引用格式：张扬，商琳，王淼，等，2025. 南堡凹陷地壳构造稳定性：源自地震活动时空特征的证据[J]. 地质力学学报，31（2）：313−324. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024036

Citation: ZHANG Y，SHANG L，WANG M，et al.，2025. Tectonic stability of the Nanpu sag: Evidence from temporal and spatial characteristics of seismic activity[J]. Journal of Geomechanics，31（2）：313−324. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024036

南堡凹陷地壳构造稳定性：源自地震活动时空特征的证据

张　扬，商　琳，王　淼，吴海涛，段　彬
ZHANG Yang，SHANG Lin，WANG Miao，WU Haitao，DUAN Bin

中国石油冀东油田分公司，河北 唐山 063000
PetroChina Jidong Oilfield Company, *Tangshan* 063000, *Hebei*, *China*

Tectonic stability of the Nanpu sag: Evidence from temporal and spatial characteristics of seismic activity

Abstract: ［**Objective**］The evaluation of regional tectonic stability plays a crucial role in the planning and construction of major projects. Given that the Nanpu sag is the site for China's first offshore gas storage facility, its tectonic stability is naturally a focal point of concern. ［**Methods**］Based on historical seismic data for the region, this study summarizes the spatiotemporal distribution of seismic activities in the Nanpu sag and its surrounding areas. It analyzes the rupture modes of the Tangshan−Hejian−Cixian fault zone and the Zhangjiakou−Penglai fault zone, and explores the tectonic stability of the Nanpu sag. ［**Results**］The results indicate that the Nanpu sag is a relatively stable "safe island" near active tectonic zones. Regionally, stress accumulated around the periphery of the Nanpu sag is mainly released through the activity of faults such as the Luanxian−Laoting and Baodi−Ninghe faults, and the influence of the seismic activity at the periphery on the interior of the Nanpu sag is limited. Internally, a large-scale creep-dominated extensional deformation system has developed within the Nanpu sag. ［**Conclusion**］Given the current tectonic stress background, only a small magnitude of stress accumulation is required to trigger unstable sliding of pre-existing normal faults within the Nanpu sag. This suggests that stress cannot accumulate over long time scales, and thus the interior of the Nanpu sag lacks conditions for the occurrence of major earthquakes.

Keywords: rupture model of fault zone; seismic activities; tectonic stability; Nanpu sag; tectonic stress

摘　要：区域构造稳定性评价在重大工程的规划和建设中发挥着重要的参考作用。目前南堡凹陷作为中国海上储气库的建设地，其构造稳定性成为关注的热点。基于区域历史地震数据，总结了南堡凹陷及周边地震活动的时空分布规律，分析了唐山−河间−磁县断裂带和张家口−蓬莱断裂带的破裂模式，探讨了南堡凹陷地壳的构造稳定性。研究结果表明，南堡凹陷是活动构造带附近相对稳定的“安全岛”。区域上，南堡凹陷周缘积累的应力主要通过滦县−乐亭和宝坻−宁河等断裂带活动得以释放，周缘的地震活动对南堡凹陷内部的影响十分有限；而在南堡凹陷的内部，发育一个以蠕滑为主的大型伸展变形系统。根据现今的构造应力背景，南堡凹陷内的应力仅需要积累很小的量级就会诱发先存正断层的不稳定滑动，这意味着应力无法长期积累。因此，南堡凹陷内部不具备发生大地震的条件。

关键词：断裂带破裂模式；地震活动；地壳构造稳定性；南堡凹陷；构造应力

基金项目：地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项（2024ZD1000701）
This research is financially supported by the National Science and Technology Project on Deep Earth Probe and Mineral Resources Exploration (Grant No. 2024ZD1000701).

第一作者：张扬（1982—），女，硕士，工程师，主要从事油气田开发等研究工作。Email：zhangyang008@petrochina.com.cn
通信作者：商琳（1987—），男，博士，高级工程师，主要从事油气田开发、油气藏改建储气库等研究工作。Email：shanglinsonny@163.com

收稿日期：2024−04−09；**修回日期：**2024−12−29；**录用日期：**2025−01−02；**网络出版日期：**2025−01−02；**责任编辑：**范二平

中图分类号：P54; P315.2 文献标识码：A 文章编号：1006−6616(2025)02−0313−12
DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024036

0 引言

地壳稳定性是指在地球内部的现代构造运动、地震活动以及岩浆活动影响下的地壳及表层的相对稳定程度(李兴唐等, 1987; 陈庆宣, 1992; 胡海涛, 2001)。这种稳定性包括构造稳定性、岩土体稳定性和地表稳定性3个方面(易明初, 2003; 吴中海等, 2016)。其中, 构造稳定性主要是由地壳的结构、应力场等因素决定的, 反映了地壳抵抗外界影响和自身运动的能力。首都经济圈位于中国华北平原地震带的北缘, 强震活动历来频繁, 历史上就发生过诸如1679年河北三河8.0级地震、1969年渤海7.4级地震以及1976年唐山7.8级地震(徐杰等, 1996; 刘保金等, 2011; 林向东等, 2017; Zhang et al., 2022)。因此, 首都经济圈现今的地壳稳定性问题一直以来受到大家的广泛关注(张树轩等, 2018; 丰成君等, 2019; 杜东和王国明, 2020; 王惠卿等, 2022)。

近年来, 为保障首都经济圈的快速发展, 中国石油天然气集团有限公司在渤海湾盆地北缘改造了多个油藏为地下储气库(高广亮等, 2023; 王起京等, 2003; 杨树合等, 2003)。其中, 位于京津冀腹地的南堡凹陷冀东储气库, 作为中国海上储气库, 具有油藏构造完整性好、储层厚度大、渗透率高等特点。然而, 南堡凹陷距离唐山−河间−磁县地震构造带和张家口−蓬莱地震构造带较近, 区域地震活动是否会影响凹陷内储气库的安全运行, 是一个亟待解决的问题。因此, 开展南堡凹陷地壳构造稳定性研究, 对于保障首都经济圈周边地下储气库的安全建设和运行, 具有重要的理论和实践意义, 值得深入探讨。

基于南堡凹陷及周边地震活动的时空分布规律, 文章分析了唐山−河间−磁县断裂带和张家口−蓬莱断裂带的破裂规律, 探讨了周边强震对南堡凹陷地震活动的影响, 并结合现今地应力状态分析了南堡凹陷地壳的构造稳定性。

