

doi: 10.12029/gc20210505

岳高凡, 王贵玲, 马峰, 朱喜, 张汉雄. 2021. 地热规模化开发断层滑动概率评估——以雄安新区深部岩溶热储为例[J]. 中国地质, 48(5): 1382–1391.

Yue Gaofan, Wang Guiling, Ma Feng, Zhu Xi, Zhang Hanxiong. 2021. Evaluation of fault slip probability of geothermal large-scale development: A case study of deep karst geothermal reservoir in Xiong'an New Area [J]. Geology in China, 48(5): 1382–1391 (in Chinese with English abstract).

地热规模化开发断层滑动概率评估——以雄安新区 深部岩溶热储为例

岳高凡^{1,2,3}, 王贵玲^{1,2}, 马峰^{1,2}, 朱喜^{1,2}, 张汉雄^{1,2}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 河北 石家庄 050061; 3. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要: 雄安新区地热资源丰富, 具有广阔的规模化开发利用前景, 对于实现“绿色雄安”具有重要意义。许多学者的研究集中在地质结构探测、地热资源量评价、地壳稳定性等方面, 关于深部岩溶热储规模化开发可能引起的断层滑动研究薄弱。本文在地热地质综合调查的基础上, 基于地质力学理论, 采用蒙特卡罗随机模拟方法, 评价雄安新区主要断层特征(走向、倾角、滑动摩擦系数等)、地应力分布(孔隙压力、最大/最小/垂直主应力大小及方向等), 量化雄安新区天然断层在规模化开发利用情况下的激活可能性, 结果显示已探明断层在天然、规模化回灌和水力压裂条件下的最大滑动趋势分别为 0.26、0.27 和 0.40, 地热开发不会引起断层激活。本研究树立了地热规模化开发的信心, 可为雄安新区地热资源安全利用提供支撑。

关键词: 地热; 规模化开发利用; 断层滑动趋势; 蒙特卡罗模拟; 地质调查工程; 雄安新区
中图分类号: P314.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–3657(2021)05–1382–10

Evaluation of fault slip probability of geothermal large-scale development: A case study of deep karst geothermal reservoir in Xiong'an New Area

YUE Gaofan^{1,2,3}, WANG Guiling^{1,2}, MA Feng^{1,2}, ZHU Xi^{1,2}, ZHANG Hanxiong^{1,2}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, 050061, Hebei, China; 2. Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 3. China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, Hubei China)

Abstract: Xiongan New Area is rich in geothermal resources and has broad prospects for large-scale development and utilization, which is of great significance to the realization of "green Xiongan". Many scholars have focused their research on geological

收稿日期: 2021–04–06; 改回日期: 2021–07–20

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“冀中坳陷深部碳酸盐岩热储调查评价”(DD20190555)及国家自然科学基金项目(41807208)联合资助。

作者简介: 岳高凡, 男, 1989 年生, 硕士, 助理研究员, 主要从事地热地质、反应溶质运移研究工作; E-mail: gaofan3904@163.com。

通讯作者: 王贵玲, 男, 1964 年生, 研究员, 主要从事地热地质研究工作; E-mail: guilingw@163.com。

structure exploration, resource evaluation, crustal stability, etc. However, the study on the possible fault sliding caused by the large-scale development of deep karst thermal storage is weak. On the basis of geomechanical theory and geothermal geological survey, Monte Carlo stochastic simulation method was used to evaluate the characteristics of main faults (strike, dip, slip friction coefficient, etc.) and geostress distribution (pore pressure, maximum/minimum/vertical principal stress magnitude and direction, etc.) in Xiongan New area for quantifying the activation possibility of natural faults under large-scale development and utilization. The results show that the maximum slip trends of proven faults under natural, large-scale recharge and hydraulic fracturing conditions are 0.26, 0.27 and 0.40, respectively. Geothermal development will not cause fault activation. The study establishes confidence in geothermal development and provides support for safe geothermal use in Xiongan New Area.

Key words: geothermal; large-scale development; probability of fault slip; Monte Carlo simulation; geological survey engineering, Xiongan New Area

About the first author: YUE Gaofan, male, born in 1989, postgraduate, assistant researcher, engaged in the research of geothermal geology; E-mail: gaofan3904@163.com。

About the corresponding author: WANG Guiling, male, born in 1964, researcher, engaged in the research of geothermal geology; E-mail: guilingw@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190555), China National Natural Science Foundation Project (No.41807208).

1 引言

雄安新区位于河北平原中部,作为一座承载着“千年大计、国家大事”的社会主义现代化新城,坚持生态优先、绿色发展。地热,作为深部可再生能源,规模化科学开发利用能够极大推进雄安新区绿色建设。近年来,自然资源部中国地质调查局完成了雄安新区水文地质、工程地质、土地质量和地热调查(吴爱民等, 2018; 马震等, 2019; 王贵玲, 2020a)。其中由中国地质科学院水文地质环境地质研究所牵头实施的“京津冀地热调查科技攻坚”在雄安新区开展了大量地热资源调查、物探勘查、深部地热勘探孔、储层改造增产试验、资源评价等工作,并取得了一系列重要成果(张薇等, 2019; 王贵玲等, 2020b; 马峰等, 2020)。作为中国中东部地区地热资源开发利用条件最好的地区,雄安新区水热型地热资源丰富(陈墨香, 1988; Pang et al., 2018; 胡秋韵等, 2020; 赵佳怡, 2020),包括容城地热田、牛驼镇地热田大部分以及高阳地热田北部,规模化科学开发利用前景可期。

