引用格式：乔二伟，马秀敏，郭华林，等，2025. 渤海海峡跨海通道工程南段地应力特征与工程稳定性分析[J]. 地质力学学报，31（2）：197−210. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023169

Citation: QIAO E W，MA X M，GUO H L，et al.，2025. Characteristics of in-situ stresses and engineering stability analysis on the south section of the Bohai Strait Cross-Sea Corridor project[J]. Journal of Geomechanics，31（2）：197−210. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2023169

渤海海峡跨海通道工程南段地应力特征与工程稳定性分析

乔二伟[1,2,3,4]，马秀敏[1,2,3,4,5]，郭华林[1,6]，孙 尧[1,2,3,4]，姜景捷[1,2,3,4]

QIAO Erwei[1,2,3,4]，MA Xiumin[1,2,3,4,5]，GUO Hualin[1,6]，Sun Yao[1,2,3,4]，JIANG Jingjie[1,2,3,4]

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. 自然资源部地应力工程技术创新中心，北京 100081；
4. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室，北京 100081；
5. 北京科技大学，北京 100083；
6. 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. *Technology Innovation Center for In-situ Stress*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*;
4. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*;
5. *University of Science and Technology Beijing*, *Beijing* 100083, *China*;
6. *Engineering Faculty*, *China University of Geosciences* (*Wuhan*), *Wuhan* 430074, *Hubei*, *China*

Characteristics of in-situ stresses and engineering stability analysis on the south section of the Bohai Strait Cross-Sea Corridor project

Abstract: ［**Objective**］The Bohai Strait Cross-Sea Corridor is an important maritime traffic project which joins the Liaodong and the Shandong peninsulas. The state of geostress is an important reference for engineering design and construction decision-making.［**Method**］In order to better understand the present characteristics of the geostress and the distribution of the tectonic stress field in the southern section of the project, hydraulic fracturing tests were conducted for stress measurements at 0～300 m depth at Beigou Town, southwest Penglai District, Yantai City.［**Results**］The analysis of the measured data indicates that the in-situ stress field is controlled by horizontal tectonic stress in the study area, and the horizontal stress values are at an intermediate level compared with those obtained elsewhere in the Northeast−North China Stress Zone; S_H (the maximum horizontal principal stress), S_h (the minimum horizontal principal stress), and S_v (the vertical principal stress) change linearly with the depth of the BGZ borehole; in the depth range of the measurements, the shallow surface stress of the crust is mainly reverse fault type, that is, the relationship of the three principal stresses is $S_H>S_h>S_v$. The measured S_H average azimuth angle in the borehole, N75.3°E, is in good agreement with the direction of the tectonic stress field of the North China Stress Zone to which the study area belongs; and, it is basically consistent with the direction of the

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD20230249，DD20230014，DD20160149）；国家自然基金基金项目（42272222）；中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费项目（DZLXJK202106，DZLXS202211）

This research is financially supported by the Geological Survey Project of the Chinese Geological Survey (Grant Nos. DD20230249, DD20230014 and DD20160149), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42272222) and the Basic Research Funds of the Chinese Academy of Geological Sciences (Grant Nos. DZLXJK202106 and DZLXS202211).

第一作者：乔二伟（1970—），男，博士，副研究员，从事地应力与地壳稳定性、岩石物理学等方面的研究。Email：qewzq@163.com

通信作者：马秀敏（1978—），男，硕士，正高级工程师，主要从事地应力测量与监测、断裂稳定性研究工作。Email：maxiumin@mail.cgs.gov.cn

收稿日期：2023−10−11；**修回日期**：2024−12−02；**录用日期**：2024−12−02；**网络出版日期**：2025−01−02；**责任编辑**：吴芳

regional tectonic stress field revealed by the focal source mechanism solution and GPS measurement. The Coulomb friction sliding criterion and the measured data are used to preliminarily evaluate the current level of geostress accumulation in the study area and its impact on the engineering stability. It is believed that the overall level of stress accumulation in the region is relatively low, and the crust in the engineering area is currently relatively stable. In addition, based on the comprehensive discrimination criterion of rock burst danger, $\sigma_{\theta_{max}}/R_c$, the possibility of rock burst in the underground tunnel of the Bohai Strait Cross-Sea Corridor is discussed. [**Conclusion**] It is primarily concluded that there is currently no possibility of rock burst in the underground tunnel of the Bohai Strait Cross-Sea Corridor, and the rock surrounding the tunnel is stable. [**Significance**] The findings in this paper provide a scientific basis for the optimization of the design and the construction of the Bohai Strait Cross-Sea Corridor. The study also provides basic data for research on active faults, seismogeology, regional dynamics in the survey area, and others.

Keywords: Bohai Strait; Cross-Sea Corridor project; hydraulic fracturing method; in-situ stress; surrounding rock stability; tectonic stress field

摘　要：渤海海峡跨海通道工程是连接山东半岛与辽东半岛重要的海上交通主线工程，沿线地应力状态是工程设计和施工决策的重要参考依据。为了准确获得工程南段地区现今地应力特征及构造应力场分布特征，在烟台市蓬莱区西南北沟镇实施了300 m以浅的水压致裂法地应力测量。结果表明：测区主导应力为水平构造应力，与东北—华北应力区其他地区相比，应力值处于中等；随测量深度增加，最大水平主应力（S_H）、最小水平主应力（S_h）和垂向主应力（S_v）均呈线性增大趋势；在测量深度范围内地壳浅表层应力结构以逆断型为主，即$S_H>S_h>S_v$；实测S_H平均方位角为N75.3°E，与华北应力区的应力场方向一致，也与其震源机制解和GPS测量揭示的区域构造应力场方向基本一致。应用库仑摩擦滑动准则和此次测量数据，初步评估了渤海海峡跨海通道工程南段地区现今地应力积累水平及其对工程稳定性的影响，认为区域内应力积累总体水平相对较低，工程区域地壳相对稳定。依据岩爆危险程度综合判别准则$\sigma_{\theta_{max}}/R_c$讨论了通道区域地下隧道工程围岩岩爆的可能性，认为该工程地下隧道发生岩爆可能性很低，隧道围岩总体稳定。研究结果为渤海海峡跨海通道工程的设计、施工等方案的优选提供了科学依据，同时也可为区域活动断裂、地震地质、区域动力学等研究提供基础数据。

关键词：渤海海峡；跨海通道工程；水压致裂法；地应力；围岩稳定性；构造应力场

中图分类号：P315.72+7; TV554　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)02−0197−14

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023169

0　引言

渤海海峡西接渤海，东连黄海，是沟通渤海与黄海、联系山东半岛与辽东半岛的重要水道。而拟建的渤海海峡跨海通道对国家构筑华北、东北地区海上贸易大通道，加快环渤海区域一体化发展和促进东北老工业基地的振兴具有重要意义（王梦恕和宋克志，2013）。该通道的基本设想是以跨海大桥和海底隧道相结合方式（王梦恕和宋克志，2013；尹延鸿等，2017）修建一条连接海峡南北两岸的通道，实现从山东烟台（蓬莱）到辽宁大连（旅顺）间的直通。渤海海峡跨海通道工程将是一项施工难度巨大，同时兼具显著社会经济效益，规模空前的海上重大工程（祁嘉翔等，2013）。通道工程位于中国东部华北应力区，该区由于受青藏高原北东方向的推挤作用（周玖等，1983；邓起东等，1999）和太平洋板块向欧亚板块俯冲作用（汪一鹏，1979）以及地壳上隆所产生的北西—南东向的扩张作用（黄培华和傅容珊，1983）等，导致区域内地壳变形，断裂众多，地震时有发生，历史地震曾达到6～7级（晁洪太等，1995；王志才等，2006）。这些现象的发生与地壳应力状态密切相关，特别是强震发生前后，受其影响的地壳浅表层地应力分布特征常常会随之出现明显的差异变化（景才瑞和肖平，1989；郭啟良等，2009；陈群策等，2012）。地应力状态是地壳稳定性评价的重要因素之一（孙叶等，1997），也是工程设计和施工决策的重要参考依据（白世伟和李光煜，1982；Klee et al., 1999；吴满路等，2002；张杰等，2016；陈东升等，2023）。

对渤海海峡跨海通道工程所处的中国东部华北应力区，《中国岩石圈动力学地图集》编委会（1991）研究认为该区水平挤压作用由中生代的北西—南东向转变为新生代以来的北东东—南西西

向，使北北东、北东向构造左旋压性断层转变为右旋拉张断层，并延续至今；马杏垣（1987）、谢富仁等（2004）的研究认为华北应力区构造应力场主压应力方向呈北东—北东东向（近东西向）。已有报道中针对渤海海峡跨海通道工程区域实测的地应力状态的资料较少，郑红霞等（2015）报道了跨海通道工程沿线 6 个测点孔深为 85.8～147.89 m 的地应力空芯包体测试数据，其中最大水平主应力为 5.22～10.07 MPa，最小水平主应力 3.91～8.26 MPa，垂直应力为 3.47～6.18 MPa；其认为渤海海峡区南部的应力状态有利于逆断层活动；在区域北东—北东东向主压应力作用下，郯庐断裂带、蓬莱−威海断裂带和黄河口−庙西北断裂带的运动状态分别为右旋压扭、左旋压扭和拉张走滑。李兵等（2019）在蓬莱东南近海岸开展了 2 个测点孔深为 189 m 和 209 m 的水压致裂地应力测量工作，最大水平主应力为 6.15～13.71 MPa，最小水平主应力为 4.30～8.08 MPa，垂直应力为 1.90～5.09 MPa；其认为蓬莱东南近海岸区域以逆断型应力状态为主，最大水平主应力方向为北东至东西向。综上所述，目前渤海海峡跨海通道工程南段实测的地应力资料较少，仅有的测点深度也较浅。因此，为了更全面了解渤海海峡跨海通道工程南段的地应力状态，文章以该工程南段为研究区，在其陆域的烟台市蓬莱区实施了水压致裂法地应力测量，根据获得的测量数据，分析了该段的地应力特征，讨论了区域构造应力场分布特征及对工程稳定性的影响，评估了区域构造应力场对研究区地下隧道围岩稳定性的影响，拟为渤海海峡跨海通道工程的设计、施工等方案的优选提供科学依据，也为该工程南段区域活动断裂、地震地质、区域动力学等研究提供基础资料和数据。