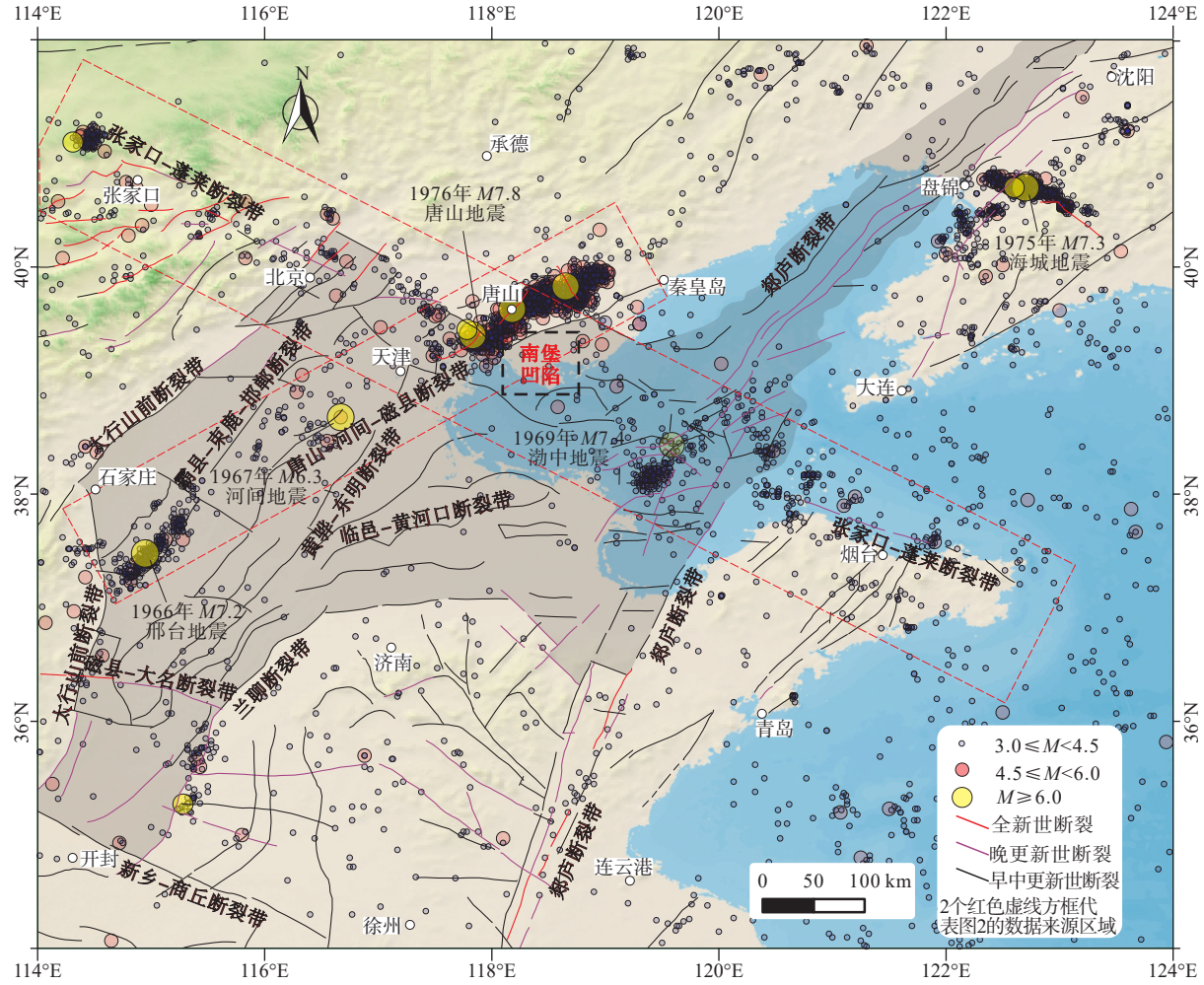
1 区域地质概况

南堡凹陷位于华北陆块的北部, 是渤海湾盆地北缘中—新生界叠合的含油气凹陷(周海民等, 2000)。南堡凹陷周边发育3条重要的地震带, 分别是北西向张家口−渤海地震带、华北平原地震带以及北东向郯庐地震带。张家口−渤海地震带是中国著名的强震集中带, 其以张家口张北县为起点, 经怀来、唐山等地向南东延伸至渤海, 最终到达山东的蓬莱及黄海北部海域, 与郯庐断裂带相交, 整体呈北西—南东向延伸, 全长约为600 km(张莹莹等, 2015)。地震带内主要的活动断裂为张家口−蓬莱断裂带, 该断裂带形成于中生代, 控制了断裂带两侧的沉积、岩浆和构造作用(徐杰等, 1998)。进入新生代, 特别是第四纪以来, 由于区域构造应力场的转变, 该断裂带表现为左行走滑的性质(冉勇康等, 1995; Zhang et al., 2018)。华北平原构造带是中国东部重要的地震活跃区, 历史上发生过多次的M 6.0以上的地震, 如1679年三河M 8.0地震、1966年邢台M 7.2地震、1967年河间M 6.3地震和1976年唐山M 7.8地震。这些地震主要集中在北东向唐山−河间−磁县右行走滑断裂带及其与北西向张家口−蓬莱左行走滑断裂带的交汇处(冉勇康等, 2001; Yin et al., 2015; 林向东等, 2017)。郯庐地震带又称之为郯庐断裂带, 其形成于中三叠世华北陆块与华南陆块的碰撞造山中(Zhang et al., 2007; Zhu et al., 2009)。中侏罗世末其发生复活, 并在随后的白垩纪时期经历了左行平移—强伸展—左行平移—弱伸展的交替(Zhu et al., 2018)。进入新生代, 由于区域构造应力场的转变, 渤海海域的郯庐断裂带依次发生了古近纪右行平移正断—古近纪末逆右行平移—新近纪弱伸展—第四纪以来的逆右行平移4个演化阶段(詹润和朱光, 2012; 胡惟等, 2013)。郯庐断裂带中段(经山东—渤海海域—辽河坳陷)现今一直处于活动状态。在断裂带及其附近, 历史上发生过多次大地震, 如1668年郯城M 8.5大地震、1957年渤海M 7.5地震、1969年渤海中部M 7.4地震以及1975年海城M 7.3地震。

