

引用格式: 毛佳睿, 马秀敏, 孙尧, 等, 2023. 地应力作用下鸭绿江断裂带活动对丹东五龙背地热温泉的影响初析 [J]. 地质力学学报, 29 (3): 402–416. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232909](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232909)

Citation: MAO J R, MA X M, SUN Y, et al., 2023. Preliminary analysis of the influence of the activity in the Yalu River fault zone on the Wulongbei geothermal hot springs in Dandong under the action of crustal stress [J]. Journal of Geomechanics, 29 (3): 402–416. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232909](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232909)

地应力作用下鸭绿江断裂带活动对丹东五龙背地热温泉的影响初析

毛佳睿^{1,2,3}, 马秀敏^{1,2,3,4}, 孙尧^{1,2,3}, 姜景捷^{1,2,3}, 张文汇^{1,5}
MAO Jiarui^{1,2,3}, MA Xiumin^{1,2,3,4}, SUN Yao^{1,2,3}, JIANG Jingjie^{1,2,3}, ZHANG Wenhui^{1,5}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 自然资源部北京地壳应力应变野外科学观测研究站, 北京 100081;
3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
4. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;
5. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Observation and Research Station of Crustal Stress and Strain in Beijing, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
3. *Key Laboratory of In-situ Stress Measurement and Monitoring, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*
4. *School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*
5. *School of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China*

Preliminary analysis of the influence of the activity in the Yalu River fault zone on the Wulongbei geothermal hot springs in Dandong under the action of crustal stress

Abstract: The Yalu River fault zone is an essential branch of the Tanlu fault system with intense present-day tectonic activity. Over 60 hot springs are exposed along the fault zone with abundant geothermal resources. In order to find out the present-day crustal stress state and fault activity in the Wulongbei area of the southern section of the fault zone and to study the control and long-term influence of the fault activity on the geothermal water bodies of hot springs, in-situ stress measurements of 12 sections were carried out in the area by hydraulic fracturing method. The results showed that the maximum and minimum horizontal principal stresses (S_H and S_h) range from 6.00 to 13.52 MPa and 3.18 to 7.26 MPa, respectively, in the depth range of 36.80–215.50 meters. In general, the three principal stresses showed an increasing trend with depth; in the middle section of the fracture zone (198.60–207.80 m), the three principal stress values meet the relation of $S_H > S_v > S_h$, which is favorable to the strike-slip activity and has some potential for water-rich hydraulic conductivity, while the three principal stress values of the upper section (36.80–196.63 m) and lower section (215.50 m) accord with $S_H > S_h > S_v$, which is favorable to the reverse fault activity, with poor longitudinal continuity of heat flow channels and poor

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20230249, DD20230014, DD20190546); 中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费 (DZLXJK202106)

This research is financially supported by the China Geological Survey Projects (Grants DD20230249, DD20230014 and DD20190546) and the Basic Scientific Research Fund of the Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences (Grant DZLXJK202106).

第一作者: 毛佳睿 (1992—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事区域地壳稳定性评价、工程地质与地质灾害等研究工作。

E-mail: 547799801@qq.com

通讯作者: 马秀敏 (1978—), 男, 在读博士, 教授级高工, 主要从事地应力测量及监测、地壳稳定性调查评价等研究工作。

E-mail: maxinmin2@163.com

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-04-30; 责任编辑: 王婧

hydraulic conductivity. Based on the present-day relationship between stress field characteristics and fault activity, it is deduced that the decline of the hot spring level in the Wulongbei area may be due to the fault activity under compressive stress, which gradually reduced the space of the hydraulic conductivity system by extrusion, causing the increase of discharge of runoff in other directions and the reduction of hot spring water supply. Based on the Coulomb frictional instability theory, the in-situ stress value in the depth range of 36.80–113.20 m in the fault zone reaches the lower limit of the critical stress value required for its activity. There is a possibility of dislocation in the future, and the fault activity may change the hot spring geothermal water supply channel. The research results have theoretical significance in studying the role of faults in controlling hot spring geothermal water and applying in-situ stress measurements near fault zones in geothermal research.

Keywords: Yalu River fault zone; in-situ stress measurements by hydraulic fracturing method; crustal stress state; geothermal hot spring; fault activity

摘要: 鸭绿江断裂带为郯庐断裂系的重要分支, 现今构造活动强烈, 沿断裂带出露温泉 60 余处, 地热资源丰富。为查明断裂带南段五龙背地区的现今地应力状态和断层的活动性, 研究断裂活动对温泉地热体的控制作用和远期影响, 采用水压致裂法对该区开展了 12 个测段的原位地应力测量。测量结果显示, 在测段深度 36.80~215.50 m 范围内, 最大、最小水平主应力及垂直主应力值 (S_H 、 S_h 、 S_v) 分别为 6.00~13.52 MPa、3.18~7.26 MPa 和 0.97~5.7 MPa, 总体而言, 3 个主应力值呈现随深度的增加而逐渐增大的趋势, 最大水平主应力方向以北东向为主; 断裂带中段 (198.60~207.80 m), 主应力关系为 $S_H > S_v > S_h$, 有利于走滑型活动, 具有一定潜力的富水导水条件, 断裂带上段 (36.80~196.63 m) 及下段 (215.50 m), $S_H > S_h > S_v$, 有利于逆断层活动, 热流通道纵向连续性欠佳, 导水条件较差; 根据现今应力场特征与断裂活动的关系推演, 五龙背地区温泉水位下降可能是因为断裂在压应力作用下活动, 导水系统空间受挤压逐渐缩小, 其他方向径流排泄增多, 导致温泉水源供给减少; 基于库仑摩擦失稳理论, 断裂带 36.80~113.20 m 深度范围内的地应力值达到了其活动需要的应力临界值下限, 将来有可能发生错断活动, 温泉地热体的补给通道可能受到断裂活动的影响而发生改变。研究成果在断裂对温泉地热体控制作用研究方面具有一定的理论意义, 并积极探索了断裂带附近地应力测量在地热研究领域中的应用思路。

关键词: 鸭绿江断裂带; 水压致裂地应力测量; 地应力状态; 地热温泉; 断层活动性

中图分类号: P315.72+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 03-0402-15

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20232909

0 引言

鸭绿江是中朝两国的界河, 沿江发育的鸭绿江断裂带是郯庐断裂系中的一个重要分支断裂, 由数条相互平行的断裂构成(张国仁等, 2006)。鸭绿江断裂带是中朝边境地区地震活动控制构造带, 历史上在鸭绿江口发生过 2 次 $M 6.0$ 级以上地震, 现今构造活动仍较为强烈。断裂带附近有 60 余处温泉出露, 地热资源十分丰富(孙焕朝, 2018)。位于断裂带附近的丹东地区, 地热温泉分布广、水质好, 开发利用时间较早, 该区著名的五龙背温泉已有一千多年的历史。然而, 五龙背地区现有温泉井 28 眼, 其中有 10 眼已经报废, 自 20 世纪 80 年代起, 温泉热水水位下降, 多处自涌温泉不再涌水, 需要人工抽水储存(宋文明, 2016)。地热温泉水资源是辽东

地区隆起储热区的一部分, 原为丹东市的优势资源之一, 现已探明其受北东向深部断裂构造影响(常婧莹, 2014), 但应力场作用下的断裂构造活动对温泉地热体的控制作用仍有待研究。

地应力状态是地球动力学研究的基本内容之一, 是影响和控制断层活动的直接力源(王连捷等, 1991; 谭成轩等, 2007, 2019; 孙叶等, 2012; 王成虎, 2020), 而断层对地热系统有着重要的控制作用, 是热源和水源的双向通道。断裂带深度大, 可以更好地沟通热源和水源, 有利于形成温度更高的水热型地热系统; 断裂带宽度大, 可以形成更大体积的水热对流通道的热储层, 有利于形成规模更大的地热系统(庞忠和等, 2020)。地壳浅表层变形和内部构造活动及其由此导致的地热资源赋存运移状态的改变均与地壳应力状态密切相关。以往有关鸭绿

江断裂带的研究,主要集中在鸭绿江断裂带运动形式(刘如琦等, 2006; 张岳桥和董树文, 2008; 肖世椰等, 2018)、构造演化(张国仁等, 2006; 潘明臣, 2016)及其分段性特征(夏怀宽, 1993; 孙晓辉等, 2010)等方面,缺少对断裂带内部实测地应力资料的分析,更鲜有对现今地应力状态、应力场作用下断层活动对温泉影响的研究。尽管学者们从不同角度对温泉形成进行了研究,但主要针对地热的类型(Reed, 1982, 1983; 陈墨香等, 1996)、分布(马晓东等, 2014; 闫佰忠, 2016; 拓明明等, 2018, 张云辉, 2018)、补给和循环(White, 1968; Uzelli et al., 2017; Massiot et al., 2017; 王洁青等, 2017; 张晗彬等, 2018; 任宪军, 2018)水化学特征(Cuoco et al., 2017; 陈鹏, 2018; 郭宁等, 2019; 王源, 2020)等方面,对于影响地热水体运移的构造条件,特别是基于地应力背景从断层活动对温泉区导水构造的影响方面认识尚为欠缺。基于此,文章通过在鸭绿江断裂带南段开展地应力测量,获取了原位地应力实测值,为查明鸭绿江断裂带现今地应力状态、活动特征及其潜在发展趋势,分析断裂活动对温泉地热水体的控制作用提供了动力学依据。

1 研究区概况

1.1 区域地质背景

鸭绿江断裂带整体走向 NE 45°~NE 50°,全长约 900 km,宽 10~30 km,由数条相互平行的断裂构成,主干断裂基本上被江道占据,在中国一侧沿丹东、接梨树、四道沟、古楼子、拉古哨、腰岭子、绿江村等地出露,向北经黑龙江省进入俄罗斯境内,向南跨北黄海与山东境内的阜平-即墨断裂相连(张国仁等, 2006),是中国东北地区的大型断裂带之一(Xu et al., 1987; 董南庭等, 1989)。该断裂带位于辽东-狼林隆起带中,将地块一分为二,东侧为狼林地块,西侧为辽吉裂谷带,自南向北穿过龙岗地块(图 1)。断裂带控制了一系列伸展盆地的发育,自南西向北东分别有丹东盆地、古楼子盆地、蜚场沟盆地、绿江村盆地、凉水盆地、麻线沟盆地以及集安盆地(夏怀宽和许东满, 1993; Liu et al., 2011)。断裂切割了太古界、元古界和中生界,但主要是错切了中生界和中生代岩浆岩,并控制了中生代断陷盆地的形成和新生代玄武岩浆的喷溢活动,断裂在长期的发