1　区域地质背景

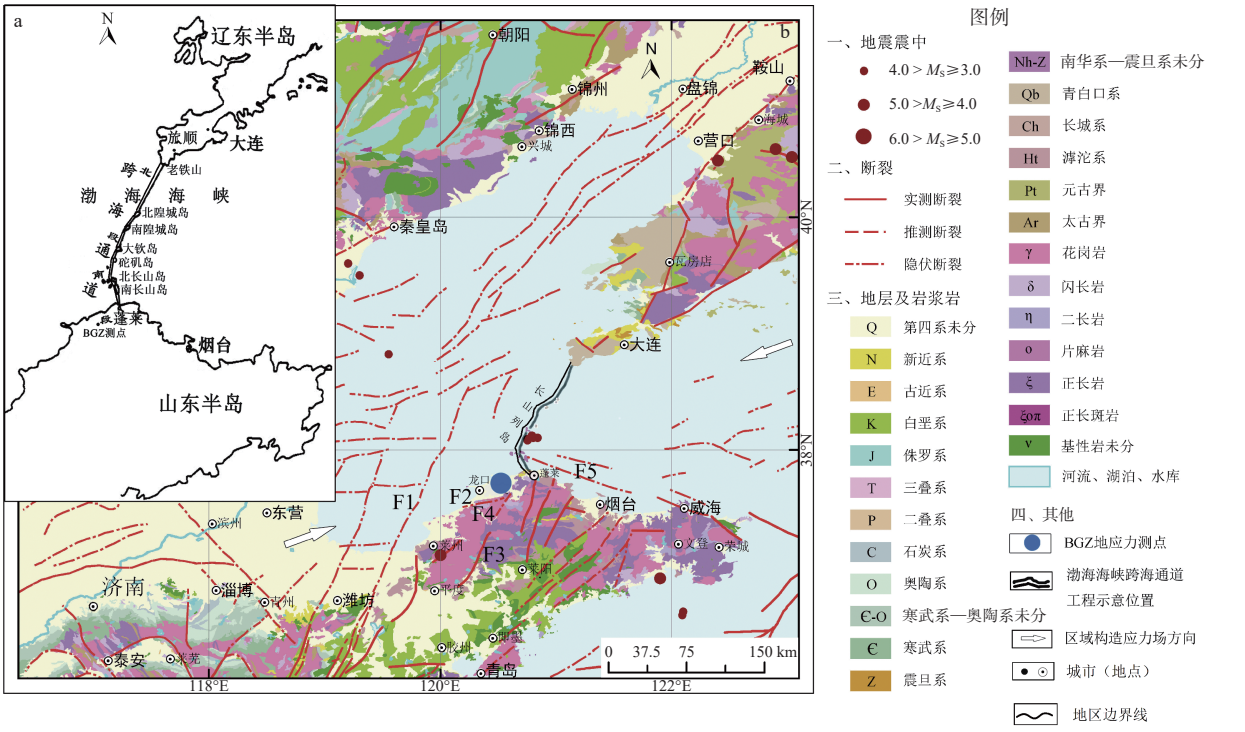
渤海海峡及其周边在大地构造上位于西太平洋板块俯冲带前沿，属于华北断块区胶辽断块（邓起东等，2002）。结晶基底为变质岩系，形成于太古代和元古代。从古生代开始，地台发育，该地区处于长期隆起状态，致使古生代至三叠纪地层缺失。中生代中—晚期以后，亚洲大陆东部北东向的滨太平洋构造系，成为控制区域差异升降和沉积盆地发育的主导因素。胶莱等地区形成了断陷盆地，沉积陆相和浅海相地层，并发育北北东、北东、北东东和北西西向断层。新生代以来该区整体抬升，遭受剥蚀，出现多期夷平台地（晁洪太等，1995；黄永华等，2007）。

根据渤海海峡跨海通道工程的线路走向，以北长山岛为界，将该工程线路简单分为南段和北段两部分，南段总体为北北西走向（图 1a），南段烟台蓬莱地区区域地质构造主要以北北东向和北西西向断裂为主（图 1b）。北北东向断裂基本为右旋走滑型，有北沟−玲珑断裂、招远−平度断裂带、黄县断裂；北西西向断裂为左旋走滑型，有蓬莱−威海断裂带（张培震等，2002；张静华等，2004；王志才等，2006；索艳慧等，2013）；以及北东—北北东走向的营口−潍坊断裂带。北沟−玲珑断裂是招远−平度断裂带的北段部分，也是黄县盆地的控盆同沉积断裂（蔡克明和张公德，1983；李增学等，1999；吕育林，2017；孔凡飞等，2019），范围大致是从招远市至渤海海峡，长 100 km，走向北北东，陆地部分倾向西，海域部分推测倾向为东，倾角 60°～85°。招远−平度断裂带是胶东半岛西北部地区规模较大的断裂带，是该地区重要的控矿、导矿和容矿构造（邓军等，1996；林文蔚等，2000；吴泽权等，2014）；该断裂带南起平度市，向北经招远市至烟台市蓬莱区后进入渤海海峡；总体走向为北东 30°～40°。黄县断裂是黄县盆地重要的控盆、控矿同沉积断裂，也是该盆地的南部边界断裂；走向近东西向，长 40 km（蔡克明和张公德，1983；张振晗等，2013；王华林等，2015；吕育林，2017；孔凡飞等，2019）。蓬莱−威海断裂带位于山东半岛北部近海海域，属于张家口−蓬莱断裂带的东南段，由多条次级断层组成，走向为北西西 60°～70°，倾角 70º～80º，长度超过 70 km（高战武等，2001；王志才等，2006；黄永华等，2007；王华林等，2015；郑红霞等，2015）；营口−潍坊断裂带位于郯庐断裂带中部，自北而南经辽河平原、渤海至山东潍坊，总体走向为北东向，全长约 400 km（图 1b）。

2　地应力测量概况

2.1　测点部署原则

考虑到地应力易受周围地形和断层的影响（杨建中，2008；张永兴，2008），地应力测点应尽量布置在地形起伏较小，相对平缓的地方，同时还要避让断层和岩石破碎带。另外，根据该地区已有的地应力测点（郑红霞等，2015；李兵等，2019），此次地应力测点选择在渤海海峡跨海通道工程南段陆域部分，



F1—营口–潍坊断裂带；F2—黄县断裂；F3—招远—平度断裂带；F4—北沟–玲珑断裂；F5—蓬莱–威海断裂带

a—渤海海峡跨海通道线路示意图（据宋克志和王梦恕，2006 修改）；b—区域构造地质简图（据乔二伟等，2019 修改）

图 1 渤海海峡跨海通道线路示意图及区域构造地质简图

Fig. 1 Schematic diagram of the Bohai Strait Cross-Sea Corridor route and the structural geology of the Bohai Strait and surrounding areas

(a) Schematic diagram of the Bohai Strait Cross-Sea Corridor route (modified after Song and Wang, 2006); (b) Structural geology of the Bohai Strait and surrounding areas (modified after Qiao et al., 2019)

F1—Yingkou-Weifang Fault Belt; F2—Huangxian Fault; F3—Zhaoyuan-Pingdu Fault Belt; F4—Beigou-Linglong Fault; F5—Penglai-Weihai Fault Belt

即 BGZ 测点（图 1）。该测点附近地形为丘陵，相对开阔，地面较平整，大部分为第四系覆盖。

2.2 测点概况

BGZ 测点位于烟台市蓬莱区西南北沟镇，邻近北沟–玲珑断裂和黄县断裂（图 1）；孔口高程 54 m，孔深 300.54 m，是跨海工程区目前最深的地应力测点。钻孔钻遇地层可分为 2 层：上层 0～6.1 m，为第四系，岩性主要为中砂、砂砾及黏性土；下层 6.1～300.54 m，岩性为上元古界辅子夼组花岗岩。钻孔钻遇花岗岩体完整性较好，局部有破碎。

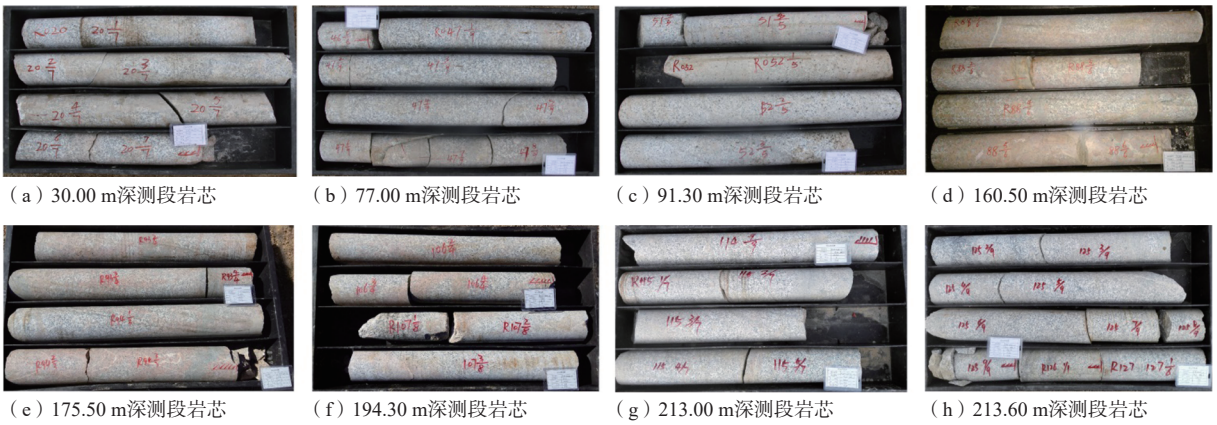
2.3 地应力测量方法

国内外常用的地应力测量方法有水压致裂法、声发射法和套孔应力解除法等（Amadei and Stephansson, 1997; Ljunggren et al., 2003; 杨建中, 2008; 张永兴, 2008; 王成虎, 2014），其中水压致裂法目前应用最为广泛（杨建中, 2008; 张永兴, 2008）。水压致裂法是指在钻孔中通过对密封段注入高压水，使孔壁岩石发生破裂，记录压力随时间的变化，并用印模器等观测破裂方位，最后利用相应的公式确定地应力的方向和大小。该方法是由国际岩石力学学会（Haimson and Cornet, 2003）推荐的主要的地应力测量方法之一，其测量设备由工作泵、数据记录仪器、定向器、封隔器、印模器、高压油管等组成（Haimson and Cornet, 2003; 中国地震局, 2018）。