2 历史地震时空特征

南堡凹陷所处的渤海湾盆地是中国地震活动较为活跃的地区之一。文章基于国家地震科学数

据中心（https://data.earthquake.cn），收集了南堡凹陷及周缘 M_L3.0 以上的地震观测数据。利用双差定位（HypoDD）方法对数据进行了精定位（Waldhauser and Ellsworth, 2000）。从结果上看，南堡凹陷及其周缘的地震活动主要分布在北西向张家口−蓬莱断裂带、北东向唐山−河间−磁县断裂带、北东向郯庐断裂带、北北东向兰聊断裂带和近南北向太行山前断裂带附近（图 1）。平面上，南堡凹陷位于北西向张家口−蓬莱断裂带和北东向唐山−河间−磁县断裂带的交汇部。历史地震活动揭示了唐山−河间−磁县断裂带和张家口−蓬莱断裂带分别具有分段性和复杂性。唐山−河间−磁县断裂带的中段（天津—河间）存在一个地震活动较少的地区（图 1），Yin et al.（2015）将其称之为地震空区（seismic gap），认为这个地震空区长度约 160 km，已经 8400 多年没有发生地表破裂。张家口−蓬莱断裂带是一条控制区域新生代构造活动的地壳构造带，由近 20 条北西/北西西向次级断裂组成的（徐杰等，1998）。沿着该断裂带发生过一系列强震和大量的中小地震。值得注意的是，历史地震的空间分布揭示了张家口−蓬莱断裂带在经过南堡凹陷时，分成了南、北 2 支。北支为北西向滦县−乐亭断裂带，南支为北西西向宝坻−宁河断裂带。沿着这 2 条次级断裂带，发生过多次 4.5 级以上且 6.0 级以下的地震（图 1）。这一复杂特征可能是南堡凹陷内部至今较少发生地震的原因。



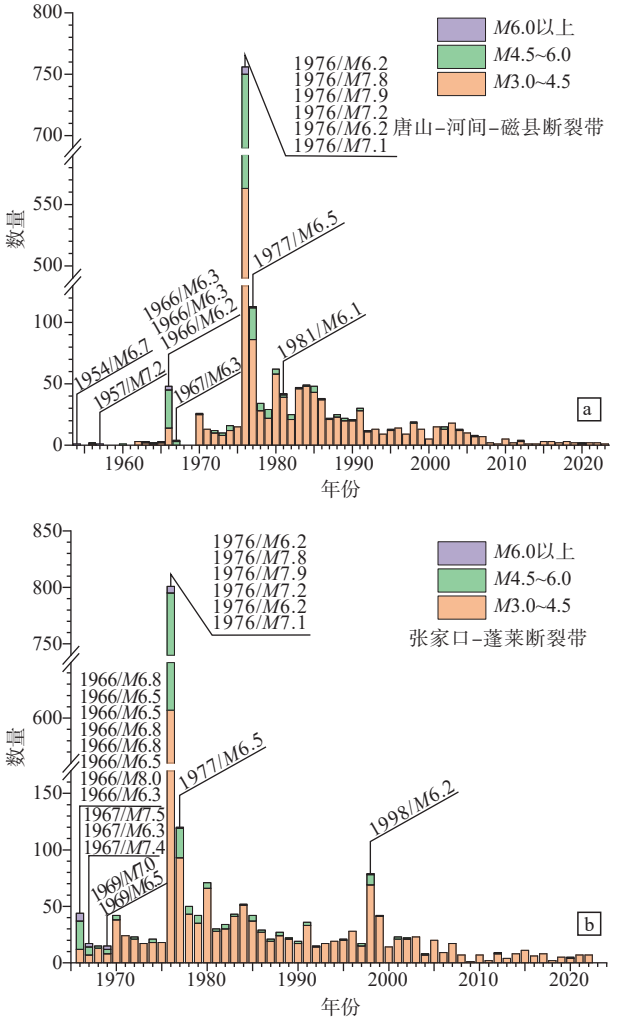
活动构造数据引自邓起东，2007；历史地震数据引自闵子群等（1995）及国家地震科学数据中心 http://data.earthquake.cn

图 1　渤海湾盆地（灰色范围）及周缘地区活动构造纲要图

Fig. 1　Active tectonic map of the Bohai Bay Basin (gray area) and its periphery

The active faults are from Deng, 2007. Historical earthquake data are from Min et al., 1995, National Earthquake Data Center http://data.earthquake.cn, and The First Monitoring and Application Center, CEA.

从地震发生的时间上看，唐山−河间−磁县断裂带（图 2a）和张家口−蓬莱断裂带（图 2b）历史有记录的大地震（大于 6.0 级）均发生在 20 世纪，其中地震发生最频繁的一年为 1976 年，与唐山 M 7.8 大地震有关。进入 21 世纪之后，这 2 条断裂带的活动性均不强，中强震发育不多（图 2）。选取唐山−河间−磁县断裂带和张家口−蓬莱断裂带历史上发生地震活动最多的 10 个年份数据进行分析，发现张家口−蓬莱断裂带地震活动具有沿着断裂带走向向北西方向扩展的特征（图 3）。唐山−河间−磁县断裂带的地震活动迁移规律不明显，但 Yin et al.（2015）根据断裂带近 400 年来最大的地震事件，即 1624 年的滦县地震（M 6.5）、1830 年磁县地震（M 7.5）、1966 年邢台地震（M 7.2）和 1976 年唐山地震（M 7.8），提出唐山−河间−磁县断裂带的地震活动具有从北东和南西方向向天津扩展的特征。



