南平顶山八矿等煤矿进行系统的研究，为矿山建设提供了基础资料，同时也提供了中国第一批大地热流值。目前，我国许多煤矿区的采深都已超过了600 m，1 000 m以深的矿井已超过50座。随着开采深度的增加，地层温度随之升高，因此矿山地热资源相当可观，以地热资源深度范畴来讲，对应于中层地热资源。

煤田地热应变废为宝，很多煤矿因为各种原因正面临关闭或废弃，根据调查，目前关闭/废弃矿井中蕴藏着大量可供开发的地热资源与地下空间资源，煤炭系统目前正在面临着历史性的转型期，如何继续发挥“煤田地热”的优势，将“矿井”变为“热井”是摆在我们科技工作者面前的光荣使命和责任。

作为中国第一代深耕地热能的科研工作者，我对地热能开发近年来获得的巨大成就深感欣慰，也为地热能和煤田地热开发的广阔前景倍感振奋，地热能开发任重道远。《煤田地质与勘探》编辑部精心组织策划了“地热能”专刊，中国科学院地质与地球物理研究所庞忠和研究员，德国地球科学与岩土工程院院士侯正猛教授，美国斯坦福大学资深研究员、北京大学、中国地质大学（北京）李克文教授共同担任专刊主编，中国科学院地质与地球物理研究所孔彦龙研究员担任执行主编。从编辑部获悉，自征稿通知发布以来，专刊得到业界专家学者及一线科技人员的积极响应，共计收到投稿56篇，经专刊负责人初审、同行评议、编辑部复审和执行主编终审，优选出17篇高质量学术论文，在2024年第1期刊发。论文主要涵盖我国主要盆地地热资源成因和资源量评价、地热能高效开发技术、干热岩地热成因机制和资源评价以及地热田伴生矿产等内容，旨在响应国家号召、传播地热能最新研究成果，为广大科研与技术人员提供有益借鉴。

中国科学院院士：



2024年1月

地热和水文地质学家、中国科学院汪集暘院士



汪集暘院士，现任中国科学院地质与地球物理研究所研究员，“国家地热能中心技术委员会”名誉主任，“国家地热能中心指导委员会”委员，“中国地源热泵产业联盟”名誉理事长，联合国教科文组织（UNESCO）国际岩溶研究中心（IRCK）理事会理事，香港中文大学名誉教授，河海大学及南京水利水电科学研究院“水文水资源与水利工程科学国家重点实验室”学术委员会顾问，中国科学院广州能源研究所首席科学家，中国石油大学（华东）

“地热与可再生能源研究中心”主任，中国科学院水资源研究中心专家委员会副主任，中国科学院能源研究委员会专家委员会委员。

长期从事理论和应用地热研究，在大地热流、深部地热、矿山与油田地热和地热资源方面做出了开拓性贡献。迄今为止，已在国内外学术刊物上发表论文100多篇，撰写专著6部。获得国家科学技术进步二等奖1项，中国科学院及其他部委自然科学及科学技术进步一等奖4项，以及刘光文科技成就奖（2016）、何梁何利基金科学与技术进步奖（2006）与李四光地质科学奖荣誉奖（2003）。主要论著有《中低温对流型地热系统》（1993）、《Geothermics in China》（1996）、《神奇的地热》（2001）、《地热利用技术》（2005）、《地热学及其应用》（2015）等。

煤田地质与勘探

MEITIAN DIZHI YU KANTAN

2024 年第 1 期

(月刊 1973 年创刊)

第 52 卷 总 313 期

目 次

·综述·

深部地热能系统主要挑战与耦合储能的增强型创新开发模式 侯正猛, 吴旭宁, 罗佳顺, 张烈辉, 李早元, 曹 成, 吴 林, 陈前均(1)

地热系统钙华和硅华定年方法研究进展及其应用 李 彬, 李义曼, 庞忠和, 黄天明, 高彬彬(14)

·地热资源成因·

松辽盆地岩石热导率柱及古地温场分布特征 唐博宁, 邱楠生, 朱传庆, 常 健, 李 潇, 黄 越, 杨俊生, 付秀丽(26)

内蒙古中部干热岩地热资源成因机制研究 熊 波, 许 浩, 唐淑玲, 王社教, 方朝合, 辛福东, 吴京杰, 位湘权, 宋雪静, 王金伟(36)

歧口凹陷区新近系馆陶组热储特征及成因机制 夏国朝, 楼 达, 赵艳婷, 王 辉, 段忠丰, 孙晓林, 张飞鹏, 雒 蓉, 葛家成(46)

云南落漏河流域温泉水化学特征及成因模式 罗 欢, 刘振南, 马一奇, 张云辉, 陶兰初, 陈庆松, 符敦凯, 吴湘川(56)

湖南省热水圩地热田干热岩形成的热源机制与成因模式 杜 江, 蔡宁波, 张保建, 王克营, 何立宏, 廖凤初(70)

·地热能高效开发技术·

影响岩溶热储采出温度的开采参数敏感性研究——以河南清丰地区为例 韩 昀, 李克文, 何继富, 汪新伟, 高楠安(83)

渤海湾盆地干热岩开发利用前景评估——基于开采优化数值模拟的认识 江晓雪, 朱传庆, 丁 蕊, 谢 芳, 邱楠生(93)

中深层地热井换热特性多因素影响规律研究 韩永亮, 王凯鹏, 王义杰, 苟 立, 杨延斌, 雷燕子, 武芳丽, 沈 浩(104)

裂缝分布对 CO₂-EGS 热提取的影响研究 周 庆, 廖建兴, 徐 斌, 姚 亮, 周浩宇, 赵 权(117)

关中地区中深层地埋管换热器长期运行性能研究 张智斌, 马真迪, 郝建科, 贾国圣, 柯婷婷, 成崇华, 金立文(129)

深部地热水多开采井联合运行模式优化 平 宇, 李 放, 季文清, 袁筱莹, 齐玉峰, 邓晓颖, 王心义(140)

陕北地区中深层同轴地埋管取热性能影响因素分析及优化 邹海江, 李永鹏, 张 林, 惠 鹏, 刘厚宁, 申 芳, 王泮浩(152)

太阳能补热热泵供暖实验及地温场热均衡模拟研究 贾子龙, 郑 佳, 张耀斌, 陈 珂, 刘爱华, 李 娟(159)

·地热成矿·

秦岭山前眉县低温地热水及伴生氦气成因机制 韩元红, 吕 俊, 张育平, 罗娜宁, 李 兵, 申小龙(168)

羊八井-谷露裂谷地热水锂空间分布规律及其成因的统计分析 陈娅奎, 孔彦龙, 段佳斌, 孙文洁, 程远志(177)

期刊基本参数: CN 61-1155/P*1973*m*A4*188*zh*P* ¥ 40.00*1500*17*2024-01 本期执行编辑: 周建军

2024 年 1 月 25 日出版

公开发行

邮发代号: 52-14

国内定价: 40.00 元

CONTENTS

Major challenges of deep geothermal systems and an innovative development mode of REGS integrated with energy storage	
..... HOU Zhengmeng, WU Xuning, LUO Jiashun, ZHANG Liehui, LI Zaoyuan, CAO Cheng, WU Lin, CHEN Qianjun(1)	
Dating methods for travertine and siliceous sinter in geothermal systems: Progress and applications	
..... LI Bin, LI Yiman, PANG Zhonghe, HUANG Tianming, GAO Binbin(14)	
Thermal conductivity column of rocks and distribution characteristics of paleo-geothermal field in the Songliao Basin	
..... TANG Boning, QIU Nansheng, ZHU Chuanqing, CHANG Jian, LI Xiao, HUANG Yue, YANG Junsheng, FU Xiuli(26)	
Genetic mechanisms of hot dry rock geothermal resources in central Inner Mongolia	
..... XIONG Bo, XU Hao, TANG Shuling, WANG Shejiao, FANG Chaohe, XIN Fudong, WU Jingjie, WEI Xiangquan, SONG Xuejing, WANG Jinwei(36)	
Characteristics and genetic mechanism of geothermal reservoirs in the Neogene Guantao Formation, Qikou Sag	
..... XIA Guochao, LOU Da, ZHAO Yanting, WANG Hui, DUAN Zhongfeng, SUN Xiaolin, ZHANG Feipeng, LUO Rong, GE Jiacheng(46)	
Hydrochemistry characteristics and genesis mode of hot springs in the Luolou River basin, Yunnan, China	
..... LUO Huan, LIU Zhennan, MA Yiqi, ZHANG Yunhui, TAO Lanchu, CHEN Qingsong, FU Dunkai, WU Xiangchuan(56)	
Heat source-related mechanisms and genetic modes for the formation of hot dry rocks in the Reshuiwei geothermal field, Hunan Province	
..... DU Jiang, CAI Ningbo, ZHANG Baojian, WANG Keying, HE Lihong, LIAO Fengchu(70)	
Sensitivity analysis of development parameters on the production temperature of karst geothermal reservoirs: A case study of the Qingfeng area in Henan, China	
..... HAN Yun, LI Kewen, HE Jifu, WANG Xinwei, GAO Nan'an(83)	
Evaluating the exploitation and utilization prospects of hot dry rock in Bohai Bay Basin: Understanding based on numerical simulations for exploitation optimization	
..... JIANG Xiaoxue, ZHU Chuanqing, DING Rui, XIE Fang, QIU Nansheng(93)	
Influencing patterns of multiple factors on the heat transfer performance of moderately deep geothermal wells	
..... HAN Yongliang, WANG Kaipeng, WANG Yijie, GOU Li, YANG Yanbin, LEI Yanzi, WU Fangli, SHEN Hao(104)	
Effects of fracture distribution on heat extraction through CO ₂ -EGS	
..... ZHOU Qing, LIAO Jianxing, XU Bin, YAO Liang, ZHOU Haoyu, ZHAO Quan(117)	
Long-term operation performance of medium-deep borehole heat exchangers in the Guanzhong area	
..... ZHANG Zhibin, MA Zhendi, HAO Jianke, JIA Guosheng, KE Tingting, CHENG Chonghua, JIN Liwen(129)	
A joint operation mode of multi-production wells for deep geothermal water exploitation	
..... PING Yu, LI Fang, JI Wenqing, YUAN Xiaoying, QI Yufeng, DENG Xiaoying, WANG Xinyi(140)	
Influencing factor analysis and optimization of heat extraction performance of moderately deep coaxial borehole heat exchangers in northern Shaanxi, China	
..... ZOU Haijiang, LI Yongpeng, ZHANG Lin, HUI Peng, LIU Houning, SHEN Fang, WANG Fenghao(152)	
Heating experiments of a solar-assisted heat pump and thermal equilibrium simulations of geothermal fields	
..... JIA Zilong, ZHENG Jia, ZHANG Yaobin, CHEN Ke, LIU Aihua, LI Juan(159)	
Genetic mechanisms of low-temperature geothermal water and its associated helium gas in Meixian County in the piedmont of Qinling Mountains	
..... HAN Yuanhong, LYU Jun, ZHANG Yuping, LUO Naning, LI Bing, SHEN Xiaolong(168)	
Statistical analysis of the spatial distribution and genesis of lithium in geothermal water in the Yangbajing-Gulu rift, Xizang	
..... CHEN Yakui, KONG Yanlong, DUAN Jiabin, SUN Wenjie, CHENG Yuanzhi(177)	