为了使测量结果准确、可靠，此次工作主要采取了控制测试流量和提高测段完整性 2 种方法。控制测试流量，就是根据现场测试实际情况，控制流量在 12 L/min 以下。这样可防止出现较大的附加管阻压力，确保测试数据的精准性。提高测段完整性，则是选择的测段岩芯完整程度均大于 95%，且压裂段岩芯没有原生裂隙（图 2），这样保障了测试结果具有一定的代表性。

3 地应力测量结果与分析

按照水压致裂法技术规范（Haimson and Cornet,



（a）30.00 m深测段岩芯　（b）77.00 m深测段岩芯　（c）91.30 m深测段岩芯　（d）160.50 m深测段岩芯

（e）175.50 m深测段岩芯　（f）194.30 m深测段岩芯　（g）213.00 m深测段岩芯　（h）213.60 m深测段岩芯

图 2　BGZ 测点压裂段岩芯

Fig. 2　Cores from the locations where the hydraulic fracturing stresses were measured in the BGZ borehole

(a) The core of the 30.00 m deep survey section; (b) The core of the 77.00 m deep survey section; (c) The core of the 91.30 m deep survey section; (d) The core of the 160.50 m deep survey section; (e) The core of the 175.50 m deep survey section; (f) The core of the 194.30 m deep survey section; (g) The core of the 213.00 m deep survey section; (h) The core of the 213.60 m deep survey section

2003; 中国地震局, 2018), 在 BGZ 测点孔深 30.0～293.4 m 实施了 10 个测段的原位测量和两个测段的印模试验, 得到 8 个测段的数据为有效测量(图 3)。每个有效测量的破裂压力(P_b)、重张压力(P_r)和关闭压力(P_s)等压力参数值以及 2 个最大水平主应力方向见表 1。所获取的 8 个测段曲线都显示了清晰的破裂压力特征, 且各重张回次形态重复性好, 表明此次测试结果准确、可靠。根据 Haimson and Fairhust(1969)和 Haimson(1987)的水压致裂理论, 得到每个测段的最大、最小水平主应力及垂向主应力(表 1, 图 4)。

3.1　地应力量值

在 0～231.6 m, 最大水平主应力 S_H 的变化范围为 4.67～10.46 MPa, 最小水平主应力 S_h 的范围为 3.69～9.57 MPa, 垂直主应力 S_v 则为 0.81～6.25 MPa(表 1)。通过对此次获取的最大与最小水平主应力量值随深度的变化关系进行线性拟合, 得到如下公式:

$$S_H = 0.033D + 3.4834 \quad (R^2 = 0.8731) \qquad (1)$$

$$S_h = 0.0295D + 2.3942 \quad (R^2 = 0.8775) \qquad (2)$$

式中: D 为孔深, m; R^2 为相关系数; S_H 为最大水平主应力, MPa; S_h 为最小水平主应力, MPa。

上述拟合曲线的相关系数均接近 0.9, 说明各测量值与深度之间具有较好的线性关系。总体上最大与最小水平主应力均随深度增加而呈线性增大(图 4), 该结果与已有报道相符(郑红霞等, 2015; 李鹏等, 2017; 李兵等, 2019)。

3.2　地应力类型

此次获得的最大、最小水平主应力 S_H、S_h 和垂向主应力 S_v 在测量深度内三者关系为 $S_H > S_h > S_v$(表 1, 图 4), 属于逆断型应力类型(谢富仁等, 2004), 这种应力结构有助于逆断层活动(Anderson, 1905, 1951), 与该区域郑红霞等(2015)和李兵等(2019)的研究结果一致。此外, 在大约 200 m 以深, 随深度增加 S_h 逐渐降低(表 1, 图 4), 按此规律, 深部可能会出现 $S_v > S_h$ 的情况, 即应力结构转变为 $S_H > S_v > S_h$, 这反映的是走滑断层的应力特征。

3.3　主应力方向

在地应力测量中, 通过印模试验可得到主应力方向。试验过程如下: 先将装有定向仪的印模器放到地应力测量段的深度, 通过工作泵向印模器加压, 其压力值应大于水压致裂缝的重张压力, 保压时≥30 min, 使孔壁已有裂缝重新张开, 胶筒表面的软橡胶挤入裂缝, 印模器表面留下了裂缝印迹。

此次测量获取的最大水平主应力 S_H 方向为 N82.2°E 和 N68.5°E(表 1, 图 5),平均值为 N75.3°E, 与所属华北应力区的应力场方向一致(马杏垣, 1987; 谢富仁等, 2004), 也与震源机制解(许忠淮等, 1983; 董旭光等, 1999; 刘方斌等, 2018)和 GPS 测量(张培震等, 2002; 张静华等, 2004)揭示的区域构造应力场方向基本一致。

3.4　侧压力系数

侧压力系数可以反映水平构造应力的作用和水平应力的差异性, 常被用来表征地下某点的地应力特征。其是指最大、最小水平主应力 S_H、S_h 以及

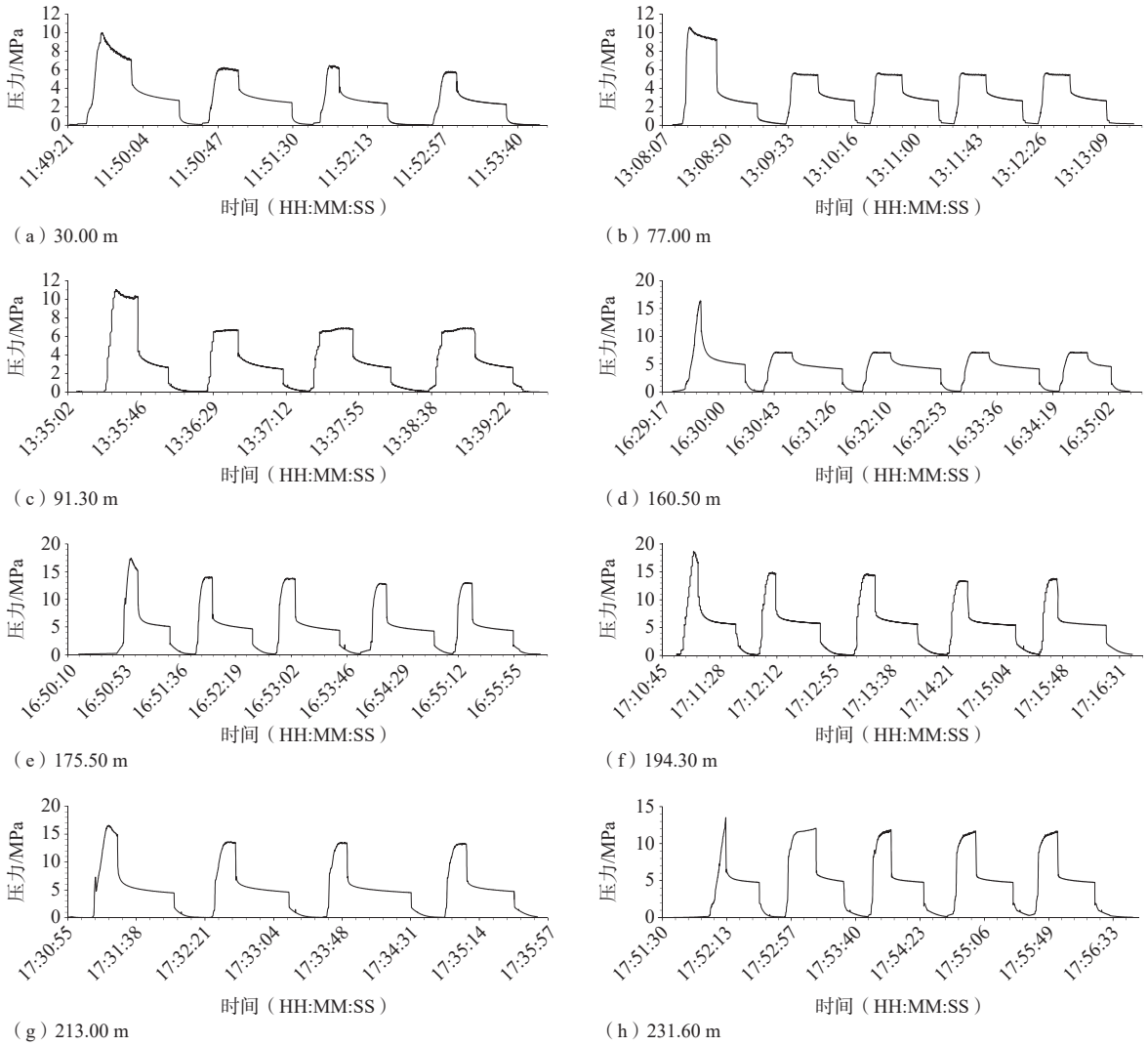


图 3 BGZ 测点水压致裂地应力测量曲线

Fig. 3 Curves of in-situ hydraulic fracturing stress measurements in the BGZ borehole