a—唐山−河间−磁县断裂带历史地震时间频率图；b—张家口−蓬莱断裂带历史地震时间频率图

图 2 唐山−河间−磁县断裂带和张家口−蓬莱断裂带历史地震时间频率图

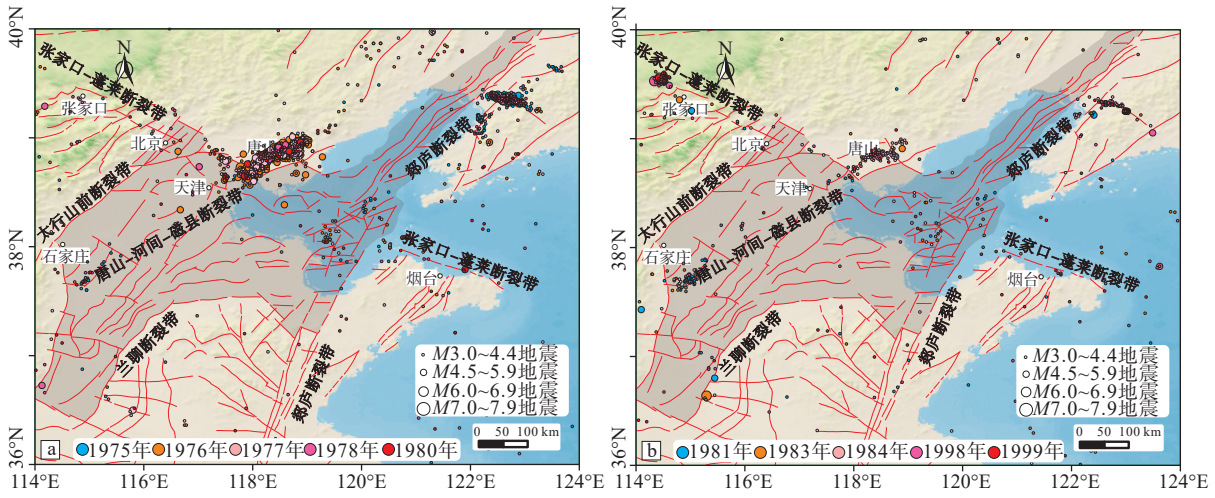
Fig. 2 Time-frequency chart of historical earthquakes at the Tangshan−Hejian−Cixian and Zhangjiakou−Penglai fault zones

(a) Time-frequency chart of historical earthquakes at the Tangshan−Hejian−Cixian fault zone; (b) Time-frequency chart of historical earthquakes at the Zhangjiakou−Penglai fault zone

3 发震断裂破裂模式

张家口−蓬莱断裂带和唐山−河间−磁县断裂带的破裂模式直接影响南堡凹陷的地壳构造稳定性。野外观察显示，张家口−蓬莱断裂带由一系列的北西向和近东西向的次级断裂带组成，呈左阶雁列式分布（尤惠川等，2008）。其在剖面上多构成花状构造，具有左行兼具正断的性质，断裂带的活动控制了周边第四纪盆地的形成（索艳慧等，2013）。从张家口−蓬莱断裂带周边地震的震源机制解上看，其绝大多数也均是以左行走滑性质为特征，除张家口西南部存在个别正断兼走滑的结果（图 4）。唐山−河间−磁县断裂带由一系列北北东/北东向次级断裂和北西向次级断裂组成，其中河间一带的北北东/北东向断裂可以观察到右行平移性质（徐杰等，1996）；北西向断裂带在天津地区则是以正断作用为特征（陈宇坤等，2004）。唐山−河间−磁县断裂带相关地震震源机制解同样反映这一特征。整条构造带的震源机制以右行走滑为主，在唐山地区则右行走滑和正断兼有发育（图 4）。

基于上述分析，文章认为唐山−河间−磁县断裂带是由一系列北北东/北东向右行走滑断裂带和其夹持的北西向正断层组成的（图 5a）。北北东/北东向断裂带在平面上构成了右行右阶的几何学样式。断裂带上以右行走滑破裂为特征的地震代表了北北东/北东向次级断裂带的活动，而以正断破裂为特征的地震则代表了北西向次级断裂带的活动（图 5a）。张家口−蓬莱断裂带上的地震活动具有向北西方向迁移的规律，且断层西北端发育左行走滑和正断性质的地震，据此，文章认为张家口−蓬莱断裂带的破裂模式可以用走滑断裂尖端合成分支破裂（Synthetic branch fracture）和尖端羽状破裂（Pinnate fracture）的模式解释（Kim et al., 2004; Choi et al., 2016; 图 5b）。张家口−蓬莱断裂带的破裂是向北西方向扩展的，属于走滑断裂带的尖端破坏。



a—1975—1980 年；b—1981—1999 年

图 3　渤海湾盆地及其周缘不同年份地震分布图（图中红色线条为断裂/带）

Fig. 3　Distribution of earthquakes in the Bohai Bay Basin and its periphery in different years (the red lines are fault zones)