育过程中力学性质多次发生变化,但总体上以压扭性质为主(Wang et al., 2003; 朱光等, 2003; 胡惟等, 2013; 严乐佳等, 2014; Liu et al., 2015; Gu et al., 2017)。第四纪以来,鸭绿江断裂带一直处于活动状态,控制着 300 km 的鸭绿江河道,沿断裂带发育着断层陡崖,其中以鸭绿江断裂南段东、西支断裂的活动性尤为清楚。该断裂带沿线,近代多次发生过 M_s 5~6 级以上地震(钟以章等, 2012; 万波等, 2013),强度最大的是 1944 年在鸭绿江口发生的 M_s 6.75 级地震(夏怀宽和许东满, 1993)。

1.2 温泉地热情况

温泉是一种由地下自然涌出的水温高于当地年平均气温的泉水。由于分支断裂的发育和地壳结构的破碎,地表水渗入地下,在深部热源区加热后,沿断裂或相应通道上升至地表,从而形成温泉(蔺文静等, 2013; 董月霞等, 2021; 屈泽伟等, 2021)。

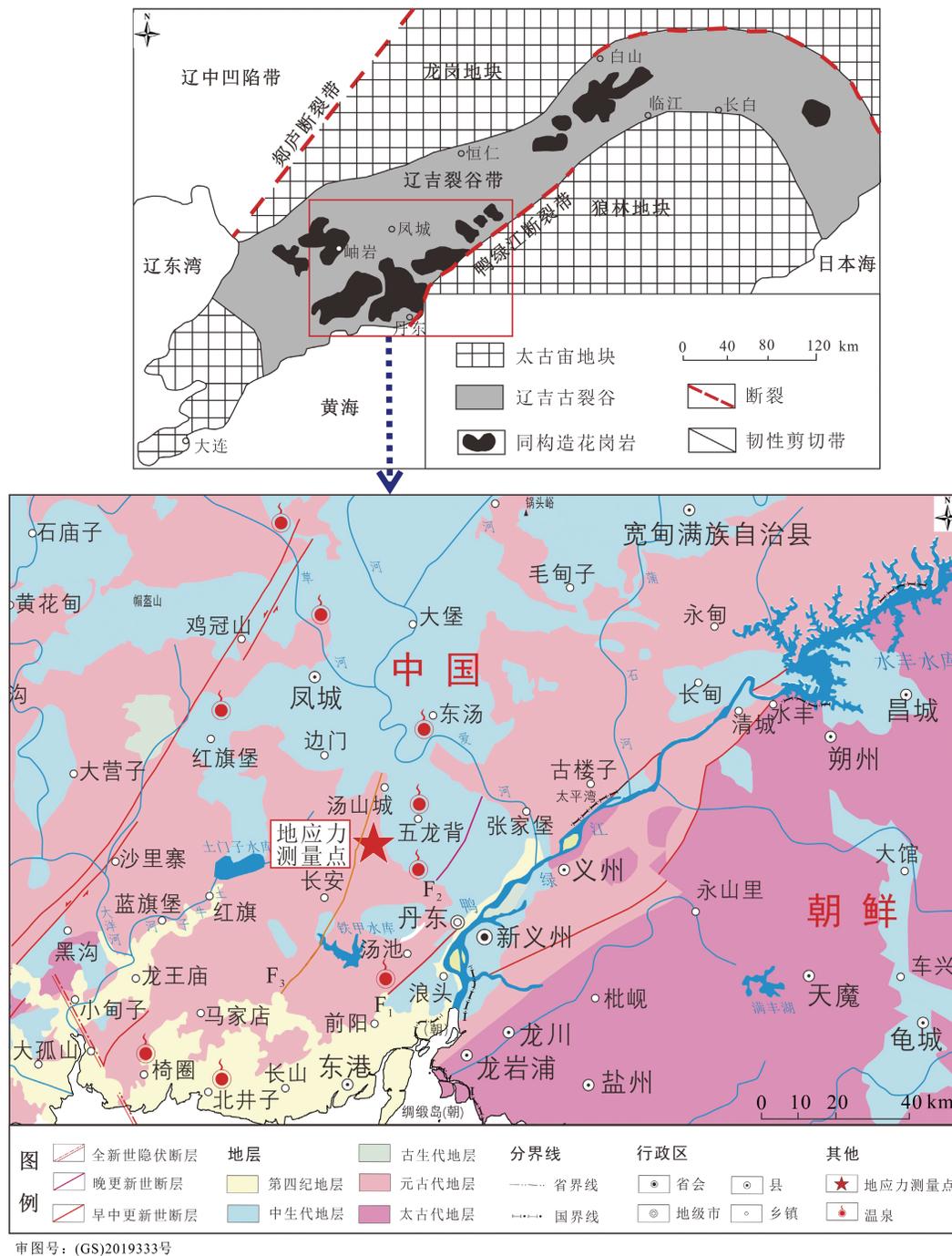
鸭绿江断裂带长期的构造活动造就了现今的线性地貌特征,其邻区以山地和丘陵为主,境内有丰富的水资源,沿断裂带或于断裂构造的交汇处常有温泉出露,发育模式以基岩裂隙水为主,如辽阳附近的千山、汤岗子温泉,岫岩的宝山汤池、仙人咀温泉,凤城山东沟、东汤温泉,以及丹东附近的五龙背、炮守营温泉等(图 2)。其中,丹东地区已知温泉数占全省温泉总数的五分之一,是我国地热资源十分丰富的地区(孙焕朝, 2018),其自然流量位居全省第三,主要温泉出露情况见表 1。

2 鸭绿江断裂带原位地应力测量

为探明鸭绿江断裂带现今活动特征及其潜在的活动发展趋势,进而综合分析地应力控制下的断裂带活动对邻区的温泉水体运移及储量变化的影响,通过实地调查地形地貌、地层岩性及活动构造,在辽宁省丹东市振安区五龙背镇开展了水压致裂法原位地应力测量。该地应力钻孔(124.2397°E, 40.2596°N, 孔深: 235 m)位于鸭绿江断裂带与桓仁-庄河断裂带之间,距丹东市约 20 km,距鸭绿江直线距离约 10 km(图 1)。综合地应力监测探头安装深度 234.5 m,钻孔所在场地较为平整,基础稳定性相对较好。

2.1 地应力测量结果

根据水压致裂地应力测量条件,结合钻孔地质



F₁—鸭绿江断裂带; F₂—蚂蚁岭—五龙背断裂; F₃—黄土坎—大堡断裂

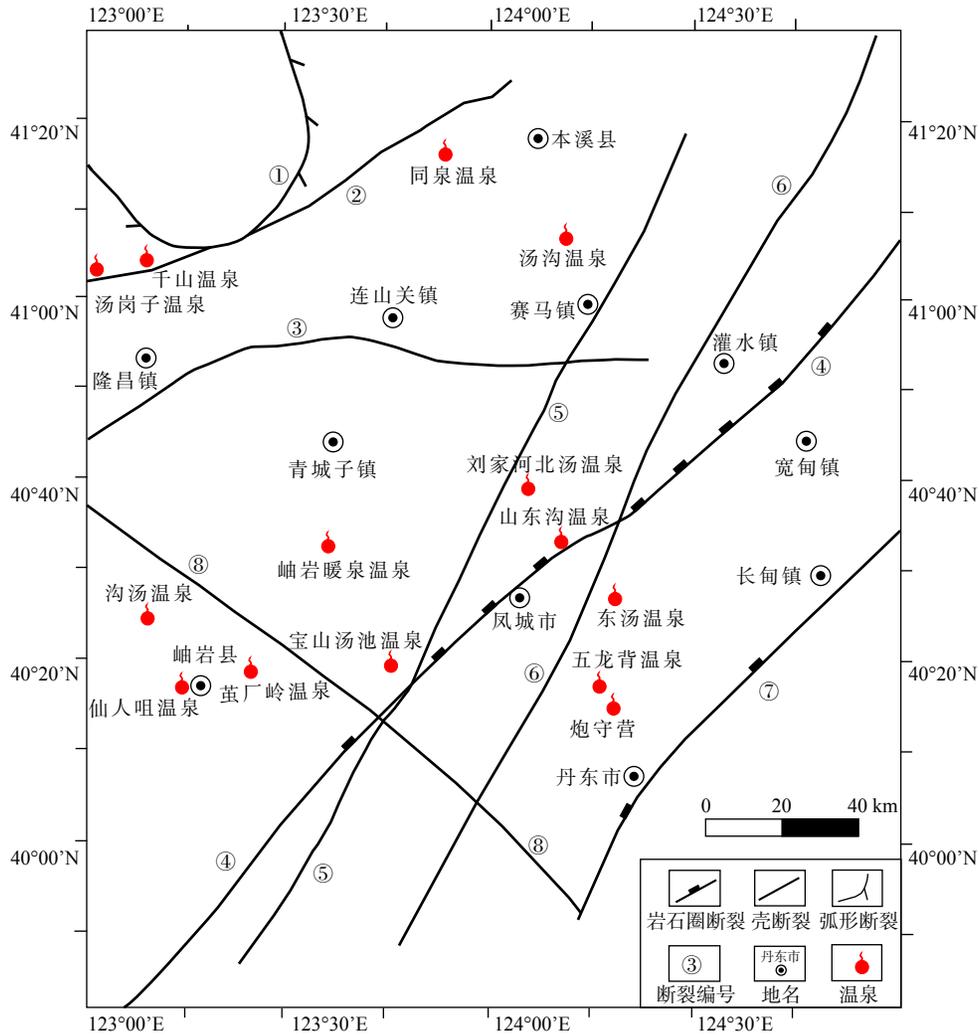
图 1 研究区地理位置及地质构造简图

Fig. 1 Geographical location and tectonic diagram of the study area

F₁—Yalu River fault zone; F₂—Mayiling-Wulongbei fault; F₃—Huangtukan-Dabao fault

编录、节理裂隙统计、钻探岩芯的岩石质量指标 (RQD) 以及岩石的力学性质等, 进行了系统的地应力测量, 成功获取了 12 段压裂测试曲线 (图 3)。根据压裂测试曲线的初步分析, 考虑测量结果随深度分布的合理性和科学性, 选取了 3 个压裂峰值明