在现有经济和技术条件下,水热型“采灌组合”是热效率最高、技术最为成熟的直接利用方式,经过多年的探索,已经形成可推广的著名“雄县模式”。回灌是维持热储压力,同时避免地热废水直接排放引起污染的主要方式。但同时,回灌也是引

起相关地质环境问题(如地震)的主要因素之一。在美国和欧洲地区已经明确了地震活动和废水注入的相关性(Mcgarr et al., 2018)。特别是当注入流体激活天然断层,引起断层滑动,进而会引起更大的地震。这是因为回灌(特别是规模化集中回灌)会增加地层孔隙压力,导致断层上有效应力降低,进而增加断层滑动风险(Zoback et al., 1997)。例如,在美国俄克拉何马州中北部,自2009年开始,地震活动频率显著增加,空间跨度约200 km,最大震级5.8级,就是由大量的咸水回注引起的(Walsh et al., 2015)。韩国浦项2018年的5.5级地震是由于地热开发过程中的回灌引起了天然断层滑动(Walsh et al., 2015)。因此,在地热规模化利用区进行断层滑动趋势分析,是保证经济社会和工程安全的重要工作之一。Walsh et al.(2016)利用莫尔-库仑滑动准则,考虑了俄克拉何马州注入引起的孔隙压力增加,量化已知断层的滑动概率,评价结果与地震监测结果具有高度的一致性。Seithel et al.(2019)针对德国Bavarian Molasse盆地,通过断层滑动趋势分析,将地震活动与断层构造联系起来,结果表明,处于临界应力状态的断层,很小的孔隙压力变化便可引起断层滑动趋势急剧增加。

总之,规模化地热采灌很可能引起天然断层失稳滑动并诱发地震,目前雄安新区主要的研究集中在地质结构探测(何登发等, 2018; 马震等, 2019)、资

源量评价(胡秋韵等, 2020; 马峰等, 2020; 王贵玲等, 2020)、地壳稳定性(丰成君等, 2019; 范玉璐等, 2020)等方面, 鲜有涉及规模化采灌引起的断层滑动。本文通过分析雄安新区地质条件、地应力场特征、储层水动力条件等因素, 采用地质力学理论和相关参数蒙特卡罗模拟方法(Walsh et al., 2016), 量化雄安新区天然断层在规模化开发利用情况下的激活可能性(断层滑动趋势), 获得水力压裂和回灌作业的压力阈值, 为新区地热资源安全利用提供支撑。

2 地质背景

雄安新区处于华北地台的冀中凹陷中部, 为廊固凹陷、牛驼镇凸起和保定凹陷、高阳低凸起等Ⅳ级构造单元交汇处(图1), 总体受华北地区构造格局控制, 呈现北东—北北东向隆起和断陷相间发

育、多凸多凹的构造特点(陈墨香等, 1988; 吴爱民等, 2018)。研究区发育地层有新生界(第四系、新近系)、古生界(寒武系、奥陶系)、中元古界(青白口系、蓟县系、长城系)和太古宇(深变质岩)。中元古界蓟县系在区内均有分布, 是区内主要的深部热储层, 顶板埋深800~3600 m, 岩性主要为含燧石条带白云岩、巨厚叠层石白云岩、沥青质白云岩和粉砂泥状白云岩夹薄层棕红、灰绿色泥岩(朱喜等, 2020)。

2.1 断裂特征

区内及周边发育的断裂主要有保定—石家庄断裂、徐水断裂、容城断裂、牛南断裂、牛东断裂、高阳断裂和任西断裂(陈墨香, 1988), 这些断裂控制区域构造格局, 对雄安新区深部地热系统的形成具有十分重要意义(朱喜等, 2020)。



图1 雄安新区地理位置和断层分布图

Fig.1 Geographic location and distribution of faults in Xiongan New Area

保定—石家庄断裂位于研究区西侧边界,走向NE,倾向SE,倾角50~65°,断裂形成于晚侏罗世—早白垩世,第四纪以来没有明显活动迹象(徐杰等, 2000)。容城断裂,为牛驼镇凸起和容城凸起的边界,走向NNE,倾向SE,倾角50~60°。徐水断裂和牛南断裂走向NNW,倾向SSW,倾角45~70°(商世杰等, 2019),是容城凸起、牛驼镇凸起和高阳低凸起的分界,断开了结晶基底,为长期活动深大断裂(王贵玲等, 2020;胡秋韵等, 2020)。牛东断裂穿过雄安新区东侧,走向NE40°,倾向SE,倾角约70°(张艺等, 2014;范玉璐等, 2020)。高阳断裂走向NE,倾向NW,倾角约50°,断距由浅部向深部逐渐加大(王贵玲等, 2020)。任西断裂位于研究区西南边界处,走向NE40°,倾向SE,倾角55~70°。据物探解译,研究区内还分布有大量的次一级断裂,这些断裂往往是以上断裂的分支断裂,其倾角与主断层相似。