移动阅读

江晓雪, 朱传庆, 丁蕊, 等. 渤海湾盆地干热岩开发利用前景评估——基于开采优化数值模拟的认识[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(1): 93–103. doi: [10.12363/issn.1001-1986.23.07.0435](https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.07.0435)
JIANG Xiaoxue, ZHU Chuanqing, DING Rui, et al. Evaluating the exploitation and utilization prospects of hot dry rock in Bohai Bay Basin: Understanding based on numerical simulations for exploitation optimization[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(1): 93–103. doi: [10.12363/issn.1001-1986.23.07.0435](https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.07.0435)

渤海湾盆地干热岩开发利用前景评估

——基于开采优化数值模拟的认识

江晓雪^{1,2}, 朱传庆^{1,2,*}, 丁蕊^{1,2}, 谢芳^{1,2}, 邱楠生^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249)

摘要: 渤海湾盆地的大地热流高, 5 000 m 埋深地层平均温度为 175℃, 热储岩性以低孔低渗的变质岩、火成岩为主, 具备形成干热岩资源的条件。基于大地热流、岩石热导率、生热率等热参数, 利用 COMSOL 软件建立三维水热耦合的干热岩开采模型、分析不同井间距、注采速率、布井方式等差异开采方案下在 100 a 内对热储层温度的影响随开发时间的变化, 选取最优方案并估算干热岩资源。结果表明: 注采速率一定时, 随着开采时间的增加, 开采井水温度下降速率与井间距成反比; 当注采井间距一定时, 注采速率越大, 开采井水温度下降越快, 发生“热突破”的时间越早; 其他条件相同的情况下, “两采两注”布井方案比“一采一注”布井方案获得的热量更多, 开采效率更高。基于上述认识, 确定研究区最优开采方案为: 年限 50 a、井间距 400 m、注采量 90 m³/h、“两采两注”方式。此方案下, 可获得开采井水平均温度为 172℃, 对应全渤海湾盆地可采资源量为 3.28×10¹⁹ J/a。以河北任丘市为例, 按照民用住宅热负荷指标 100 W/m² 计算, 利用最优方案进行干热岩的开采, 仅需 157.75 km² 干热岩有利区即可满足全市居民供暖需求。因此, 开发利用研究区干热岩资源, 可增强华北地区能源供应保障能力, 打造可持续发展的绿色低碳能源体系。

关键词: 干热岩; 数值模拟; 有利区圈定; 开发方案优化; 地热资源估算; 渤海湾盆地

中图分类号: P314.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2024)01-0093-11

Evaluating the exploitation and utilization prospects of hot dry rock in Bohai Bay Basin: Understanding based on numerical simulations for exploitation optimization

JIANG Xiaoxue^{1,2}, ZHU Chuanqing^{1,2,*}, DING Rui^{1,2}, XIE Fang^{1,2}, QIU Nansheng^{1,2}

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The Bohai Bay Basin, characterized by high terrestrial heat flow, formation temperatures average of 175℃ at a depth of 5 000 m, and reservoirs with lithologies dominated by low-porosity and low-permeability metamorphic and igneous rocks, meets the requirements for the formation of hot dry rock (HDR) resources. Based on geothermal parameters such as terrestrial heat flow, rock thermal conductivity, and heat production rate, this study established a three-dimensional HDR exploitation model with thermo-hydro coupling using the COMSOL software. Furthermore, this study analyzed the effects of spacing between production and reinjection wells, reinjection and production rates, and well arrangement mode on the temperature evolution of the geothermal reservoir with exploitation time within 100 a. Accordingly, it selected the optimal scheme and estimated the potential HDR resources. Key findings are as follows: (1) Under certain reinjection and production rates, the rate of decline in production well water temperature over time is inversely proportional to injection and exploitation well spacing. (2) Under a certain well spacing, higher reinjection and production rates

收稿日期: 2023-07-24; 接收日期: 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42172334); 国家重点研发计划课题(2021YFA0716003)

第一作者: 江晓雪, 1997 年生, 女, 山西太原人, 博士研究生, 从事地热资源研究. E-mail: jiangxiaoxue135@163.com

*通信作者: 朱传庆, 1981 年生, 男, 山东曲阜人, 博士, 教授, 从事地热资源研究. E-mail: zhucq@cup.edu.cn

were associated with a quicker decrease in the water temperature of production wells and earlier thermal breakthroughs.

(3) Regarding well arrangement mode, the HDR exploitation using two production wells and two reinjection wells yielded more heat and higher efficiency than that using one production well and one reinjection well providing other conditions remained unchanged. Based on these results, the optimal HDR exploitation scheme was determined, consisting of an exploitation duration of 50 a, a well spacing of 400 m, reinjection and production rates of 90 m³/h, and well arrangement mode comprising two production wells and two reinjection wells. Using this scheme, the average water temperature of the production wells will be 172°C, corresponding to total recoverable resources of 3.28×10^{19} J/a of the entire Bohai Bay Basin. For instance, in Renqiu City of Hebei Province, which falls within the delineated HDR favorable area, the heating demands of the entire city can be met using merely 157.75 km² of HDR favorable area if the optimal HDR exploitation scheme is adopted, as calculated based on a heat load index of residential buildings of 100 W/m². Therefore, the exploitation and utilization of HDR resources in the study area can enhance the energy supply and guarantee capabilities of North China, contributing to the creation of a sustainable, green, and low-carbon energy system.

Keywords: hot dry rock (HDR); numerical simulation; delineation of favorable area; exploitation scheme optimization; geothermal resource estimation; Bohai Bay Basin

随着世界能源供需的日益紧张,传统化石能源面临着资源短缺和高碳排放的问题,新能源的开发利用已成为当今科技发展的重中之重。干热岩作为地热资源的重要组成部分,具有温度高、资源量大、热连续性好等优点,是当今地热资源研究的热点与前沿。前人研究表明,中国大陆 3~10 km 深处干热岩资源总计为 20.9×10^6 EJ,相当于 714.9×10^{12} t 标准煤,广泛分布于藏南、滇西、川西、东南沿海、渤海湾等地区^[1-2]。

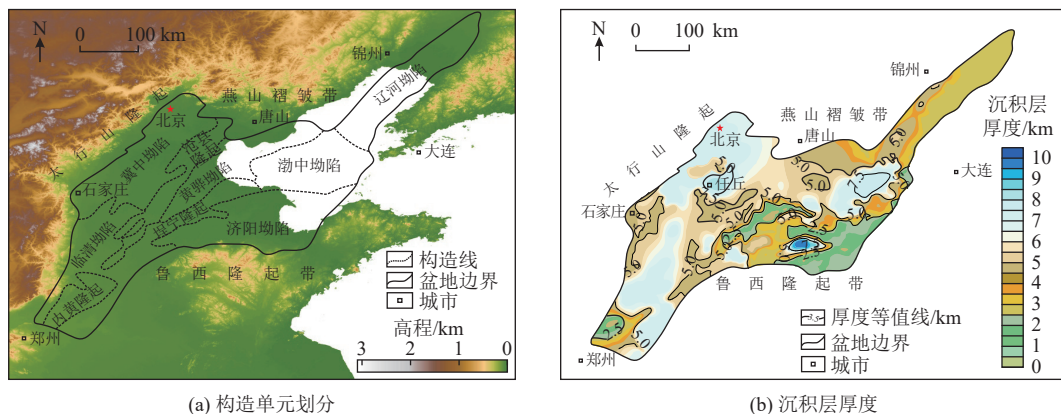
位于渤海湾盆地腹地的京津冀地区是我国的政治、经济、工业中心,也是冬季雾霾的高发区,减排需求迫切,合理开发利用地热资源已成为重要的发展方向。目前,河北雄安新区水热型地热资源已经在大规模供热制冷方面得到广泛应用,且雄安地热开发项目被列入国际可再生能源机构全球推广项目,证明该地区地热资源开发利用的可行性与广阔前景。近年来,除水热型地热资源外,该地区也发现了丰富的干热岩资源^[2-3]。前人对不同地区进行了干热岩资源评价,山东省 3~10 km 深度内干热岩资源总量约为 2.63×10^{23} J^[4];河北省马头营地区干热岩资源总量约为 5.00×10^{19} J^[5-6];华北地区的干热岩资源潜力约为 1.00×10^{24} J^[7]。渤海湾盆地不同地区均进行了不同程度的资源估算,但估算方法多为热储体积法^[8-9]。该方法的主要缺点是在开发过程中没有考虑储层的动态响应,忽略了相同热源下不同渗透率和压裂后的供液量对储层开发潜力的影响。许多学者提出利用数值模拟方法分析热储层开采效率的影响因素,从而优化干热岩系统开采方案并进行资源量估算。M. D. Aliyu 等^[10]利用数值模拟建立干热岩储层热-水-力学模型,分析不同开采因素对开采效率的影响;Wang Zhuting 等^[11]通过研究不同开采模拟方案对碳酸盐岩热储开采效率的影响,并提出合理开采方案。刘汉青^[12]、岳高凡^[13]等利用数值模拟方法对青海共和盆地干热岩开采过程中温度、压力的变化进行研究,并

