

引用格式：朱思雨，曹佳文，丰成君，等，2023. 河北高阳深部热储层回灌注水诱发断层失稳危险性探讨 [J]. 地质力学学报，29（2）：220–235. DOI: 10. 12090/j. issn. 1006–6616. 2022093

Citation: ZHU S Y, CAO J W, FENG C J, et al. , 2023. Study on fault-slip potential induced by water injection in the deep thermal reservoir of the Gaoyang low uplift, Hebei province [J]. Journal of Geomechanics, 29（2）：220–235. DOI: 10. 12090/j. issn. 1006–6616. 2022093

河北高阳低凸起深部热储层回灌注水诱发断层失稳危险性探讨

朱思雨^{1,2,3}，曹佳文⁴，丰成君^{1,2,3}，王继明⁵，孟 静^{1,2,3}，戚帮申^{1,2,3}，张 鹏^{1,2,3}
ZHU Siyu^{1,2,3}，CAO Jiawen⁴，FENG Chengjun^{1,2,3}，WANG Jiming⁵，MENG Jing^{1,2,3}，QI Bangshen^{1,2,3}，ZHANG Peng^{1,2,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；

2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室，北京 100081；

3. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心，北京 100083；

4. 中国地质调查局，北京 100037；

5. 中国联合工程有限公司，浙江 杭州 310051
1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*

3. *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100083, China;*

4. *China Geological Survey, Beijing 100037, China;*

5. *China United Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310051, Zhejiang, China*

Study on fault-slip potential induced by water injection in the deep thermal reservoir of the Gaoyang low uplift, Hebei Province

Abstract: Recently, water injection-induced earthquakes caused by faulting instability have become a prominent geological safety issue for safely exploiting deep geothermal resources. This study investigates whether the future large-scale development of deep geothermal resources in the Gaoyang uplift will destabilize buried faults. There has a great amount of karst thermal reservoir in the Gaoyang low uplift, Hebei province. To find out whether the large-scale deep geothermal exploitation in the future will induce faults distributed in and around Gaoyang geothermal reservoir to become unstable, firstly, we calculate the initial stable state of the main buried faults based on Mohr-Coulomb criteria using the comprehensive in-situ stress field of North China; then, under Hsieh and Bredehoeft hydrological model, we calculate the possible excess pore pressure caused by water injection for 10~40 years at representative geothermal wells; subsequently, combing this perturbation with the initial stable state, we obtain the fault slip potential of the main buried faults from 2022 to 2062 based on a probabilistic approach; ultimately, we discuss the impact on the changes of fault slip potential due to varying angles between the maximum horizontal principal stress and the fault orientation. The main conclusions of this work can be drawn as follows. With the injection rate of 170 m³/h, the maximum excess pore pressure caused by a single geothermal well does not surpass

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD20230540）
This research is financially supported by the Investigation and Assessment of Geosafety Risks in Megacities and Urban Agglomerations, China（Grant DD20230540）.

第一作者：朱思雨（1998—），女，在读硕士，主要从事地应力、断层活动危险性、活动构造带灾害效应等方面研究。
E-mail: Esther9802@163.com

通讯作者：曹佳文（1979—），男，博士，主要从事地质灾害、城市地质及重大工程地质安全风险等管理工作。
E-mail: cjiawen@mail.cgs.gov.cn

收稿日期：2022-07-25；修回日期：2023-03-20；责任编辑：王婧

11 MPa, and it obeys a power decrease distribution with increasing distance from the center of the injection well; its influence scope is no more than 8 km. Continuous water injection strongly changes the stability of those buried faults distributed 2 km within the geothermal wells, and fault-slip potentials of some segmental faults even exceed 85%, corresponding to high unstable risk. Under 50 years of water injection at an injection well, the fault-slip potential of faults with different strikes within 2 km from the injection well increases rapidly with the declining angle among its orientation and the regional maximum horizontal principal stress. This paper's study methodology and associated findings can offer geoscientific justification for the safe exploration and exploitation of deep geothermal resources domestically and internationally. This study can provide a method reference for the location of injection wells and the selection of faults in different orientations in geothermal fields at home and abroad, thus promoting the safe and efficient development and utilization of geothermal resources.

Keywords: Gaoyang low uplift; geothermal; water injection; fault-slip potential

摘 要: 近年来, 注水诱发断层活化引发地震已成为深部地热资源安全开采面临的突出地质安全问题。河北高阳低凸起深部岩溶热储丰富, 区内分布多条隐伏断层, 研究旨在探明未来大规模开发高阳低凸起深部地热资源是否会诱发区内隐伏断层失稳破坏。研究基于华北地区综合地应力场, 利用莫尔-库伦准则计算热储区及邻区主要隐伏断层的初始稳定状态; 选用 Hsieh and Bredehoeft 水文模型计算代表性地热井回灌注水 10~40 年产生的超孔隙水压力值; 在初始稳定状态的基础上叠加该孔隙水压扰动, 采用断层滑动失稳概率评价方法, 分析长期回灌注水对断层稳定性的影响; 讨论断层走向与最大水平主应力夹角变化对断层滑动失稳风险的作用规律。结果表明: 高阳低凸起及邻区代表性地热井在 170 m³/h 注水速率条件下, 持续注水 40 年产生的超孔隙水压力值最大不超过 11 MPa, 该扰动以注水井为中心向四周呈幂函数规律递减, 其影响范围不超过 8 km; 持续回灌注水对高阳低凸起代表性地热井附近 2 km 范围内隐伏断层的稳定性影响显著, 部分断层滑动失稳概率超过 85%, 具有极高的活化风险; 距离注水井 2 km 范围内不同走向的断层, 在单井回灌注水 50 年的作用下, 滑动失稳概率随断层走向与最大水平主应力夹角的减小而迅速增加。文章研究方法及相关成果可为国内外深部地热资源安全开发利用提供地质科学支撑。

关键词: 高阳低凸起; 地热; 回灌注水; 断层滑动失稳概率

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 02-0220-16

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022093

0 引言

近年来, 非常规油气资源开发、CO₂ 地质封存、核废料处置以及储气库建设等人类工业活动发展迅猛, 极大地改善了能源短缺问题。但是, 随着深地工程的快速发展, 全球诱发地震事件逐年增加 (Giardini, 2009; Zoback and Gorelick, 2012; Lei et al., 2017)。位于美国中南部的俄克拉荷马州由于大规模的页岩气开采和废水回注诱发储层及其邻区断层活化, 发生一系列中强地震, 最大震级可达 M 5.8, 不仅造成了严重的经济损失, 还威胁到居民人身和财产安全 (Ellsworth, 2013; Yeck et al., 2016, 2017; 甘浩男等, 2020)。地震发生率的增加和多次破坏性地震的发生吸引了众多学者的关注, 深入研究其致灾机理对注水诱发断层失稳的预测和防治具有重要指导意义。

Healy et al. (1968) 首次提出结合有效应力原理和莫尔-库伦准则解释美国科罗拉多州丹佛地区 1962—1967 年期间废水处理与诱发微—中强地震之间的关系。Rutqvist and Oldenburg (2008) 使用固-液-热耦合模型分析加利福尼亚间歇泉地热田注水诱发微震事件的成因机制。Shapiro and Dinske (2009) 模拟了回灌注水后储层内流体-岩石相互作用与诱发地震活动的关系。Yoon et al. (2013) 开发了一种流固耦合模型用来模拟水力压裂和诱发地震相关过程。Zang et al. (2013) 基于该模型提出循环水力压裂法, 通过循环加、减注水压力控制裂缝边缘应力, 将可能发生的大震级事件转化为微震事件, 以较少的诱发地震活动来激发更高的渗透率。Weingarten et al. (2015) 基于美国 187570 口废水注入井数据探讨了地热开采过程中可能促进诱发地震事件发生的影响因素。Chen et al. (2017) 计算了俄克拉荷马州 Pawnee 地区 2016

年 $M 3.0$ 级以上地震产生的库伦应力, 结果显示这部分应力变化引起主断层正库伦应力变化, 最终诱发 $M 5.8$ 级 Pawnee 地震。注入流体冷却岩石并增加热储层孔隙水压力, 引起局部热弹性和孔隙弹性应力变化并诱发地震活动 (Yu et al., 2018)。现阶段, 深地探测技术的局限性使得获取目标储层构造环境、原位地应力条件仍存在困难, 增加了研判断层初始稳定状态的难度。在探索注水诱发断层活化的成因机制方面, 国内外研究学者相继提出了 4 种可能的机理, 包括孔隙水压扩散理论 (Healy et al., 1968; Raleigh et al., 1976; 雷兴林等, 2014; 丰成君等, 2022)、孔隙弹性应力 (Wang and Kümpel, 2003; Segall and Lu, 2015)、库伦应力 (Chen et al., 2017; Yeo et al., 2020) 和无震滑移 (Lohman and McGuire, 2007; Guglielmi et al., 2015), 并开发多种计算模型模拟流体注入后储层应力环境的变化规律, 旨在还原断层滑动前后真实的物理过程。

河北高阳低凸起在构造上处于冀中坳陷中部, 地热资源赋存条件优越 (王贵玲等, 2018)。对河北地区包括雄安新区范围内的地热资源潜力调查始于 20 世纪 80 年代 (陈墨香等, 1982; 庞忠和等, 2017; 王贵玲等, 2018), 目前的研究深度主要集中于 500~800 m 之间的新近系砂岩热储层和 1500~1800 m 以浅的蓟县系岩溶热储层, 为支撑新区规划建设的迫切需要, 未来势必会提高深部 (>2000 m) 岩溶热储探测速度以寻找更高品质地热资源 (吴爱民等, 2018)。

鉴于国外已经发生过深地下回灌注水诱发地震事件, 而高阳低凸起及其邻区内分布多条第四纪隐伏断层, 未来大规模开采深部热储资源时, 回灌注水是否会诱发区内先存断裂活化进而发生地震值得研究。为助力国内地热能发展, 作者团队于 2021 年围绕雄安新区容城热储区开展一系列调查评估工作, 初步得到关于该地区未来深地热开发可能诱发的断层滑动失稳风险的认识 (Zhu et al., 2022; 朱思雨等, 2022)。但是, 团队目前尚未开展关于河北高阳低凸起回灌注水的断层滑动失稳风险预测, 且国内外暂无该地区相关研究成果的公开发表。为完善河北地区地热开采回灌注水诱发断层失稳危险性研究, 文章以高阳低凸起为研究对象, 采用莫尔-库伦准则系统评价在初始地应力背景下研究区内的主要断裂应力积累水