表 1 BGZ 测点水压致裂地应力测量结果

Table 1 Results of the hydraulic fracturing stress measurements in the BGZ borehole

测段序号	测段中心深度/m	压裂参数/MPa					主应力/MPa			S_H方向
		P_b	P_r	P_s	T	P_0	S_H	S_h	S_v	
1	30.00	10.00	6.10	3.69	4.20	0.30	4.67	3.69	0.81	
2	77.00	10.52	6.03	4.07	5.26	0.77	5.41	4.07	2.08	N82.2°E
3	91.30	10.52	7.47	4.71	3.96	0.91	5.75	4.71	2.47	
4	160.50	11.23	8.73	6.89	4.11	1.61	10.33	6.89	4.33	
5	175.50	17.20	12.00	7.98	6.96	1.76	10.18	7.98	4.74	
6	194.30	18.12	16.82	9.57	3.24	1.94	9.95	9.57	5.25	
7	213.00	16.20	13.90	8.83	4.43	2.13	10.46	8.83	5.75	
8	231.60	13.50	11.90	8.03	3.92	2.32	9.87	8.03	6.25	N68.5°E

注：P_b为岩石原地破裂压力；P_r为破裂面重张压力；P_s为破裂面瞬时关闭压力；T为岩石抗拉强度；P_0为孔隙压力；S_H为最大水平主应力；S_h为最小水平主应力；S_v为根据上覆岩石埋深计算的垂向主应力（岩石平均重力密度取27/kN /m^3）

平均值 $(S_H + S_h)/2$ 分别与垂向主应力 S_v 之比（杨建中，2008；张永兴，2008），分别记为 K_H、K_h 和 K_{av}。

$$K_H = S_H / S_v \quad (3)$$

$$K_h = S_h / S_v \quad (4)$$

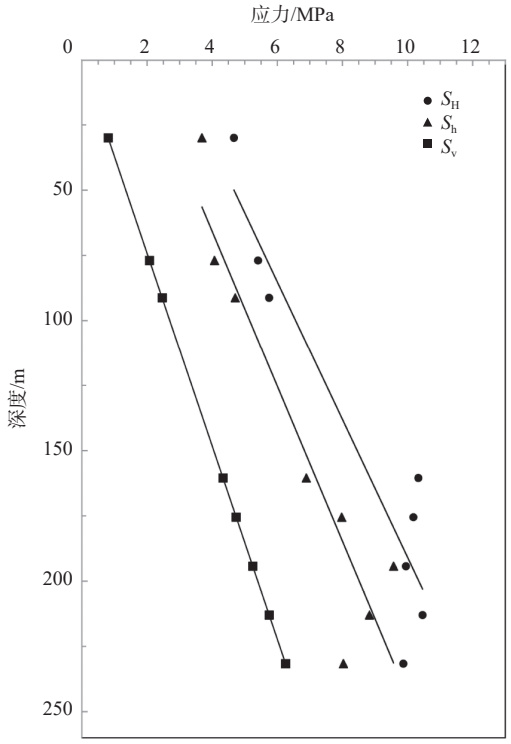
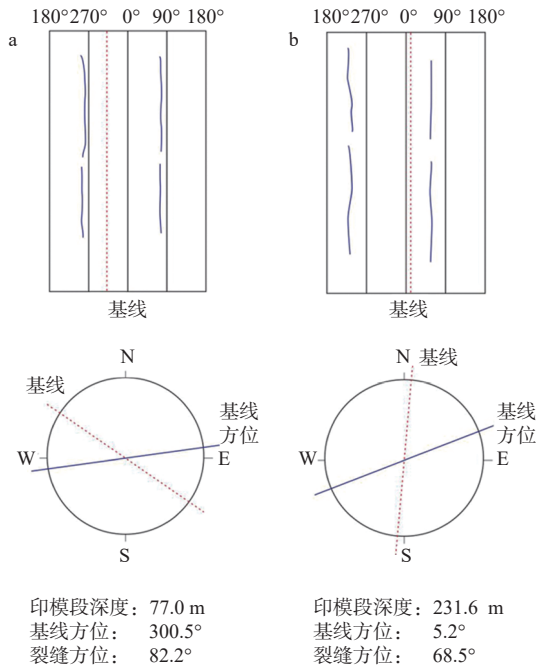


图 4　BGZ 测点 S_H、S_h 和 S_v 随深度的变化曲线

Fig. 4　Variations of stresses S_H, S_h, and S_v with depth in the BGZ borehole



a—77.0 m 深水压致裂印模定向结果；b—231.6 m 深水压致裂印模定向结果

图 5　BGZ 测点水压致裂印模定向结果

Fig. 5　Results of impression packer tests in the BGZ borehole

(a) Results of the impression packer test at a depth of 77.0 m; (b) Result of the impression packer test at a depth of 231.6 m

$$K_{av}=(S_H+S_h)/(2S_v) \quad (5)$$

式中：K_H、K_h 和 K_{av} 为侧压力系数；S_H 为最大水平主应力，MPa；S_h 为最小水平主应力，MPa；S_v 为垂向主应力，MPa。

此次获得的侧压系数随深度的变化特征见图 6。在 0～231.6 m，K_H 变化范围为 1.58～5.777，K_h 的范围为 1.28～4.56，K_{av} 则为 1.43～5.16，说明渤海海峡跨海通道工程南段地区的地应力状态以水平构造应力为主导，其变化范围与现有认知规律基本一致（景锋等，2007；杨建中，2008；张永兴，2008）。整体上，3 个侧压系数值和离散性随深度增加均呈减小趋势。

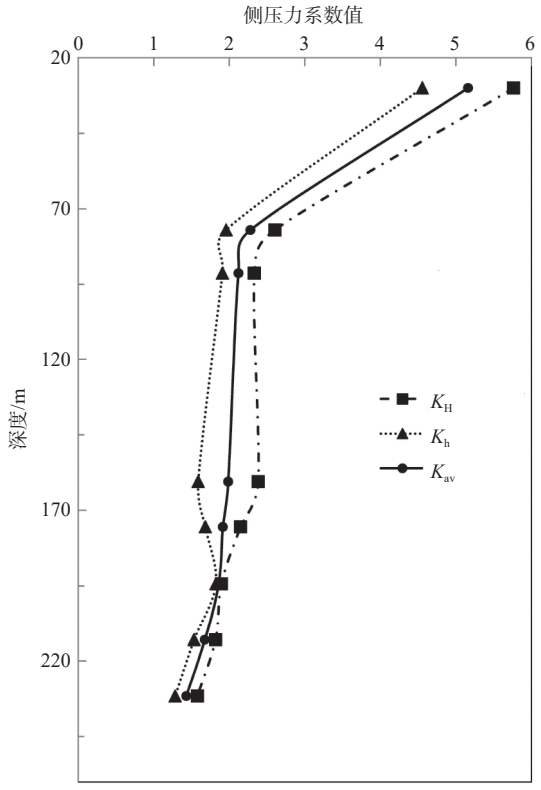


图 6　侧压力系数 K_H，K_h，K_{av} 随深度的变化曲线

Fig. 6　Variations of the lateral pressure coefficients K_H, K_h, and K_{av} with depth at the BGZ borehole

将 K_H、K_h 和 K_{av} 和对应的深度数据进行拟合，得到如下关系式：

$$K_H=134.19/D+1.1675 \quad (R^2=0.966) \quad (6)$$

$$K_h=103.9/D+0.9601 \quad (R^2=0.9569) \quad (7)$$

$$K_{av}=119.04/D+1.0638 \quad (R^2=0.9686) \quad (8)$$

式中：K_H、K_h、K_{av} 为侧压力系数；D 为孔深，m；R^2 为相关系数。

由理论计算可推测，3 个侧压系数值随深度增加可能分别将趋向于某个定值。由式 (6)— (8) 可知，K_H、K_h 和 K_{av} 将可能分别向 1.17、0.96 和 1.06 趋近。另外，从 K_h 趋向于 0.96 也间接说明了随着深度增加可能会出现 $S_H>S_v>S_h$ 的应力类型，即走滑型的应力类型。

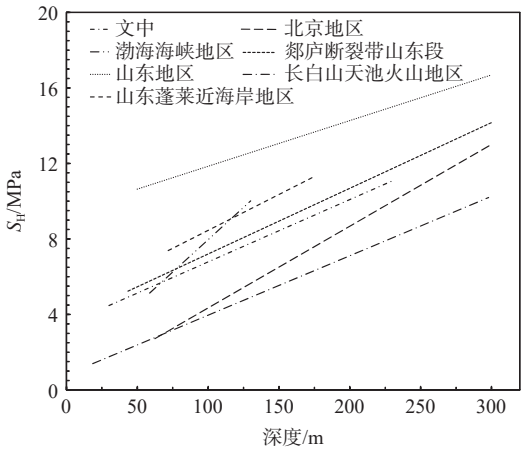
4 讨论

4.1 区域现今构造应力场特征

为进一步了解渤海海峡跨海通道工程南段地区现今地应力水平，以最大水平主应力 S_H 为例将此次测量结果与同属东北—华北应力区的北京地区、渤海海峡地区和郯庐断裂带山东段、山东地区、长白山天池火山地区以及山东蓬莱近海岸地区的 S_H 拟合曲线进行对比（图 7）。结果表明：在相同深度（300 m 以浅），此次测量的 S_H 值总体低于郯庐断裂断山东段、山东以及山东蓬莱近海岸和渤海海峡地区，高于北京和长白山天池火山地区，应力值在东北—华北应力区处于中等水平。