2.2 地应力场分布

雄安新区最大水平主应力方向NW2°~NW45°,平均方向NW20°(范玉璐等, 2020),与世界地应力分布的研究结果吻合(Heidbach et al., 2016)。黄祿渊等(2013)得出华北地区0~4000 m深度域内水平主应力及侧压系数随深度变化的回归关系式、华北地区垂向应力和水平应力作用的转换深度:

$$\begin{aligned} S_{Hmax} &= 0.0233H + 4.665 \text{ MPa} \\ S_{Hmin} &= 0.0162H + 2.100 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{15}{H} + 0.42 \leq \frac{S_{Hmax} + S_{Hmin}}{2S_v} = \frac{225}{H} + 0.61 \leq \frac{1030}{H} + 0.76$$

公式(1)中, H 代表埋深(m)。以此计算雄安新区内4000 m深度的地应力场大小为: $S_{Hmax}=97.865$ MPa, $S_{Hmin}=66.900$ MPa, $S_v=123$ MPa, $S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$ 为正断层型地应力状态。

2.3 水动力条件

为了获得深部热储水动力条件,评估现今孔隙压力分布和回灌引起的孔隙压力扰动,对研究区内的水位进行了系统的监测,并对典型地热井开展了降压抽水试验。D35抽水试验获得渗透系数 $K=3.281$ m/d,影响半径 $R=693.79$ m;D12水位降深171.7 m时,涌水量为47.33 m³/h;D18的三个落程抽水试验表明热储富水性好,外推最大出水量可达200 m³/h。

总之雄安新区地热井集中区地下水水位相对

较低,埋深在120 m以下,凸起地区地下水水位埋深普遍在100~110 m,相对较浅(马峰等, 2020)。热储天然裂隙发育,水动力条件很好,渗透系数普遍大于3.0 m/d,按照单井100 m³/h的开发规模,稳定水位降深不超过12 m(吴爱民等, 2018;王贵玲等, 2020;马震等, 2021)。即使部分地区天然裂缝连通性欠佳,也可通过热储增产改造达到开发利用要求(樊腊生等, 2020)。

以120 m埋深作为计算研究区内天然孔隙压力的基准值,采用静水压力平衡求得4000 m深度对应的热储天然孔隙压力 $P_f=37.24$ MPa。

3 研究方法

3.1 滑动趋势分析

断层滑动趋势(T_s)是断层表面上的剪应力与法向应力之比(Morris et al., 1996),其计算公式为:

$$T_s = \frac{\tau}{\sigma_{n,eff}} \geq \mu_s \quad (2)$$

式中, τ 为断层面上的剪应力, $\sigma_{n,eff}$ 为断层面有效法向应力(法向应力, σ_n ,减去孔隙压力, P_f), μ_s 为断层滑动摩擦系数(Byerlee, 1978)。如果剪应力(沿滑动方向) τ 等于或超过摩擦滑动阻力 μ_s ,则断层可能发生滑动。

给定断层面上的剪切应力和有效正应力取决于它在应力场中的方位,这个应力场由主有效应力定义(Jaeger et al., 2007):

$$\sigma_{1,eff} = (\sigma_1 - P_f) > \sigma_{2,eff} = (\sigma_2 - P_f) > \sigma_{3,eff} = (\sigma_3 - P_f) \quad (3)$$

$$\sigma_{n,eff} = \sigma_{1,eff} \times l^2 + \sigma_{2,eff} \times m^2 + \sigma_{3,eff} \times n^2 \quad (4)$$

$$\tau = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)l^2m^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)m^2n^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)l^2n^2} \quad (5)$$

式中 l, m, n 分别是给定断层平面法线相对于主应力轴 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 的方向余弦。公式(4)和(5)定义了正断层应力状态下的有效正应力和剪应力,对于逆断层和走滑断层应力机制可以通过改变方向余弦的顺序求得。通过对三维空间的断层面求解方程式(4)、(5),带入公式(2)即可求得断层滑动趋势。这种滑动趋势分析可以快速、方便直观的评估应力状态和潜在的断层活动(Moeck et al., 2009)。

3.2 蒙特卡洛随机模拟

在库仑断层理论背景下,断层滑动趋势取决于地应力场的大小和方向、断层特征(走向、倾角)、孔

隙压力和摩擦系数等参数。由于这些参数中的每一个都存在不确定性,采用蒙特卡洛随机模拟方法评估断层因孔隙压力增加而发生滑动的可能性是非常必要的。定量风险评价(QRA),一种蒙特卡罗方法,用于评估包含输入参数不确定性的不确定结果的概率。该方法已被用于评价井壁稳定性和断层稳定性,证实了该方法的可信度(Walsh et al., 2015; Schoenball et al., 2018)。

定量风险评价方法突出了地质力学参数的不确定性,因此评价结果只适用于特定的参数。图2显示了本次评价使用的参数分布,主要包括断层走向和倾角、断层滑动摩擦系数、主应力(S_{Hmax} 、 S_{hmin} 、 S_v)大小及方向、孔隙压力 P_f 。表1给出了每个参数不确定度的建立过程。为了定量评价雄安新区4000 m深度的断层稳定性,将区内断层离散成360条断层段,断层段走向由坐标计算得