平和稳定性; 选择 Hsieh and Bredehoeft 水文模型计算深部地热开采回灌注水产生的孔隙水压扰动; 叠加该孔隙水压扰动, 运用断层滑动失稳概率评价方法分析不同注水时段诱发近场断层活化的风险; 讨论了断层走向及回灌效率对注水井附近主要活动断层滑动失稳概率的影响。研究成果可为国内其他深部碳酸盐地热资源开发的地热井选址等开采方案的确定提供科学参考。

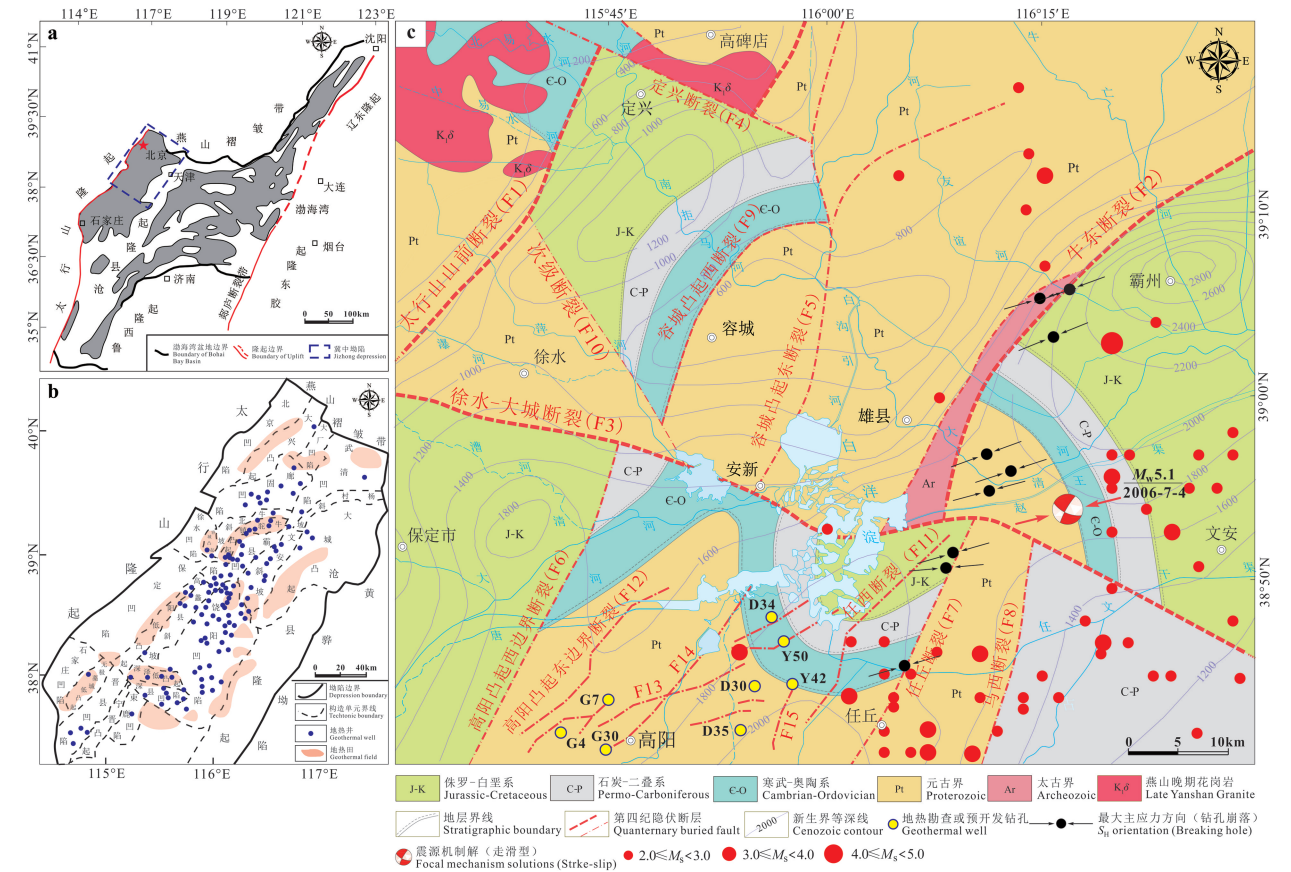
1 高阳低凸起主要断裂分布特征

1.1 第四纪活动性

河北高阳低凸起在大地构造上处于华北板块 (I 级) 渤海湾盆地 (II 级) 冀中坳陷 (III 级) 中央凸起带 (图 1a、1b), 区域地质构造较为复杂 (Yang and Xu, 2004; 王贵玲等, 2020)。晚中生代, 受古太平洋板块俯冲作用以及蒙古-鄂霍茨克海闭合的影响, 华北克拉通的动力学机制由早中生代的南北向收缩或挤压转变为近东西向的板内变形与伸展, 由此导致华北克拉通破坏 (180~155 Ma), 并在早白垩世 (~125 Ma) 达到峰期, 出现大量伸展构造 (朱日祥等, 2011); 古新世—始新世中期, 太行山山前 (F_1)、牛东 (F_2)、徐水-大城 (F_3) 等断裂发生大规模正断层活动, 同时高阳低凸起西翼发生旋转 (即 F_6 , 高阳-博野断裂), 随后, 马西断裂 (F_8) 活动强烈, 高阳低凸起东翼开始旋转 (即 F_{12} , 高阳凸起东边界断裂; 毛翔等, 2021); 始新世晚期—渐新世晚期, 廊固凹陷、霸县西部、饶阳东部凹陷带等活动强烈, 石家庄、保定凹陷断陷减弱; 新近纪以来, 冀中坳陷断裂活动性整体较弱, 徐水-大城 (F_3)、容城 (F_9)、高阳-博野 (F_6) 等边界断裂均已停止活动, 研究区地质构造相对稳定 (何登发等, 2017, 2018; 王思琪等, 2021)。

1.2 高阳低凸起及邻区主要隐伏断层几何特征

为便于后续计算分析各断层的稳定状态, 将高阳低凸起及其邻区主要隐伏断层按照走向的不同简化分段, 简化后共得到 9 条隐伏断层, 包括 33 条分段断层, 各分段断层在研究区内的展布特征如图 2 所示, 断层走向、倾角及长度详见表 1 (何登发等, 2018; 商世杰等, 2019; 隋少强等, 2020; 谭成轩等, 2020; 王贵玲等, 2020)。断层倾角的确定方面, 根据研究区内已有钻探、物探



a—冀中坳陷及邻区主要构造单元 (何登发等, 2018); b—冀中坳陷地热田分布图 (常健等, 2016); c—高阳低凸起及邻区主要隐伏断层及地热勘察孔分布图 (商世杰等, 2019; 隋少强等, 2020)

图1 高阳低凸起及邻区构造背景和主要隐伏断层分布图

Fig.1 Geological structures and the main buried faults distributed in and around the Gaoyang low uplift
(a) Main tectonic units in and around the Jizhong depression (modified from He et al. , 2018) ; (b) Geothermal fields distributed in the Jizhong depression (modified from Chang et al. , 2016) ; (c) Map of the main buried faults and existing geothermal exploitation boreholes distributed in and around the Gaoyang geothermal reservoir (modified from Shang et al. , 2019; Sui et al. , 2020)

等成果剖面,选取高阳低凸起岩溶热储埋藏深度范围内(3000~4000 m)断层倾角的平均值。此外,考虑到不同参考资料中对于断层走向和倾角的认识略有不同,同一深度范围内断层的倾角也有变化,综合所参考资料中关于断层走向、倾角的描述,对各分段断层的走向、倾角各赋予 $\pm 5^\circ$ 和 $\pm 10^\circ$ 的误差值。

2 回灌注水诱发断层失稳的可能机理

目前,对回灌注水诱发断层失稳可能机制的普遍观点认为:当流体注入储层,随之向邻区扩散,导致断层区内孔隙水压力增加,断层面有效正应力减小,进而降低断层本身的抗滑阻力,当断层面剪应力大于其抗滑阻力时,断层滑动失稳进

而诱发地震(Zoback and Gorelick, 2012; Ellsworth, 2013; 赵昱超等, 2022; 朱思雨等, 2022),该物理过程可用莫尔-库仑破裂准则进行定量描述(Rubey and Hubbert, 1959):

$$\begin{aligned} \tau_s &\geq \mu(\sigma_n - P_f) \\ P_f &= P_0 + \Delta P \end{aligned} \tag{1}$$

式中 τ_s 为断层面剪应力; μ 为断层面静摩擦系数; σ_n 为断层面正应力; P_f 为孔隙水压力; P_0 为初始孔隙水压力或静水压力; ΔP 为注水引起的超孔隙水压力; $\mu(\sigma_n - P_f)$ 为断层本身的抗滑阻力。

流体注入储层引起的孔隙水压增量(或超孔隙水压力)随压力水头增加而增大,且压力水头增量、超孔隙水压力和注水参数之间的相互关系可由公式(2)进行表达(Hsieh and Bredehoeft,