(a) Earthquakes from 1975 to 1980; (b) Earthquakes from 1981 to 1999

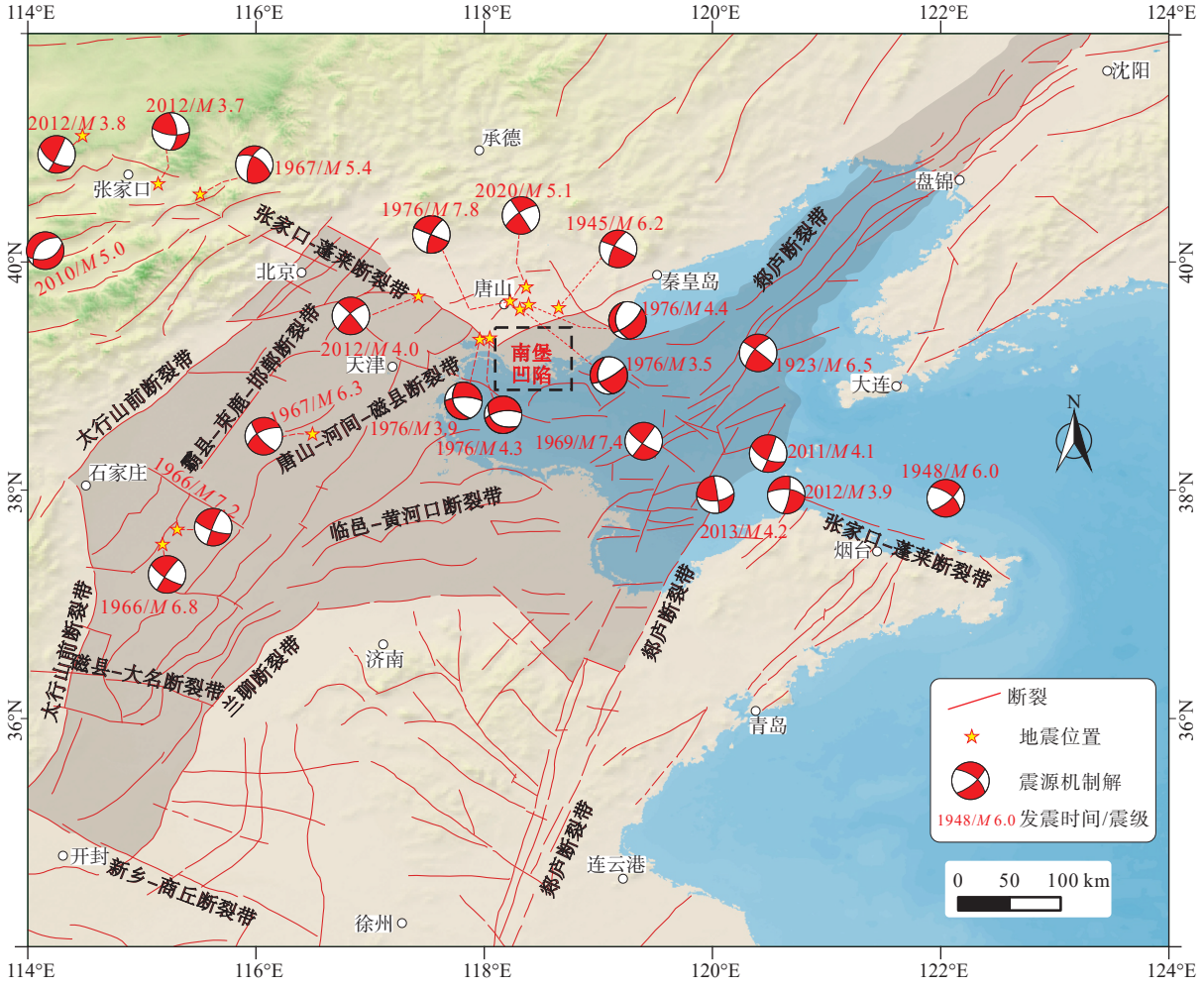
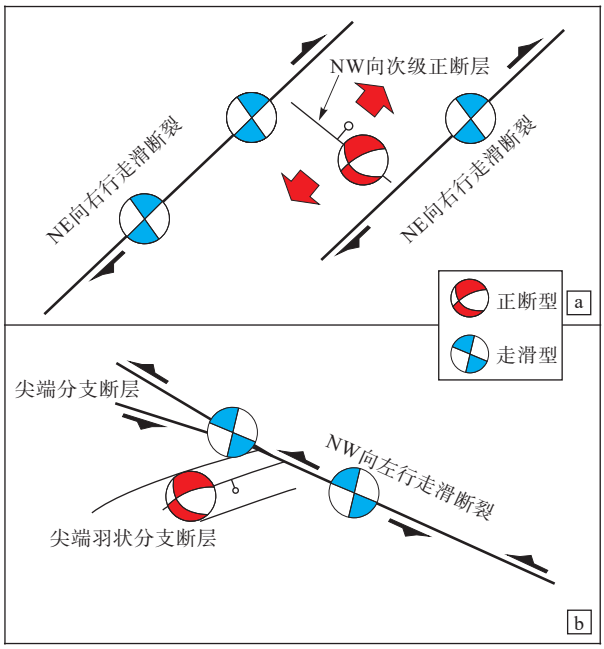


图 4　唐山–河间–磁县断裂带和张家口–蓬莱断裂带相关的震源机制解（Chen and Nábelek，1988；徐杰等，1996；张宏志等，2008；高彬等，2016；林向东等，2017；王想等，2021；Zhang et al.，2022）

Fig. 4　Focal mechanism solutions of earthquakes related to the Tangshan−Hejian−Cixian and the Zhangjiakou−Penglai fault zones (data from Chen and Nábelek, 1988; Xu et al., 1996; Zhang et al., 2008; Gao et al., 2016; Lin et al., 2017; Wang et al., 2021; Zhang et al., 2022)



a—唐山−河间−磁县断裂带破裂构造模式图; b—张家口−蓬莱断裂带破裂构造模式图

图 5 断裂带破裂构造模式图

Fig. 5 Damage models of the fault zones

(a) Damage model of the Tangshan−Hejian−Cixian fault zone; (b) Damage model of the Zhangjiakou−Penglai fault zone

4 南堡凹陷地壳构造稳定性

针对南堡凹陷来说,影响其地壳构造稳定性的主要因素包括地震活动和构造活动2个方面。基于区域历史地震数据,文章分析了南堡凹陷及周边地震活动的时空分布特征以及活动断裂的破裂模式,并从周缘地震活动和现今地应力状态2个方面探讨了南堡凹陷的地壳构造稳定性。

4.1 地震活动对南堡凹陷地壳构造稳定性的影响

南堡凹陷及周缘的地震活动主要是沿着张家口−蓬莱断裂带和唐山−河间−磁县断裂带分布的。根据上文分析,张家口−蓬莱断裂带的破裂模式是向着北西方向扩展的,且断裂带在经过南堡凹陷时,分成了南、北2支,这一特征使得南堡凹陷地震活动并不活跃,地壳相对稳定。唐山−河间−磁县断裂带位于南堡凹陷的西北部,距离南堡凹陷最近的断裂带北东段历史上发生过多次大地震。为了进一步了解该段断裂带地震活动对南堡凹陷地壳构造稳定性的影响,文章收集了南堡凹陷内部历史地震目录,共计78条(其中59条数据包含震源深度)。地震数据显示,凹陷内大于M3.0的地震共发生过4次(最大为M4.3),其余的74次地震均小于M3.0。凹陷内震源深度变化于5～29 km之间,以5～12 km为主(图6)。

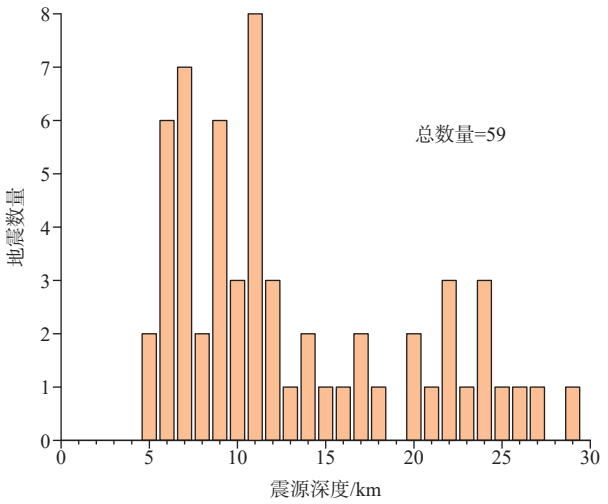


图 6 南堡凹陷历史地震震源深度分布图

Fig. 6 Distribution of the hypocenter depth of historical earthquakes in the Nanpu sag