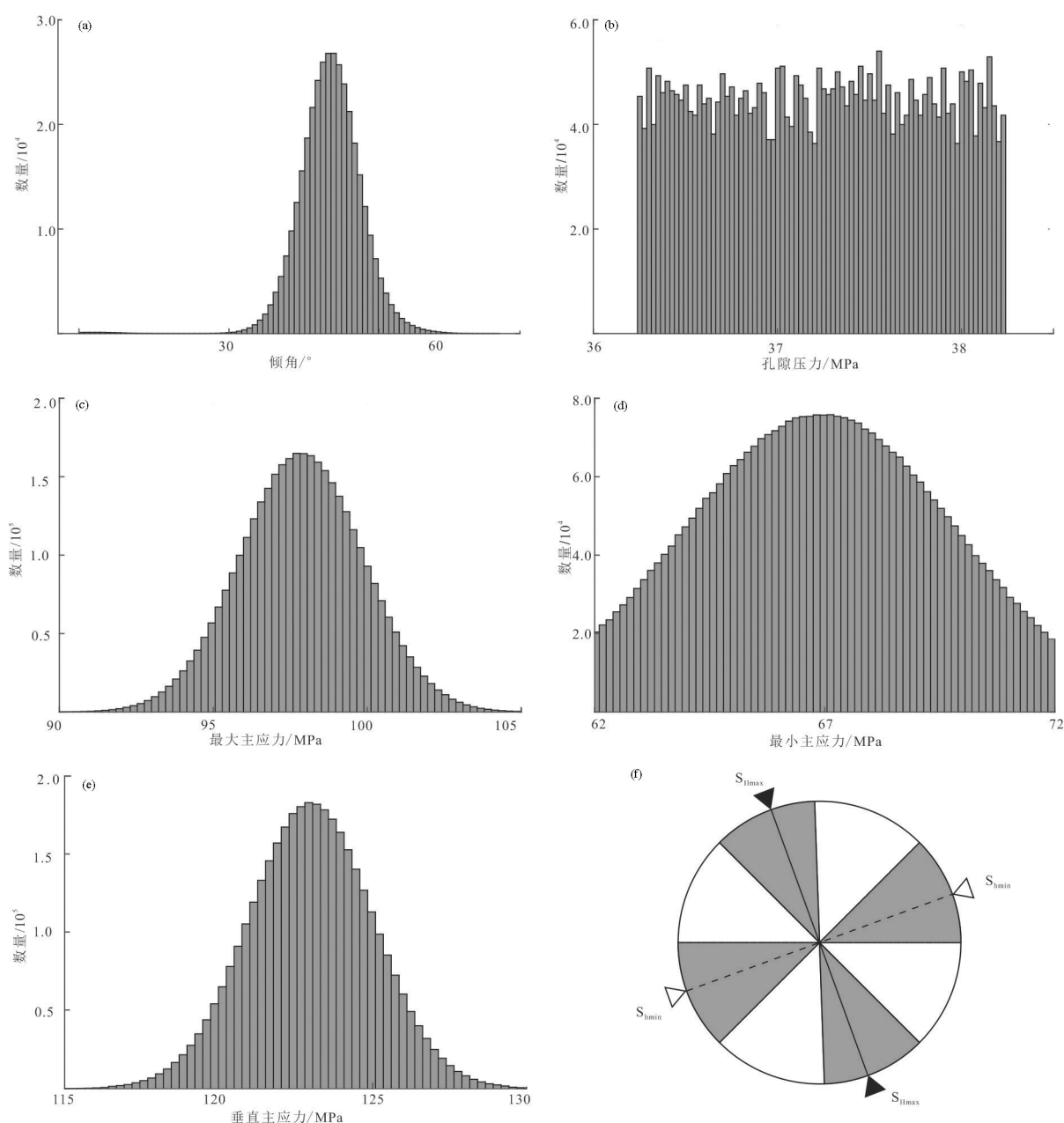


图2 蒙特卡洛模拟参数分布图

Fig.2 Monte Carlo simulation parameter distribution

表1 断层滑动趋势分析参数分布
Table 1 Fault slip trend analysis parameter distribution

参数	分布	均值	标准差	取值界限	数据来源
断层倾角	截断高斯分布	50°	5°	0°~90°	实际断层倾角
断层走向		据图1	2°	± 5°	实际断层走向
断层滑动摩擦系数	截断高斯分布	0.71	0.1	0.62~0.82	Blanpied et al., 1995
孔隙压力	均匀分布	37.24 MPa		36.2~38.2 MPa	全区水位监测
最小主应力	截断高斯分布	66.9 MPa	3.18 MPa	62~72 MPa	黄禄渊等, 2013;
垂直主应力	截断高斯分布	123 MPa	2.78 MPa	115~130 MPa	牛琳琳等, 2018
最大主应力	截断高斯分布	97.8 MPa	2.76 MPa	90~110 MPa	
最大主应力方向	截断高斯分布	NW20°	2°	NW2°~NW45°	范玉璐等, 2020

出,并增加标准差为2°(5°截断)的高斯噪声。断层倾角符合截断高斯分布,前人的研究及钻探、物探揭示的倾角均值为50°,标准差5°(图2a)。断层滑动摩擦系数难以确定,它的分布范围通常是0.62~0.82,符合截断高斯分布(Byerlee, 1978; Blanpied et al., 1995)。地应力场大小和方向(图2c~f)来自于黄禄渊等(2013)及范玉璐等(2020)。据Nelson et al. (2015)的研究,孔隙压力 P_f 在天然储层中符合均匀分布,据笔者的压力监测数据,4000 m处的孔隙压力在37.24 MPa左右(图2b)。

本文建立了以上参数的10000次蒙特卡洛模拟模型,对于每次模拟,均使用3.1所示的方法计算每个断层段的稳定性,统计每个断层在不同地质参数下的最大滑动趋势,并计算滑动趋势的经验累积分布函数(CDF),量化其在特定孔隙压力下的滑动概率。