显的压裂段进行印模定向, 以确定钻孔附近地壳浅表层现今最大水平主应力方向, 典型深度段水压致裂测量曲线与测试结果见图 3 和表 2。从获得的压裂曲线来看, 12 个测段均符合标准的压裂特征, 其压力-时间记录连续、关系明确, 破裂压力峰值明显,



①—辽阳弧形断裂；②—寒岭—偏岭断裂带；③—海城—草河口断裂带；④—庄河—桓仁断裂带；⑤—刘家河—青堆子断裂带；⑥—四平街—凤城断裂带；⑦—鸭绿江断裂带；⑧—海城析木城—岫岩断裂带

图2 主要断裂构造与温泉发育关系图 (据李文庆, 2015 修改)

Fig. 2 Map showing the relationship between main faults and hot springs (modified from Li, 2015)

①—Liaoyang arc-shaped fault; ②—Hanling–Pianling fault zone; ③—Haicheng–Caohekou fault zone; ④—Zhuanghe–Huanren fault zone; ⑤—Liujiage–Qingduizi fault zone; ⑥—Sipingjie–Fengcheng fault zone; ⑦—Yalu River fault zone; ⑧—Haichengximucheng–Xiuyan fault zone

各个重张循环可重复性很强,且具有良好的 consistency。

根据水压致裂法地应力测量基本原理,测段(压裂段)受到水力压裂而产生的破裂面走向就是最大水平主应力方向。为确定该孔具有代表性的测段主应力方向,通过分析压裂曲线特征,选出了 36.80 m、159.70 m 和 215.50 m 测段完成了印模定向(图 4)。定向结果表明,各测段最大水平主应力方向分别为 NE 58.94°, NE 80.53°和 NE 77.78°,测区最大主应力方向以东北东向为主。

2.2 主应力大小随深度变化规律

虽然地应力大小在钻孔的不同深度并不一致,但整体上看,地应力数据的水平应力大小相差不

大。为了便于对不同深度处的地应力数据进行对比,将 12 个测段的主应力测值进行线性回归,得到钻孔最大水平主应力(S_H)、最小水平主应力(S_h)线性回归方程(公式 1, 公式 2):

$$S_H = 0.022H + 6.70 \quad R^2 = 0.7981 \quad (1)$$

$$S_h = 0.016H + 3.26 \quad R^2 = 0.8135 \quad (2)$$

其中, H —钻孔深度(向下为正), m; R^2 —回归相关系数; S_h 、 S_H , MPa。

从主应力随深度变化趋势可知,整体上而言,测试深度内测段主应力表现出随深度增加而逐渐增大的趋势,局部(144.70~198.60 m)应力值随深度增加出现减小的趋势(图 5)。

表 1 鸭绿江断裂带温泉状况

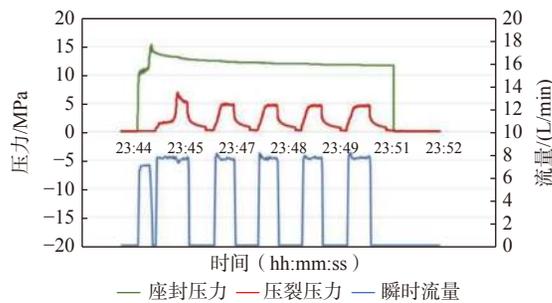
Table 1 List of hot springs in the Yalu River fault zone

温泉名称	出露位置	采水量/(m ³ ·d ⁻¹)	水温/℃	温泉井数(利用数/总数)
五龙背	振安区五龙背镇	2300	72	13/19
炮守营	元宝区炮守营村	700	53	4/4
东汤	凤城市东汤镇	2400	73	2/2
草河	凤城市草河经济区	580	40	0/6
宝山	凤城市宝山镇	120	46	1/1
北汤	凤城市刘家河镇	/	45	1/2
汤池子	东港市汤池镇	/	38	1/2
北井子	东港市北井子镇	240	53	1/1
椅圈	东港市椅圈镇	200	71	3/3
合计	/	6990	/	26/39

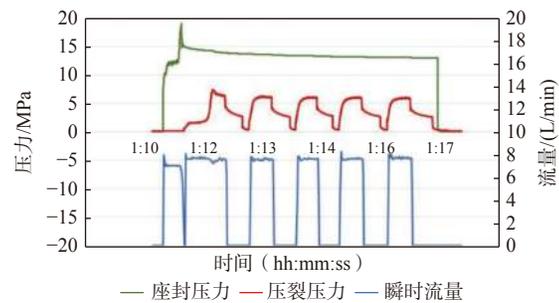
3 鸭绿江断裂带构造活动对温泉的控制作用

断裂构造既是热储层的重要热力通道, 又是地

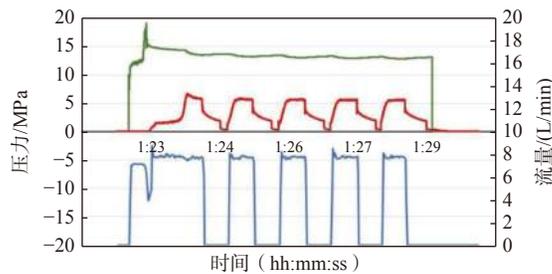
下水的重要补给通道, 对温泉分布具有明显的控制作用(罗来麟, 1994; 李学伦等, 1997; 程先锋等, 2008)。岩体热储来源于刚性结晶基底对地壳深部(上地幔)热的传导作用, 深大断裂则是地下热源上涌的主要通道, 张性断裂为导水通道, 压扭性断裂



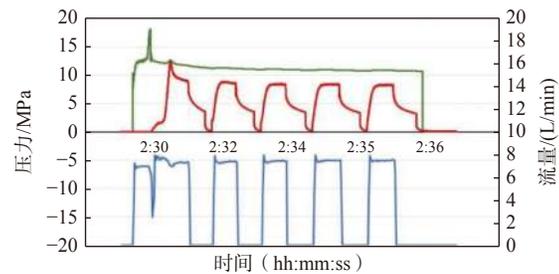
(a) 第 1 段压裂曲线 (36.80~37.60 m)



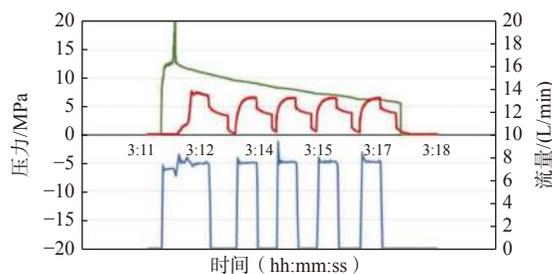
(b) 第 2 段压裂曲线 (86.88~87.68 m)



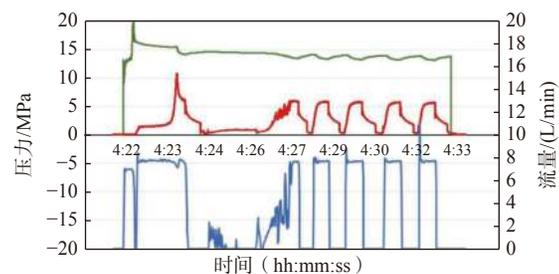
(c) 第 3 段压裂曲线 (92.22~93.02 m)



(d) 第 4 段压裂曲线 (101.68~102.48 m)



(e) 第 5 段压裂曲线 (113.20~114.00 m)



(f) 第 6 段压裂曲线 (132.85~133.65 m)