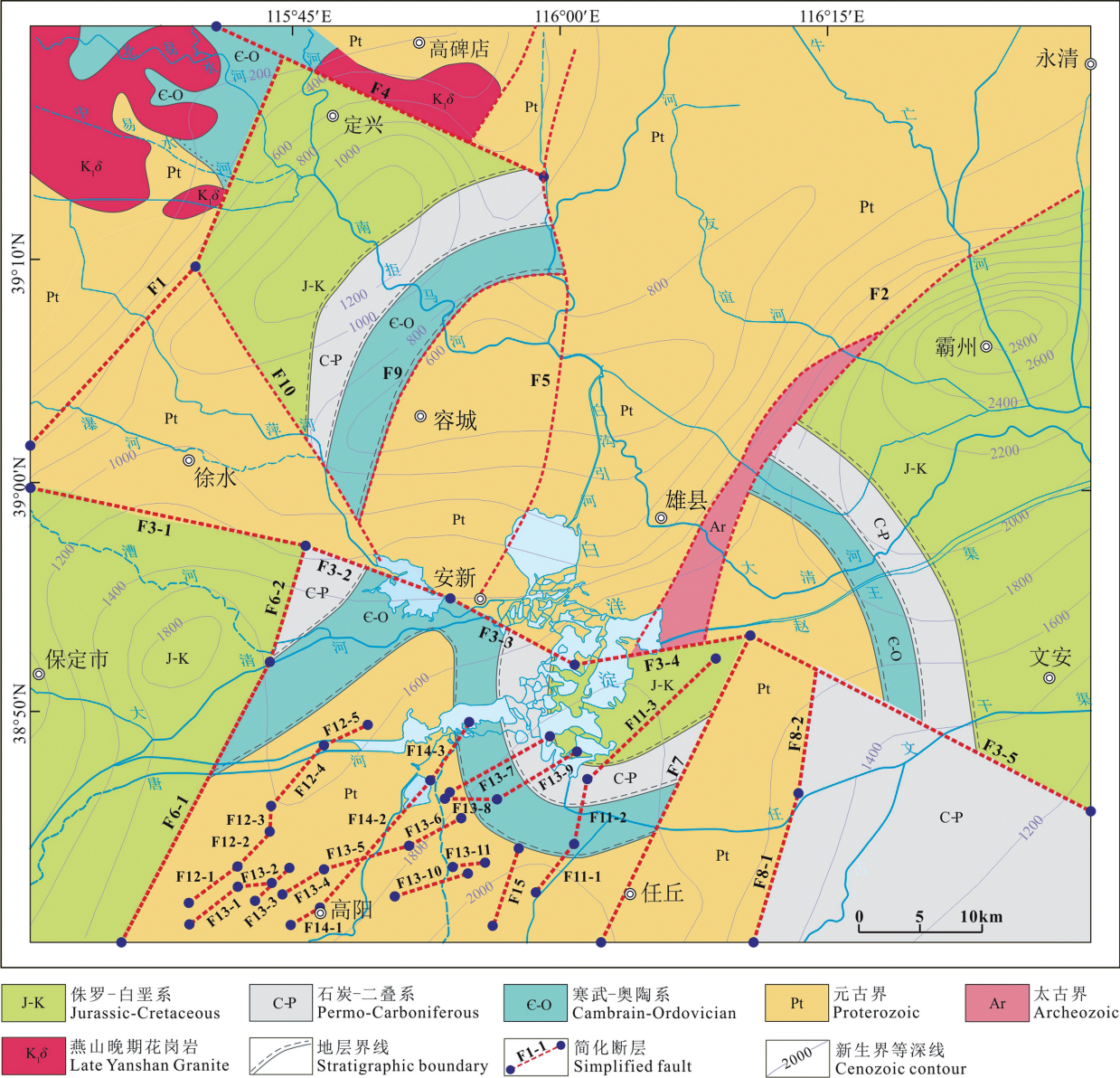


图2 高阳低凸起及邻区主要隐伏断层分段图
Fig. 2 Segmental faults in and around the Gaoyang low uplift

1981), 文后分析中简称为 Hsieh and Bredehoeft 水文模型:

$$T\left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta h}{\partial y^2}\right) = S \frac{\partial \Delta h}{\partial t} - Q(t) \delta(x) \delta(y)$$
$$\Delta P = \gamma \Delta h$$

(2)

式中 Δh 为注水引起的压力水头增量; ΔP 为超孔隙水压力; T 为储层导水系数; S 为储层储水系数; (x, y) 为注水井位置; $Q(t)$ 为注水速率; t 为注水时间; γ 为流体容重。

3 高阳低凸起主要隐伏断层初始稳定状态

3.1 计算参数选取

基于已公开发表的研究成果中对于华北地区现今应力场的详细分析 (黄禄渊等, 2013; 范玉璐等, 2020), 研究团队选取华北地区地壳浅层综合应力水平作为高阳低凸起的初始地应力场, 区域地壳浅层最大、最小水平主应力 (S_H 和 S_h) 随深度线性增加梯度分别为 0.0233 MPa/m 和 0.0162 MPa/m (朱思雨等, 2022), 其中 S_H 方向为 $N77^\circ E \pm 9^\circ$ (俞言祥和许忠淮, 1994; 黄建平

表 1 高阳低凸起及邻区主要隐伏断层属性参数

Table 1 Attribute parameters of the main buried faults in and around the Gaoyang low uplift

名称	分段编码	走向	倾角	长度/km
徐水-大城断裂（F ₃ ）	F ₃₋₁	102°±5°	70°±10°	22.96
	F ₃₋₂	110°±5°	70°±10°	12.96
	F ₃₋₃	120°±5°	70°±10°	11.48
	F ₃₋₄	80°±5°	70°±10°	14.44
	F ₃₋₅	117°±5°	70°±10°	31.11
高阳凸起西边界断裂（F ₆ ）	F ₆₋₁	27°±5°	40°±10°	25.93
	F ₆₋₂	18°±5°	40°±10°	8.15
任丘断裂（F ₇ ）	F ₇	25°±5°	45°±10°	27.78
马西断裂（F ₈ ）	F ₈₋₁	17°±5°	50°±10°	12.59
	F ₈₋₂	8°±5°	50°±10°	10.00
任西断裂（F ₁₁ ）	F ₁₁₋₁	38°±5°	59°±10°	5.30
	F ₁₁₋₂	11°±5°	59°±10°	5.25
	F ₁₁₋₃	47°±5°	59°±10°	14.38
	F ₁₂₋₁	53°±5°	47°±10°	5.20
高阳凸起东边界断裂（F ₁₂ ）	F ₁₂₋₂	44°±5°	47°±10°	3.82
	F ₁₂₋₃	0°±5°	47°±10°	2.15
	F ₁₂₋₄	40°±5°	47°±10°	6.27
	F ₁₂₋₅	64°±5°	47°±10°	4.24
	F ₁₃₋₁	51°±5°	65°±10°	5.21
	F ₁₃₋₂	84°±5°	65°±10°	3.03
	F ₁₃₋₃	46°±5°	65°±10°	4.22
断裂 F ₁₃	F ₁₃₋₄	58°±5°	65°±10°	4.28
	F ₁₃₋₅	75°±5°	65°±10°	7.11
	F ₁₃₋₆	62°±5°	65°±10°	4.78
	F ₁₃₋₇	61°±5°	54°±10°	9.70
	F ₁₃₋₈	90°±5°	60°±10°	4.73
	F ₁₃₋₉	58°±5°	60°±10°	7.04
	F ₁₃₋₁₀	73°±5°	65°±10°	6.71
断裂 F ₁₄	F ₁₃₋₁₁	84°±5°	65°±10°	3.16
	F ₁₄₋₁	59°±5°	74°±10°	2.97
	F ₁₄₋₂	41°±5°	74°±10°	13.57
	F ₁₄₋₃	34°±5°	74°±10°	5.78
断裂 F ₁₅	F ₁₅	18°±5°	75°±10°	6.81

等，2009)。李燕燕等（2021）通过对 D34 井获取的高于庄组热储碳酸盐岩开展实验，得到 4195 ~ 4506 m 深度段白云岩密度为 2.56~2.76 g/cm³，并由上覆岩石自重计算得出垂向应力（S_v）随深度线性增加梯度为 0.0266±0.001 MPa/m；初始孔隙水压力（P₀）选取研究区内的静水压力，由唐朝（2020）对位于高阳县城的地热井开展的地下水位监测数据可知，2022 年该地区相对静水位处于 82.17~151.83 m 之间，则初始孔隙水压随深度线性增加梯度为 0.0097±0.0001 MPa/m。

高阳低凸起 D35 孔揭示区内蓟县系雾迷山组顶板埋深为 3634.5 m（王贵玲等，2020，因此文章近似选取 3600 m 作为雾迷山组热储层的起始计算深度。断层摩擦系数对于断层稳定状态的研判至关重要。由于目前暂时无法直接获取高阳低凸

起主要隐伏断层的摩擦系数，参考国内外学者在分析断层活动性、应力积累水平以及滑动失稳风险时均采用 0.60 作为断层失稳破坏的临界摩擦系数（Ellsworth，2013；Walsh and Zoback，2016；牛琳琳等，2018），且研究团队在开展容城热储区回灌注水诱发断层失稳危险性研究中，也将 0.60 作为区内主要隐伏断层摩擦系数的临界值，相关研究成果表明这一假设在雄安新区范围内进行断层活化危险性分析是可行的（Zhu et al.，2022；朱思雨等，2022）。因此，文章选取 0.60 作为研究区主要隐伏断层的临界摩擦系数，计算热储区内各隐伏断层在现今地应力场作用下的应力积累水平和初始滑动失稳风险。

3.2 高阳低凸起主要隐伏断层初始稳定状态

3.2.1 确定性初始稳定状态分析

以华北地区地壳浅层综合应力水平作为高阳

低凸起初始应力边界条件, 根据弹性力学中主应力坐标系下任意斜截面正应力和剪应力计算公式 (丰成君等, 2019), 得到高阳地热田及其邻区主

要隐伏断层在 3600 m 深度断层面上有效正应力和剪应力, 利用莫尔-库伦准则做出各分段断层在现今应力条件下的有效应力莫尔圆 (图 3)。

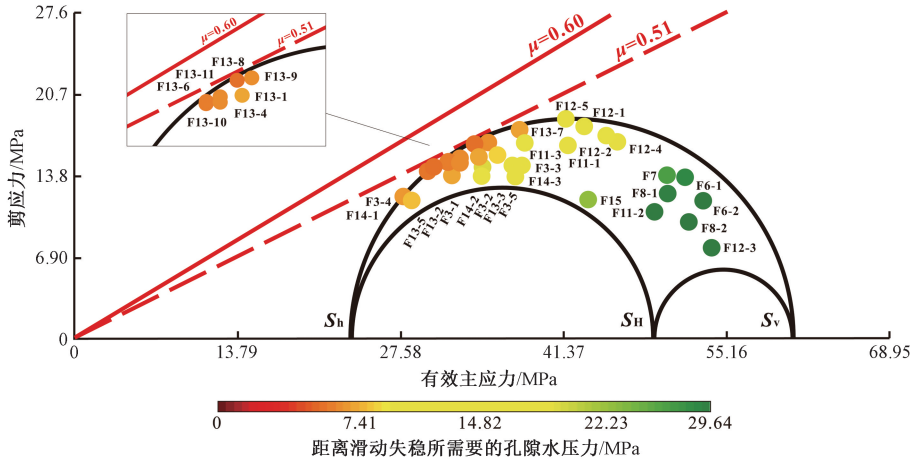


图 3 高阳低凸起及邻区主要隐伏断层初始稳定状态
Fig. 3 The initial stable state of the main buried faults in and around the Gaoyang low uplift