BGZ 测点位于北北东向的北沟−玲珑断裂（F4）和近东西向的黄县断裂（F2）的交汇部位，且距北西西向的蓬莱−威海断裂带（F5）较近（图 1）。有学者认为该位置地区是应力集中区，应力值高，易引起强烈的构造活动（李四光，1973；陈庆宣等，1998）。但此次测得的应力值在所属应力区处于中等，相对偏低，其原因可能与该区历史上地震频发有关，如 1548 年发生的 7 级和 1948 年发生的 6 级地震（晁洪太等，1995；王志才等，2006；张振晗等，2013；王华林等，2015），且上述 3 条断裂均为控震断裂（晁洪太等，1995；郭玉贵等，2005；王志才等，2006；张振晗等，2013；王华林等，2015），从而降低了区域应力水平。李兵等（2019）的测点位于 2 条北东向断裂和蓬莱—威海断裂带的夹持之中，构造环境与 BGZ 测点类似；但由于 2 条北东向断裂相距较远，且无交汇，可能造成的应力释放没有 BGZ 测点那么明显，因此保持了比 BGZ 测点较高的平均应力水平。

渤海海峡跨海通道工程南段的原位地应力测量结果表现为逆断型为主的浅表层地壳应力环境（232 m 以浅深度），与区域北沟−玲珑断裂、黄县断裂和蓬莱−威海断裂带等均以正断层为主（晁洪太等，2001；王志才等，2006；黄永华等，2007；葛孚刚等，2010）的性质不一致，也与震源机制解给出的地



文中 S_H=0. 033D+3.4834；北京地区 S_H=0.0433D + 0.016（秦向辉等，2014）；渤海海峡地区 S_H=0.0684D +1.120（郑红霞等，2015）；郯庐断裂断山东段 S_H=0.0348D + 3.7231（丰成君等，2017）；山东地区 S_H=0.0242D+ 9.4269（李鹏等，2017）；长白山天池火山地区 S_H=0.0315D + 0.81（乔二伟等，2023）；山东蓬莱近海岸地区 S_H=0. 038D +4. 656（李兵等，2019）

图 7 不同地区 S_H 随深度变化情况

Fig. 7 Depth dependence of S_H in different regions

This study S_H = 0. 033D + 3.4834; Beijing area S_H=0.0433D + 0.016 (Qin et al., 2014); Bohai Strait area S_H = 0.0684D + 1.120 (Zheng et al., 2015); Shandong segment of the Tan-Lu fracture belt S_H = 0.0348D + 3.7231 (Feng et al., 2017); Shandong area S_H = 0.0242D + 9.4269 (Li et al., 2017); Tianchi volcano area in Changbaishan S_H = 0.0315D + 0.81 (Qiao et al., 2023); Penglai coast area, Shandong Province S_H = 0. 038D + 4.656 (Li et al., 2019).

壳震源深度主要为走滑型和正断型（许忠淮等，1983；董旭光等，1999；刘方斌等，2018）的应力类型存在较大差别。由地应力特征理论分析可知，地下深部可能会出现走滑型的应力类型。这意味着该区域应力场可能存在垂向上的分层特征，即浅表层以挤压−剪切为主，深部则以拉张−剪切为主。

4.2 应力积累水平对工程稳定性的影响

研究表明，当地壳内的应力积累水平超过断裂保持稳定态的临界应力，可引起断裂面滑动，从而将所累积的能量释放出来，使应力积累水平下降，实现地壳稳定（Zoback et al., 2002）。利用库仑摩擦滑动准则中的摩擦系数 μ 值大小可定量分析地壳中的应力积累水平，进而评估断裂的活动性以及对工程稳定性的影响。

库仑摩擦滑动准则建立的基本前提是认为断裂面内聚力为零，且断裂面上的剪应力和有效正应力之间满足一定条件，如式 9 所示，则该断裂的滑动失稳会在某个合适方位产生（Stock et al., 1985；

Zoback and Townend, 2001; Jaeger et al., 2007; Zoback, 2007)。

$$\tau=\mu\left(S_{\mathrm{n}}-P_0\right) \tag{9}$$

式中：τ为剪应力，MPa; μ为断裂面的摩擦系数；S_{n}为断裂面上的正应力，MPa; P_0为孔隙压力，MPa。

式 9 还可转化为式 10, 即由有效主应力来表示的关系式(McGarr et al., 1982; Stock et al., 1985; Evans and Engelder, 1989; Zoback and Townend, 2001; Jaeger et al., 2007)：

$$\frac{S_{\max}-P_0}{S_{\min}-P_0}=\left(\sqrt{\mu^2+1}+\mu\right)^2 \tag{10}$$

式中：$S_{\max}$为最大主应力，MPa; $S_{\min}$为最小主应力，MPa; 其余同式 9。

根据式 10 可知，若等式左边运算式值小于右边，则断裂处于稳定状态，相反断裂可能会发生滑动。所以，对于断裂活动性，摩擦系数μ是一个重要的评估指标。已有研究给出了岩石摩擦系数μ的范围为 0.6 ～1.0(Byerlee, 1978; Zoback and Townend, 2001)。文中分别选取μ为 0.6 和 1.0 作为判别指标，确定可能引起断裂滑动的最大和最小主应力临界值，分析研究区实测应力是否达到该临界值。

根据计算结果(图 8)，BGZ 测点最大和最小有效主应力大多在μ= 0.6 临界线之下，表明研究区现今地壳浅表层应力尚未满足邻近断裂滑动失稳的标准，说明渤海海峡跨海通道工程南段区域现今地应力积累总体水平相对较低，还没超出地壳破裂要求的临界状态。其中有一个点位于μ= 1.0 临界线之上(图 8)，可能是由于该点深度较浅，受临近断裂和地形的影响较大，$S_{\max}$、$S_{\min}$偏高所造成，可以不考虑。由于北沟−玲珑断裂和黄县断裂产状变化较大，且缺少精确的断层特征实测资料，上述计算未考虑断裂实际产状与理想滑动角间的差异，而是认为断裂满足式(10)的失稳滑动条件。由于 BGZ 测点距离蓬莱−威海断裂带和营口−潍坊断裂带还有一定距离，此次测量结果可能无法准确评估二者的稳定性，可结合郑红霞等(2015)和李兵等(2019)对这 2 条断裂稳定性的详细评述，进行综合判断。由此，以上基于实测数据的局部断裂活动性判断对于区域构造稳定性的评价仍具有一定的参考意义。

综合上述计算结果以及分析讨论，尽管研究区现今地壳浅表层应力积累水平相对较低，反映渤海海峡跨海通道工程南段区域地壳目前总体是稳定的，但北沟−玲珑断裂既是活动断裂，也是区内主要控震断裂，而且历史上很多地震均与其有关，仍需要对北沟−玲珑断裂加强监测。随着区域地应力水平积累到一定程度，该断裂可能会再次活动，并直接威胁到渤海海峡跨海通道工程以及建筑设施和生命财产安全。文中目前主要基于地应力测量结果和库仑摩擦滑动准则，分析了渤海海峡跨海通道工程南段区域的地应力状态，探讨了邻近断裂的稳定性。由于区域构造、新构造活动以及其他未知因素的作用，加之区域地应力实测数据偏少、深度偏浅等，要想做到科学评估区域内活动断裂的稳定性，尚需进行长期的地应力监测，并开展区域深部探测工作。

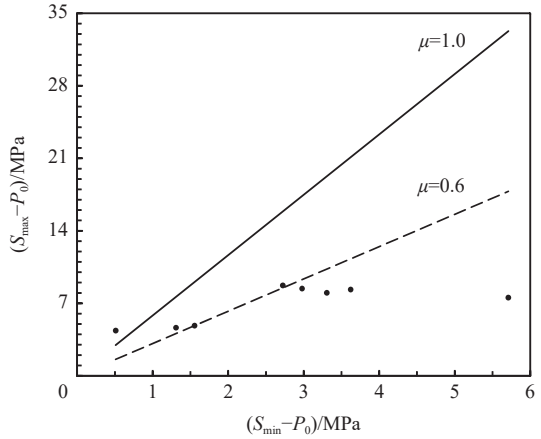


图 8　BGZ 测点地应力数据的库伦破裂准则计算结果

Fig. 8　Results of Coulomb failure criterion calculation for data measured at the BGZ borehole

4.3　区域应力场对地下隧道围岩稳定性的影响

地应力是引起隧道等地下工程变形和破坏的主要作用力，尤其是高应力作用下，更易在隧道建设与运营期间出现严重的隧道变形与破坏等现象。岩爆是一种在结构完整的硬脆性围岩中较为常见的破坏形式，在硐室开挖过程中，由于围岩卸荷导致岩体中聚积的弹性应变能忽然释放而引起的一种脆性破坏，产生爆裂、弹射甚至抛掷而动力失稳的现象(徐则民等, 2004; 冯夏庭等, 2019)。理论研究和工程实践均表明，岩爆的成因机制复杂，控制和影响因素较多。其中，具有高储能体性质的岩体以及与岩体强度相近的围岩应力条件是岩爆发生的 2 个必要因素(谭以安, 1989; 张咸恭等, 2000)。

为了计算围岩切应力σ_θ, 需要先作一定假设，即假设隧道横截面为受两向正应力作用的平面应

变模型。两向正应力分别指上覆岩石自重所引起的垂向应力 S_v 和作用于隧道横截面上的水平向正应力 σ_n。其中前者是实测值，后者则由线弹性理论公式计算得出（式 11）。

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(S_H + S_h) + \frac{1}{2}(S_H - S_h)\cos\theta \tag{11}$$

式中：θ 为水平隧道轴向法线方向与 S_H 方向的夹角。

最大切向应力 $\sigma_{\theta_{max}}$ 由如下公式计算获得：

$$\sigma_{\theta max} = \begin{cases} 3\sigma_n - S_v (\sigma_n \geqslant S_v) \\ 3\sigma_n - S_v (\sigma_n > S_v) \end{cases} \tag{12}$$