4 结果与讨论

4.1 天然状态下的断层滑动趋势

断层的滑动摩擦系数介于0.62~0.82(Blanpied et al., 1995),本次研究选取0.6作为断层达到临界条件的判据,这种保守性的方法可以使评价结果更具指导意义。并且选取平均值0.3作为低滑动风险和较低滑动风险的分界点。统计10000次蒙特卡洛模拟得到的每个断层段的滑动概率最大值,按照其风险等级投影至雄安新区断层分布图上(图3)。计算结果显示,雄安新区所有断层在天然状态下均处于较低风险($T_s < 0.6$)和低风险($T_s < 0.3$),天然状态下不会发生断层滑动。其中,容城断裂、徐水断裂、牛东断裂滑动趋势相对较高,保定—石家庄断裂、高阳断裂、任西断裂滑动趋势较低(丰成君等, 2019),更加稳定。这是因为容城断裂的倾角介于50~60°,相对于

最大主应力是最易激活的状态,但其滑动趋势仍旧远低于0.6。同样计算了断层滑动趋势的经验累积分布函数(CDF),它代表了小于等于某个滑动趋势出现的概率之和,能够更加明确地表示天然断层的滑动趋势(图4)。大部分断层的滑动趋势均低于0.3,这与图3所显示的结果一致。在90%的置信度下,断层的滑动趋势在0.18~0.26,为低风险断层。图4未能体现较低风险断层(黄色断层)的存在,这是因为图3的结果是根据每条断层段的最大滑动趋势绘制,CDF函数几乎不会捕捉到这种极值。

除了地应力场之外,断层走向和倾角同样影响滑动趋势,而且目前的断层刻画工作是基于前人的研究和有限的物探、钻探工作,势必会遗漏某些小规模断层。为了较为全面地评估研究区内断层的滑动趋势,以统计参数的均值计算了空间所有可能的断层面滑动趋势,绘制滑动趋势极坐标统计图(Moeck et al., 2009),如图5所示。所有的断层面滑动趋势均在0.6以下,双峰值出现在与主应力方向一致,倾角约60°的断层面上。说明NW10°~NW30° $\angle$ 60°及其相似的断层具有较高的滑动趋势,可能更加接近临界滑动状态,在今后的开发过程中,需要重点监测。

4.2 回灌扰动状态下的断层滑动趋势

考虑到热储良好的水动力条件,假设抽水试验获得的水动力参数同样适用于回灌条件,即回灌速率与抽水速率相同时,回灌引起的水位增加与抽水时的稳定降深相同。那么回灌能够引起的水位扰动低于12 m,即 $\Delta P_f \leq 0.12$ MPa,其对孔隙压力的改变微乎其微。但是规模化回灌对水位的影响肯定不止于此,但考虑到雄安新区内现有回灌井的状况,均为无压回灌,并未发现回灌堵塞问题,因此较为合理的取值为 $\Delta P_f = 2$ MPa (Nelson et al., 2015)。



图3 天然断层滑动趋势分布图
Fig.3 Natural fault slip trend distribution

以此压力扰动再次计算了滑动趋势CDF,结果如图6。由于雄安新区天然断层十分稳定,即使2 MPa的孔隙压力扰动也不会引起滑动趋势的大幅增加。在90%的置信度下,断层的滑动趋势在0.19~0.27,仅上升了0.01,为低风险断层。对此类断层而言,引起滑动所需的孔隙压力往往高达几十兆帕(Norbeck et al., 2018),普通的回灌工程不会引起滑动,不存在诱发地震风险。

4.3 水力压裂条件下的断层滑动趋势

研究区内蓟县系热储具有强烈的非均质性,抽水试验显示其渗透系数介于0.2~3.7 m/d(王贵玲等, 2020; 樊腊生等, 2020),水力压裂是进行热储改造增产、满足规模化开发利用的主要手段,上述方法同样可用于评估水力压裂过程中断层滑动的可能性(Friberg et al., 2014)。在水力压裂作业过程中,孔隙

压力扰动会比前文考虑的回灌引起的孔隙压力变化(2 MPa)更大。为了考虑水力压裂引发断层滑动的可能性,图7展示出0~50 MPa孔隙压力扰动时(可能高达最小主应力)断层滑动可能性。41 MPa的孔隙压力扰动才会使个别断层的滑动趋势达到0.6,大部分断层则需要达到45 MPa。雄安新区4000 m深最小水平主应力约为66.7 MPa,天然孔隙压力为37.24 MPa,约为30 MPa的孔隙压力扰动即可实现改造,此时断层滑动趋势低于0.4。而且,水力压裂与规模化回灌不同,水力压裂作业只会在短时间内影响很小体积的岩石。因此,水力压裂引起断层滑动的可能性很低,不会诱发较大的地震。