由图 3 可知, 在现今地应力场的作用下, 高阳低凸起及邻区主要隐伏断层均处于相对稳定状态, 且各分段断层现今稳定状态指示出研究区内主要隐伏断层最小临界摩擦系数为 0.51。从图中还可以得出, 各分段断层的初始应力积累水平不同, 使得不同分段断层距离滑动失稳所需要的临界孔隙水压力不同, 具体表现为 (图 4): ①徐水-大城断裂 F_{3-1} — F_{3-5} 分段距离滑动失稳所需要的孔隙水压力值分别为 8.47 MPa、10.19 MPa、13.14 MPa、7.72 MPa 和 12.56 MPa, 其中 F_{3-1} 和 F_{3-4} 分段更接近滑动失稳的临界状态, 其他分段较为稳定; ②高阳凸起西边界断裂 F_{6-1} 和 F_{6-2} 分段、任丘断裂 F_7 、马西断裂 F_{8-1} 和 F_{8-2} 分段以及断裂 F_{15} 距离滑动失稳所需要的孔隙水压力值分别为 28.74 MPa、33.62 MPa、26.90 MPa、29.52 MPa、35.39 MPa 和 23.68 MPa, 整体相对稳定; ③高阳凸起东边界断裂 F_{12-1} — F_{12-5} 分段距离滑动失稳所需要的孔隙水压力值分别为 13.00 MPa、16.26 MPa、40.89 MPa、17.97 MPa 和 10.69 MPa, 其中, F_{12-5} 分段与其他分段相比较为接近失稳状态; ④ F_{13-1} — F_{13-11} 分段断层距离滑动失稳所需要的孔隙水压力值分别为 8.38 MPa、5.60 MPa、9.71 MPa、7.16 MPa、6.20 MPa、6.74 MPa、8.03 MPa、6.43 MPa、7.28 MPa、6.23 MPa 和 6.29 MPa, 表明该断裂的各分段目前均处于稳定状态; ⑤ F_{14-1} — F_{14-3} 各分段距离滑动失稳所需要的孔隙水压力值分别为

8.91 MPa、11.20 MPa 和 13.90 MPa, 相对而言, F_{14-1} 分段易于失稳, F_{14-2} 和 F_{14-3} 分段更加稳定。

3.2.2 不确定性初始稳定状态分析

由于断层走向、倾角 (表 1), 垂向应力 (S_v) 的大小和方向, 初始孔隙水压力 (P_0) 均存在误差, 为了充分考虑这些参数的不确定性对断层初始稳定状态研判的影响, 研究采用基于莫尔-库伦准则的断层滑动失稳概率分析方法, 计算研究区主要隐伏断层的初始滑动失稳风险。该方法首先依据蒙特卡洛的不确定性概率分析方法, 在误差范围内对关键参数随机抽样, 确定各期望值的概率分布特征, 其次依据莫尔-库伦准则计算各分段断层面上剪应力与有效正应力的比值及其概率分布, 最后将该概率分布与断层临界摩擦系数进行对比, 得到断层滑动失稳概率 (Walsh and Zoback, 2016; Zhu et al., 2022; 朱思雨等, 2022)。针对该方法, 美国斯坦福大学 Zoback 教授团队开发了计算断层滑动失稳概率 (fault slip potential) 的公开版程序 FSP 1.0, 以下计算均采用该软件完成 (Walsh and Zoback, 2016)。

综合考虑关键参数存在的误差, 运用 FSP 1.0 计算高阳低凸起及邻区主要隐伏断层在未受地热长期开采扰动时的初始滑动失稳风险。从图 5 可以看出, 研究区及邻区各分段断层初始滑动失稳概率较低, 均小于 10%, 比如, 徐水-大城断裂东部

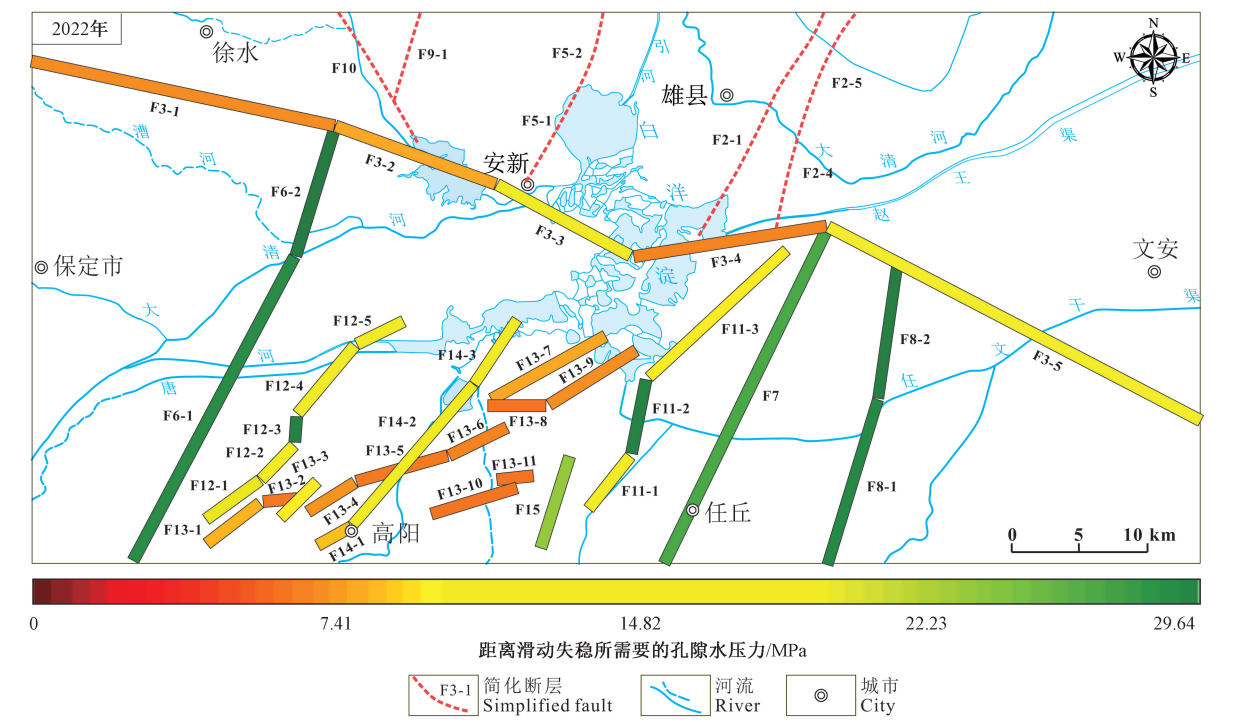


图4 高阳低凸起及邻区主要隐伏断层距离滑动失稳所需要的孔隙水压力
Fig. 4 Map views of pore pressure required for the main buried faults to slip in and around the Gaoyang low uplift

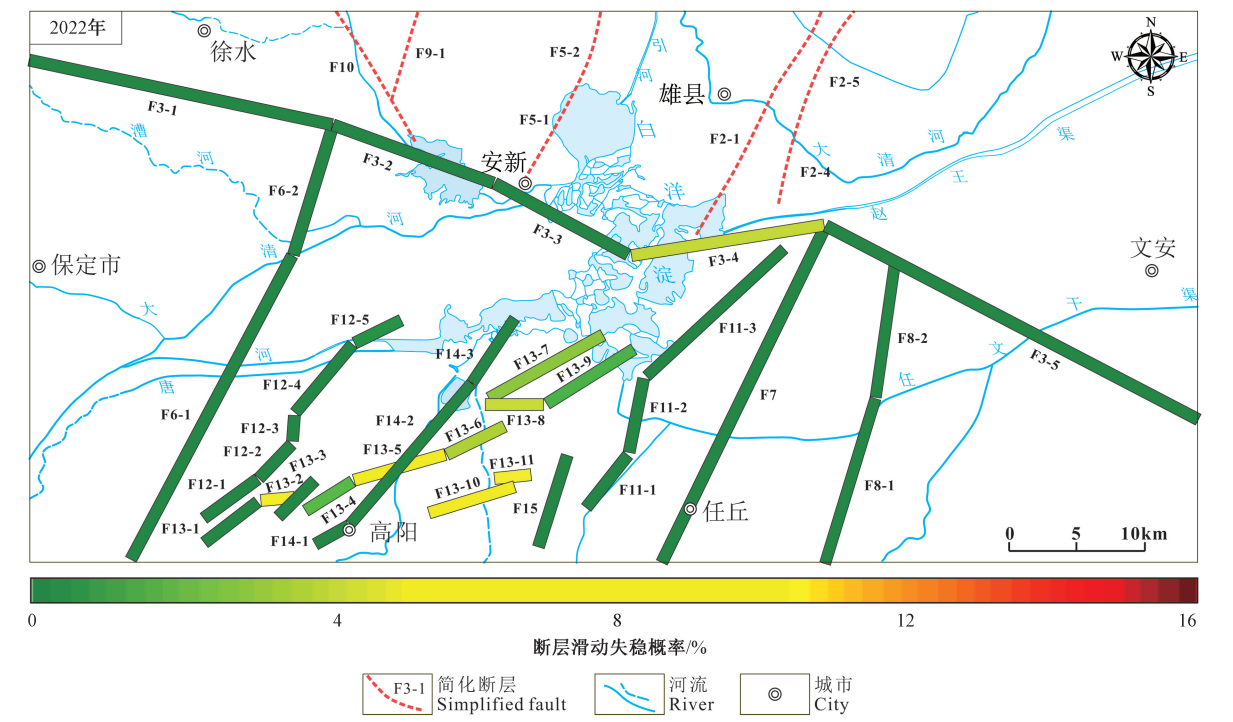


图5 高阳低凸起及邻区主要隐伏断层初始滑动失稳概率
Fig. 5 The initial fault-slip potential of the main active faults in and around the Gaoyang low uplift

F_{3-4} 分段、高阳凸起东边界断裂北部 F_{12-5} 分段、断裂 F_{13} 的西南段 F_{13-4} 、东北段 F_{13-6} — F_{13-9} 初始滑动失稳概率分别为 4%、1%、2%、4%、3%、4% 和 1%，而 F_{13-2} 、 F_{13-5} 和 F_{13-10} 分段初始滑动失稳概率略高，分别为 8%、7% 和 9%。总体来说，高阳低凸起及邻区主要隐伏断层目前均处于稳定状态。