提出了合理的开采方案。雷宏武等^[14]利用热-水动力耦合方法对松辽盆地增强型地热系统温度变化进行模拟,并估算出热提取效率。前人学者对共和盆地、松辽盆地等地区的干热岩开采数值模拟已较为成熟,而渤海湾地区干热岩开采模拟研究程度较低。因此,笔者基于地热地质条件圈定出渤海湾盆地干热岩的有利区域,利用数值模拟方法建立传热渗流模型,研究不同开采因素如注采井间距、注水速率、布井方式等对开采效率的影响,进一步优化开采方案,并在优化方案基础上估算干热岩可采资源量。该方法一定程度上规避了热储体积法的缺点,提出更为准确的资源评估结果,以期为后续干热岩的实际开采工程提供理论依据。

1 研究区概况及有利区圈定

1.1 地质背景

渤海湾盆地位于华北东部,是华北克拉通破坏背景下形成的中生代伸展裂谷盆地,面积约 15×10^4 km²^[15],包括辽河、渤中、济阳、黄骅、冀中、临清坳陷和内黄、埕宁、沧县、邢衡等隆起(图 1a)^[16]。该区经历了中新世-古生代稳定沉积阶段、中生代隆升褶皱阶段、古近纪断陷发育阶段和新近纪-第四纪区域坳陷 4 个构造演化阶段^[17]。渤海湾盆地沉积厚度适中,一般在 2~5 km,冀中坳陷沉积厚度较大,一般大于 3 km;济阳坳陷、辽河坳陷相对较低,多小于 3 km(图 1b)^[18]。盆地地层发育较齐全,从老至新主要发育有太古界泰山群变质岩系、中元古界蓟县系和长城系、新元古界青白口系和震旦系、下古生界寒武系和奥陶系、上古生界石炭系和二叠系、中生界侏罗系和白垩系、新生界古近系和第四系。其中新生、中生界和上古生界以碎屑岩沉积为主,古生界下部及元古界以碳酸盐岩为主^[11]。大量钻井资料表明,渤海湾盆地基底构造复杂,为太古界地层,不同地区岩性有一定差别。基于大地电磁测深资料分析,渤海湾

图1 渤海湾盆地构造单元划分及沉积层厚度^[16,18]Fig.1 Location and structural units and thickness of sedimentary layers in the Bohai Bay Basin^[16,18]

盆地存在高电阻率体,其视电阻率范围在 250~15 848 $\Omega \cdot m$,推断为燕山期花岗岩^[19]。渤海湾盆地多期构造发育、沉积厚度适中、花岗岩致密,为研究区形成干热岩地热资源奠定了基础。

1.2 地温场特征及有利区圈定

由渤海湾盆地不同深度温度分布(图2)显示,济阳拗陷、黄骅拗陷、埕宁隆起以及冀中拗陷部分地区地温较高,临清拗陷、内黄隆起地温相对较低。渤海湾盆地 3 000 m 深度地层温度介于 75~150 $^{\circ}C$,平均温度为 105 $^{\circ}C$ 。5 000 m 深度时地层温度介于 125~225 $^{\circ}C$,平均温度为 175 $^{\circ}C$ 。温度高值区在埕宁隆起、冀中拗陷东南部、黄骅拗陷西南部以及济阳拗陷西部,地层温度普遍可达 180 $^{\circ}C$,符合干热岩的温度界限。当埋深大于 7 000 m 时,地层温度主要集中在 175~250 $^{\circ}C$ 。总体而言,深部较高的温度为干热岩资源形成提供了基础条件,深部高温可能是板块碰撞和新生代构造运动造成的^[18]。

基于渤海湾盆地 71 个实测热流值数据收集与统计分析(图3),表明研究区热流分布在 44~85 mW/m^2 ,平均为 64.6 mW/m^2 ,高于中国大陆平均热流(61 mW/m^2),

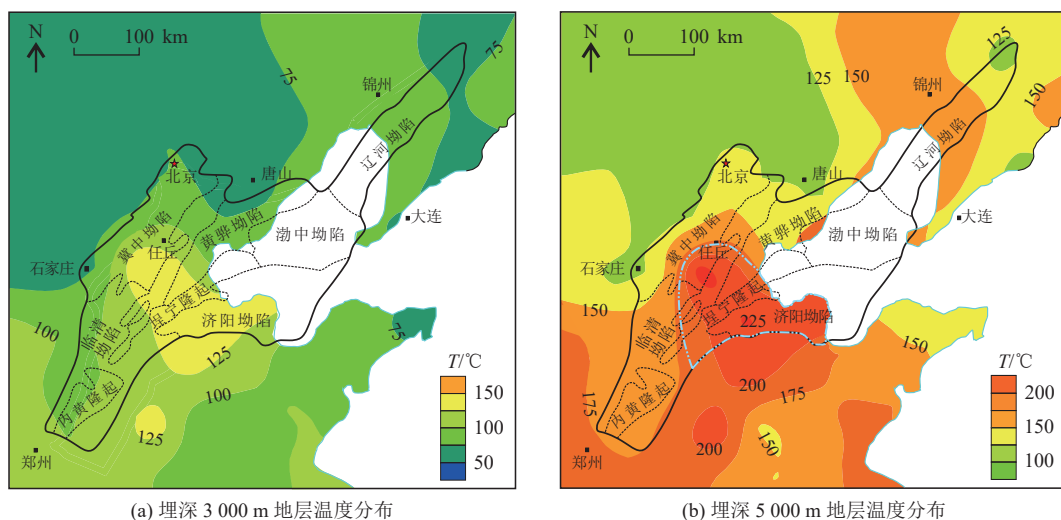
具有较高的热背景^[20-21]。

根据上述地温场分布特征,结合研究区岩性、岩石生热率、岩石热导率、基底埋藏深度等资料,圈定了埕宁隆起、冀中拗陷、黄骅拗陷、济阳拗陷等地区适合进行干热岩的开发与利用(图2b),为后续有利区干热岩地热资源储量估算提供了可靠的估算范围^[21-23]。

2 干热岩开采数值模拟分析

前人在地热资源评价工作中广泛应用的“热储体积法”不能准确判定采收率,且该方法忽略开采过程中动态响应等因素^[24]。为了解决这个问题,本次研究依据地热系统中多个实测属性参数建立地质开采模型,从而弥补静态估算法的不足,准确地进行干热岩资源估算以及开发前景预测。

由于干热岩自身物性特征导致资源开发往往需要通过人工压裂的方式进行人工造储,即增强型地热系统(Enhanced Geothermal Systems, EGS)。EGS 通常是由注射井和开采井以及连通不同井的裂缝系统组成,在钻井与后期的运营、维护中均需要很高的成本,在埋深



(a) 埋深 3 000 m 地层温度分布

(b) 埋深 5 000 m 地层温度分布

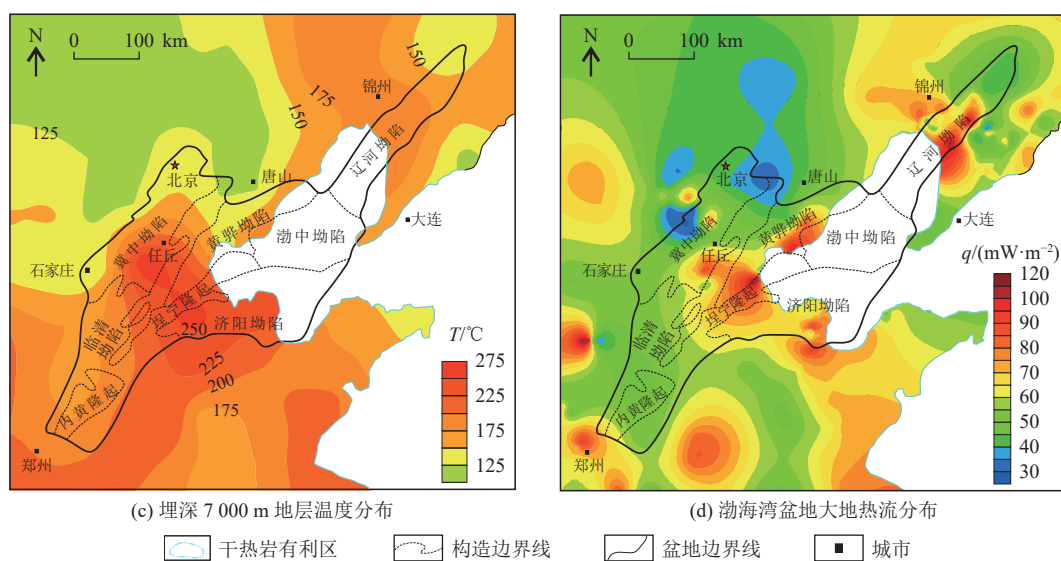


图 2 渤海湾盆地不同深度温度及大地热流分布(据文献 [18] 修改)

Fig.2 Distributions of temperatures at different depths and terrestrial heat flow in the Bohai Bay Basin (modified from Reference [18])

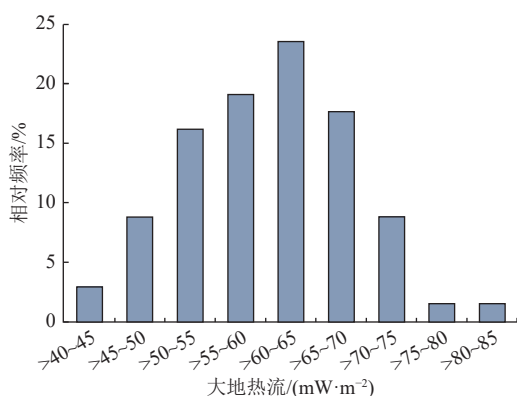


图 3 渤海湾盆地大地热流频率分布^[20]