从地震的平面分布规律上看,南堡凹陷内的历史地震集中分布在北西向柏各庄断裂带、南堡2号、南堡3号和南堡4号构造带附近(图7)。震级最大的M4.3地震位于南堡2号构造带的北部,共计发生过2次(图7),时间上与1976年唐山M7.8地震对应。剖面上,将59个具有震源深度的地震数据(均小于M3.0级)按照南堡凹陷新生界最大厚度8 km为界(静禹钱等, 2023),分成5～8 km和8～29 km两组,再与凹陷内古近系沙河街组三段一亚段底界构造和太古界顶面构造叠合。分析结果显示,南堡凹陷新生界内部的地震主要分布在凹陷的东南部,与北西向柏各庄断裂带和南堡2—4号构造带的活动有关(图8a)。南堡凹陷8 km深度之下的地震活动规律性不强(图8b),指示了基底断裂格架的复杂性。值得注意的是,虽然凹陷内与1976年唐山M7.8大地震时间上对应的M4.2～4.3地震缺少震源深度数据,但是从叠合结果上推测,这些地震应该是由唐山M7.8大地震引发的凹陷基底断裂活动造成的,即与高柳断裂带的活动有关(图8b)。这一特征可能从侧面暗示了周边大的地震活动对南堡凹陷地壳构造稳定性影响有限。