4 高阳低凸起未来回灌注水诱发断层失稳危险性分析

4.1 超孔隙水压力计算参数选取

基于 Hsieh and Bredehoeft 水文模型（公式（2）），计算高阳低凸起未来深地热开采回灌注水可能产生的超孔隙水压力。参考已发表的研究成果，距离断层越近，回灌注水对断层的扰动效果越显著（Zhu et al.，2022；朱思雨等，2022），因此，文章选取由中国地质调查局在高阳低凸起及其邻区组织实施的 8 口地热井（D30、D34、D35、G4、G7、G30、Y42、Y50，与断层的距离 ≤ 2 km）作为回灌注水井（常健等，2016）；回灌注水密度为 1000 kg/m^3 ；Evans et al.（2012）研究欧洲地区地热开采注水诱发大型地震相关的注水参数得出：注水速率在 $18\sim 120\text{ L/s}$ 之间易于诱发最大震级地震，平均值为 51 L/s ，即 $170\text{ m}^3/\text{h}$ ，该速率也是王贵玲等（2020）在高阳低凸起中北部 D35 孔开展抽水试验期间的最大抽水速率，考虑回灌注水可能引起的最不利影响，注水速率选取最大实验抽水速率 $170\text{ m}^3/\text{h}$ （王贵玲等，2020）；并选择 40 年（2022—2062 年）作为研究时间尺度，追踪长期回灌注水对断层稳定性的影响。

回灌注水起始深度选择长城系高于庄组热储层顶界深度 3600 m ；D35 井揭露蓟县系雾迷山组热储层在 $3600\sim 3850\text{ m}$ 深度段共发育 10 个岩溶裂隙带，岩溶裂隙总厚度 250 m ，因此选取 250 m 作为研究区岩溶裂隙含水层厚度（ $3600\sim 3850\text{ m}$ ）；同时，D34 井揭露该深度段热储层主要岩性为灰色、灰白色白云岩，岩石密度在 $2.56\sim 2.76\text{ g/cm}^3$ 之间，计算选取 2.66 g/cm^3 ；目标深度段热储层渗透率为 $0.59\times 10^{-3}\sim 7.20\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ ，选取最大值 $7.20\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ ；热储层岩石孔隙度处于 $2\%\sim 6\%$ 之间，选取平均值 3.93% （王贵玲等，2020；李燕燕等，2021；王思琪等，2021）；此外，水动黏滞系数参考相应研究的经验值，取 $0.0008\text{ Pa}\cdot\text{s}$ （Walsh and Zoback，2016）。

4.2 回灌注水产生的超孔隙水压力特征分析

基于 Hsieh and Bredehoeft 水文模型（公式（2）），分别计算回灌注水 10~40 年产生的超孔隙水压力值（2032—2062 年），计算结果见图 6。

在恒定的注水速率条件下，随着回灌注水时间的增加，产生的超孔隙水压力也逐渐增长（图 6）。

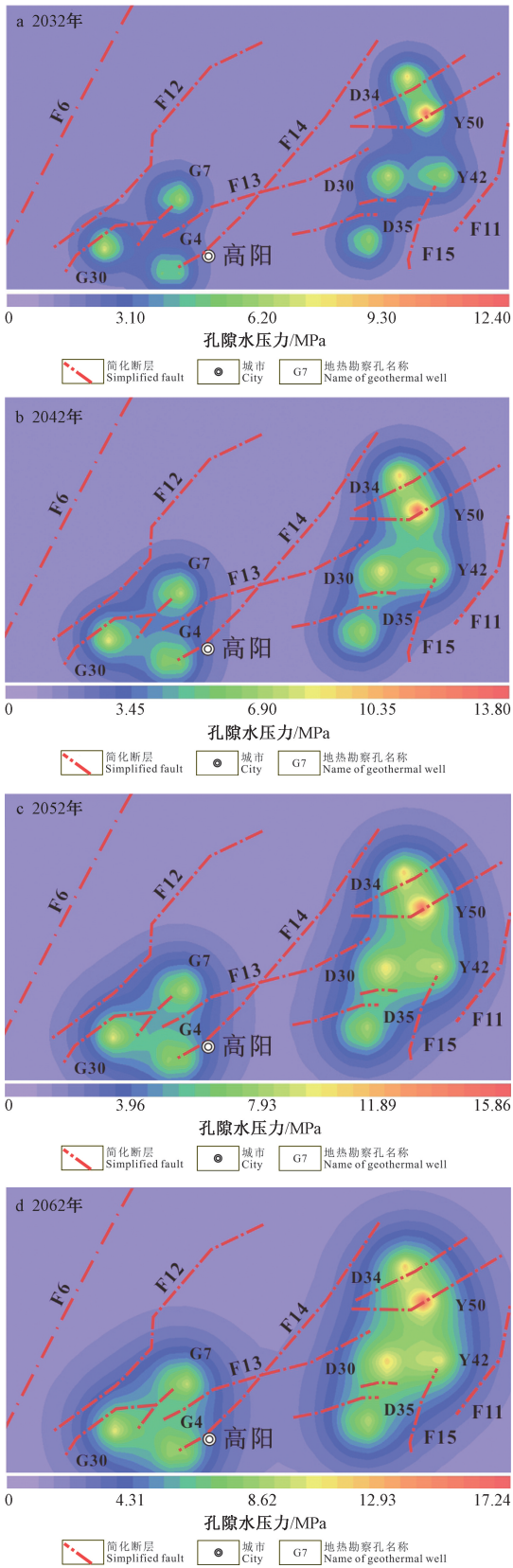


图 6 高阳低凸起代表性深地热井回灌注水产生的超孔隙水压力

Fig. 6 The excess pore pressure caused by water injection in deep-geothermal wells in the Gaoyang low uplift

持续注水 10 年、20 年、30 年、40 年，单井产生的超孔隙水压力值分别不超过 6 MPa、7 MPa、8 MPa、11 MPa。以 G7 地热井为例（图 7），注水速率和注水时间一定时，单井产生的超孔隙水压力值在注水井中心处最大，以注水井为中心向外呈指数函数规律衰减，其直接影响范围普遍不超过 8 km，0~4 km 范围内，超孔隙水压力快速降低，4~8 km，逐渐减小为 0 MPa。

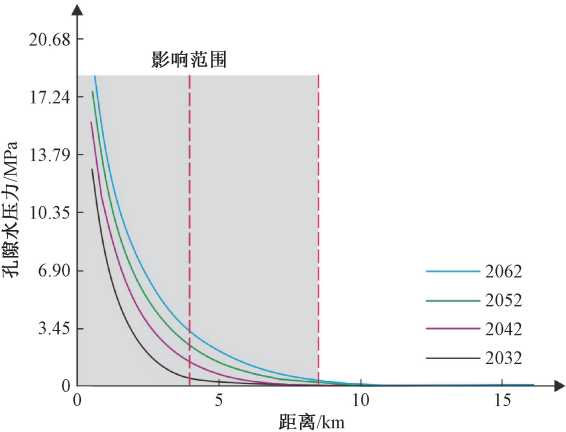


图 7 G7 地热井回灌注水引起的超孔隙水压力衰减规律

Fig. 7 The excess pore pressure variations with horizontal distance from the geothermal well G7

4.3 高阳低凸起目标地热井长期回灌注水诱发断层失稳危险性分析

由 4.2 节可知，在恒定注水速率和注水时间的前提下，单井回灌注水引起超孔隙水压力的影响范围在 0~8 km 之间，因此，我们选取目标地热井附近 8 km 范围内的 6 条第四纪隐伏断层作为研究对象（ F_6 、 F_7 、 F_{12} 、 F_{13} 、 F_{14} 、 F_{15} ），在初始稳定状态（图 5）的基础上叠加回灌注水产生的超孔隙水压力（图 6），计算得到高阳低凸起未来大规模开采深地热资源可能诱发的断层滑动失稳风险（图 8）。需要说明的是，为了考虑回灌注水可能对断层稳定性产生的最不利影响，断层滑动失稳概率计算采用 0.51 作为各分段断层的临界摩擦系数。

从图 8 可以看出，高阳低凸起 8 口目标地热井持续回灌注水对断层 F_{13} 的 F_{13-2} 、 F_{13-4} 、 F_{13-7} 、 F_{13-8} 、 F_{13-10} 、 F_{13-11} 分段的稳定性影响极大。在回灌注水 40 年产生的超孔隙水压力的扰动作用下，这些断层的滑动失稳概率均大于 85%，具有极高的滑动失稳风险；持续回灌注水对断层 F_{13} 的 F_{13-1} 、 F_{13-3} 、 F_{13-6} 、 F_{13-9} 分段、断层 F_{14} 的 F_{14-1} 分段的稳

定性影响很大，注水 40 年后，各分段断层的滑动失稳概率处于 30%~60% 之间；此外，回灌注水对高阳凸起东边界断层西南端的 F_{12-1} 分段以及断层 F_{13} 的 F_{13-5} 分段稳定性影响较小，两条断层的滑动失稳概率均小于 20%，对其他断层稳定性的影响则不明显。