Fig.3 Histogram showing the frequency distribution of terrestrial heat flow in the Bohai Bay Basin^[20]

大、密度高、低孔渗和更高温度的储层钻井更为甚之,因此,在施工前需要先设计好完善高效的开采方案,尽可能提高开采效率,保证经济效益^[25]。

开采效率主要取决于开采液的温度以及注采速率,还需考虑开发年限即热突破问题,过早地发生热突破会导致储层破坏、开发中断以及大量经济损失^[26]。热突破年限主要受到布井距离、注水速率、注水温度等因素影响。因此,为了获取更高效率的开采方案,可利用数值模拟方法控制上述不同开采条件、影响因素,确定研究区最有利干热岩开采的工程设计参数,从而得到最优开发方案并估算可采资源量^[10,27]。

本次利用 COMSOL Multiphysic 对于干热岩资源开采模型进行数值模拟,COMSOL Multiphysic 是一款以有限元为基础,通过偏微分方程(单场)或者偏微分方程组(多场)来实现真实物理现象的仿真模拟软件^[28]。软件中预设的渗流-传热控制方程可用于储层水-热耦合模拟,

其准确性以及可靠性可由先前的储层模拟广泛证明^[29]。

2.1 热储模型

热储模型的建立过程如下:(1)通过调研不同国家干热岩开采项目中热储层垂直与水平压裂范围,确定出热储开发范围,将热储层厚度定为 300 m,热储层规模定为 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ ^[30],满足有效热交换面积大于等于 $2 \times 10^6\text{ m}^2$ 的开采标准。(2)根据研究区地层分布、深部地温场特征,设定热储层顶部埋深为 5 000 m。(3)定义热储层压裂系统性质,前人通常采用裂隙介质渗透性升尺度转换的方法,即人工压裂增加渗透性使注射井与开采井之间发生水力联系这一复杂系统用等效渗透层的形式在地质模型体现,本次研究沿用这一方法,将热储层压裂系统简化为等效渗透层^[31-32]。

本次对于干热岩开采模拟研究主要包括 3 个方面:当注采速率一定时,研究不同井间距对开采井水温度的影响;当井间距一定时,研究不同注采速率对开采效率的影响;不同的布井方式(“一采一注”“两采两注”)对开采效率的影响。通过对比模型温度变化以及开采井水温度变化,来确定不同开采设计对于干热岩开采效率影响大小,从而优化开采模型,进而计算出可采干热岩资源量。根据上述资料结合实际的研究思路建立开采模型,如图 4 所示。

2.2 物理场、参数及边界条件确定

在模拟干热岩开采计算过程中,为了提高模拟结果的稳定性,做出如下假设:

- (1) 干热岩储层是一种理想的多孔介质层;
- (2) 地层中的流体流动符合达西定律^[27];
- (3) 忽略流体损失率,假定多孔介质与注入流体之

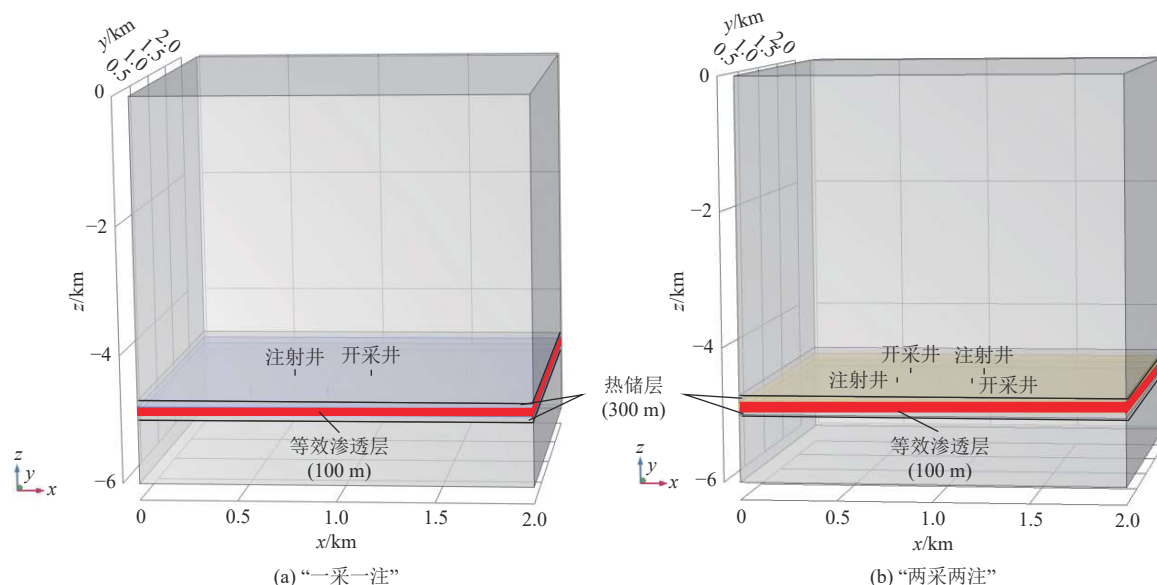


图 4 干热岩开采模型

Fig.4 Model of geothermal exploitation for hot dry rock

间不发生化学反应^[30];

(4) 岩石中的热传递遵循傅里叶定律;

(5) 将热储模型中侧面边界作为隔水、隔热边界, 将储层顶底板作为隔水导热边界^[33]。

考虑以上假设, 本次模拟遵循达西定律与多孔介质传热原理, 方程如下。

定义多孔介质中流体流动状态的达西定律表明, 速度(v) 场与流体压力梯度呈线性关系。达西定律公式^[10] 如下:

$$v=-\frac{k}{\mu}(\nabla p+\rho_L g \nabla z) \quad (1)$$

多孔介质传热控制方程^[34] 为:

$$(\rho \cdot C)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t}+\rho_f \cdot C_{\text{pf}} \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla T=\nabla \cdot\left(\lambda_{\text{eff}} \cdot \nabla T\right)+A \quad (2)$$

根据全国 5 000m 深温度分布图结合 Jiang Guangzheng 等^[18] 实测井温数据, 增加模型在该深度初始条件, 即约束温度 200℃, 并用下式定义研究区块不同埋深地层温度^[35]。

$$T=T_0+\nabla T z \quad (3)$$

结合龚育龄^[36] 对渤海湾盆地内主要构造单元的地温梯度研究, 将研究区平均地温梯度定为 0.036 2℃/m。

表 1 总结出模拟过程中设计的主要参数, 其中孔隙率、渗透率、导热系数、比热容等参数的取值主要参考前人对 EGS 中人工压裂和储层物性的研究成果。

2.3 模拟过程与结果分析

2.3.1 参考案例

为探究热储层内温度随着开采时间的变化, 本次研究根据上述资料与物理参数, 建立了井间距 300 m, 注

表 1 主要的物理参数取值

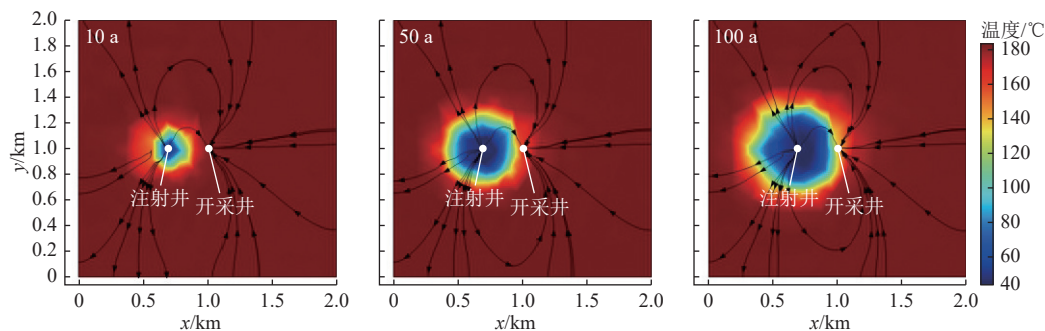
Table 1 Values of primary physical parameters

参数	取值
岩层密度/(kg·m ⁻³)	2 640 ^[37]
岩层孔隙率/%	10 ^[38]
岩层渗透率/m ²	1×10 ⁻¹⁴ ^[33]
岩层热扩散系数/(10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹)	1.61
岩层比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	780 ^[30]
岩层热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.6
等效渗透层密度/(kg·m ⁻³)	850
等效渗透层孔隙率/%	10
等效渗透层渗透率/m ²	4.94×10 ⁻¹² ^[38]
等效渗透层热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.5
注射井水温度/℃	40
等效渗透层厚度/m	100

采速率 100 m³/h 的“一采一注”开采模型进行 100 a 的计算。结果如图 5、图 6 所示, 展示了随时间变化的热储层切面温度分布和空间热储温度分布。从图中可知, 随着注射井注入冷水, 形成以注射井为中心向四周扩散的低温区, 运行开采时间越久, 水平与垂直方向上温度影响范围越大。当运行至 50 a 时, 低温区的扩散逐渐开始扰动开采井区域温度, 从而影响采出井开采效率。在干热岩地热资源开采过程中, 不同的井间距, 注采速率以及布井方式均对热储层内地热资源的可持续开采有较大影响, 因此, 下文将上述因素对于干热岩资源开采效率的影响进行了详细研究。

2.3.2 井间距的影响

本节探讨了固定注采速率情况下, 随着时间变化, 不同井间距对开采温度的影响特征。当注采速率保持 100 m³/h 不变, 注射井与开采井之间的距离从 200 m 渐



注：表面为温度；流线表示达西速度场(箭头表示方向，密集程度表示大小)。

图 5 “一采一注”热储层切面温度分布(井间距 300 m, 注采速率 100 m³/h)

Fig.5 Sections showing the temperature distribution of geothermal reservoirs exploited using one reinjection well and one production well (well spacing: 300 m, reinjection and production rates: 100 m³/h)