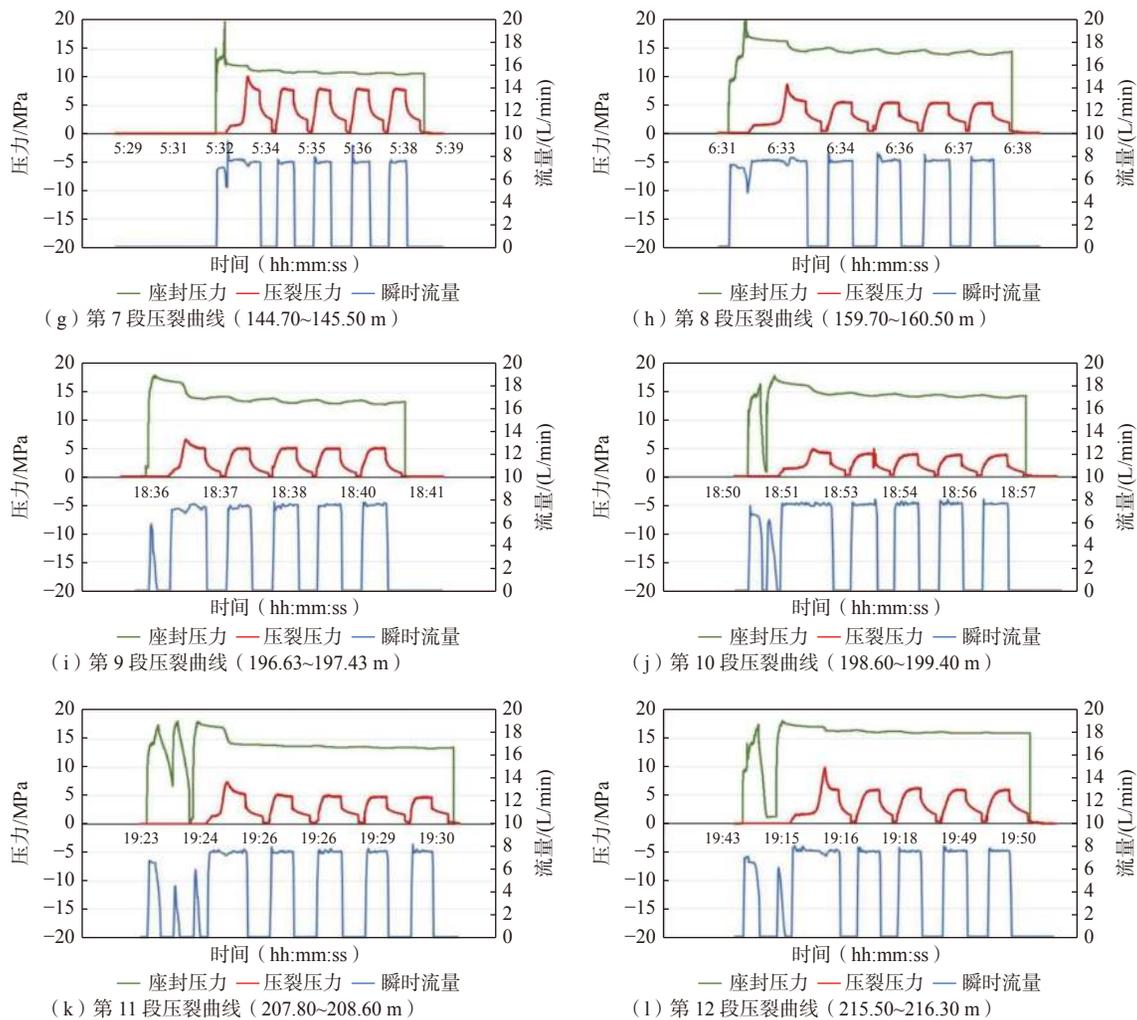


图3 地应力钻孔各测量段水压致裂曲线特征线特征

Fig.3 Curves of in-situ stress measured by hydraulic fracturing method in the test borehole

表2 地应力钻孔水压致裂地应力测量结果

Table 2 Results of the in-situ stress measured by hydraulic fracturing method in the test borehole

测段深度/m	破裂压力 P_b /MPa	重张压力 P_r /MPa	瞬时关系压力 P_f /MPa	抗拉强度 T /MPa	孔隙水压力 P_p /MPa	最大水平主应力 S_{H1} /MPa	最小水平主应力 S_{H2} /MPa	垂直主应力 S_v /MPa	最大主应力方向
36.80	7.01	4.42	2.82	2.59	0.36	6.00	3.18	0.97	NE 58.94°
86.88	7.39	5.58	4.22	1.81	0.85	9.29	5.07	2.30	
92.22	6.73	5.45	3.87	1.28	0.90	8.64	4.77	2.44	
101.68	12.51	8.08	6.26	4.43	1.00	13.52	7.26	2.69	
113.20	7.83	6.16	4.91	1.67	1.11	10.93	6.02	3.00	
132.85	10.98	5.61	3.85	5.37	1.30	9.00	5.15	3.52	
144.70	12.40	8.92	5.49	3.48	1.42	12.40	6.91	3.83	
159.70	8.74	5.07	3.68	3.67	1.57	8.93	5.25	4.23	NE 80.53°
196.63	6.68	4.88	3.33	1.80	1.93	8.59	5.26	5.20	
198.60	5.01	3.66	2.21	1.35	1.95	6.37	4.16	5.25	
207.80	7.57	4.63	2.95	2.94	2.04	7.94	4.99	5.50	
215.50	9.91	5.78	4.24	4.13	2.11	10.59	6.35	5.70	NE 77.78°

注: 地应力测量孔静水位5.63 m

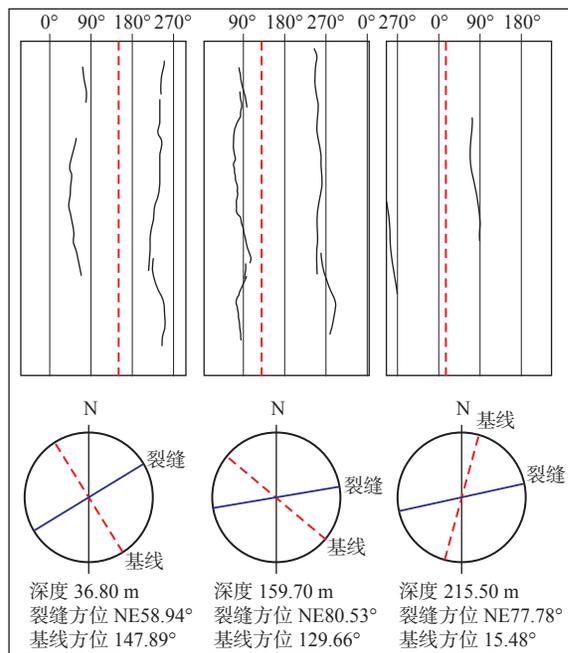


图 4 地应钻孔印模定向结果

Fig. 4 The impression orientation results in the test borehole

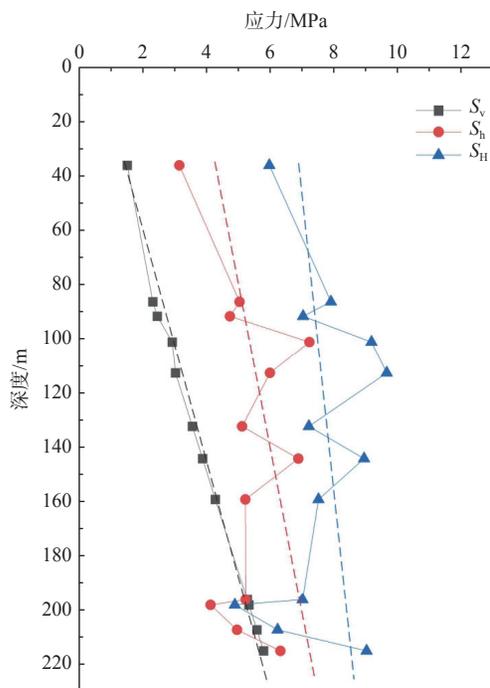


图 5 地应力钻孔主应力大小随深度分布

Fig. 5 Distribution graph showing the borehole stress with depth

具有一定的阻水作用, 控制着地热水体的边界(易世友, 2016; 范艳霞等, 2022)。大气降水和地表河流补给的地下水在沿着断层破碎带及岩石裂隙带径流过程中, 与地下热源进行了充分的热交换后形成温泉, 而位于花岗岩岩体之上的新近纪和第四纪地层是隔水层和保温盖层, 使热能得以保存和聚集

(张献文等, 2022)。

研究区的温泉出露点主要集中在鸭绿江断裂带西侧, 现已探明五龙背地区温泉是受深部断裂构造控制的“深循环型热水”(李良振, 2020), 全部地热水资源属于断裂型(常婧莹, 2014), 数量庞大的中生代花岗岩岩体作为热储岩石提供了相对稳定可靠的热源(李文庆, 2015; 李天舒等, 2020; 钟振楠等, 2021)。另外, 五龙背地区属脉状承压水, 其补给区并非在当地, 而是接受了区域大面积大气降水补给, 沿着某些裂隙、断裂进行了远距离运移(张作佳, 1985)。因此, 研究区温泉的水温和水量受断裂构造的直接控制。

3.1 鸭绿江断裂带现今活动特征对温泉的影响

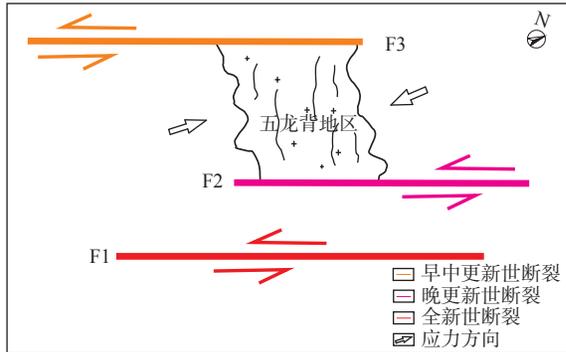
3.1.1 现今应力场对断裂的控制作用

断裂活动是岩石内部应力聚集达到一定程度后, 岩石突然发生变形、破坏的外在表现。地应力状态与断层活动性之间存在着密切的联系(杜建军等, 2013)。地应力大小受岩石完整程度、地形地貌、局部构造的影响差异性较大。同一孔内, 在完整孔段, 地应力值较高, 在节理、裂隙发育孔段地应力值较低(彭华等, 2011; 师修昌等, 2014)。Anderson 断层理论表明, 当最大、最小和垂直 3 个主应力的关系分别为 $S_{H1} > S_{H2} > S_v$ 、 $S_{H1} > S_v > S_{H2}$ 和 $S_v > S_{H1} > S_{H2}$ 时, 对应的主应力关系有利于逆断层、走滑断层和正断层活动(Anderson, 1951)。

由鸭绿江断裂带地应力钻孔的 12 段压裂和 3 段印模的地应力测量数据可知: 钻孔地应力测段深度 36.80~215.50 m, 最大水平主应力值为 6.00~13.52 MPa, 最小水平主应力值为 3.18~7.26 MPa, 主应力大小之间的关系为 $S_{H1} > S_{H2} > S_v$ 。从主应力大小随深度的变化曲线可以看出, 在深度 100 m、150 m 处出现了明显的应力集中现象, 其中在 36.80~196.63 m 深度范围内, 三个主应力关系为 $S_{H1} > S_{H2} > S_v$, 有利于逆断层活动; 孔深 198.60~207.80 m 范围内, 表现为 $S_{H1} > S_v > S_{H2}$, 表明该层位的应力结构属于走滑型; 孔深 215.50 m 处, 主应力则表现为 $S_{H1} > S_{H2} > S_v$, 属于逆断层应力状态, 有利于逆断层活动。

因鸭绿江断裂带处于长期活动状态, 伴随不同地质时期应力场的改变, 断裂带的力学性质也发生相应的变化。在现今应力场作用下, 鸭绿江断裂带(F_1)具有左行走滑活动特点, 其西侧相邻的蚂蚁岭-五龙背断裂(F_2)也表现为左行走滑活动, 黄土坎-大堡断裂(F_3)为右行走滑活动(张国仁等, 2006; 李