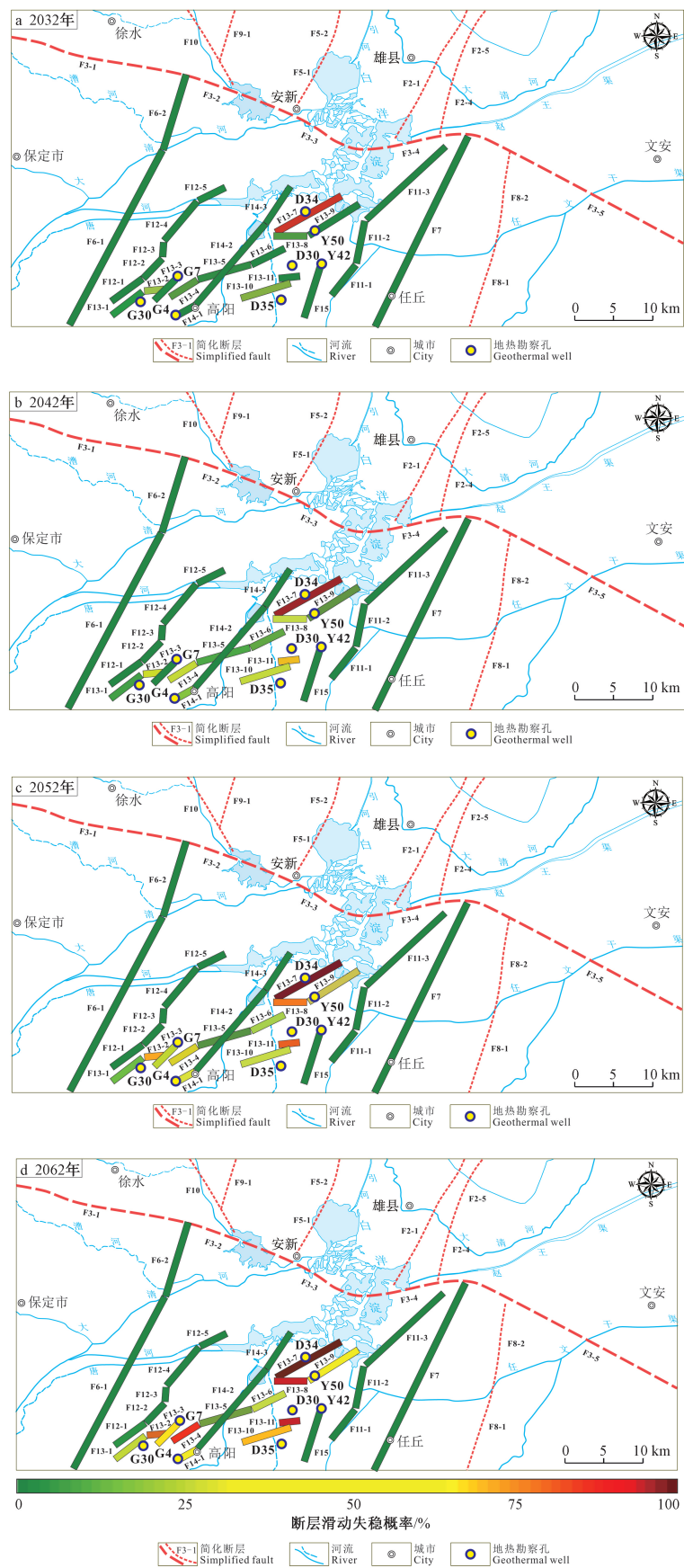
5 讨论

研究团队前期开展了雄安新区容城热储区未来回灌注水诱发近场断层失稳危险性研究，结果表明：随着注水速率的增加，断层滑动失稳概率呈指数函数规律非线性增大（朱思雨等，2022）；热储层孔隙度变化对同一断层滑动失稳概率的影响不明显；热储层渗透率与断层滑动失稳概率呈反比关系，即深地热储层渗透率越大，同一断层滑动失稳概率越小（Zhu et al., 2022）。考虑到研究区内可能存在未知走向的隐伏断层，为了进一步揭示不同走向的断层在当前区域应力场作用下对回灌注水的敏感性，在已有研究成果的基础上，重点讨论断层走向与最大水平主应力（ S_H ）的夹角变化以及地热水回灌效率对断层稳定性的影响。

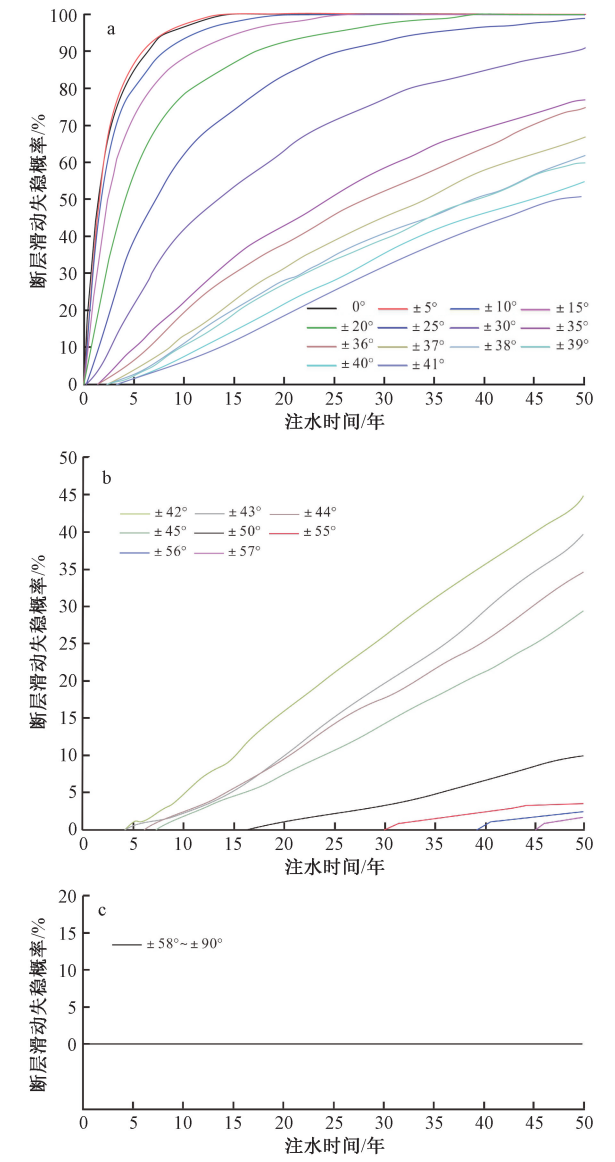
5.1 断层走向与最大水平主应力夹角变化对断层稳定性的影响

由图 1 和 4.3 节可知， F_{13-7} 分段断层紧邻地热井 D34，且其稳定性受长期回灌注水影响最为明显。在未知未探测隐伏断层产状的情况下，暂且以 F_{13-7} 分段断层为例，通常情况下，区域应力场、热储层参数、注水速率、断层长度、倾向和倾角保持不变，假设注水时间为 2022—2072 年，依次改变 F_{13-7} 分段断层的走向，使其与 S_H 的夹角发生变化，讨论这种变化对断层滑动失稳概率产生的影响。区域构造应力场最大水平主应力方向为 $N77^\circ E$ ，以 S_H 的方向为轴，分别选取与 S_H 成 0° 、 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ \cdots \pm 80^\circ$ 、 $\pm 85^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 的方向角作为 F_{13-7} 分段断层的走向（顺时针为正方向），计算该断层走向与 S_H 平行/近平行、小角度相交以及垂直时，断层滑动失稳概率的变化规律。并根据计算结果，在滑动失稳概率增长趋势发生明显变化的角度附近适当增加对照组（分别与 S_H 成 $36^\circ \sim 39^\circ$ 、 $41^\circ \sim 44^\circ$ 、 $56^\circ \sim 59^\circ$ 的方向角）。

计算结果表明，回灌注水 50 年间，断层滑动



失稳概率随断层走向变化分别表现为 3 种增长趋势（图 9）：



a—与 S_H 夹角： $0^\circ \sim \pm 41^\circ$ ；b—与 S_H 夹角： $\pm 42^\circ \sim \pm 57^\circ$ ；c—与 S_H 夹角： $\pm 58^\circ \sim \pm 90^\circ$

图 9 $F_{13.7}$ 分段断层滑动失稳概率随断层走向变化特征

Fig. 9 Changes in fault-slip potential with the varying orientation of $F_{13.7}$

(a) Angles with S_H ： $0^\circ \sim \pm 41^\circ$ ；(b) Angles with S_H ： $\pm 42^\circ \sim \pm 57^\circ$ ；(c) Angles with S_H ： $\pm 58^\circ \sim \pm 90^\circ$

(1) 当断层走向与 S_H 夹角处于 $0^\circ \sim 41^\circ$ 之间时，断层滑动失稳概率呈指数函数规律增大。夹角在 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 范围内变化时，注水 5 年后，该断层的滑动失稳概率迅速增加至 50% 及以上，并逐渐增长直至趋近 100%。夹角在 $-41^\circ \sim -21^\circ$ 和 $21^\circ \sim$

41° 范围内变化时，断层滑动失稳概率随注水时间的增加稳步增长（图 9a）。由此看来，当断层走向与最大水平主应力方向近平行或小于 20° 斜交时，断层稳定性受注水影响最为敏感。

(2) 当断层走向与 S_H 夹角处于 $-57^\circ \sim -42^\circ$ 和 $42^\circ \sim 57^\circ$ 之间时，随注水时间的延长，断层滑动失稳概率基本呈线性增大（图 9b）。基于该线性关系，大致推断，当断层走向与最大水平主应力方向呈 $49^\circ \pm 8^\circ$ 大角度斜交时，可以通过控制注水时间的方式直接降低注水诱发断层失稳的危险程度。

(3) 当断层走向与 S_H 夹角处于 $-90^\circ \sim -58^\circ$ 和 $58^\circ \sim 90^\circ$ 之间时，回灌注水 50 年间，断层滑动失稳概率对回灌注水的敏感性很弱，断层始终保持初始稳定状态（图 9c）。

5.2 回灌效率对注水井附近主要活动断层稳定性的影响

受储层压力、回灌工艺等因素的影响，回灌井的回灌能力可能逐渐降低（刘久荣，2003）。为研究回灌效率对断层稳定性的影响，以断层 $F_{13.7}$ 为例，保持断层属性参数和注水时间不变，假定地热开发冷水回灌效率分别为 10%、20%~100%，即注水速率分别为 $17 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $34 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $51 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $68 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $85 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $102 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $119 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $136 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $153 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $170 \text{ m}^3/\text{h}$ ，分别计算在不同回灌效率条件下，注水 10~40 年该断层滑动失稳概率的变化趋势（图 10）。