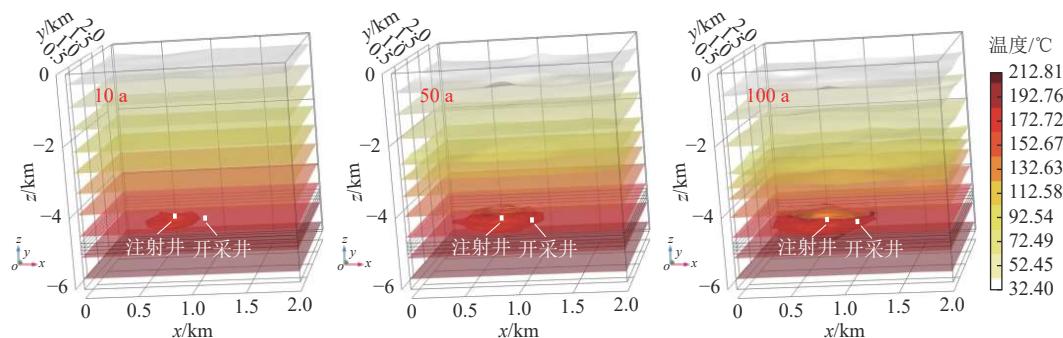


图 6 热储层温度的时空演化

Fig.6 Spatial and temporal evolution of geothermal reservoir temperature

变至 600 m 时,分析热储层温度分布、开采井水温度变化特征。

根据上述设计参数进行模拟计算,绘制出不同井间距方案的开采井水温度随时间变化曲线和储层温度变化图。如图 7 所示,井间距越大,开采井水温度下降速度越慢,且运行至 100 a 时温度越高。当注射井与开采井之间距离为 600 m 时,开采井水温度随时间变化幅度较小,100 a 运行时间井水温度仅下降约 10℃;然而当井间距为 200 m 时,开采井水温度在模拟运行至 50 a 时已经下降到 130℃ 以下,温度下降速度非常快。图 8 中热储层温度分布进一步证实,井间距越大热储层温度下降速度越慢,开采井温度越高。结合干热岩实际开采工程可知,虽然维持开采井的高温需要较大的井间距,但井间距的增大需要更大的注采压力,使经济成本增加,不利于实际开发。结合前人研究时开采井水温度下降幅度不超过 10% 的设定,优化方案选择在井间距最小的条件下保证开采期为 50 a,开采井温度下降不超过 160℃(考虑到热损失),下降温度超过 160℃ 即视为“热突破”[37-38]。

2.3.3 注采速率的影响

注采速率是另一个关键参数,对储层温度和干热岩的开采寿命具有控制作用。这是由于相同开采时间内,不同注采速率导致储层内热水流速变化大,从而影响储

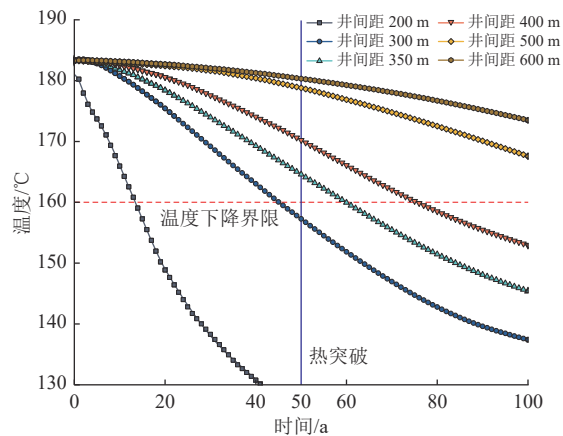
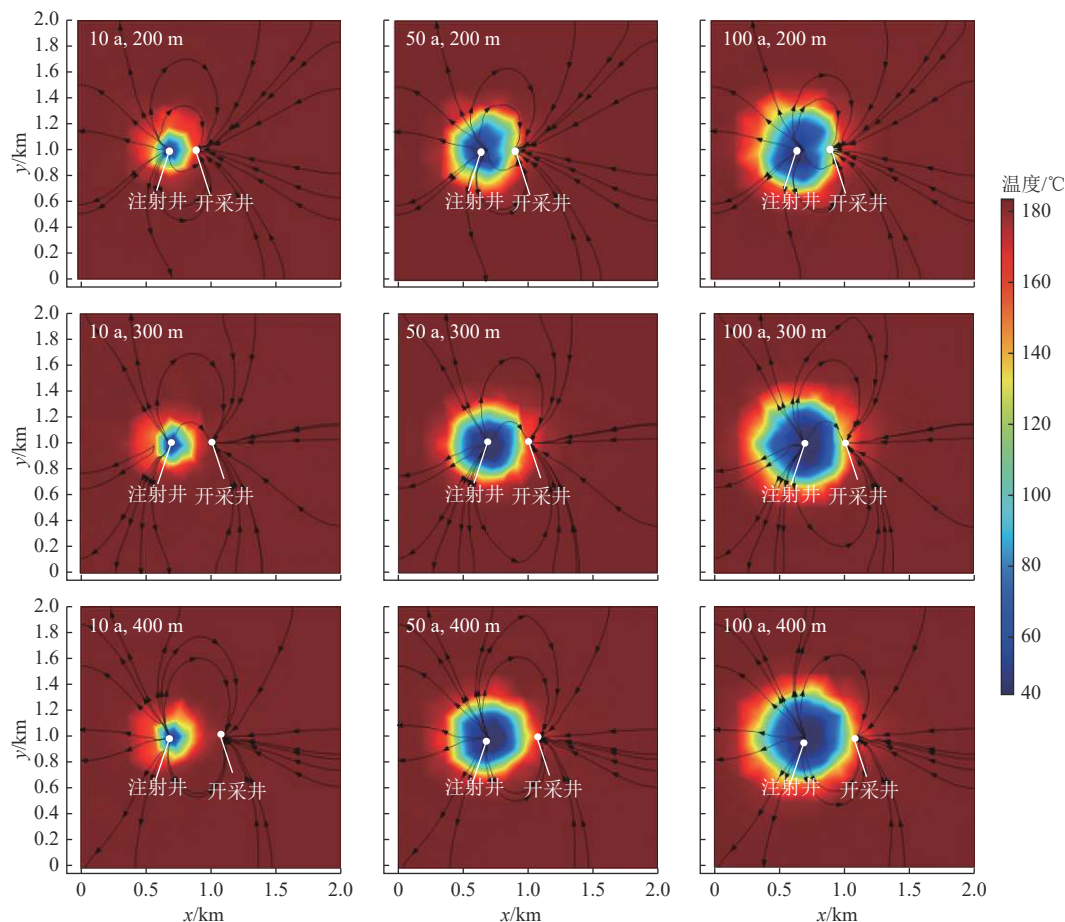


图 7 不同井间距下模型开采井水温度随时间变化曲线
Fig.7 Curves of time-varying water temperature of production wells under different well spacings

层热量的提取。通常,注采速率越大,开采热量越大。但当注采速率过大时,干热岩开采系统容易过早发生热突破问题,造成严重的经济损失。因此,本次研究在井间距一定时,对不同注采速率(100 m³/h 到 180 m³/h)下开采温度变化进行分析。结果如图 9 所示,随着开采时间的推移,不同注采速率方案下开采井水温度下降曲线具有不同的下降速率。如注采速率为 160 m³/h 时,开采井水温度在 100 a 时大约为 136℃,而注采速率为 100 m³/h 时,开采井水温度在 100 a 时下降至 145℃。图中整体趋势也能表明,相同井间距,注采速率越大,其



注: 表面为温度; 流线表示达西速度场(箭头表示方向, 密集程度表示大小)。

图 8 不同井间距下模型热储温度随时间变化特征 (注采速率=100 m³/h)

Fig.8 Time-varying geothermal reservoir temperature under different well spacings (reinjection and production rates: 100 m³/h)

开采井水温度下降越快, 开采寿命越短, 开采运行结束时温度越低; 开采速率越低, 开采井水温度下降速率越慢, 开采寿命越长, 开采模拟结束时开采井水温度越高。但结合开采利用率和实际情况, 不能为了追求开采寿命将注采速率一味减小, 应找到符合开采年限即 50 a 且最大注采速率的开采方案, 以获得更高的经济效益。

2.3.4 布井方式

目前, 实际开采工作中也存在“两采两注”的布井开发模式, 为探究不同布井方式下开采井水温度、效率是否受影响, 本次通过建立井间距 400 m、注采速率 100 m³/h 方案下的“两采两注”开采模型进行时间尺度 100 a 的模拟计算, 并观察其储层温度随时间的变化, 结果如图 10 所示。在相同的布井范围、注水温度以及开采速率的情况下, 两种布井方式呈现出的温度变化趋势相同, 但开采温度和温度下降速率有所差异。图 11 显示, “一采一注”布井方式比“两采两注”布井方式下的开采井水温度更高。通过对相同条件下不同布井方式的曲线对比, “两采两注”方式比“一采一注”方式下开采井水温度降低速率快, 这是由于两口注水井形成的低

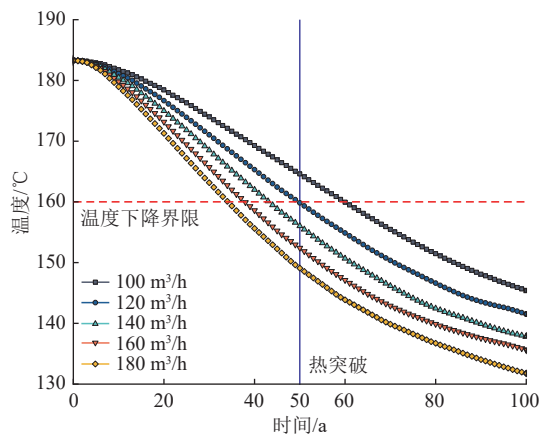
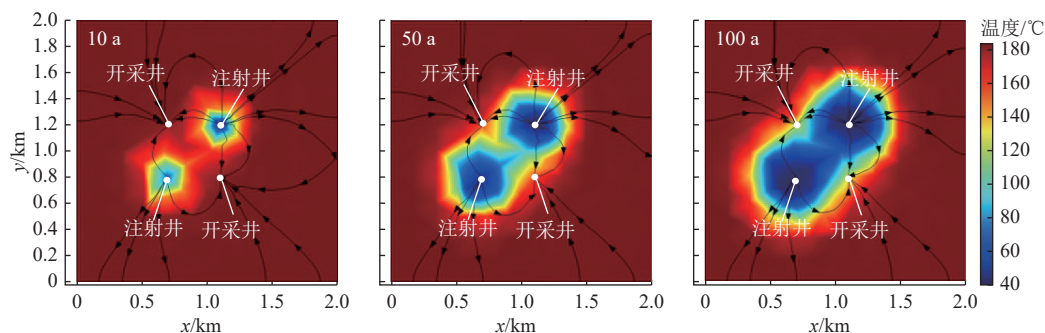