岩爆危险程度的判别准则主要有 Russenes 准则、Hoek 准则和综合准则（王元汉等，1998；刘元坤等 2003）。其中，综合判别准则是基于 Russenes、Hoek 等人的判别准则（Hoek and Brown, 1980；侯发亮等，1992），文中采用综合判别准则。

考虑到围岩地应力条件，包括应力值及应力方向均对地下隧道的稳定性具有重要影响作用，同时兼顾渤海海峡跨海工程地下隧道的线路走向（宋克志和王梦茹，2013），将该工程构造应力分区大致分为跨海工程南段（蓬莱东港—北长山岛）和跨海工程北段（北长山岛—老铁山）两段。跨海工程南段地下隧道的地应力条件是依据此次实测数据，隧道深度取 100 m；跨海工程北段地下隧道的地应力条件依据郑红霞等（2015）的实测数据，隧道深度取 150 m。跨海工程南段 100 m 深的最大、最小水平主应力及垂向应力分别为 6.78 MPa、5.34 MPa、2.72 MPa；跨海工程北段 150 m 深最大、最小水平主应力及垂向应力分别为 11.38 MPa、9.61 MPa、6.35 MPa。渤海海峡跨海工程地下隧道围岩岩性主要为石英岩（郑红霞等 2015；乔二伟等，2019），石英岩的单轴抗压强度为 R_c 为 166 MPa（乔二伟等，2019）。

以实测原位地应力和岩石力学参数为基础，根据岩爆危险程度综合判别准则 $\sigma_{\theta_{max}} / R_c$，对渤海海峡跨海工程南段和北段的岩爆危险程度进行评价（表 2）。结果表明，在当前原位地应力状态下，跨海工程南段地下隧道在 100 m 深处和跨海工程北段地下隧道在 150 m 深处均不存在发生岩爆的可能，渤海海峡跨海工程地下隧道围岩总体稳定。

表 2 围岩岩爆分析结果

Table 2 Results of rock burst analysis of surrounding rock

隧道区段	S_H 方位	隧道轴向	S_H 与隧道轴向法线 夹角(°)	σ_v/MPa	$\sigma_{\theta max}$ /MPa	$\sigma_{\theta max}$ /R_c	岩爆危险程度
跨海工程南段	N75°E	N40°W	25	6.76	17.55	0.11	无岩爆
跨海工程北段	N51°E	N30°E	69	11.36	27.72	0.17	无岩爆

5 结论

采用水压致裂法在渤海海峡跨海工程南段 BGZ 测点实施了原位地应力测量，对区域地应力特征展开了研究，并对渤海海峡跨海工程构造应力场分布特征进行了分析，得到以下认识：

（1）在测量深度范围内，最大水平主应力 S_H 范围为 4.67～10.46 MPa，最小水平主应力 S_h 范围为 3.69～9.57 MPa。与东北—华北应力区其他地区相比，区内应力值相对较低，处于中等水平。且随测量深度增加，地壳浅表层地应力值 S_H、S_h 和 S_v 均呈线性增大趋势。

（2）在 232 m 以浅范围内，地壳浅表层应力类型以逆断型为主，$S_H > S_h > S_v$。最大水平主应力 S_H 方向为北东—北北东，平均方位角为 N75.3°E，与华北应力区的应力场方向基本一致，也与该区域震源机制解和 GPS 测量的区域构造应力场方向基本一致。侧压力系数随深度的变化范围表明，研究区以水平构造应力为主导。

（3）渤海海峡跨海通道工程南段区域地壳浅表层及震源深度构造应力场存在显著差异，表明该区应力场在垂向上可能存在分层特征，浅表层以挤压-剪切为主，深部则以拉张-剪切为主。

（4）基于库仑摩擦滑动准则的分析结果表明，渤海海峡跨海通道工程南段区域现今地应力积累总体水平相对较低，尚未超出地壳破裂要求的临界状态。推测邻近北沟-玲珑断裂和黄县断裂目前相对稳定，渤海海峡跨海通道工程南段区域地壳基本上也是稳定的。

（5）以实测原位地应力和岩石力学参数为基础，依据岩爆危险程度综合判别准则 $\sigma_{\theta_{max}} / R_c$ 对渤海海峡跨海通道两个区段的工程稳定性进行了分析，

认为目前渤海海峡跨海工程地下隧道没有发生岩爆的可能，隧道围岩总体稳定。

References

AMADEI B, STEPHANSSON O, 1997. Rock stress and its measurement［M］. London: Chapman & Hall.

ANDERSON E M, 1905. The dynamics of faulting［J］. Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8(3): 387-402.

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

BAI S W, LI G Y, 1982. Research on stress field around dam area of Ertan hydropower station［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1(1): 45-56. (in Chinese with English abstract)

BYERLEE J, 1978. Friction of rocks［J］. Pure and Applied Geophysics, 116(4-5): 615-626.

CAI K M, ZHANG G D, 1983. The neotectonic movement in the Bohai strait［J］. Marine Sciences, 7(5): 18-20. (in Chinese with English abstract)

CHAO H T, LI J L, CUI Z W, 1995. Tectonic conditions of strong earthquakes with M≥6 in Shandong province and its adjacent seas［J］. Journal of Seismological Research, 18(2): 188-196. (in Chinese with English abstract)

CHAO H T, YU S E, LI J L, et al., 2001. Research on active faults in the Shandong peninsula［J］. Seismological Research of Northeast China1, 17(4): 1-8. (in Chinese with English abstract)

CHEN D S, JI H G, YUAN Y Z, et al., 2023. Influence of rock inhomogeneity degree on the crustal stress results measured by hydraulic fracturing method［J］. Journal of Geomechanics, 29(3): 365-374,

CHEN Q C, FENG C J, MENG W, et al., 2012. Analysis of in situ stress measurements at the northeastern section of the Longmenshan fault zone after the 5.12 Wenchuan earthquake［J］. Chinese Journal of Geophysics, 55(12): 3923-3932. (in Chinese with English abstract)

CHEN Q X, WANG W X, SUN Y, et al. , 1998. Pock mechanics and analysis of tectonic stress field［M］. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

China Earthquake Administration, 2018. Specification of hydraulic fracturing and overcoring method for in-situ stress measurement: DB/T 14-2018［S］. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)

DENG J, XU S L, FANG Y, et al. , 1996. The tectonic systems and gold metallogenic dynamics in the Northestern Jiao dong, China［M］. Beijing: Geological Publishing House: 16-17. (in Chinese)

DENG Q D, CHENG S P, MIN W, et al., 1999. Discussion on cenozoic tectonics and dynamics of Ordos block［J］. Journal of Geomechanics, 5(3): 13-21. (in Chinese with English abstract)

DENG Q D, ZHANG P Z, RAN Y K, et al., 2003. Basic characteristics of active tectonics of China［J］. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(4): 356-372.

DING J M, LIANG G P, GUO Q L, 1986. Stress measurements in deep boreholes in the Bohai coastal area of Shandong province: determination of the orientation of the principal stress［J］. Journal of Seismology(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)

DONG X G, ZHOU C Y, HUA A J, 1999. The analysis on focal mechanism solutions of recent minor earthquakes in Bohai Straits and its vicinity［J］. Inland Earthquake, 13(1): 7-16. (in Chinese with English abstract)

Editorial Committee of the Atlas of Chinese Lithospheric Dynamics, 1991. An introduction to lithospheric dynamics of China［M］. Beijing: Seismological Press: 271-539. (in Chinese)

EVANS K, ENGELDER T, 1989. Some problems in estimating horizontal stress magnitudes in "thrust" regimes［J］. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 26(6): 647-660.

FENG C J, ZHANG P, MENG J, et al., 2017. In situ stress measurement at deep boreholes along the Tanlu fault zone and its seismological and geological significance［J］. Progress in Geophysics, 32(3): 946-967. (in Chinese with English abstract)

FENG X T, XIAO Y X, FENG G L, et al., 2019. Study on the development process of rockbursts［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38(4): 649-673. (in Chinese with English abstract)

GAO Z W, XU J, SONG C Q, et al. , 2001. The segmental character of Zhangjiakou—Penglai fault［J］. North China Earthquake Sciences, 19(1): 35-42, 54. (in Chinese with English abstract)

GE F G, WANG Z C, WANG J Q, et al., 2010. Preliminary study of quaternary faults on Changdao island of Shandong province［J］. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 26(4): 13-21. (in Chinese with English abstract)

GUO Q L, WANG C H, MA H S, et al., 2009. In-situ hydro-fracture stress measurement before and after the Wenchuan M_S8.0 earthquake of China［J］. Chinese Journal of Geophysics, 52(5): 1395-1401. (in Chinese with English abstract)

GUO Y G, WANG H X, DENG Z H, et al., 2005. The fractal analysis on seism in the coastal and offshore areas of Shandong province［J］. Progress in Geophysics, 20(1): 155-159. (in Chinese with English abstract)

HAIMSON B C, 1987. Measurement of *in situ* stress［J］. Methods in Experimental Physics, 24: 377-408.

HAIMSON B C, CORNET F H, 2003. ISRM suggested methods for rock stress estimation-part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)［J］. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8): 1011-1020.

HAIMSON B, FAIRHURST C, 1969. In-situ stress determination at great depth by means of hydraulic fracturing［C］//Proceedings of the 11th U. S. symposium on rock mechanics. Berkeley: American Rock Mechanics Association: 559-584.

HOEK E, BROWN E T, 1980. Underground excavations in rock［M］. London: CRC Press.

HOU F L, LIU X M, WANG M Q, 1992. Re analysis of the causes of rock bursts and discussion on the intensity classification［C］//Proceedings of the 3rd national conference on rock dynamics. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press: 448-457. (in Chinese)

HUANG P H, FU R S, 1983. Mantle convection pattern under lithosphere of China［J］. Chinese Journal of Geophysics, 26(1): 39-47. (in Chinese with English abstract)

HUANG Y H, YOU H C, SONG Y S, et al., 2007. Recent activities of faults in Jiaodong peninsula, Shandong Province, China［J］. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2(1): 39-49. (in Chinese with English ab-

stract)

JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W, 2007. Fundamentals of rock mechanics[M]. 4th ed. Malden: Blackwell Publishing Ltd.