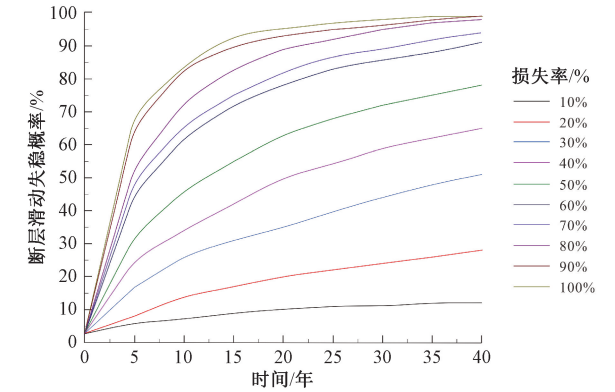


图 10 $F_{13.7}$ 分段断层滑动失稳概率随损失率变化规律

Fig. 10 Changes in fault-slip potential with the varying loss rate of $F_{13.7}$

如图 10 所示，注水时间一定时，回灌效率越大， $F_{13.7}$ 分段断层滑动失稳概率增长的越快，滑动失稳概率值越高。

5.3 对回灌注水诱发最大地震的讨论

滑动失稳概率较高的断层在注水产生的超孔隙水压力作用下更容易诱发地震 (Keranen et al., 2013; Lei et al., 2017)。McGarr (2014) 通过分析大量注水诱发地震事件, 认为流体回注诱发地震的最大震级受限于注入流体的总体积, 其通过理论推导得出了注水诱发最大地震震级的估算公式:

$$M_0(\max) = G\Delta V$$
$$M_w = \frac{2}{3} \log \frac{M_0(\max)}{10^{17}} - 6.033 \quad (3)$$

式中: $M_0(\max)$ 为最大地震矩, G 为剪切模量, ΔV 为注入流体总体积, M_w 为矩震级。

据李燕燕等 (2021) 围绕雄安新区高阳地热田 4195~4422 m 深度高于庄组碳酸盐岩样品开展的三轴抗压强度实验结果显示, 在 50 MPa 围压范围内, 白云岩弹性模量主要为 33.45~65.03 GPa, 泊松比为 0.18~0.26, 其中最大弹性模量为 65.03 GPa, 对应的泊松比为 0.20, 计算得到的最大剪切模量 G 为 54.19 GPa, 由公式 (3) 估算高阳低凸起单地热井在不同回灌注水速率条件下持续回灌 1 个月可能诱发的最大地震震级 (图 11), 估算过程中, 回灌注水速率分别为 170 m³/h、140 m³/h、110 m³/h、80 m³/h、50 m³/h 和 20 m³/h。

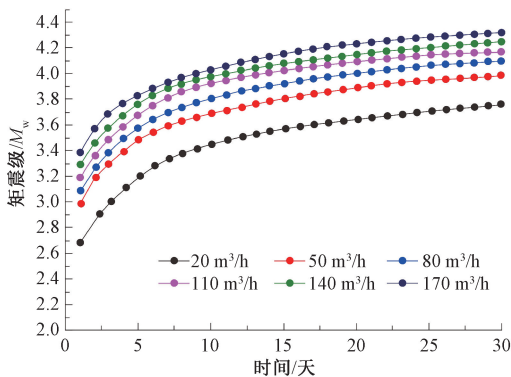


图 11 高阳低凸起单井回灌注水 30 天诱发地震震级变化

Fig. 11 The estimated earthquake magnitude induced by water injection for 30 days at a single well in the Gaoyang low uplift

由图 11 可以看出, 在固定注水时间范围内, 随着回灌注水速率增加, 估测得到的诱发地震最大震级也逐渐增大; 在 140~170 m³/h 注水条件下, 持续注水 30 天可能诱发地震的最大矩震级达 4.3 级; 在 20~110 m³/h 注水条件下, 持续注水 10~15 天可能诱发地震的最大矩震级为 4.2 级。

6 结论

(1) 在现今地应力场的作用下, 高阳低凸起及其邻区主要隐伏断层均处于相对稳定状态。

(2) 在 170 m³/h 回灌注水速率条件下, 高阳低凸起代表性地热井回灌注水 40 年产生的超孔隙水压力值最大不超过 11 MPa, 影响范围一般不超过 8 km, 扩散特征表现为以注水井为中心向四周呈幂函数规律衰减。

(3) 高阳低凸起代表性地热井在 170 m³/h 回灌注水速率条件下, 持续注水 40 年对断层 F_{13} 的 F_{13-2} 、 F_{13-4} 、 F_{13-7} 、 F_{13-8} 、 F_{13-10} 、 F_{13-11} 分段影响显著, 各分段断层的滑动失稳概率很高; 对断层 F_{13} 的 F_{13-1} 、 F_{13-3} 、 F_{13-6} 、 F_{13-9} 分段和断层 F_{14} 的 F_{14-1} 分段稳定性影响较大; 对热储区内其他断层稳定性的影响较不明显。受热储层和断层计算参数不确定性的影响, 相关结论有待于结合后期地热开采结果进一步验证和完善。

(4) 距离注水井 2 km 范围内, 不同走向断层在单井回灌注水 50 年的作用下, 滑动失稳概率随断层走向与最大水平主应力夹角的变化而变化。两者夹角处于 0°~41°之间时, 断层滑动失稳概率随着注水时间的延长以指数函数规律快速增长, 其中, 两者近平行或成 0°~21°小角度斜交时, 断层稳定性受注水影响最为明显; 夹角处于 42°~57°之间时, 断层滑动失稳概率随注水时间的增加呈线性规律增大; 夹角大于 57°时, 回灌注水 50 年对断层稳定性影响微弱。

致谢: 感谢中国地质科学院地质力学研究所谭成轩研究员、王宗秀研究员对论文的指导。感谢中国地质调查局水文地质环境地质调查中心李胜涛教授级高工对论文提出的宝贵建议。感谢编辑部对论文的大力支持。

References

CHANG J, QIU N S, ZHAO X Z, et al., 2016. Present-day geothermal regime of the Jizhong depression in Bohai Bay basin, East China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 59 (3): 1003-1016. (in Chinese with English abstract)

CHEN M X, HUANG G S, ZHANG W R, et al., 1982. The temperature distribution pattern and the utilization of geothermal water at Niutuozen basement protrusion of central Hebei Province [J]. Scientia Geologica Sinica (3): 239-252. (in Chinese with English abstract)

- abstract)
- CHEN X W, NAKATA N, PENNINGTON C, et al., 2017. The Pawnee earthquake as a result of the interplay among injection, faults and foreshocks [J]. *Scientific Reports*, 7 (1): 4945.
- ELLSWORTH W L, 2013. Injection-induced earthquakes [J]. *Science*, 341 (6142): 1225942.
- EVANS K F, ZAPPONE A, KRAFT T, et al., 2012. A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO₂ reservoirs in Europe [J]. *Geothermics*, 41, 30-54.
- FAN Y L, TAN C X, ZHANG P, et al., 2020. A study of current in-situ stress state and its influence on tectonic stability in the Xiongan New Area [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41 (4): 481-491. (in Chinese with English abstract)
- FENG C J, QI B S, WANG X S, et al., 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)
- GAN H N, WANG G L, LIN W J, et al., 2020. Research on the status quo of environmental geology impact of enhanced geothermal system and countermeasures [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (2): 211-220. (in Chinese with English abstract)
- GIARDINI D, 2009. Geothermal quake risks must be faced [J]. *Nature*, 462 (7275): 848-849.
- GUGLIELMI Y, CAPP A F, AVOUAC J P, et al., 2015. Seismicity triggered by fluid injection-induced aseismic slip [J]. *Science*, 348 (6240): 1224-1226.
- HE D F, CUI Y Q, ZHANG Y Y, et al., 2017. Structural genetic types of paleo-buried hill in Jizhong depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (4): 1338-1356. (in Chinese with English abstract)
- HE D F, SHAN S Q, ZHANG Y Y, et al., 2018. 3-D geologic architecture of Xiong'an New Area: constraints from seismic reflection data [J]. *Science China Earth Sciences*, 61 (8): 1007-1022.
- HEALY J H, RUBEY W W, GRIGGS D T, et al., 1968. The Denver earthquakes [J]. *Science*, 161 (3848): 1301-1310.
- HSIEH P A, BREDEHOEFT J D, 1981. A reservoir analysis of the Denver earthquakes: a case of induced seismicity [J]. *Journal of Geophysical Research*, 86 (B2): 903-920.
- HUANG J P, NI S D, FU R S, et al., 2009. Source mechanism of the 2006 M_w 5.1 Wen'an earthquake determined from a joint inversion of local and teleseismic broadband waveform data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52 (1): 120-130. (in Chinese with English abstract)
- HUANG L Y, YANG S X, CUI X F, et al., 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)
- KERANEN K M, SAVAGE H M, ABERS G A, et al., 2013. Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: links between wastewater injection and the 2011 M_w 5.7 Earthquake Sequence [J]. *Geology*, 41 (6): 699-702.
- LEI X L, LI X Y, LI Q, et al., 2014. Role of immature faults in injection-induced seismicity in oil/gas reservoirs: a case study of the Sichuan Basin, China [J]. *Seismology and Geology*, 36 (3): 625-643. (in Chinese with English abstract)
- LEI X L, HUANG D J, SU J R, et al., 2017. Fault reactivation and earthquakes with magnitudes of up to Mw4.7 induced by shale-gas hydraulic fracturing in Sichuan Basin, China [J]. *Scientific Reports*, 7 (1): 699-702.
- LI Y Y, ZHANG B J, XING Y F, et al., 2021. Fragmentation law of carbonate rocks under different confining pressure in Gaoyuzhuang Formation, Gaoyang geothermal field, Xiong'an New Area [J/OL]. *Geology in China*, 2021: 1-15 [2022-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210419.1328.006.html>. (in Chinese with English abstract)
- LIU J R, 2003. The status of geothermal reinjection [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 30 (3): 100-104. (in Chinese with English abstract)
- LOHMAN R B, MCGUIRE J J, 2007. Earthquake swarms driven by aseismic creep in the Salton Trough, California [J]. *Journal of Geophysical Research*, 112 (B4): B04405.
- MCGARR A, 2014. Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119: 1008-1019.
- MAO X, WANG X W, GUO S Y, et al., 2021. Genetic mechanism of geothermal resources in the Gaoyang geothermal field and adjacent areas [J]. *Carsologica Sinica*, 40 (2): 273-280. (in Chinese with English abstract)
- NIU L L, FENG C J, ZHANG P, et al., 2018. In-situ measurements in the southern margin of the Ordos block [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (1): 25-34. (in Chinese with English abstract)
- PANG Z H, KONG Y L, PANG J M, et al., 2017. Geothermal resources and development in Xiongan New Area [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32 (11): 1224-1230. (in Chinese with English abstract)
- RALEIGH C B, HEALY J H, BREDEHOEFT J D, 1976. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado [J]. *Science*, 191 (4233): 1230-1237.
- RUBEY W W, HUBBERT M K, 1959. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting; II. Overthrust belt in geosynclinal area of western Wyoming in light of fluid-pressure hypothesis [J]. *GSA Bulletin*, 70 (2): 167-206.
- RUTQVIST J, OLDENBURG C M, 2008. Analysis of injection-induced micro-earthquakes in a geothermal steam reservoir, the Geysers Geothermal Field, California [C] //Proceedings of the 42nd U. S. Rock Mechanics Symposium (USRMS). San Francisco, California: Lawrence Berkeley National Lab: 151.
- SEGALL P, LU S, 2015. Injection-induced seismicity: poroelastic and earthquake nucleation effects [J]. *Journal of Geophysical Research*, 120 (7): 5082-5103.
- SHANG S J, FENG C J, TAN C X, et al., 2019. Quaternary activity study of major buried faults near Xiongan New Area [J]. *Acta*