图 9 不同注采速率下开采井水温度随时间变化曲线 (井间距=350 m)

Fig.9 Curves of time-varying water temperature of the production well under different production rates (well spacing: 350 m)

温区范围更大, 从而导致降温速率的加快。

横向对比, “两采两注”模式下开采温度和降温界限发生的年限均低于“一采一注”模式。开采效率除受到温度影响外, 注采速率也是很重要的考虑因素, 为准确对比两种布井方式下哪种开采效率更高, 本文引入



注：表面为温度；流线表示达西速度场(箭头表示方向，密集程度表示大小)。

图 10 “两采两注”方式下热储层切面温度分布(井间距=400 m, 注采速率=100 m³/h)

Fig.10 Sections showing the temperature distribution of geothermal reservoirs exploited using two reinjection wells and two production wells (well spacing: 400 m; reinjection and production rates: 100 m³/h)

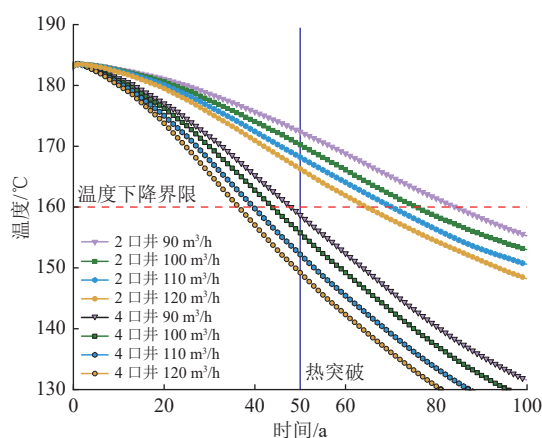


图 11 不同布井方式下开采井水温度随时间变化曲线(井间距=400 m; 2 口井：一采一注; 4 口井：两采两注)

Fig.11 Curves of time-varying water temperature of production wells under different well arrangement modes (well spacing: 400 m; two wells: one production well and one reinjection well; four well: two production wells and two reinjection wells)

“产热功率”这一概念, 公式^[39-40]如下:

$$W_p = MC_w(T_p - T_j) \quad (4)$$

通过式(4)计算不同开发方案下的产热功率, 结果如图 12 所示。虽然“两采两注”方案下开采温度较低、温度下降速率较快, 但在总体符合开采要求的基础上, “两采两注”布井模式所获得的能源生产率相比“一采一注”布井模式更高, 这是由于前者获得的抽采量更多, 转化的热量更多。

2.3.5 开采方案确定

通过上述数值模拟结果, 得出如下规律:

(1) 注采井间距与开采温度成正比, 与开采井水温度下降速率成反比; 注采速率与开采井开采寿命成反比。

(2) 其他开采因素不变, “两采两注”布井方案下可获得更多的热量, 开采效率更高。

综合以上规律, 在保证干热岩资源开采年限不少于 50 a 的情况下, 考虑井间距最小、注采速率最大且开采温度不低于 160℃, 提出合理的开采方案。“一采一

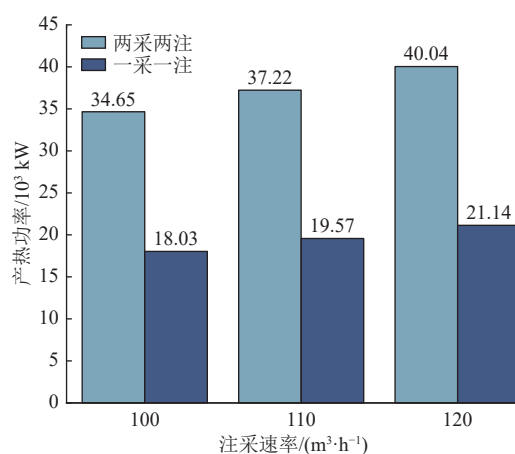


图 12 不同布井方式不同注采速率下的产热功率(井间距=400 m)

Fig.12 Heat production capacity under different well arrangement modes and different reinjection and production rates (well spacing: 400 m)

注”布井方式下, 选择井间距 350 m, 注采速率 120 m³/h, 获得开采井水平均温度为 173℃。如图 9 所示, 在开采年限达 50 a 时, 开采井水温度刚好下降至 160℃左右, 符合开采年限的同时井间距最小、开采量最大。通过计算, 该方案下渤海湾盆地 2 km×2 km 范围内, 干热岩年开采资源量为 5.87×10¹⁴ J, 相当于 2.01×10⁴ t 标准煤; 50 a 总开采资源量为 2.94×10¹⁶ J, 相当于 1.00×10⁶ t 标准煤。在“两采两注”布井方式下, 井间距选取 400 m, 注采速率 90 m³/h, 获得开采井水平均温度为 172℃。此方案下干热岩资源年开采量为 8.74×10¹⁴ J, 相当于 2.99×10⁴ t 标准煤; 50 a 总可采资源量为 4.37×10¹⁶ J, 相当于 1.49×10⁶ t 标准煤。结合上述优化开采方案, 渤海湾盆地面积约为 15×10⁴ km², 若全盆均建立 2 km×2 km 范围的 EGS, “两采两注”布井方式下, 全盆可采资源量为 3.28×10¹⁹ J/a, 50 a 总可采资源量为 1.64×10²⁰ J。

3 干热岩开发利用实例分析

针对华北地区能源消耗高、冬季雾霾严重等问题,

可利用上述优化方案下的可采干热岩资源量为华北地区提供城市供暖。以干热岩有利区内的河北任丘市为例,任丘地区居民供暖面积约 1 333 万 m^2 ,其中热负荷为 $100 \text{ W}/\text{m}^2$ 。根据《地热资源评价方法及估算规程》规定^[41],地热资源的经济价值采用与常规能源(燃料)类比的方法进行换算。因此,根据地热流体可采量所采出的热量计算地热田的产能:

$$W_t = 4.1868 Q_d (T_w - T_q) \quad (5)$$

根据上述研究,“两采两注”优化开采方案下的产能为 $3.38 \times 10^4 \text{ kW}$ 。

在此方案下,干热岩开采系统单位时间可满足的供热面积约为 $3.38 \times 10^5 \text{ m}^2$ (热负荷为 $100 \text{ W}/\text{m}^2$),若满足河北任丘市的供热需求,需建立面积约 157.75 km^2 的干热岩开采系统,小于任丘市干热岩资源分布范围,证明干热岩资源开采供暖方案的可行性。

前人对华北地区干热岩资源的估算广泛采用“热储体积法”,该方法无法确定实际开采条件下的开采率以及地热田内部能量的补充。按照体积法计算渤海湾盆地内埋深 5 km、储层厚度 300 m 的干热岩资源量为 $2.63 \times 10^{20} \text{ J}$,若按 40% 的可采资源量计算则为 $1.05 \times 10^{20} \text{ J}$ 。本文根据实际地热地质数据建立具体干热岩开采模型,进行时间尺度为 100 a 的计算,分析出干热岩开采系统必要参数的影响规律及优化开采方案,并计算得出 50 a 该热储层可采资源量约为 $1.64 \times 10^{20} \text{ J}$ 。此方法一定程度上弥补了热储体积法估算资源量的缺点,为研究区提供更为全面和准确的干热岩资源估算结果。

需要说明的是,本次研究中的地质开采模型属于极简化的概念模型,在设置初始条件时忽视了水头损失、注入流体与多孔介质之间的化学反应等因素。因此,该模型仅用于预测地热系统某一方面的响应以及为资源潜力的评估提供参考,在实际开发过程中需要对数值模型进行详细、复杂的细化工作。

4 结论

a. 基于渤海湾盆地地温场分布特征,圈定了埕宁隆起、冀中拗陷东南部、黄骅拗陷南部以及济阳拗陷西部为干热岩开采有利目标区。

b. 不同开采条件下干热岩地质模型的热储模拟结果表明:注采速率一定,开采井水温度下降速率与井间距成反比;井间距一定,开采井水温度下降速率与注采速率成正比;“两采两注”布井方式下干热岩开采效率更高。

c. 通过对影响规律分析,提出了研究区优化开采方案。此方案下,研究区 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 范围内年可采资源

量为 $8.74 \times 10^{14} \text{ J}$,折合标准煤 $2.99 \times 10^4 \text{ t}$,50 a 可采资源总量为 $4.37 \times 10^{16} \text{ J}$,折合标准煤 $1.49 \times 10^6 \text{ t}$ 。

d. 在优化开采方案下,河北任丘市干热岩储层范围提供的热量可覆盖市区居民所需供暖需求,证明了该地区利用干热岩资源实现可持续清洁能源供热的可行性。

符号注释:

A 为生热率, $\mu\text{W}/\text{m}^3$; C 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; C_{pf} 为恒压流体比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; C_w 为地下水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; $(\rho \cdot C)_{\text{eff}}$ 为有效比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; g 为重力加速度, m/s^2 ; k 为渗透率, m^2 ; M 为生产流量, kg/s ; p 为流体压力, Pa ; q 为大地热流, mW/m^2 ; Q_d 为地热流体可采量, L/s ; t 为时间, s ; T 为温度, $^\circ\text{C}$; T_0 为模型顶面温度, $^\circ\text{C}$; T_w 为地热流体温度, $^\circ\text{C}$; T_q 为当地年平均气温, $^\circ\text{C}$; T_p 为生产井提取水的温度, $^\circ\text{C}$; T_i 为注水温度, $^\circ\text{C}$; ∇T 为温度梯度, $^\circ\text{C}/\text{m}$; W_p 为产热功率, W ; W_t 为热功率, kW ; u 为达西速度矢量, m/s ; z 为地层深度, m ; μ 为流体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ρ 为密度, kg/m^3 ; ρ_f 为水的密度, kg/m^3 ; ρ_L 为液体密度, kg/m^3 ; λ_{eff} 为有效热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ∇ 为散度算子。

参考文献(References)

- [1] 蔺文静,王贵玲,邵景力,等.我国干热岩资源分布及勘探:进展与启示[J].地质学报,2021,95(5):1366–1381.
LIN Wenjing, WANG Guiling, SHAO Jingli, et al. Distribution and exploration of hot dry rock resources in China: Progress and inspiration[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(5): 1366–1381.
- [2] 汪集旸,胡圣标,庞忠和,等.中国大陆干热岩地热资源潜力评估[C]/中国科学院地质与地球物理研究所 2012 年度(第 12 届)学术论文汇编.北京:工程地质与水资源研究室,2013:536–542.
- [3] 王贵玲,蔺文静,刘峰,等.地热系统深部热能聚敛理论及勘查实践[J].地质学报,2023,97(3):639–660.
WANG Guiling, LIN Wenjing, LIU Feng, et al. Theory and survey practice of deep heat accumulation in geothermal system and exploration practice[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(3): 639–660.
- [4] 许传杰,张军,张玲,等.山东省干热岩地热资源潜力估算[J].山东国土资源,2021,37(10):44–50.
XU Chuanjie, ZHANG Jun, ZHANG Ling, et al. Estimation of geothermal resource potential of dry hot rock in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(10): 44–50.
- [5] 许天福,张炜.增强型地热工程国际发展和我国前景展望[J].石油科学通报,2016,1(1):38–44.
XU Tianfu, ZHANG Wei. Enhanced Geothermal Systems: International developments and China's prospects[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(1): 38–44.
- [6] 上官拴通.马头营区干热岩地热资源赋存分布特征及开发利用前景[J].能源与环保,2017,39(5):155–159.
SHANGGUAN Shuantong. Occurrence conditions of hot-dry-rock geothermal resources and development prospects in Matouy-

- ing area[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2017, 39(5): 155–159.
- [7] 汪集旸, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. *科技导报*, 2012, 30(32): 25–31.
WANG Jiyang, HU Shengbiao, PANG Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 25–31.
- [8] 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等. 济阳拗陷地温场分布特征[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(5): 652–658.
GONG Yuling, WANG Liangshu, LIU Shaowen, et al. Distribution characteristics of geotemperature field in Jiyang depression, Shandong, North China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(5): 652–658.
- [9] 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 等. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. *中国地质*, 2017, 44(6): 1074–1085.
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIN Wenjing, et al. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. *Geology in China*, 2017, 44(6): 1074–1085.
- [10] ALIYU M D, ARCHER R A. A thermo–hydro–mechanical model of a hot dry rock geothermal reservoir[J]. *Renewable Energy*, 2021, 176: 475–493.
- [11] WANG Zhuting, ZHANG Chao, JIANG Guangzheng, et al. Effect of different exploitation schemes on production performance from the carbonate reservoir: A case study in Xiong'an New Area[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 128050.
- [12] 刘汉青, 胡才博, 赵桂萍, 等. 利用热–孔隙流体耦合有限元数值模拟研究干热岩开发温度下降过程: 以青海共和盆地恰卜恰地区干热岩开发为例[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(7): 2887–2902.
LIU Hanqing, HU Caibo, ZHAO Guiping, et al. Thermal–hydraulic finite element simulation of temperature decrease process during hot dry rock exploitation: A case study in the Qiabuqia area, Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(7): 2887–2902.
- [13] 岳高凡, 邓晓飞, 邢林啸, 等. 共和盆地增强型地热系统开采过程数值模拟[J]. *科技导报*, 2015, 33(19): 62–67.
YUE Gaofan, DENG Xiaofei, XING Linxiao, et al. Numerical simulation of hot dry rock exploitation using enhanced geothermal systems in Gonghe Basin[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(19): 62–67.
- [14] 雷宏武, 金光荣, 李佳琦, 等. 松辽盆地增强型地热系统(EGS)地热能开发热–水动力耦合过程[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(5): 1633–1646.
LEI Hongwu, JIN Guangrong, LI Jiaqi, et al. Coupled thermal–hydrodynamic processes for geothermal energy exploitation in Enhanced Geothermal System at Songliao Basin, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(5): 1633–1646.
- [15] 周琦杰, 刘永江, 王德英, 等. 渤海湾中部中、新生代构造演化与潜山的形成[J]. *地质前缘*, 2022, 29(5): 147–160.
ZHOU Qijie, LIU Yongjiang, WANG Deying, et al. Mesozoic–Cenozoic tectonic evolution and buried hill formation in central Bohai Bay[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 147–160.
- [16] CUI Yue, ZHU Chuanqing, QIU Nansheng, et al. The heat source origin of geothermal resources in Xiong'an New Area, North China, in view of the influence of igneous rocks[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 818129.
- [17] 许威. 渤海湾盆地中–新生代热体制与岩石圈减薄研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
XU Wei. Meso–Cenozoic thermal regime and lithospheric thinning in the Bohai Bay Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [18] JIANG Guangzheng, WANG Yi, SHI Yizuo, et al. Estimate of hot dry rock geothermal resource in Daqing oilfield, northeast China[J]. *Energies*, 2016, 9(10): 731.
- [19] 张英, 冯建赟, 罗军, 等. 渤海湾盆地中南部干热岩选区方向[J]. *地质前缘*, 2020, 27(1): 35–47.
ZHANG Ying, FENG Jianyun, LUO Jun, et al. Screening of hot dry rock in the south–central part of the Bohai Bay Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(1): 35–47.
- [20] 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等. 中国东部渤海湾盆地热结构和热演化[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2011.
- [21] 阎敦实, 于英太. 京津冀油区地热资源评价与利用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000.
- [22] 董月霞, 黄红祥, 任路, 等. 渤海湾盆地北部新近系馆陶组地热田特征及开发实践: 以河北省唐山市曹妃甸地热供暖项目为例[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 666–676.
DONG Yuexia, HUANG Hongxiang, REN Lu, et al. Geology and development of geothermal field in Neogene Guantao Formation in northern Bohai Bay Basin: A case of the Caoheidian geothermal heating project in Tangshan, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 666–676.
- [23] 蒋林, 季建清, 徐芹芹. 渤海湾盆地应用增强型地热系统(EGS)的地质分析[J]. *地质与勘探*, 2013, 49(1): 167–178.
JIANG Lin, JI Jianqing, XU Qinqin. Geologic analysis on the prospects of the Enhanced Geothermal System (EGS) in the Bohai Bay Basin[J]. *Geology and Exploration*, 2013, 49(1): 167–178.
- [24] MUFFLER P, CATALDI R. Methods for regional assessment of geothermal resources[J]. *Geothermics*, 1978, 7(2/3/4): 53–89.
- [25] 樊冬艳, 孙海, 姚军, 等. 增强型地热系统不同注采井网参数分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(3): 797–806.
FAN Dongyan, SUN Hai, YAO Jun, et al. Parametric analysis of different injection and production well pattern in Enhanced Geothermal System[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(3): 797–806.
- [26] ZINSALO J M, LAMARCHE L, RAYMOND J. Sustainable electricity generation from an Enhanced Geothermal System considering reservoir heterogeneity and water losses with a discrete fractures model[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 192: 1–20.
- [27] ALIYU M D, CHEN Huapeng. Optimum control parameters and long–term productivity of geothermal reservoirs using coupled thermo–hydraulic process modelling[J]. *Renewable Energy*, 2017, 112(10): 151–165.
- [28] 何朋朋. 含水层水热运移试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
HE Pengpeng. Experimental study of groundwater flow and heat transfer in aquifers[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.

- [29] POLA M, CACACE M, FABBRI P, et al. Fault control on a thermal anomaly: Conceptual and numerical modeling of a low-temperature geothermal system in the southern Alps Foreland Basin (NE Italy)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(5): e2019JB017394.
- [30] SHAIK A R, RAHMAN S S, TRAN N H, et al. Numerical simulation of fluid-rock coupling heat transfer in naturally fractured geothermal system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(10): 1600–1606.
- [31] 董晓飞, 胡成, 曹孟雄, 等. 裂隙介质渗透性的升尺度转换研究[J]. *地质科技通报*, 2023, 42(4): 259–267.
DONG Xiaofei, HU Cheng, CAO Mengxiong, et al. Study on the upscaling transformation of hydraulic conductivity in fractured media[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(4): 259–267.
- [32] 杨吉龙, 胡克. 干热岩(HDR)资源研究与开发技术综述[J]. *世界地质*, 2001, 20(1): 43–51.
YANG Jilong, HU Ke. A review of hot dry rock (HDR) research and development in the world[J]. *World Geology*, 2001, 20(1): 43–51.
- [33] ZHU Chuanqing, CHEN Chi, JIANG Xiaoxue. Numerical simulation of internal factors that influence the thermal conductivity of rock[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2022, 44(2): 24.
- [34] 尚宏波, 赵春虎, 靳德武, 等. 中深层地热单井换热数值计算[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(6): 159–166.
SHANG Hongbo, ZHAO Chunhu, JIN Dewu, et al. Numerical calculation of heat transfer in single medium-deep geothermal well[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(6): 159–166.
- [35] 丁蕊, 朱传庆, 曹倩, 等. 河间潜山地热资源开发方案数值模拟[J]. *地球学报*, 2023, 44(1): 248–256.
DING Rui, ZHU Chuanqing, CAO Qian, et al. Numerical simulation of buried hill geothermal resources exploitation in Hejian area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2023, 44(1): 248–256.
- [36] 龚育龄. 中国东部渤海湾盆地地热结构和热演化[D]. 南京: 南京大学, 2003.
GONG Yuling. Geothermal structure and thermal evolution in Bohai Bay Basin, eastern China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2003.
- [37] 邵保平, 赵阳升. 600℃ 内高温状态花岗岩遇水冷却后力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(5): 892–898.
XI Baoping, ZHAO Yangsheng. Experimental research on mechanical properties of water-cooled granite under high temperatures within 600℃[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(5): 892–898.
- [38] 陈炫沂, 姜振蛟, 徐含英, 等. 共和盆地干热岩体人工裂隙带结构的控热机理与产能优化[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 191–199.
CHEN Xuanyi, JIANG Zhenjiao, XU Hanying, et al. Heat control mechanism and productivity optimization of artificial fracture zone structure of dry hot rock in Gonghe Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 191–199.
- [39] ASAI P, PANJA P, MCLENNAN J, et al. Effect of different flow schemes on heat recovery from Enhanced Geothermal Systems (EGS)[J]. *Energy*, 2019, 175: 667–676.
- [40] KADYLAK D, CAVE P, MERIDA W. Effectiveness correlations for heat and mass transfer in membrane humidifiers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(5/6): 1504–1509.
- [41] 中华人民共和国自然资源部. 地热资源评价方法及估算规程: DZ/T 0331—2020[S]. 北京: 地质出版社, 2020.