吉焱等, 2013; 张帅, 2019)。位于鸭绿江断裂带西侧的五龙背温泉区在区域应力场控制下的断层活动中, 处于压应力状态(图6)。



F1—鸭绿江断裂带; F2—蚂蚁岭—五龙背断裂; F3—黄土坎—大堡断裂

图6 丹东五龙背温泉区断裂活动概化图

Fig. 6 Schematic diagram showing the fault activities in the Wulongbei hot spring area

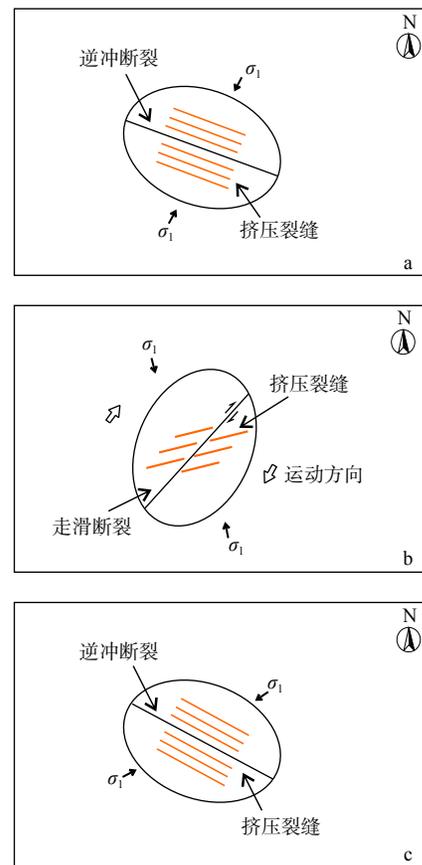
F1—Yalu River fault zone; F2—Mayiling—Wulongbei fault; F3—Huangtukan—Dabao fault

3.1.2 断裂活动特征对温泉的控制作用

由现今实测地应力值可知, 鸭绿江断裂带的构造应力状态在深度上具有明显的分段性, 导致上下构造变形发生一定程度的解耦(图7)。断裂带上段(36.80~196.63 m)为逆冲力学性质, 呈叠瓦状近似平行排列, 多表现为压性。断层之间发育褶皱, 虽具有一定的走滑分量, 增加了降雨补给的可能性, 但逆冲断构造导致地热储层的纵向连续性较差, 同时将潜在的盖层切割, 使得水热型地热系统的储层和盖层条件较差, 进而导致地层岩性和断裂的渗透性变差(图7a); 断裂的中段(198.60~207.80 m)为走滑力学性质, 使该断裂在相应深度具备裂隙型地下水运移的条件, 且能够在深部汇聚收敛, 不同程度上成为地下水补给和储存空间, 为温泉热水的供给创造一定的条件(图7b); 其下段(215.50 m), 仍为逆冲断层应力结构, 不利于水热型地热系统形成(图7c)。综上, 鸭绿江断裂带及其邻区现今裂隙型热储在东北向走滑断裂上存在一定的潜力, 而东北向逆冲型应力结构导致地层的导水导热条件较差。

3.1.3 断裂控制作用下温泉水位下降分析

鸭绿江断裂带附近著名的丹东五龙背温泉已有一千多年的历史, 如今却发生了很大变化。五龙背温泉区现有温泉井28眼, 其中10眼已报废, 可正常使用13眼, 备用5眼, 年开采能力为 $76 \times 10^4 \sim 100 \times 10^4$ 吨, 温泉水的自给量为 $80 \times 10^4 \sim 90 \times 10^4$ 吨(常婧莹,



σ_1 —最大水平主应力

a—上部 36.80~196.63 m; b—中部 198.60~207.80 m; c—下部 215.50 m

图7 鸭绿江断裂带及其邻区构造应力场随深度变化
Fig. 7 Diagram showing the tectonic stress field of the Yalu River fault zone with depth

(a) Upper part (36.80–196.63 m); (b) Middle part (198.60–207.80 m); (c) Lower part (215.50 m)

σ_1 —the maximum horizontal stress

2014)。20世纪80年代, 五龙背温泉水仍处于地表自涌状态; 21世纪初, 地热区温泉水位下降, 如今枯水期温泉水位降至29 m, 原来的自涌温泉不再涌水, 需要依赖人工抽水储存利用。通过人工干预, 五龙背地区的温泉水位基本处于14 m左右(于正兵和宋振坤, 2007)。据温泉资源现状分析, 温泉水位下降与当地热水的过量开采和缺少回灌有直接关系。但是, 有数据显示, 1990年的温泉水年开采量是 $76 \times 10^4 \text{ m}^3$, 2003年的年开采量是 $59 \times 10^4 \text{ m}^3$, 虽然2003年的年开采量已降低了 $17 \times 10^4 \text{ m}^3$, 但是却与1990年的月平均静水位过程线的变化几乎重合(孙境姝和邓力实, 2008)。究其原因, 开采当地热水不是温泉水位下降的唯一诱发因素, 推测还可能是断裂活动对温泉区储热导水条件进行了改造, 断裂活动导致地

热水资源流失、热流体运移通道受阻所致。

根据钻孔揭露地层资料,五龙背温泉区主要热储由花岗岩裂隙网络构成,盖层为第四系松散沉积层,岩性主要为亚黏土和亚砂土。地热水在山区接收大气降水入渗补给,推测补给区为研究区北东方向 80~120 km 处的丘陵和山区,补给高程为 376~678 m,降水入渗后沿导水断裂向地下深处运移,循环深度为 800~3000 m(杨峰田等, 2022)。降雨在流动过程中被大地热流逐渐加热,在构造破碎带交汇部位直接上涌,进入浅部第四系含水层或出露地表形成温泉。鸭绿江断裂带主要的热源通道为 F_1 断裂,其地表浅层段为补水型断裂,为降雨入渗提供通道;下段为阻水型断裂,下盘富水(李文庆, 2015; 图 8)。根据上述现今应力场特征与断裂活动的关系,结合区域应力场分布特征,分析鸭绿江断裂带的早期活动对温泉水位的影响:最初,地下水源穿过二长花岗岩层升温后可运移至地表,形成温泉出露点,但因该段逆断层活动,使其上盘上升,错断了热源的运输通道,造成温泉水源的供给不连续;另外,逆冲断裂的挤压作用使断层两盘间的裂隙受到挤压应力影响,导热系统空间逐渐缩小、储热条件变差。 F_2 为鸭绿江断裂西侧一近平行的断裂,为排水型断裂,呈左旋走滑运动,虽具备裂隙型地下水补给径流和储存条件,但其东北方向的延伸段次级断裂使花岗岩体受多期拉张应力改造,节理裂隙发育,为热水排泄提供了空间,具有排水、散热双重作用,分散了原本集中的地热水源(图 8)。因此,推测 21 世纪初,鸭绿江断裂带处于压应力背景下,断层两盘间的裂隙受到挤压应力影响被压缩,储热条件变差,导热系统空间逐渐缩小,当遇到阻水断裂时,遂向其他方向径流排泄,进而造成温泉水源供给减少,断裂带邻区的温泉水位下降,甚至不再自涌。

3.2 鸭绿江断裂带活动性对温泉的远期影响

由于鸭绿江断裂带区域性构造活动控制着温泉地热水体储量的展布,控制了热储盖层组合的多样性和差异性,并将对该区域今后的导热、控水通道进行不同程度的改造,所以通过分析鸭绿江断裂的活动性,可研判断裂活动对温泉地热水体补给及运移通道等因素的影响,以更好地服务地热温泉资源的开发利用(郎旭娟等, 2017; 哇华生等, 2019; 李天舒等, 2020; 钟振楠等, 2021)。

断层活动性受其所处的应力状态控制,依据库仑准则,如果断层面上的剪应力等于或大于断层面

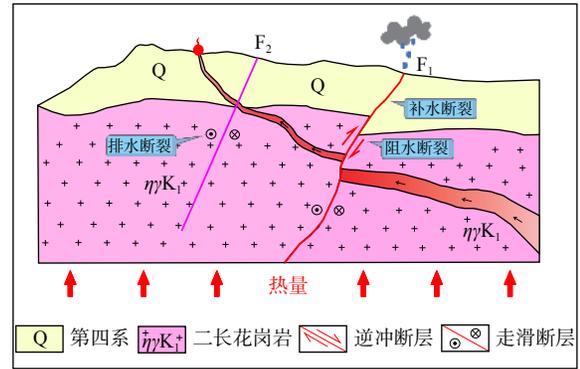


图 8 鸭绿江断裂带对温泉水位控制作用概念模型
Fig. 8 Conceptual model of the control effect of the Yalu River fault zone on the water level of the hot springs

上的滑动摩擦阻力时,断层将会发生滑动,如下关系式成立(Zoback and Healy, 1992; Jaeger et al., 2007; Zoback, 2007):

$$\tau \geq \tau_0 + \mu \sigma_n \quad (3)$$

式中: τ 为断层面上的剪应力; τ_0 为初始剪应力; μ 为摩擦系数(由试验确定); σ_n 为断层面上的正应力; $\mu \sigma_n$ 为断层面上的滑动摩擦阻力。

Zoback 和 Townend(2001)分析了大量的地应力实测资料后,认为地壳浅部应力状态是受断裂活动影响,其强度的极限状态可用库仑摩擦滑动准则来描述;同时,指出在使用库仑摩擦滑动准则时,黏聚力可以忽略,并引入有效应力的概念,用主应力转换了库仑准则(Zoback, 1992; 秦向辉等, 2013; 陈群策等, 2014; 李彬等 2022)。最大有效主应力(σ_1)与最小有效主应力(σ_3)之比与摩擦系数 μ 满足下列关系:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_1 - P}{S_3 - P} = [(1 + \mu)^{\frac{1}{2}} + \mu]^2 \quad (4)$$

式中: S_1 、 S_3 —断层面最大与最小主应力; P —孔隙水压力。如果公式(4)左边小于右边,说明断层面稳定。反之,断层面可能沿其法线方向与最大主应力夹角为 φ 的面发生错动,且 φ 与 μ 满足关系:

$$\varphi = \left(\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \mu \right) / 2 \quad (5)$$