- Geoscientica Sinica, 40 (6): 836-846. (in Chinese with English abstract)
- SHAPIRO S A, DINSKE C, 2009. Scaling of seismicity induced by nonlinear fluid-rock interaction [J]. Journal of Geophysical Research, 114 (B9): B09307.
- SUI S Q, WANG Y X, LI H Q, et al., 2020. Analysis of sedimentary characteristics of the Wumisan Formation in Jixian system, Xiong'an New Area [J]. Mineral Exploration, 11 (8): 1563-1571. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, YANG W M, ZHANG C S, et al., 2020. Study on the active tectonic zone and regional crustal stability in the coordinated development of the Beijing-Tianjin-Hebei Region [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- TANG C, 2020. Subsidence study of geothermal recharge test in Gaoyang County [D]. Baoding: Hebei University. (in Chinese with English abstract)
- 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.
- WANG G L, LI J, WU A M, et al., 2018. A study of the thermal storage characteristics of Gaoyuzhuang formation, a new layer system of thermal reservoir in Rongcheng uplift area, Hebei province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 39 (5): 533-541. (in Chinese with English abstract)
- WANG G L, GAO J, ZHANG B J, et al., 2020. Study on the thermal storage characteristics of the Wumishan formation and huge capacity geothermal well parameters in the Gaoyang low uplift area of Xiong'an New Area [J]. Acta Geologica Sinica, 94 (7): 1970-1980. (in Chinese with English abstract)
- WANG R J, KÜUMPEL H J, 2003. Poroelasticity: efficient modeling of strongly coupled, slow deformation processes in multilayered half-space [J]. Geophysics, 68 (2): 705-717.
- WANG S Q, ZHANG B J, LI Y Y, et al., 2021. Heat accumulation mechanism of deep ancient buried hill in the Northeast of Gaoyang geothermal field, Xiong'an New Area [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40 (3): 12-21. (in Chinese with English abstract)
- WEINGARTEN M, GE S, GODT J W, et al., 2015. High-rate injection is associated with the increase in U. S. mid-continent seismicity [J]. Science, 348 (6241): 1336-1340.
- WU A M, MA F, WANG G L, et al., 2018. A study of deep-seated Karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiongan New Area [J]. Acta Geoscientica Sinica, 39 (5): 523-532. (in Chinese with English abstract)
- YANG Y T, XU T G, 2004. Hydrocarbon habitat of the offshore Bohai Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 21 (6): 691-708.
- YECK W L, WEINGARTEN M, BENZ H M, et al., 2016. Far-field pressurization likely caused one of the largest injection induced earthquakes by reactivating a large preexisting basement fault structure [J]. Geophysical Research Letters, 43 (19): 10198-10207.
- YECK W L, HAYES G P, MCNAMARA D E, et al., 2017. Oklahoma experiences largest earthquake during ongoing regional wastewater injection hazard mitigation efforts [J]. Geophysical Research Letters, 44 (2): 711-717.
- YEO I W, BROWN M R M, GE S, et al., 2020. Causal mechanism of injection-induced earthquakes through the M_w 5.5 Pohang earthquake case study [J]. Nature Communications, 11 (1): 2614.
- YOON J S, ZANG A, STEPHANSSON O, 2013. Hydro-mechanical coupled discrete element modeling of geothermal reservoir stimulation and induced seismicity [M] // HOU M Z, XIE H P, WERE P. Clean energy systems in the subsurface: production, storage and conversion. Berlin: Springer; 221-231.
- YU C P, VAVRYŮK V, ADAMOVÁ P, et al., 2018. Moment tensors of induced microearthquakes in the Geysers geothermal reservoir from broadband seismic recordings: implications for faulting regime, stress tensor, and fluid pressure [J]. Journal of Geophysical Research, 123 (10): 8748-8766.
- YU Y X, XU Z H, 1994. A study on orientations of horizontal principal stress in Jizhong depression using borehole breakout data [J]. Petroleum Exploration and Development, 21 (2): 48-55. (in Chinese with English abstract)
- ZANG A, YOON J S, STEPHANSSON O, et al., 2013. Fatigue hydraulic fracturing by cyclic reservoir treatment enhances permeability and reduces induced seismicity [J]. Geophysical Journal International, 195 (2): 1282-1287.
- ZHAO Y C, LUO Y, LI L X, et al., 2022. In-situ stress simulation and integrity evaluation of underground gas storage: A case study of the Xiangguosi underground gas storage, Sichuan, SW China [J]. Journal of Geomechanics, 28 (4): 523-536.
- ZHU R X, CHEN L, WU F Y, et al., 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton [J]. Science China Earth Sciences, 54 (6): 789-797.
- ZHU S Y, FENG C J, TAN C X, et al., 2022. Fault slip potential induced by water injection in the Rongcheng deep-seated geothermal reservoir, Xiong'an New Area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 41 (S1): 2735-2756. (in Chinese with English abstract)
- ZHU S Y, FENG C J, XING L X, et al., 2022. Changes in Fault Slip Potential Due to Water Injection in the Rongcheng Deep Geothermal Reservoir, Xiong'an New Area, North China [J]. Water, 14 (3): 410.
- ZOBACK M D, GORELICK S M, 2012. Earthquake Triggering and Large-Scale Geologic Storage of Carbon Dioxide [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109 (26): 10164-10168.

附中文参考文献

- 常健, 邱楠生, 赵贤正, 等, 2016. 渤海湾盆地冀中坳陷现今地热特征 [J]. 地球物理学报, 59 (3): 1003-1016.
- 陈墨香, 黄歌山, 张文仁, 等, 1982. 冀中牛驼镇凸起地温场的特点及地下热水的开发利用 [J]. 地质科学 (3): 239-252.
- 范玉璐, 谭成轩, 张鹏, 等, 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, 等, 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.

丰成君, 李滨, 李惠, 等, 2022. 南迦巴瓦地区地应力场估算与构造稳定性探讨. 地质力学学报, 28 (6): 919-937.

甘浩男, 王贵玲, 蒯文静, 等, 2020. 增强型地热系统环境地质影响现状研究与对策建议 [J]. 地质力学学报, 26 (2): 211-220.

何登发, 崔永谦, 张煜颖, 等, 2017. 渤海湾盆地冀中坳陷古潜山的构造成因类型 [J]. 岩石学报, 33 (4): 1338-1356.

何登发, 单帅强, 张煜颖, 等, 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.

黄建平, 倪四道, 傅容珊, 等, 2009. 综合近震及远震波形反演 2006 文安地质 ($M_w5.1$) 的震源机制解 [J]. 地球物理学报, 52 (1): 120-130.

黄禄渊, 杨树新, 崔效锋, 等, 2013. 华北地区实测应力特征与断层稳定性分析 [J]. 岩石力学, 34 (S1): 204-213.

雷兴林, 李霞颖, 李琦, 等, 2014. 沉积岩储藏系统小断层在油气田注水诱发地震中的作用: 以四川盆地为例 [J]. 地震地质, 36 (3): 625-643.

李燕燕, 张保建, 邢一飞, 等, 2021. 雄安新区高阳地热田热储高于庄组碳酸盐岩不同围压下破碎规律研究 [J/OL]. 中国地质, 2021: 1-15 [2022-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210419.1328.006.html>.

刘久荣, 2003. 地热回灌的发展现状 [J]. 水文地质工程地质, 30 (3): 100-104.

毛翔, 汪新伟, 郭世炎, 等, 2021. 高阳地热田及邻区地热资源形成机制 [J]. 中国岩溶, 40 (2): 273-280.

牛琳琳, 丰成君, 张鹏, 等, 2018. 鄂尔多斯地块南缘地应力测量研究 [J]. 地质力学学报, 24 (1): 25-34.

庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 等, 2017. 雄安新区地热资源与开发利用研究 [J]. 中国科学院院刊, 32 (11): 1224-1230.

商世杰, 丰成君, 谭成轩, 等, 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.

隋少强, 王延欣, 李海泉, 等, 2020. 河北雄安新区蓟县系雾迷山组沉积特征分析 [J]. 矿产勘查, 11 (8): 1563-1571.

谭成轩, 杨为民, 张春山, 等, 2020. 京津冀协同发展区活动构造与区域地壳稳定性研究 [M]. 北京: 地质出版社.

唐朝, 2020. 高阳县地热回灌试验的沉降研究 [D]. 保定: 河北大学.

王贵玲, 李郡, 吴爱民, 等, 2018. 河北容城凸起区热储层新层系: 高于庄组热储特征研究 [J]. 地球学报, 39 (5): 533-541.

王贵玲, 高俊, 张保建, 等, 2020. 雄安新区高阳低凸起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.

王思琪, 张保建, 李燕燕, 等, 2021. 雄安新区高阳地热田东北部深部古潜山聚热机制 [J]. 地质科技通报, 40 (3): 12-21.

吴爱民, 马峰, 王贵玲, 等, 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.

俞言祥, 许忠淮, 1994. 用钻孔崩落法研究冀中坳陷水平主应力方向 [J]. 石油勘探与开发, 21 (2): 48-55.

赵昱超, 罗瑜, 李隆新, 等, 2022. 地下储气库地应力模拟研究与地质完整性评估: 以相国寺为例 [J]. 地质力学学报, 28 (4): 523-536.

朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等, 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制 [J]. 中国科学: 地球科学, 41 (5): 583-592.

朱思雨, 丰成君, 谭成轩, 等, 2022. 雄安容城深热储层回灌注水诱发断层失稳危险性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 41 (S1): 2735-2756.