JING C R, XIAO P, 1989. On Li Siguang's thought of seismic geology and earthquake prediction[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 23(3): 403-406. (in Chinese with English abstract)

JING F, SHENG Q, ZHANG Y H, et al., 2007. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China mainland[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(10): 2056-2062. (in Chinese with English abstract)

KLEE G, RUMMEL F, WILLIAMS A, 1999. Hydraulic fracturing stress measurements in Hong Kong[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36(6): 731-741.

KONG F F, JIA Q, LI Z X, et al., 2019. Sedimentary facies characteristis and evolution of coal-bearing rock series of the Paleogene Lijiaya formation in Huangxian Basin, Shandong Province[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 21(3): 469-478. (in Chinese with English abstract)

LEE J S, 1973. Seismology[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

LI B, DING L F, WANG J X, et al., 2019. The state of the in-situ stress and fault stability evaluation of the Penglai coast[J]. Journal of Geomechanics, 25(4): 459-466. (in Chinese with English abstract)

LI P, GUO Q F, LIU H T, et al., 2017. Characteristics of current in-situ stress field and stress accumulation in Shandong region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(9): 2220-2231. (in Chinese with English abstract)

LI Z X, WEI J C, LAN H X, et al., 1999. The active stages of the boundary faulting and the deposition filling pattern in Huangxian faulted basin[J]. Coal Geology & Exploration, 27(6): 4-8. (in Chinese with English abstract)

LIN W W, ZHAO Y M, XU J, 2000. Active properties and age of Zhaoyuan-Pingdu fracture zone[J]. Regional Geology of China, 19(1): 43-50. (in Chinese with English abstract)

LIU F B, QU J H, LI G Y, et al., 2018. Spatial-temporal characteristics of the focal mechanism solutions consistency parameter of Changdao earthquake swarm[J]. China Earthquake Engineering Journal, 40(5): 1034-1041. (in Chinese with English abstract)

LIU Y K, LUO C W, YIN J M, 2003. Geostress measurement and rock burst analysis in West China[J]. Rock and Soil Mechanics, 24(S1): 94-95. (in Chinese with English abstract)

LJUNGGREN C, CHANG Y T, JANSON T, et al., 2003. An overview of rock stress measurement methods[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8): 975-989.

LYU Y L, 2017. Lijiaya formation coal and oil shale paragenetic ore-forming features and assembled ore-forming model in Huangxian Basin[J]. Coal Geology of China, 29(5): 1-6, 26. (in Chinese with English abstract)

MA X Y, 1987. Summary of the lithospheric dynamics in China[J]. Acta Geologica Sinica, 61(2): 113-125. (in Chinese with English abstract)

MCGARR A, ZOBACK M D, HANKS T C, 1982. Implications of an elastic analysis of in situ stress measurements near the San Andreas fault[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 87(B9): 7797-7806.

QI J X, JI H G, PENG H, et al., 2013. Earthquake risk analysis in the engineering area of Bohai strait cross-sea channel[J]. Journal of Geomechanics, 19(1): 93-103. (in Chinese with English abstract)

QIAO E W, PENG H, MA X M, 2019. The surrounding rock condition exploration and construction method analysis of cross-Bohai strait passage[J]. Journal of Geomechanics, 25(4): 563-573. (in Chinese with English abstract)

QIAO E W, MA X M, PENG H, et al., 2023. Hydraulic fracturing tests for stress measurements and analysis of stability for frictional sliding of faults at the Southwest foot area of Tianchi volcano in Changbaishan Mountains[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(4): 1545-1557,

QIN X H, ZHANG P, FENG C J, et al., 2014. In-situ stress measurements and slip stability of major faults in Beijing region, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(7): 2165-2180. (in Chinese with English abstract)

QIN X H, CHEN Q C, ZHAO X G, et al., 2020. Experimental study on the crucial effect of test system compliance on hydraulic fracturing in-situ stress measurements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 39(6): 1189-1202. (in Chinese with English abstract)

SONG K Z, WANG M S. 2006. A feasibility study on building Bohai strait tunnel. Ludong University Journal(Natural Science Edition) , 22(3): 253-260. (in Chinese with English abstract)

STOCK J M, HEALY J H, HICKMAN S H, et al., 1985. Hydraulic fracturing stress measurements at Yucca Mountain, Nevada, and relationship to the regional stress field[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 90(B10): 8691-8706.

SUN A Q, NIU S Y, ZHANG J Z, et al., 2013. Analysis of ore-controlling structures in the Linglong and Jiaojia style gold deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 87(S1): 144-147. (in Chinese)

SUN Y, TAN C X, YANG G S, et al., 1997. Quantitative assessment and zonation of regional crustal stability in China[J]. Journal of Geomechanics, 3(3): 42-52. (in Chinese with English abstract)

SUO Y H, LI S Z, LIU X, et al., 2013. Structural characteristics of NWW-trending active fault zones in East China: a case study of the Zhangjiakou-Penglai Fault Zone[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(3): 953-966. (in Chinese with English abstract)

TAN Y A, 1989. The mechanism research of rockburst[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 16(1): 34-38, 54. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, 2014. Brief review and outlook of main estimate and measurement methods for in-situ stresses in rock mass[J]. Geological Review, 60(5): 971-991, 996, 992-995. (in Chinese with English abstract)

WANG H L, HU C, WANG J Q, et al., 2015. The seismic risk assessment on active faults in Yantai city and its adjacent area[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 10(2): 211-226. (in Chinese with English abstract)

WANG M S, SONG K Z, 2013. Urgency and current construction conditions and preliminary scheme of Bohai Strait cross-sea channel[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 37(1): 1-10. (in Chinese with English abstract)

WANG Y H, LI W L, LI Q G, et al., 1998. Method of fuzzy comprehensive evaluations for rockburst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 17(5): 493-501. (in Chinese with English abstract)

WANG Y P, 1979. Intraplate earthquake and Meso-Cenozoic stress field in China[J]. Seismology and Geology, 1(3): 1-11. (in Chinese with English

abstract)

WANG Z C, DENG Q D, CHAO H T, et al., 2006. Shallow-depth sonic reflection profiling studies on the active Penglai-Weihai fault zone offshore of the northern Shandong peninsula[J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(4): 1092-1101. (in Chinese with English abstract)

WU M L, LIAO C T, YUAN J Y, 2002. A study of stress state and engineering stability of underground houses at the Huanggou accumulation power station[J]. Acta Geoscientia Sinica, 23(3): 263-268. (in Chinese with English abstract)

WU Z Q, MAO X C, CHEN J, et al., 2014. Analysis of fault/fracture metallogenicl favourability degree of the middle part of Zhaoping fault belt[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 29(1): 44-50. (in Chinese with English abstract)

XIE F R, CUI X F, ZHAO J T, et al., 2004. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 47(4): 654-662. (in Chinese with English abstract)

XU Z H, YAN M, ZHAO Z H, 1983. Evaluation of the direction of tectonic stress in North China from recorded data of a large number of small earthquakes[J]. Acta Seismologica Sinica, 5(3): 268-279. (in Chinese with English abstract)

XU Z M, HUANG R Q, FAN Z G, et al., 2004. Progress in research on rock burst hazard of long tunnel with large section[J]. Journal of Natural Disasters, 13(2): 16-24. (in Chinese with English abstract)

YANG J Z, 2008. Rock mechanics[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press: 59-71. (in Chinese)

YANG S X, YAO R, CUI X F, et al., 2012. Analysis of the characteristics of measured stress in Chinese mainland and its active blocks and North-South seismic belt[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(12): 4207-4217. (in Chinese with English abstract)

YIN Y H, YE S Y, ZHAO T H, et al., 2017. Marine geo-environment analysis of the proposed bridge-tunnel path system across the Bohai strait and suggestions on construction schemes[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 37(3): 1-16. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J, HUANG L Y, JIANG Y H, et al., 2016. The analysis about characteristics of in-situ stress field in Xinjiang Tianshan area[J]. Journal of Engineering Geology, 24(S1): 1370-1377. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J H, LI Y X, GUO L Q, et al., 2004. Study on present-day deformation and strain field in north china by use of GPS data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 24(3): 40-46. (in Chinese with English abstract)

ZHANG P Z, WANG Q, MA Z J, 2002. GPS velocity field and active crustal blocks of contemporary tectonic deformation in continental china[J]. Earth Science Frontiers, 9(2): 430-441. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X G, WANG S J, ZHANG Z Y, et al. , 2000. Chinese engineering geology[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

ZHANG Y X, 2008. Rock mechanics[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press: 94-99, 106-116. (in Chinese) ZHANG Z H, LIAN H N, ZHANG Y W, 2013. On survey of active faulting at northern areas of Yantai[J]. Shanxi Architecture, 39(1): 36-38. (in Chinese with English abstract)

ZHENG H X, ZHANG X H, ZHAO T H, et al., 2015. In-situ stress field and geological analysis of Bohai Trait[J]. Periodical of Ocean University of China, 45(11): 81-91. (in Chinese with English abstract)

ZHOU J, HUANG X W, WANG X C, et al., 1983. Gravity tectonics of the Chinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geology, 18(4): 345-354. (in Chinese with English abstract)

ZOBACK M D, TOWNEND J, 2001. Implications of hydrostatic pore pressures and high crustal strength for the deformation of intraplate lithosphere[J]. Tectonophysics, 336(1-4): 19-30.

ZOBACK M D, TOWNEND J, GROLLIMUND B, 2002. Steady-state failure equilibrium and deformation of intraplate lithosphere[J]. International Geology Review, 44(5): 383-401.