Byerlee (1978) 认为当应力值不大于 100 MPa 时,断层面上的剪应力与正应力比值 μ 为 0.85。苏恺之等(1996)认为在应力值为 150~250 MPa 时,岩石摩擦系数 μ 的上限为 1.10,下限 0.65,平均为 0.85,即 μ 取 0.6~1.0 是合理的,该摩擦系数可以近似代表浅部断层面上的滑动摩擦系数。

对于逆断层,取 $S_1 = S_H$ 、 $S_3 = S_v$, 分别将 μ 取值

0.6、1.0代入公式(4)计算得到逆断层活动时最大水平主应力临界值的下限和上限分别为3.12和5.83。若将 $S_{\mu}=0.6$ 曲线, $S_{\mu}=1.0$ 曲线以及地应力3个特征分量曲线绘制于同一坐标系中,即可进行断层活动性分析,如果 S_H 值落入 $S_{\mu}=0.6$ 和 $S_{\mu}=1.0$ 之间的临界值范围内,那么断层在方位合适的面上可能发生逆断层活动,否则断层不会发生逆断层活动(Byerlee, 1978; 苏恺之等, 1996),将计算结果绘制成图(图9)。

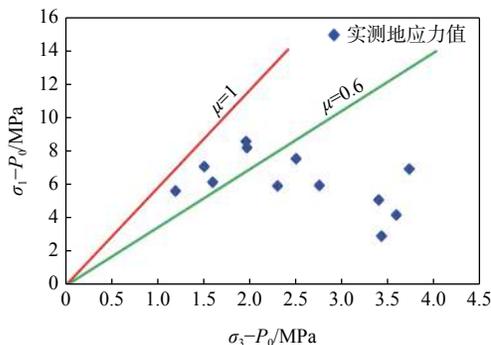


图9 库仑摩擦滑动准则评价结果和断层应力状态分析

Fig. 9 Graph displaying evaluation results of Coulomb friction sliding criterion and stress state analysis of the fault

基于库仑摩擦失稳理论和拜尔利定律对图9进行分析,深度132.85 m 以下的地应力水平低于拜尔利定律给出的应力强度范围,未达到断层活动需要的应力值下限,表明该段断裂基本处于相对稳定状态,也在一定程度上反映出该区域地壳浅表层赋存的应变能较小,对温泉储热构造的改造作用相对较弱;而36.80~113.20 m 深度范围内的地应力值落在 $\mu=0.6$ 和 $\mu=1.0$ 之间的临界范围内,已经达到了断层活动需要的应力临界值的下限,表明该段断裂处于应变能积累状态,将来有可能发生逆断层性质的活动,断层两盘间的裂隙受到挤压应力作用,不仅导水通道不连续,并且导热系统空间也逐渐缩小,储热条件变差,温泉水位可能降低。另外,由于该断裂带沿线,近代多次发生过 M_s 5~6级以上地震,受邻区地震造成的地应力和能量释放的影响,断裂带区的热力通道、地下水的补给通道均可能受到断层活动的影响而发生改变。

4 结论

基于鸭绿江断裂带邻区的地质构造背景,在断裂带附近的丹东五龙背温泉区开展了现场地应力

测试,揭示了现今地应力状态,研究了地应力控制下的断裂活动特征,分析了五龙背温泉水位下降的原因,研判了断裂的活动性及其对温泉的远期影响,主要结论如下。

(1)通过水压致裂地应力测量,得到了鸭绿江断裂带温泉区的现今地应力状态。测段深度36.80~215.50 m,最大水平主应力值为6.00~13.52 MPa,最小水平主应力值为3.18~7.26 MPa,垂直主应力0.97~5.70 MPa。总体上看,三个主应力值均随深度的增加而增大。

(2)由地应力数据可知,孔深36.80~215.50 m 范围,主应力关系为 $S_H>S_h>S_v$,该段应力有利于逆断层活动;孔深198.60~207.80 m 范围,主应力为 $S_H>S_v>S_h$,有利于走滑型活动;孔深215.50 m 处,为 $S_H>S_h>S_v$,有利于逆断层活动。在区域应力场控制下的断层活动中,五龙背温泉区处于压应力状态;在现今应力场作用下,鸭绿江断裂带在不同深度处构造变形存在一定程度的解耦,断裂的中段(198.60~207.80 m)具有一定潜力的裂隙型导水条件,而在断裂带上段(36.80~196.63 m)及下段(215.50 m),温泉导水构造的纵向连续性欠佳,导水条件较差;根据现今应力场特征与断裂活动的关系,结合区域动力学背景,对鸭绿江断裂带的早期活动进行分析得出,五龙背地区温泉水位下降期可能是由于断裂在压应力作用下被挤压,导热系统空间逐渐缩小,其他方向径流排泄增多,进而造成温泉水源供给减少,温泉水位下降。

(3)基于库仑摩擦失稳理论和拜尔利定律对现今地应力值进行分析,深度132.85 m 以下未达到断层活动需要的应力值下限,断裂基本处于相对稳定状态,对温泉的改造作用相对较弱;而36.80~113.20 m 深度范围内的地应力值已超过了断层活动需要的应力临界值下限,将来有可能发生错断活动,温泉地热水体的补给通道可能受到断层活动的影响而发生改变,鸭绿江断裂带对研究区温泉分布及水位的远期状态变化有一定的控制作用。

致谢:感谢审稿人提出的宝贵意见和建议。感谢相关项目组技术人员的辛勤付出,为文章的撰写提供了详实的地质资料。

References

- ANDERSON E M, 1951. The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain[M]. 2nd ed. Edinburgh: Oliver and Boyd: 7-22.

- BYERLEE J, 1978. Friction of rocks[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 116(4-5): 615-626.
- CHANG J Y, 2014. Investigation on the application status of hot spring resources in Dandong[J]. *Sichuan Building Materials*, 40(4): 106-107, 109. (in Chinese)
- CHEN M X, WANG J Y, DENG X, 1996. The map of geothermal system types in China and its brief explanation[J]. *Geological Sciences*, 31(2): 114-121. (in Chinese with English abstract)
- CHEN P, 2018. The formation conditions and main controlling factors of geothermal resources in Songjianghearea of Changbai Mountain[D]. Changchun: Jilin University. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Q C, FAN T Y, LI X S, et al., 2014. In situ measurements and comprehensive research on the present crustal stress of Northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(8): 2518-2529. (in Chinese with English abstract)
- CHENG X F, XU S G, ZHANG S T, 2008. Characteristics of geothermal geology and genetic model of the Anning hot spring in Yunnan Province[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 35(5): 124-128. (in Chinese with English abstract)
- CUOCO E, MINISSALE A, DI LEO A M, et al., 2017. Fluid geochemistry of the Mondragone hydrothermal systems (southern Italy): water and gas compositions vs. geostructural setting[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 106(7): 2429-2444.
- DONG N T, WU G L, WANG G Q, et al., 1989. The basic geological features of the yalujing fracture belt and the metallogenic regularities[J]. *Jilin Geology*, 8(4): 1-25. (in Chinese with English abstract)
- DONG Y X, HUANG H X, REN L, et al., 2021. Geology and development of geothermal field in Neogene Guantao Formation innorthern Bohai Bay Basin: A case of the Caofeidian geothermalheating project in Tangshan, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 666-676. (in Chinese with English abstract)
- DU J J, CHEN Q C, MA Y S, et al., 2013. Faults activity and stress state in the northeast segment of Longmenshan faults zone[J]. *Progress in Geophysics*, 28(3): 1161-1170. (in Chinese with English abstract)
- FAN Y X, LI H L, ZHANG J L, et al., 2022. Research on the in-situ stress state and the geothermal-controlling structure of the Huangshadong Geothermal Field in the Southeast Coast of China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(10): 3944-3961. (in Chinese with English abstract)
- GU C C, ZHU G, ZHANG S, et al., 2017. Cenozoic evolution of the Yilan-Yitong Graben in NE China: An example of graben formation controlled by pre-existing structures[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 146: 168-184.
- GUO N, SUN H X, LI H T, et al., 2019. Hydrochemical characteristics of Jueyong hot spring in Tibet[J]. *Geological Review*, 65(S1): 21-23. (in Chinese with English abstract)
- HU W, ZHU G, SONG L H, et al., 2013. Analysis of quaternary activity along the Bohai segment of the Tan-Lu fault zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 137-150. (in Chinese with English abstract)
- JAEGER JC, COOK N G W, ZIMMERMAN R W, 2007. *Fundamentals of rock mechanics*[M]. 4th ed. New York: Wiley-Blackwell.
- LANG X J, ZHANG F W, WANG G L, 2017. The thermal structure and geothermal genesis mechanism in Guide basin[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(S1): 43-46. (in Chinese with English abstract)
- LI B, ZHANG W, WEN R, 2022. Study on the hydraulic fracturing in-situ stress measurement in super-long highway tunnels in southern Shaanxi: Engineering geological significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(2): 191-202. (in Chinese with English abstract)
- LI J Y, SHAN X L, MA Y, et al., 2013. Distribution and evolution of petroliferous basins along Yalu River fault in Jilin[J]. 32(1): 98-105. (in Chinese with English abstract)
- LI L Z, 2020. Inversion of stress field in deep geothermal field based on multiple conditions[D]. Changchun: Jilin University. (in Chinese with English abstract)
- LI T S, WANG H M, HUANG J C, et al., 2020. The current status of geothermal energy utilization and its prospect in China[J]. *Journal of Sinopec Management Institute*, 22(3): 62-66. (in Chinese with English abstract)
- LI W Q, 2015. The influence of geothermal features and radioactive heat production of rocks to potential of geothermal resources in Eastern area of Liaoning Province[J]. Changchun: Jilin University. (in Chinese with English abstract)
- LI X L, SUN X G, WANG Y H, 1997. Distribution and origin of warm-springs in Shandong peninsula[J]. *Journal of Qingdao Ocean University*, 27(3): 389-395. (in Chinese with English abstract)
- LIN W J, LIU Z M, WANG W L, et al., 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 40(1): 312-321. (in Chinese with English abstract)
- LIU B, ZHU G, ZHAI M J, et al., 2015. Quaternary faulting of the Jiangsu part of the Tan-Lu Fault Zone, East China: Evidence from field investigations and OSL dating[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 89-102.
- LIU J L, JI M, SHEN L, et al., 2011. Early Cretaceous extensional structures in the Liaodong Peninsula: structural associations, geochronological constraints and regional tectonic implications[J]. *Science China Earth Sciences*, 54(6): 823-842.
- LIU R Q, DAI L J, SHANG M Y, et al., 2006. Main shear zones in eastern Liaoning Province and features of shear hosted gold mineralization[J]. *Chinese Journal of Geology*, 41(2): 181-194. (in Chinese with English abstract)
- LUO L L, 1994. Inquisition of the distribution and cause of the hot springs in western Sichuan[J]. *Journal of Chongqing Teachers College (Natural Science Edition)*, 11(2): 39-48, 52. (in Chinese with English abstract)
- MA X D, LIU H B, BAI J L, 2014. The application of integrated geophysical methods to the geothermal exploration in Shenxian area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 38(3): 461-464. (in Chinese with English abstract)
- MASSIOT C, NICOL A, MCNAMARA D D, et al., 2017. Evidence for tectonic, lithologic, and thermal controls on fracture system geometries in an andesitic high-temperature geothermal field[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 122(8): 6853-6874.
- PAN M C, 2016. Some viewpoints about the Yalujiang major fault zone in Lyujiangcun area, Liaoning province[J]. *Geology and Resources*, 25(3): 223-226. (in Chinese with English abstract)
- PANG Z H, LUO J, CHENG Y Z, et al., 2020. Evaluation of geological conditions for the development of deep geothermal energy in China, *Earth*