(责任编辑 周建军)

《煤田地质与勘探》征稿简则

《煤田地质与勘探》于1973年创刊，月刊（2022年1月起变更），中煤科工西安研究院（集团）有限公司主办，是煤炭地质行业学术与实用技术并重的综合性期刊。主要刊载煤炭地质，矿井地质，煤系气，煤伴生矿产，水文地质，工程地质，环境地质，煤田物探，矿井物探，钻掘工程等方面，具有较高学术、技术水平和实用价值的基础理论、先进技术与方法、先进经验等科研或工程实践成果。本刊发表的文章在国内外具有较广泛的影响，欢迎煤炭地质及相关领域的广大科技工作者踊跃投稿。

来稿要求

1. 来稿力求主题突出、论点明确、数据可靠、简明扼要、图表清晰、行文通顺、体例规范。文稿应包含题名（限20字以内）、作者姓名、作者单位及单位所在省、城市名和邮编、中文摘要（500~800字为宜）、英文摘要、3~8个关键词、第一作者简介（姓名、出生年、性别、籍贯、学位、职称和所从事的研究方向），并注明作者的详细通信地址、E-mail地址以及联系电话。论文若为基金、项目等资助，须注明属何种基金、项目资助及其编号。

2. 论文的中、英文摘要应简明、确切地记述文章的主要内容，应写出论文的背景意义、目的、方法、结果和结论几个要素（写作规范请参阅GB 6447—86《文摘编写规则》）。

3. 图表随文出现，图以8幅为宜。图幅尺寸为：分栏图宽度不超过8.0 cm，通栏图12~15 cm；图面字号为7.5，汉字为宋体，数字和字符均为Times New Roman体；图中粗线条为0.75磅，细线条为0.5磅；插图使用AutoCAD、Coreldraw、Origin、Photoshop、Excel等常用软件制图，提供可编辑矢量图；其他软件图件导出为AI、EMF、EPS或PDF（非转曲）等格式。表格一律使用三线表。图和表的题名中、英文要齐全。

4. 文稿使用Word排版，页面为A4幅面，分2栏排版（大图可通栏排）。正文（含图表）中量和单位的名称、符号及书写规则严格执行国家标准（GB 3100~3102—93《量和单位》），不可使用非法定计量单位。外文字母、单位、符号的大小写、正斜体、上下角标书写应清楚。

5. 参考文献要引用已公开发表的文献，著录真实，引用合理（不少于20篇）。正文中采用顺序编码制标注参考文献，文献著录格式参阅GB/T 7714—2015《信息与文献参考文献著录规则》。文后参考文献中，期刊[J]类和学位论文[D]类，著录须中英文对照。

热点专题方向

1. 数智化云平台在不同能源领域应用
2. 深部煤系气资源开发技术进展
3. 煤矿区“地热能+”及开发技术
4. 智能物探
5. 智能钻探
6. 碳中和技术路径与示范工程

投稿须知

1. 本刊投稿采用网上投稿方式，网址为<http://www.mtdzykt.com>。

2. 投稿时，全体作者需与本刊签订《论文版权授权书》，作者顺序不能再做变更。合著的论文，署名须征得合著者的同意，保证该论文的署名权无争议，若发生署名权争议问题，一切责任由作者承担。当来稿论文退稿时，《论文版权授权书》即刻失效。

3. 编辑部自收稿之日起2个月内，通过作者投稿系统通知作者论文处理结果。来稿一经录用，作者需按要求修改论文，作者收到修改通知1个月内返回修改稿，逾期的编辑部按退稿处理。

4. 编辑部对刊用的稿件有权作文字修改、删节，对内容的修改需征得作者的同意。



煤田地质与勘探



传媒



报刊“一键订阅”

美国《工程索引》(Ei Compendex) 收录期刊
荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus) 收录期刊
日本科学技术振兴机构数据库 (2022)
美国化学文摘 (2023)
EBSCO 学术数据库收录期刊 (2023)
中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊
中文核心期刊 中国科技核心期刊
RCCSE中国核心学术期刊
中国精品科技期刊
陕西省科技期刊十佳精品期刊
全国煤炭优秀科技期刊
“西牛计划”之精品中文科技期刊
煤炭/地球科学领域高质量科技期刊分级目录T1级期刊

煤田地质与勘探

MEITIAN DIZHI YU KANTAN

月刊 (1973年创刊)

第 52 卷 第 1 期 (总第 313 期) 2024 年 1 月

COAL GEOLOGY & EXPLORATION

Monthly (Started in 1973)

Vol.52 No.1 (Series No.313) January 2024

主 管 中国煤炭科工集团有限公司
主 办 中煤科工西安研究院 (集团) 有限公司
编辑出版 《煤田地质与勘探》编辑部
地 址 陕西省西安市高新区锦业一路82号
邮 编 710077
主 编 董书宁
副 主 编 王 皓 秦 勇 James W. LaMoreaux
执行主编 晋香兰
编辑部主任 范章群
责任编辑 范章群 聂爱兰 周建军 郭东琼
数字编辑 金 茂
出 版 科学出版社
(北京东黄城根北街16号 邮编: 100717)
印 刷 陕西盛世大宇印务有限公司
国内发行 中国邮政集团有限公司陕西省报刊发行局
邮发代号 52-14
国外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(北京 399 信箱 邮编: 100048)
国外代号 5963
订 阅 全国各地邮局 (所)
广告发布登记号 6100004000148

Competent Authorities China Coal Technology and Engineering Group Corp.
Sponsored by CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd.
Edited by Editorial Department of Coal Geology & Exploration
Add No.82 Jinyeyilu, Xi'an 710077, China
Editor in Chief DONG Shuning
Associate Chief Editor WANG Hao QIN Yong
James W. LaMoreaux(USA)
Executive Chief Editor JIN Xianglan
Editorial Director FAN Zhangqun
Responsible Editor FAN Zhangqun NIE Ailan ZHOU Jianjun
GUO Dongqiong
Digital Editor JIN Mao
Distributed by Shaanxi Press Issue Bureau of China Post Group
Distributed Abroad by China International Book Trading Corporation
Add P.O.Box 399, Beijing 100048, China

中国标准连续出版物号: ISSN 1001-1986
CN 61-1155 / P

国内定价: 40 元 CODEN: MDYKE3

电 话: 029-81778075 81778078
电子邮箱: ccrimtdzykt@vip.163.com
投稿网址: <http://www.mtdzykt.com>

渤海湾盆地干热岩开发利用前景评估基于开采优化数值模拟的认识

江晓雪 朱传庆 丁蕊 谢芳 邱楠生

引用本文:

江晓雪, 朱传庆, 丁蕊, 等. 渤海湾盆地干热岩开发利用前景评估基于开采优化数值模拟的认识[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(1): 93–103.

JIANG Xiaoxue, ZHU Chuanqing, DING Rui, et al. Evaluating the exploitation and utilization prospects of hot dry rock in Bohai Bay Basin: Understanding based on numerical simulations for exploitation optimization[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(1): 93–103.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.07.0435>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深层地热能开发及其对地热水流场的影响

Development of deep geothermal energy and its influence on geothermal water flow field: Taking the development of deep geothermal energy in Lankao County for an example

煤田地质与勘探. 2021, 49(2): 184–193 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.023>

陆表海背景下障壁海岸体系沉积层序及聚煤模式——以渤海湾地区晚古生代太原组为例

Sequence stratigraphy and coal accumulation of barrier coastal system under epicontinental–sea environment: A case study of the Late Paleozoic Taiyuan Formation in Bohai Bay Area

煤田地质与勘探. 2021, 49(4): 123–133 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.04.015>

煤层气藏数值模拟垂向网格优化

Vertical grid optimization of numerical simulation of coalbed methane reservoir

煤田地质与勘探. 2018, 46(5): 117–122 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.05.018>

瓦斯抽采钻孔间距优化三维数值模拟量化研究

Quantitative study of 3D numerical simulation on optimizing borehole layout spacing of gas drainage

煤田地质与勘探. 2021, 49(3): 78–84, 94 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.03.010>

水力裂缝在煤岩界面处穿层扩展规律的数值模拟

Numerical simulation of layer-crossing propagation behavior of hydraulic fractures at coal–rock interface

煤田地质与勘探. 2020, 48(2): 106–113 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.02.017>

煤岩体孔隙结构应力特征的数值模拟研究

Numerical simulation of pore structure stress characteristics of coal and rock mass

煤田地质与勘探. 2021, 49(1): 57–64, 80 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.006>