ZOBACK M D, 2007. Reservoir geomechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 1-332.

附中文参考文献

白世伟，李光煜，1982. 二滩水电站坝区岩体应力场研究[J]. 岩石力学与工程学报，1(1)：45-56.

蔡克明，张公德，1983. 渤海海峡的新构造运动[J]. 海洋科学，7(5)：18-20.

陈东升，纪洪广，袁永忠，等，2023. 岩石非均质程度对水压致裂地应力测试方法影响的分析与讨论[J]. 地质力学学报，29(3)：365-374,

晁洪太，李家灵，崔昭文，1995. 山东及其沿海地区强震(M≥6)发生的地质构造背景[J]. 地震研究，18(2)：188-196.

晁洪太，于慎谔，李家灵，等，2001. 山东半岛地区活断层研究[J]. 东北地震研究，17(4)：1-8.

陈庆宣，王维襄，孙叶，等，1998. 岩石力学与构造应力场分析[M]. 北京：地质出版社.

陈群策，丰成君，孟文，等，2012. 5.12 汶川地震后龙门山断裂带东北段现今地应力测量结果分析[J]. 地球物理学报，55(12)：3923-3932.

邓军，徐守礼，方云，等，1996. 胶东西北部构造体系及金成矿动力学[M]. 北京：地质出版社：16-17.

邓起东，程绍平，闵伟，等，1999. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论[J]. 地质力学学报，5(3)：13-21.

邓起东，张培震，冉勇康，等，2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D辑)，32(12)：1020-1030.

董旭光，周翠英，华爱军，1999. 渤海海峡及邻区现代小震震源机制解分析[J]. 内陆地震，13(1)：7-16.

丰成君，张鹏，孟静，等，2017. 郯庐断裂带及邻区深孔地应力测量与地震地质意义[J]. 地球物理学进展，32(3)：946-967.

冯夏庭，肖亚勋，丰光亮，等，2019. 岩爆孕育过程研究[J]. 岩石力学与工程学报，38(4)：649-673.

高战武，徐杰，宋长青，等，2001. 张家口：蓬莱断裂带的分段特征[J]. 华北地震科学，19(1)：35-42, 54.

葛孚刚，王志才，王纪强，等，2010. 山东省长岛第四纪断裂活动初步研究[J]. 防灾减灾学报，26(4)：13-21.

郭啟良，王成虎，马洪生，等，2009. 汉川 M_S8.0 级大震前后的水压致裂原地应力测量[J]. 地球物理学报，52(5)：1395-1401.

郭玉贵，王红霞，邓志辉，等，2005. 山东沿海及近海地震分形分析[J]. 地球物理学进展，20(1)：155-159.

侯发亮, 刘小明, 王敏强, 1992. 岩爆成因再分析及烈度划分探讨[C]//中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会. 第三届全国岩石动力学学术会议论文选集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社: 448-457.

黄培华, 傅容珊, 1983. 中国岩石层底面地幔对流状态的探讨[J]. 地球物理学报, 26(1): 39-47.

黄永华, 尤惠川, 宋毅盛, 等, 2007. 山东胶东半岛地区断裂最新活动性研究[J]. 震灾防御技术, 2(1): 39-49.

景才瑞, 肖平, 1989. 论李四光的地震地质与地震预报思想[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 23(3): 403-406.

景锋, 盛谦, 张勇慧, 等, 2007. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 26(10): 2056-2062.

孔凡飞, 贾强, 李增学, 等, 2019. 山东黄县盆地古近系李家崖组含煤岩系沉积相特征及演化[J]. 古地理学报, 21(3): 469-478.

李兵, 丁立丰, 王建新, 等, 2019. 山东蓬莱近海岸的地应力状态及断层稳定性评价[J]. 地质力学学报, 25(4): 459-466.

李鹏, 郭奇峰, 刘洪涛, 等, 2017. 山东地区现今地应力场特征与应力积累水平分析[J]. 岩石力学与工程学报, 36(9): 2220-2231.

李四光, 1973. 地震地质[M]. 北京: 科学出版社.

李增学, 魏久传, 兰恒星, 等, 1999. 黄县盆地盆缘断裂活动的阶段性与沉积充填样式[J]. 煤田地质与勘探, 27(6): 4-8.

林文蔚, 赵一鸣, 徐珏, 2000. 胶东招远-平度断裂活动性质及活动时代[J]. 中国区域地质, 19(1): 43-50.

刘方斌, 曲均浩, 李国一, 等, 2018. 山东长岛震群震源机制解一致性参数时空演化特征[J]. 地震工程学报, 40(5): 1034-1041.

刘元坤, 罗超文, 尹健民, 2003. 西部地应力测量与岩爆分析[J]. 岩土力学, 24(S1): 94-95.

吕育林, 2017. 黄县盆地李家崖组煤与油页岩共生成矿特征与组合成矿模式研究[J]. 中国煤炭地质, 29(5): 1-6, 26.

马杏垣, 1987. 中国岩石圈动力学概要[J]. 地质学报, 61(2): 113-125.

祁嘉翔, 纪洪广, 彭华, 等, 2013. 渤海海峡跨海通道工程区地震危险性分析[J]. 地质力学学报, 19(1): 93-103.

乔二伟, 彭华, 马秀敏, 2019. 渤海海峡跨海通道围岩条件探查与施工方法分析[J]. 地质力学学报, 25(4): 563-573.

乔二伟, 马秀敏, 彭华, 等, 2023. 长白山天池火山西南麓水压致裂法地应力测量及其实测数据在断裂稳定性分析中的应用[J]. 地球物理学报, 66(4): 1545-1557,

秦向辉, 张鹏, 丰成君, 等, 2014. 北京地区地应力测量与主要断裂稳定性分析[J]. 地球物理学报, 57(7): 2165-2180.

宋克志, 王梦恕, 2006. 修建渤海海峡跨海隧道可行性初探[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 22(3): 253-260. 孙爱群, 牛树银, 张建珍, 等, 2013. 胶东玲珑式和焦家式金矿控矿构造分析[J]. 地质学报, 87(S1): 144-147.

孙叶, 谭成轩, 杨贵生, 等, 1997. 中国区域地壳稳定性定量化评价与分区[J]. 地质力学学报, 3(3): 42-52.

索艳慧, 李三忠, 刘鑫, 等, 2013. 中国东部NWW向活动断裂带构造特征: 以张家口-蓬莱断裂带为例[J]. 岩石学报, 29(3): 953-966.

谭以安, 1989. 岩爆形成机理研究[J]. 水文地质工程地质, 16(1): 34-38, 54.

王成虎, 2014. 地应力主要测试和估算方法回顾与展望[J]. 地质论评, 60(5): 971-991, 996, 992-995.

王华林, 胡超, 王纪强, 等, 2015. 烟台市及其邻近地区活断层地震危险性评价[J]. 震灾防御技术, 10(2): 211-226.

王梦恕, 宋克志, 2013. 渤海湾跨海通道建设的紧迫性及现实条件和初步方案[J]. 北京交通大学学报, 37(1): 1-10.

王元汉, 李卧龙, 李启光, 等, 1998. 岩爆预测的模糊数学综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 17(5): 493-501.

汪一鹏, 1979. 我国板内地震和中新生代应力场[J]. 地震地质, 1(3): 1-11.

王志才, 邓起东, 晁洪太, 等, 2006. 山东半岛北部近海海域北西向蓬莱—威海断裂带的声波探测[J]. 地球物理学报, 49(4): 1092-1101.

吴满路, 廖椿庭, 袁嘉音, 2002. 荒沟蓄能电站地下厂房地应力状态与工程稳定性研究[J]. 地球学报, 23(3): 263-268.

吴泽权, 毛先成, 陈进, 等, 2014. 招平断裂带中段断裂成矿有利度分析[J]. 地质找矿论丛, 29(1): 44-50.

谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 等, 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, 47(4): 654-662.

徐则民, 黄润秋, 范柱国, 等, 2004. 长大隧道岩爆灾害研究进展[J]. 自然灾害学报, 13(2): 16-24.

许忠淮, 阎明, 赵仲和, 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J]. 地震学报, 5(3): 268-279.

杨建中, 2008. 岩石力学[M]. 北京: 冶金工业出版社: 59-71.

尹延鸿, 叶思源, 赵铁虎, 等, 2017. 渤海海峡跨海桥隧建设的海洋地质环境分析及修建方案思考[J]. 海洋地质与第四纪地质, 37(3): 1-16.

张杰, 黄禄渊, 江英豪, 等, 2016. 新疆天山地区地应力场特征分析[J]. 工程地质学报, 24(S1): 1370-1377.

张静华, 李延兴, 郭良迁, 等, 2004. 用GPS测量结果研究华北现今构造形变场[J]. 大地测量与地球动力学, 24(3): 40-46.

张培震, 王琪, 马宗晋, 2002. 中国大陆现今构造运动的GPS速度场与活动地块[J]. 地学前缘, 9(2): 430-441.

张咸恭, 王思敬, 张倬元, 等, 2000. 中国工程地质学[M]. 北京: 科学出版社.

张永兴, 2008. 岩石力学[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社: 94-99, 106-116.

张振晗, 连海宁, 张耀文, 2013. 烟台北部地区活动断裂概述[J]. 山西建筑, 39(1): 36-38.

郑红霞, 张训华, 赵铁虎, 等, 2015. 渤海海峡地应力场研究及地质条件评价[J]. 中国海洋大学学报, 45(11): 81-91.

中国地震局, 2018. 原地应力测量 水压致裂法和套芯解除法技术规范: DB/T 14-2018[S]. 北京: 中国标准出版社.

《中国岩石圈动力学地图集》编委会, 1991. 中国岩石圈动力学概论[M]. 北京: 地震出版社: 271-539.

周玖, 黄修武, 王学昌, 等, 1983. 青藏高原重力构造[J]. 地质科学, 18(4): 345-354.