- Science Frontiers, 27(1): 134-151. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, et al., 2011. Research on stress field and hydraulic fracturing in-situ stress measurement of 1000 m deep hole in Zhaolou coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 30(8): 1638-1645. (in Chinese with English abstract)
- QIN X H, CHEN Q C, TAN C X, et al., 2013. Analysis of current geostress state and seismic risk in southwest segment of Longmenshan fracture belt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 32(S1): 2870-2876. (in Chinese with English abstract)
- QU Z W, YANG X D, WU J T, et al., 2021. Genesis, fluid characteristics and productivity analysis of Beichuan geothermal field[J]. GroundWater, 43(3): 21-26. (in Chinese with English abstract)
- REED M H, 1982. Calculation of multicomponent chemical equilibria and reaction processes in systems involving minerals, gases and an aqueous phase[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(4): 513-528.
- REED M J, 1983. Assessment of low-temperature geothermal resources of the United States-1982[M]. Menlo Park: Geological Survey: 892.
- REN X J, 2018. Geological conditions and distribution law of geothermal system in the basalt area of Changbai Mountain[D]. Changchun: Jilin University. (in Chinese with English abstract)
- SHI X C, JU Y J, MENG Z P, 2014. Characteristics of in-situ stress field in Xinji coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 42(6): 68-72. (in Chinese with English abstract)
- SONG W M, 2016. Analysis on the development and utilization of geothermal water resources in Yiquan Town, Dandong city[J]. Water Conservancy Planning and Design(3): 36-38. (in Chinese)
- SU K Z, LI F Q, ZHANG B C, et al., 1996. Integrated research on the crustal stress and pore water pressure at the dam site of the Three Gorges[M]. Beijing: Seismological Press: 151-165. (in Chinese)
- SUI H S, YAN D Y, LI H L, et al., 2019. Discussion on the geogenetic model of the eastern Shilin Basin, Yunnan[J]. GroundWater, 41(6): 15-17. (in Chinese with English abstract)
- SUN H Z, 2018. Land surface temperature retrieval based on thermal infrared remote sensing data and research on the exploring methodology of geothermal resources in Dandong-Liaoyang[D]. Changchun: Jilin University. (in Chinese with English abstract)
- SUN J S, DENG L S, 2008. Preliminary exploration of the mining output of Wulongbei hot spring water[J]. Dandong Offshore Engineering(1): 93-96. (in Chinese)
- SUN X H, WU M D, LI L, 2010. Research of the relationship between the main faults activity and the earthquakes of Donggang area in Liaoning Province[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 26(4): 65-71. (in Chinese with English abstract)
- SUN Y, TAN C X, MIAO P S, et al., 2012. Seismogeology and Earthquake Prediction[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- TA M M, ZHOU X, GUO J, et al., 2018. Occurrence and formation of the hot springs and thermal groundwater in Chongqing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 45(1): 165-172. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, SUN W F, ZHANG C S, et al., 2007. An analysis on variation of crustal stress states at the shallow part of upper crust in deep-cut valley region[J]. Progress in Geophysics, 22(4): 1353-1359. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, ZHANG P, LU S L, et al., 2019. Significance and role of in-situ crustal stress measuring and real-time monitoring in earthquake prediction research[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 866-876. (in Chinese with English abstract)
- UZELLI T, BABA A, GÜL MÜNGAN G, et al., 2017. Conceptual model of the Gülbahçe geothermal system, Western Anatolia, Turkey: Based on structural and hydrogeochemical data[J]. *Geothermics*, 68: 67-85.
- WAN B, JIA L H, DAI Y L, et al., 2013. Moderate-strong earthquakes and their tectonic correlation in the Liaodong peninsula[J]. Seismology and Geology, 35(2): 300-314. (in Chinese with English abstract)
- WANG C H, GAO G Y, WANG H, et al., 2020. Integrated determination of principal stress and tensile strength of rock based on the laboratory and field hydraulic fracturing tests[J]. Journal of Geomechanics, 26(2): 167-174. (in Chinese with English abstract)
- WANG E C, LI C F, WEI H Q, et al., 2003. Late Pliocene-recent tectonic setting for the Tianchi volcanic zone, Changbai Mountains, Northeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(10): 1159-1170.
- WANG J Q, ZHOU X, LI X L, et al., 2017. Hydrochemistry and formation of the Yangchimi Hot Spring in the Lanping basin of Yunnan[J]. *Geoscience*, 31(4): 822-831. (in Chinese with English abstract)
- WANG L J, PAN L Z, LIAO C T, et al., 1991. Crustal stress measurements and their application in engineering[M]. Beijing: Geological Press. (in Chinese)
- WANG Y, 2020. A study of the characteristics and genesis of hot springs and mineral spring water to the southwest of the Changbai Mountain[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- WHITE DE, 1968. Hydrology, activity and heat flow of the Steamboat Springs thermal system, Sashoe Country, Nevada[R]. Usgs Numbered Series. U. S. Geological Survey: 109.
- XIA H K, XU D M, 1993. Features of Yalujiang river fault (south segment) activity and seismicity[J]. Journal of Seismological Research, 16(4): 391-400. (in Chinese with English abstract)
- XIAO S Y, ZHU G, ZHANG S, et al., 2018. Structural processes and dike emplacement mechanism in the Wulong gold field, eastern Liaoning[J]. Chinese Science Bulletin, 63(28): 3022-3036. (in Chinese with English abstract)
- XU J W, ZHU G, TONG W X, et al., 1987. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: a major shear system to the northwest of the Pacific Ocean[J]. *Tectonophysics*, 134(4): 273-310.
- YAN B Z, 2016. Study on the formation mechanism of geothermal water resources in Changbai mountain basalt area[D]. Changchun: Jilin University. (in Chinese with English abstract)
- YAN L J, ZHU G, LIN S Z, et al., 2014. Neotectonic activity and formation mechanism of the Yishu Fault Zone[J]. *Science China Earth Science*, 57(4): 614-629.
- YANG F T, SHI Y J, LI W Q, 2022. Genesis model of geothermal water in Dandong area of Liaoning province based on hydrogeochemical characteristics[J]. *Geoscience*, 36(2): 474-483. (in Chinese with English abstract)
- YI S Y, 2016. Analysis of thermal storage structure and research on runoff supply of geothermal water resources[J]. Resource Information and En-