4.2 现今地应力状态对南堡凹陷地壳构造稳定性的影响

晚新生代以来,中国东部乃至整个东亚地区的

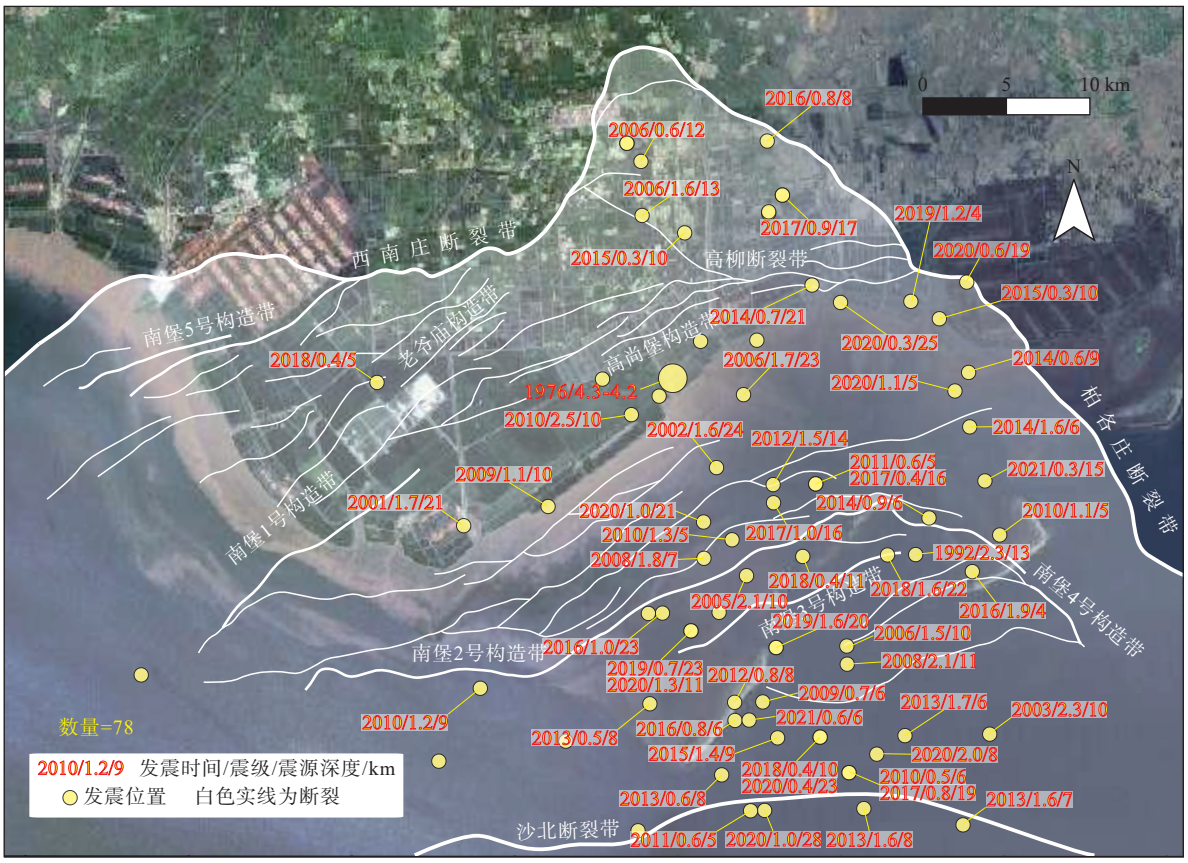


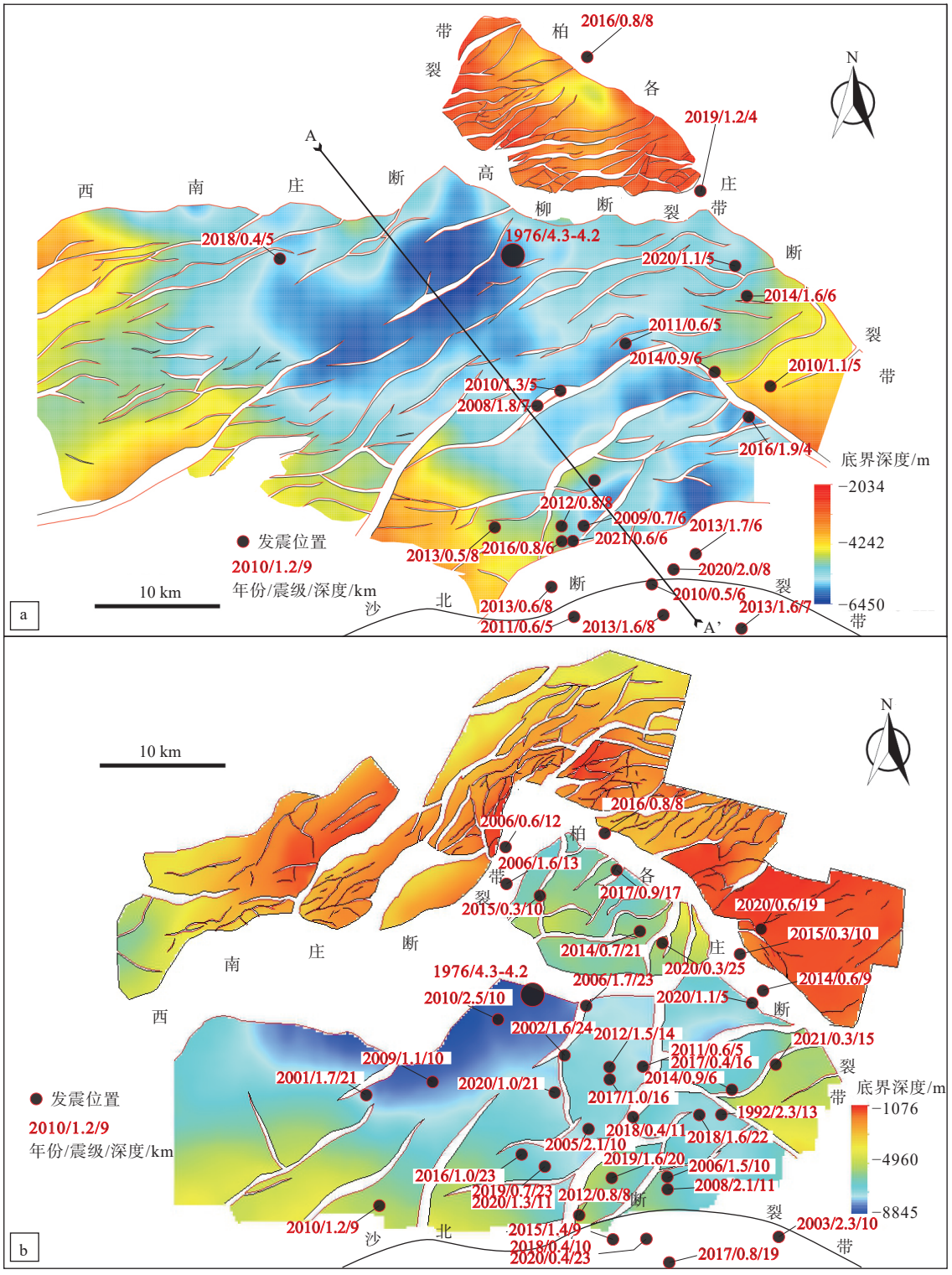
图 7　南堡凹陷内历史地震分布图（地震数据来源与图 1 相同）

Fig. 7　Distribution of historical earthquakes in the Nanpu sag (seismic data from the same source as Fig. 1)

构造活动均受控于太平洋板块和菲律宾板块的向西俯冲和青藏高原的向东扩展和挤出(Hao et al., 2019; Wang and Shen, 2019; Su et al., 2021; Shu et al., 2023)。华北地块内部存在近东西向的挤压和近南北向的拉张作用，造成北东/北北东向断裂发生右行走滑，北西/北西西向断裂发生左行走滑(Tapponnier et al., 1982; Xu and Ma, 1992; Zhang et al., 2018)。南堡凹陷位于北东向唐山−河间−磁县右行走滑断裂和北西向张家口−蓬莱左行走滑断裂的交汇部，周边地震活动频发。上文历史地震事件的时空分布规律已揭示了南堡凹陷是属于活动构造带附近相对稳定的“安全岛”，造成区域相对稳定的主要原因可能与南堡凹陷自身的构造框架有关。

南堡凹陷被北东/北北东向西南庄断裂带、北西向柏各庄断裂带和近东西向的沙北断裂带所围限，平面上呈 1 个三角形(图 7)。晚中生代以来，南堡凹陷经历了多期沉降(周海民等，2000; 童亨茂等，2018)，凹陷内形成了多个方向的次级断裂带，包括北东/北东东向南堡 1—3 号构造带、南堡 5 号构造带、老爷庙构造带和高尚堡构造带，北西/北西西向南堡 4 号构造带和北西西向高柳断裂带(图 7)。大量的地震剖面揭示了北东/北东东向断裂带和北西西向高柳断裂带分别向南东和南倾为主，剖面上呈上陡下缓的犁式，具有正断层的几何学特征(图 9; 王浩然等，2016; 王建伟等，2019; 商琳等，2024)；而北西/北西西向南堡 4 号构造带在剖面上则呈现出典型的花状构造(Liu et al., 2022)。综合上述构造特征可知，南堡凹陷是 1 个大型的伸展变形系统，北西/北西西向断裂带的左行走滑是为了协调北东/北东东向正断层上盘向南东的滑动(图 10)。水压致裂地应力测量结果也证实了南堡凹陷的应力结构属于正断型(杨跃辉等，2022)。

断层的滑动行为直接决定了地震的破坏规模、震动持续时间和地表结构破坏程度。一般活动断层的基本滑动形式包括了蠕滑和黏滑。蠕滑指的是断层活动速率缓慢的无震滑动，这里的无震指的是无较大的地震。相关学者曾对南堡凹陷中的活动断层速率进行了定量评价，评价结果揭示沙河街期、东营期、馆陶期及明化镇期断层活动速率分别为 0.027 mm/a、0.033 mm/a、0.003 mm/a 及 0.010



a—河街组三段一亚段底界构造与地震(5 km<震源深度≤8 km)叠合图;b—太古界顶面构造与地震(8 km<震源深度<12 km)叠合图

图 8 南堡凹陷底界构造与地震叠合图(图中地震数据来源与图 1 相同)

Fig. 8 Earthquake hypocenter superimposed on maps of the boundary structures of strata in the Nanpu sag (seismic data from the same source as Fig. 1)

(a) Earthquake hypocenter (5 km < depth ≤ 8 km) superimposed on a map of the lower boundary structures of the first submember of the third member of the Paleogene Shahejie Formation ; (b) Earthquake hypocenter (8 km<depth<12 km) superimposed on a map of the surface boundary structures of the Archean strata

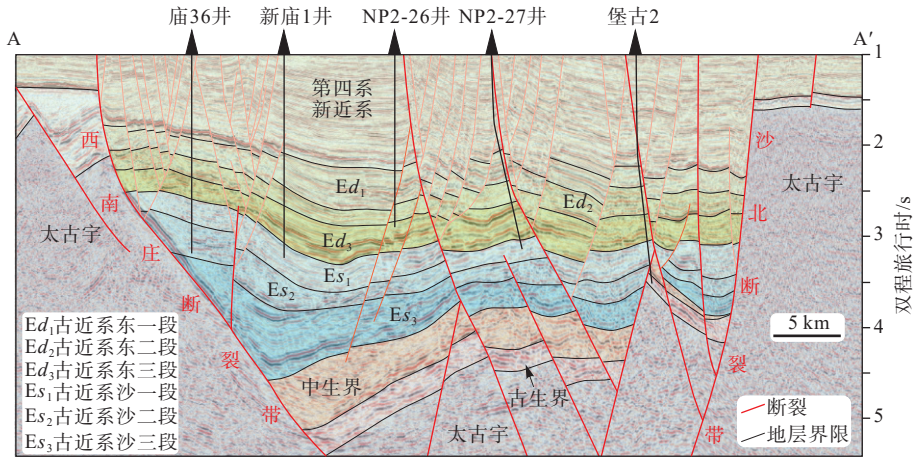


图 9　南堡凹陷地震剖面图（剖面位置见图 8a；商琳等，2024）

Fig. 9　The seismic profile of the Nanpu sag (Shang et al., 2024), the profile location is shown in Fig. 8a.