5 结 论

本文通过分析雄安新区断层展布与结构、地应

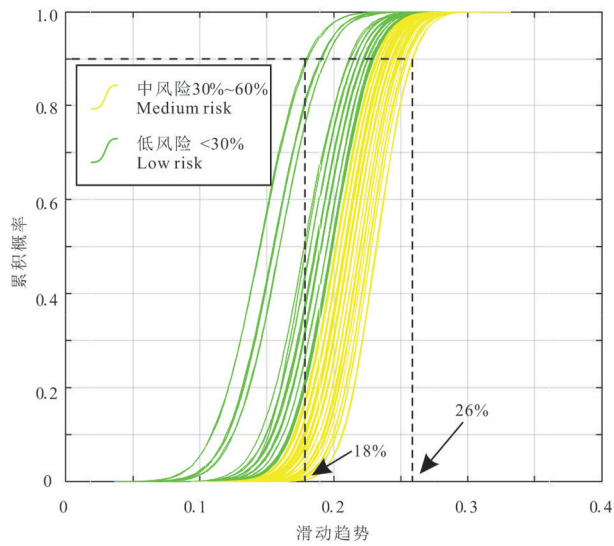


图4 天然断层滑动趋势累积分布图

Fig.4 Cumulative distribution map of natural fault sliding trend

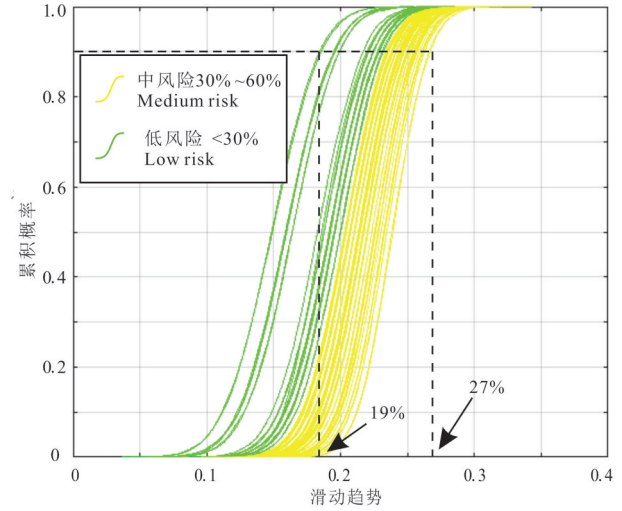


图6 孔隙压力扰动(2 MPa)下的滑动趋势累积分布图

Fig.6 Cumulative distribution plot of sliding trend under pore pressure disturbance (2 MPa)

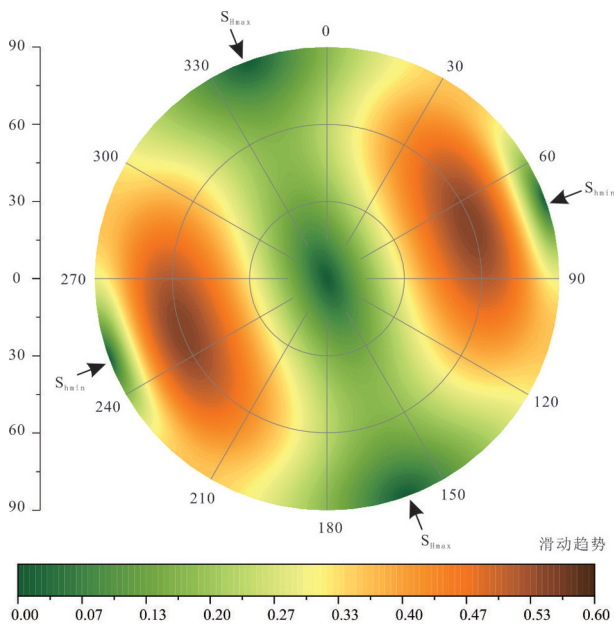


图5 滑动趋势极坐标统计图

Fig.5 Polar plot of natural fault sliding trend

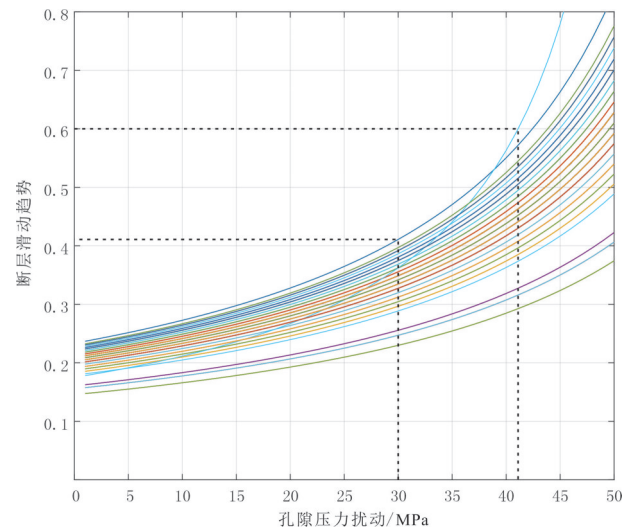


图7 孔隙压力变化对断层稳定性影响(每条曲线代表一条断层)

Fig.7 Effect of pore pressure variations on fault stability (every curve representing a fault)

力场特征、储层水动力条件等因素,采用地质力学理论和蒙特卡罗模拟方法,量化雄安新区天然断层在规模化开发利用情况下的激活可能性(断层滑动趋势),获得如下结论:

(1) 雄安新区已探明断层天然状态下滑动趋势在0.18~0.26,十分稳定。

(2) 普通的回灌工程的孔隙压力扰动(2 MPa)