- gineering, 31(4): 89, 93. (in Chinese with English abstract)
- YU Z B, SONG Z K, 2007. Analysis of the current situation of water resources development and utilization in Dandong[J]. Jilin Water Conservancy, 4(9): 18-19. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG G R, JIANG S E, HAN X P, et al., 2006. The main characteristics of Yalujiang fault zone and its significance[J]. Geology and Resources, 15(1): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H B, DENG X S, WANG B, et al., 2018. Structural characteristics and its control function to geothermal resources of Shiqian-Huaqiao fault in Guizhou[J]. Guizhou Geology, 35(2): 131-137. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG S. Mesozoic structural features and evolution history of the Yalu River Fault Zone and adjacent area[D]. Hefei: Hefei University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG X W, HE J L, MA D B, et al., 2022. Geothermal field controlling factors and geneti-model in southeast Longxi Basin: A case study of Qingshui hot spring[J]. GroundWater, 44(1): 30-34. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y H, 2018. Research on genesis and development of the geothermal system in the Kangding-Moxi segment of the Xianshuihe fault[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Q, DONG S W, 2008. Mesozoic tectonic evolution history of the Tanlu fault zone, China: Advances and new understanding[J]. Geological Bulletin of China, 27(9): 1371-1390. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J Z, 1985. Two types of underground hot water in Wulongbei Hot Spring[J]. Liaoning Geology(3): 241-250.
- ZHONG Y Z, LI Z, WU J S, 2012. Active faults prospecting and seismic risk evaluation of Dandong new district in Liaoning province[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 28(2): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- ZHONG Z N, KANG F X, SONG M Z, et al., 2021. Study on geothermal flux and geothermal genesis of Zhaoyuan geothermal field in Eastern Shandong geothermal area[J]. Geological Review, 67(3): 828-840. (in Chinese with English abstract)
- ZHU G, LIU G S, NIU M L, et al., 2003. Transcurrent movement and genesis of the Tan-Lu fault zone[J]. Geological Bulletin of China, 22(3): 200-207. (in Chinese with English abstract)
- ZOBACK M D, HEALY J H, 1992. In situ stress measurements to 3.5 km depth in the Cajon Pass Scientific Research Borehole: Implications for the mechanics of crustal faulting[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B4): 5039-5057.
- ZOBACK M D, TOWNEND J, 2001. Implication of hydrostatic pore pressures and high crustal strength for the deformation of intraplate lithosphere. Tectonophysics[J]. 336: 19-30.
- ZOBACK M D, 2007. Reservoir geomechanics[M]. New York: Cambridge University Press: 167-205.
- 附中文参考文献**
- 常婧莹, 2014. 丹东市温泉资源的应用现状调查[J]. 四川建材, 40(4): 106-107, 109.
- 陈墨香, 汪集喈, 邓孝, 1996. 中国地热系统类型图及其简要说明[J]. 地质科学, 31(2): 114-121.
- 陈鹏, 2018. 长白山松江河地区地热资源形成条件及主控因素[D]. 长春: 吉林大学.
- 陈群策, 范桃园, 李绪深, 等, 2014. 中国南海海域北部地区现今地应力实测及综合分析研究[J]. 地球物理学报, 57(8): 2518-2529.
- 程先锋, 徐世光, 张世涛, 2008. 云南省安宁温泉地热地质特征及成因模式[J]. 水文地质工程地质, 35(5): 124-128.
- 董南庭, 武贵禄, 王光奇, 等, 1989. 鸭绿江断裂带基本地质特征及成矿规律[J]. 吉林地质, 8(4): 1-25.
- 董月霞, 黄红祥, 任路, 等, 2021. 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, 48(3): 666-676.
- 杜建军, 陈群策, 马寅生, 等, 2013. 龙门山断裂带东北段地应力状态与断裂活动性研究[J]. 地球物理学进展, 28(3): 1161-1170.
- 范艳霞, 李海龙, 张军龙, 等, 2022. 东南沿海黄沙洞地热田地应力与控热构造研究[J]. 地球物理学报, 65(10): 3944-3961.
- 郭宁, 孙会肖, 李皓婷, 等, 2019. 西藏觉拥温泉水化学特征分析[J]. 地质论评, 65(S1): 21-23.
- 胡惟, 朱光, 宋利宏, 等, 2013. 郯庐断裂带渤海段第四纪活动规律探讨[J]. 地学前缘, 20(4): 137-150.
- 郎旭娟, 张发旺, 王贵玲, 2017. 贵德盆地热结构及地热成因机制[J]. 地球学报, 38(S1): 43-46.
- 李彬, 张文, 文冉, 2022. 陕南特长公路隧道水压致裂法地应力测量结果及工程地质意义分析[J]. 地质力学学报, 28(2): 191-202.
- 李吉焱, 单玄龙, 马月, 等, 2013. 鸭绿江断裂带吉林段含油气盆地分布及演化[J]. 世界地质, 32(1): 98-105.
- 李良振, 2020. 基于多条件反演深部高温地热田地应力场[D]. 长春: 吉林大学.
- 李天舒, 王惠民, 黄嘉超, 等, 2020. 我国地热能利用现状与发展机遇分析[J]. 石油化工管理干部学院学报, 22(3): 62-66.
- 李文庆, 2015. 辽宁东部地区地热特征及岩石放射性生热对地热资源潜力的影响[D]. 长春: 吉林大学.
- 李学伦, 孙效功, 王永红, 1997. 山东半岛温泉的分布规律与成因[J]. 青岛海洋大学学报, 27(3): 389-395.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等, 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 40(1): 312-321.
- 刘如琦, 戴立军, 商木元, 等, 2006. 辽东的主要剪切带及其金矿化特征[J]. 地质科学, 41(2): 181-194.
- 罗来麟, 1994. 四川西部温泉分布及成因初探[J]. 重庆师范学院学报(自然科学版), 11(2): 39-48, 52.
- 马晓东, 刘洪波, 白锦林, 2014. 综合物探在莘县地区地热勘查中的应用[J]. 物探与化探, 38(3): 461-464.
- 潘明臣, 2016. 辽宁省绿江村地区鸭绿江主干断裂带的几点认识[J]. 地质与资源, 25(3): 223-226.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 等, 2011. 赵楼煤矿1000m深孔水压致裂地应力测量及其应力场研究[J]. 岩石力学与工程学报, 30(8): 1638-1645.
- 庞忠和, 罗霖, 程远志, 等, 2020. 中国深层地热能开采的地质条件评价[J]. 地学前缘, 27(1): 134-152.
- 秦向辉, 陈群策, 谭成轩, 等, 2013. 龙门山断裂带西南段现今地应力状态与地震危险性分析[J]. 岩土力学与工程学报, 32(S1): 2870-2876.
- 屈泽伟, 杨晓东, 吴军涛, 等, 2021. 北川地热田成因、流体特征及产

- 能分析[J]. 地下水, 43(3): 21-26.
- 任宪军, 2018. 长白山玄武岩覆盖区地热资源形成地质条件及分布规律[D]. 长春: 吉林大学.
- 师修昌, 鞠远江, 孟召平, 2014. 新集矿区地应力场特征研究[J]. **煤田地质与勘探**, 42(6): 68-72.
- 宋文明, 2016. 丹东市椅圈镇地热资源开发利用分析[J]. 水利规划与设计(3): 36-38.
- 苏恺之, 李方全, 张伯崇, 等, 1996. 长江三峡坝区地壳应力与孔隙水压力综合研究[M]. 北京: 地震出版社: 151-165.
- 睦华生, 闫鼎熠, 李红林, 等, 2019. 云南石林盆地东部地热成因模式探讨[J]. 地下水, 41(6): 15-17.
- 孙焕朝, 2018. 丹东-辽阳热红外遥感地温反演与地热资源探测方法研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 孙境姝, 邓力实, 2008. 对五龙背温泉水可开采量的初步探测[J]. 丹东海工(1): 93-96.
- 孙晓辉, 吴明大, 李莉, 2010. 辽宁东港地区主要断裂活动性与地震关系研究[J]. 防灾减灾学报, 26(4): 65-71.
- 孙叶, 谭成轩, 苗培实, 等, 2012. 地震地质与地震预报[M]. 北京: 地质出版社.
- 拓明明, 周训, 郭娟, 等, 2018. 重庆温泉及地下热水的分布及成因[J]. 水文地质工程地质, 45(1): 165-172.
- 谭成轩, 孙炜锋, 张春山, 等, 2007. 深切峡谷地区地壳浅表层地应力状态变化分析[J]. **地球物理学进展**, 22(4): 1353-1359.
- 谭成轩, 张鹏, 路士龙, 等, 2019. 原位地应力测量与实时监测在地震预报研究中的作用和意义[J]. **地质力学学报**, 25(5): 866-876.
- 万波, 贾丽华, 戴盈磊, 等, 2013. 辽东半岛中强地震活动及其与构造相关性[J]. 地震地质, 35(2): 300-314.
- 王成虎, 高桂云, 王洪, 等, 2020. 利用室内和现场水压致裂试验联合确定地应力与岩石抗拉强度[J]. 地质力学学报, 26(2): 167-174.
- 王洁青, 周训, 李晓露, 等, 2017. 云南兰坪盆地羊吃蜜温泉水化学特征与成因分析[J]. **现代地质**, 31(4): 822-831.
- 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭, 等, 1991. 地应力测量及其在工程中的应用[M]. 北京: 地质出版社.
- 王源, 2020. 长白山西北部温泉和矿泉水的特征及成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 夏怀宽, 许东满, 1993. 鸭绿江断裂(南段)的特征、活动性与地震[J]. 地震研究, 16(4): 391-400.
- 肖世椰, 朱光, 张帅, 等, 2018. 辽东五龙金矿区成矿期构造过程与岩脉就位机制[J]. 科学通报, 63(28): 3022-3036.
- 闫佰忠, 2016. 长白山玄武岩区地热资源成因机制研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 严乐佳, 朱光, 林少泽, 等, 2014. 沂沭断裂带新构造活动规律与机制[J]. 中国科学:地球科学, 44(7): 1452-1467.
- 杨峰田, 石宇佳, 李文庆, 2022. 基于水文地球化学特征的辽宁丹东地区地热成因模式研究[J]. **现代地质**, 36(2): 474-483.
- 易世友, 2016. 地热资源热储构造分析与径流补给研究[J]. 资源信息与工程, 31(4): 89-93.
- 于正兵, 宋振坤, 2007. 丹东市水资源开发利用现状分析[J]. 吉林水利, 4(9): 18-19.
- 张国仁, 江淑娥, 韩晓平, 等, 2006. 鸭绿江断裂带的主要特征及其研究意义[J]. **地质与资源**, 15(1): 11-19.
- 张哈彬, 邓旭升, 王波, 等, 2018. 贵州石阡-花桥断裂构造特征及其对地热资源的控制作用[J]. **贵州地质**, 35(2): 131-137.
- 张帅, 2019. 鸭绿江断裂带及旁侧地区中生代构造特征与演化历史[D]. 合肥: 合肥工业大学.
- 张献文, 何俊林, 马代兵, 等, 2022. 陇西盆地东南部地热成田主控因素及成因模型: 以清水温泉为例[J]. 地下水, 44(1): 30-34.
- 张云辉, 2018. 鲜水河断裂康定-磨西段地热系统成因及开发利用研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 张岳桥, 董树文, 2008. 郯庐断裂带中生代构造演化史: 进展与新认识[J]. **地质通报**, 27(9): 1371-1391.
- 张作佳, 1985. 五龙背温泉水下热水的两种类型[J]. 辽宁地质, (3): 241-250.
- 钟以章, 李智, 吴劲松, 2012. 辽宁省丹东市新城区活动断裂探测及地震危险性评价[J]. **防灾减灾学报**, 28(2): 1-8.
- 钟振楠, 康凤新, 宋明忠, 等, 2021. 鲁东招远地热田地热通量及地热成因研究[J]. 地质论评, 67(3): 828-840.
- 朱光, 刘国生, 牛漫兰, 等, 2003. 郯庐断裂带的平移运动与成因[J]. **地质通报**, 22(3): 200-207.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