不会引起断层滑动,不存在诱发地震风险。

(3) 某些特定断层面(走向NWW、倾角60°以及相似特征断层)具有较高的滑动趋势,需要更为精细的勘探和长期监测工作。

(4) 水力压裂引起断层滑动的可能性较低,不会诱发较大的地震。

需要注意的是,地应力条件、断层特征对评估结果有重要影响,研究区构造条件复杂,今后的工

作需要进一步明确地质力学参数。此外,断层滑动包含很多其他重要的物理过程,如孔弹性、热应力、蠕变等,断层也可能具有一定的内聚力,本文没有完全考虑以上因素。本文研究了主要地质参数的不确定性,量化了雄安新区地热开发条件下的断层稳定性,树立了地热规模化开发的信心。

References

- Blanpied M L, Lockner D A, Byerlee J D. 1995. Frictional slip of granite at hydrothermal conditions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B7): 13045–13064.
- Byerlee J. 1978. Friction of Rocks[M]. Byerlee J D, Wyss M. Basel: Birkhäuser Basel.
- Fan Larsheng, Jia Xiaofeng, Wang Guiling, Zhang Tunde, Zhang Ping, Lv Can, Li Junping. 2020. Drilling practice of D03 geothermal exploration well in Xiongan New Area [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling And Tunneling)*, 47(10): 13–22. (in Chinese with English abstract)
- Fan Yulu, Tan Chengxuan, Zhang Peng, Sun Mingqian, Qi Bangshen, Feng Chengjun, Meng Jing, Wang Huiqing. 2020. A Study of current in-situ stress state and its influence on tectonic stability in the Xiongan New Area[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(4): 481–491 (in Chinese with English abstract).
- Feng Chengjun, Qi Bangshen, Wang Xiaoshan, Zhang Peng, Sun Mingqian, Meng Jing, Tan Chengxuan, Chen Qunze. 2019. Study of fault activity risk in typical strong seismic regions in northern China by in-situ stress measurements and the influence on the Xiong'an New Area [J]. *Earth Science Frontiers*, 26(4): 170–190 (in Chinese with English abstract).
- Friberg P, Besana-Ostman G, Dricker I. 2014. Characterization of an earthquake sequence triggered by hydraulic fracturing in Harrison County, Ohio[J]. *Seismological Research Letters*, 85: 1295–1307.
- He Dengfa, Shan Shuaiqiang, Zhang Yuying, Lu Renqi, Zhang Ruifeng, Cui Yongqian. 2018. 3-D geologic architecture of Xiong'an New Area: Constraints from seismic reflection data[J]. *Science China: Earth Sciences*, 48(9): 1207–1222 (in Chinese with English abstract).
- Heidbach O, Rajabi M, Reiter K. 2016. World Stress Map Database Release 2016. V. 1.1 [OL]. GFZ Data Services.
- Huang Luyuan, Yang Shuxin, Cui Xiaofeng, Chen Qunze, Yao Rui. 2013. Analysis of characteristics of measured stress and stability of faults in North China [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 34(S1): 204–213 (in Chinese with English abstract).
- Jaeger J C, Cook N G W, Zimmerman R. 2007. Fundamentals of Rock Mechanics, 4th Edition [M]. US: Wiley-Blackwell.
- Ma Zhen, Xia YuBo, Wang Xiaodan, Han Bo, Gao Yihang. 2019. Integration of engineering geological investigation data and construction of a 3D geological structure model in the Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*, 46(S2): 123–129(in Chinese with English abstract).
- Ma Zhen, Xia Yubo, Li Haitao, Han Bo, Yu Xuezhong, Zhou Yalong, Wang Yushan, Guo Xu, Li Hong, Pei Yandong. 2021. Analysis of natural resources and environment eco-geological conditions in the Xiong'an New Area [J]. *Geology in China*, 48(3): 677–696(in Chinese with English abstract).
- Mcgarr A, Barbour A. 2018. Injection-induced moment release can also be aseismic[J]. *Geophysical Research Letters*, 45 (11): 5344.
- Moek I, Kwiatek G, Zimmerman Gu. 2009. Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir[J]. *Journal of Structural Geology*, 31(10): 1174–1182.
- Morris A, Ferrill D, Henderson D. 1996. Slip-tendency analysis and fault reactivation[J]. *Geology*, 24.
- Nelson P, Gianoutsos N, Drake II R. 2015. Underpressure in Mesozoic and Paleozoic rock units in the Midcontinent of the United States[J]. *AAPG Bulletin*, 99: 1861–1892.
- Niu Linlin. 2018. Study on the Tectonic Stress Field and Seismogenic Environment in Beijing Tianjin Hebei Region[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Norbeck J H, Horne R N. 2018. Maximum magnitude of injection-induced earthquakes: A criterion to assess the influence of pressure migration along faults[J]. *Tectonophysics*, 733: 108–118.
- Pang Jumei, Pang Zhonghe, Lü Min, Tian Jiao. 2018. Geochemical and isotopic characteristics of fluids in the Niutuozen geothermal field, North China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 77(1): 12.
- Seithel R, Gaucher E, Mueller B, Steiner U, Kohl T. 2019. Probability of fault reactivation in the Bavarian Molasse Basin[J]. *Geothermics*, 82: 81–90.
- Schoenball M, Walsh F R, Weingarten M. 2018. How faults wake up: The Guthrie–Langston, Oklahoma earthquakes [J]. *The Leading Edge*, 37(2): 100–106.
- Shang Shijie, Feng Chengjun, Tan Chengxuan, Qi Bangshen, Zhang Peng, Meng Jing, Wang Miaomiao, Sun Mingqian, Wan Jiawei, Wang Huiqing, Xiang Xinxuan. 2019. Quaternary activity study of major buried faults near Xiongan New Area [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 40(6): 836–846 (in Chinese with English abstract).
- Walsh F R, Zoback M D. 2015. Oklahoma's recent earthquakes and saltwater disposal[J]. *Science Advances*, 1(5): 1–9.
- Walsh F R, Zoback M D. 2016. Probabilistic assessment of potential fault slip related to injection-induced earthquakes: Application to north-central Oklahoma, USA[J]. *Geology*, 44(12): 991–994.
- Xu Jie, Gao Zhanwu, Song Changqing, Sun Jiangbao. 2000. Tectonic features of the Taihang Mountains pre-mountain rift zone [J]. *Seismology and Geology*, (2): 111–122(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yi, Dai Junsheng, Wang Ke, Zou Juan, Zhang Dandan. 2014.

- Characteristics of Paleoproterozoic fracture activity in the Baxian Depression of the Jizhong Depression [J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science), 29(1): 27–33, 5(in Chinese with English abstract).
- Zhu Xi, Wang Guiling, Ma Feng, Zhang Wei, Zhang Qinglian, Zhang Hanxiong. 2020. Hydrogeochemistry of geothermal waters from Taihang Mountain – Xiong'an New Area and its indicating significance[J]. Earth Science, 46(7):15(in Chinese with English abstract).
- Zoback M D, Harbes H P. 1997. Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102 (B8): 18477–18491(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈墨香. 1988. 华北地热[M]. 北京:科学出版社.
- 樊腊生, 贾小丰, 王贵玲, 张统得, 张平, 吕灿, 李俊萍. 2020. 雄安新区D03地热勘探井钻探施工实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(10): 13–22.
- 范玉璐, 谭成轩, 张鹏, 孙明乾, 戚帮申, 丰成君, 孟静, 王惠卿. 2020. 雄安新区现今地应力环境及其对构造稳定性影响研究[J]. 地球学报, 41(4): 481–491.
- 丰成君, 戚帮申, 王晓山, 张鹏, 孙明乾, 孟静, 谭成轩, 陈群策. 2019. 基于原地应力实测数据探讨华北典型强震区断裂活动危险性及其对雄安新区的影响[J]. 地学前缘, 26(4): 170–190.
- 何登发, 单帅强, 张煜颖, 鲁人齐, 张锐锋, 崔永谦. 2018. 雄安新区的三维地质结构:来自反射地震资料的约束[J]. 中国科学:地球科学, 48(9): 1207–1222.
- 胡秋韵, 高俊, 马峰, 赵志宏, 刘桂宏, 王贵玲, 张薇, 朱喜, 张保建, 邢一飞. 2020. 雄安新区容城凸起区地热可采资源量动态预测[J]. 地质学报, 94(7): 2013–2025.
- 黄禄渊, 杨树新, 崔效锋, 陈群策, 姚瑞. 2013. 华北地区实测应力特征与断层稳定性分析[J]. 岩土力学, 34(S1): 204–213.
- 马峰, 王贵玲, 张薇, 朱喜, 张汉雄, 岳高凡. 2020. 雄安新区容城地热田热储空间结构及资源潜力 [J]. 地质学报, 94(7): 1981–1990.
- 马震, 夏雨波, 王小丹, 韩博, 高伊航. 2019. 雄安新区工程地质勘查数据集成与三维地质结构模型构建 [J]. 中国地质, 46(S2): 123–129.
- 马震, 夏雨波, 李海涛, 韩博, 余学中, 周亚龙, 王雨山, 郭旭, 李洪, 裴艳东. 2021. 雄安新区自然资源与环境-生态地质条件分析[J]. 中国地质, 48(3): 677–696.
- 牛琳琳. 2018. 京津冀地区现代构造应力场与孕震环境研究[D]. 北京:中国地质科学院.
- 商世杰, 丰成君, 谭成轩, 戚帮申, 张鹏, 孟静, 王苗苗, 孙明乾, 万佳威, 王惠卿, 项歆璇. 2019. 雄安新区附近主要隐伏断裂第四纪活动性研究[J]. 地球学报, 40(6): 836–846.
- 王贵玲, 高俊, 张保建, 邢一飞, 张薇, 马峰. 2020. 雄安新区高阳低凸起区雾迷山组热储特征与高产能地热井参数研究 [J]. 地质学报, 94(7): 1970–1980.
- 王贵玲, 蒯文静. 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式 [J]. 地质学报, 94(7): 1923–1937.
- 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 刘金侠, 胡秋韵, 苗青壮. 2018. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J]. 地球学报, 39(5): 523–532.
- 徐杰, 高战武, 宋长青, 孙建宝. 2000. 太行山山前断裂带的构造特征[J]. 地震地质, (2): 111–122.
- 张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 46(2): 255–268.
- 张艺, 戴俊生, 王珂, 邹娟, 张丹丹. 2014. 冀中坳陷霸县凹陷古近纪断裂活动特征[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 29(1): 27–33, 5.
- 赵佳怡. 2020. 雄安新区深部热储空间结构与水热分异过程研究[D]. 北京:中国地质科学院.
- 朱喜, 王贵玲, 马峰, 张薇, 张庆莲, 张汉雄. 2020. 太行山—雄安新区蓟县系含水层水文地球化学特征及意义[J]. 地球科学, 46(7): 15.