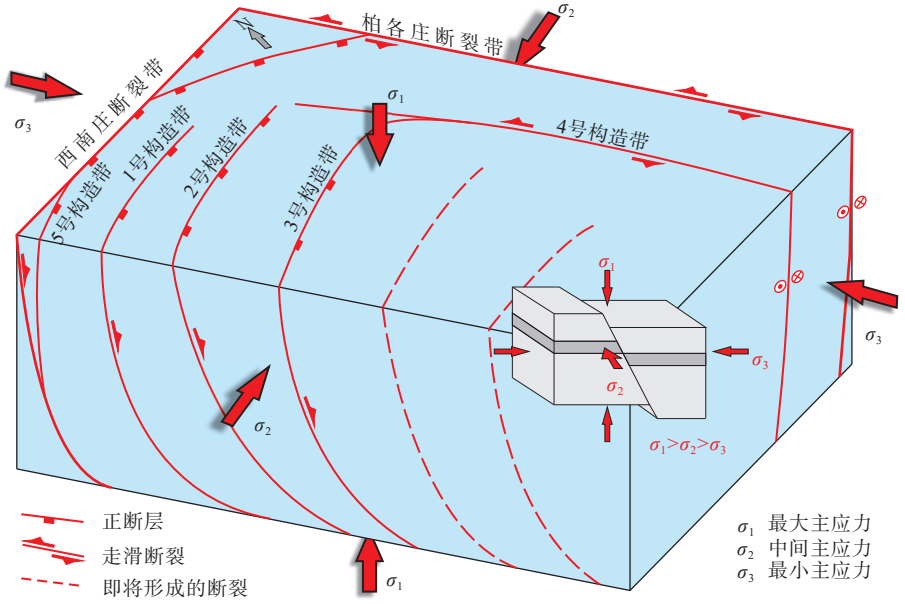


图 10　现今地应力状态下的南堡凹陷构造模式图

Fig. 10　Tectonic model of the Nanpu sag under the present-day stress state

mm/a(万涛等, 2012), 低于鲜水河断裂带乾宁段非震运动速率(5.5～7.8 mm/a; Qiao and Zhou, 2021), 与系舟山北麓断裂带茶房口段的蠕滑速率(0.25 mm/a)相当(闫小兵等, 2023)。此外, 从断裂带内的物质成分上看, 南堡凹陷内的中生界至新生界除馆陶组发育火山岩外, 其余地层均是以泥岩、细砂岩或砂泥岩互层为主。泥岩中的裂缝及断裂部常发育焦沥青、绿泥石、方沸石和伊利石等矿物(Han et al., 2021)。实验矿物学揭示绿泥石和伊利石等矿物的存在可以造成断层摩擦系数的降低(Collettini and Holdsworth, 2004), 使其更易发生蠕滑变形。据此, 文章认为南堡凹陷内的正断层活动行为主要以蠕滑为主。

南堡凹陷的构造框架配合现今的地应力状态与经典的正断层形成模式完全一致, 即最大主应力垂直、水平最大主应力与正断层走向平行(图 10)。在正断层以蠕滑变形为主的状态下, 凹陷内的应力得不到长时间尺度的积累, 凹陷内部不具备发生大地震的条件, 或者说应力积累只需要很小的量级就会诱发先存正断层不稳定滑动, 进而发生应力释放, 形成微震。此外, 从更大的区域上看, 南堡凹陷周缘的应力被周边断裂带(如滦县–乐亭断裂带和宝坻–宁河断裂带)活动释放。因此, 凹陷外部的发震模式以及凹陷自身的构造框架在现今构造应力场的作用下, 共同造就了南堡凹陷具有相对稳定的地壳。

5 结论

(1)南堡凹陷及周边的地震活动主要是沿着北西向张家口−蓬莱断裂带和北东向唐山−河间−磁县断裂带分布。张家口−蓬莱断裂带在经过南堡凹陷时,分成了南、北2支。北支为北西向滦县−乐亭断裂带,南支为北西西向宝坻−宁河断裂带。整体上,张家口−蓬莱断裂带的地震活动向北西扩展,而唐山−河间−磁县断裂带的地震活动从北东和南西两段向天津扩展。

(2)张家口−蓬莱断裂带为左行走滑断裂带,其破裂模式属于尖端破坏,主要发育合成分支破裂和尖端羽状破裂2种样式,合成分支破裂形成以左行走滑为特征的地震,而尖端羽状破裂形成以正断为特征的地震;唐山−河间−磁县断裂带是由一系列北北东/北东向右行右阶雁列式走滑断裂带和其夹持的北西向正断层组成,以右行走滑破裂为特征的地震代表了北北东/北东向次级断裂的活动,而以正断破裂为特征的地震则代表了北西向次级断裂带的活动。

(3)南堡凹陷是活动构造带附近相对稳定的“安全岛”。从区域上看,南堡凹陷周缘的应力积累被滦县−乐亭和宝坻−宁河等断裂带活动释放,周缘的地震活动对于南堡凹陷内部的影响极为有限;从自身上看,南堡凹陷的构造框架是一个以蠕滑为主的大型伸展变形系统,在现今的构造应力背景下,南堡凹陷内的应力只需要积累很小的量级就会诱发先存正断层不稳定滑动。由于应力得不到长期的积累,因此南堡凹陷内部不具备发生大地震的条件。

References

CHEN Q X, 1992. An approach to assessment of regional crustal stability[J]. Quaternary Sciences, 12(4): 289-292. (in Chinese with English abstract)

CHEN W P, NÁBELEK J, 1988. Seismogenic strike-slip faulting and the development of the North China basin[J]. Tectonics, 7(5): 975-989.

CHEN Y K, REN F, ZHANG C F, et al., 2004. Characteristics of Late Quaternary activity of the Haihe buried fault in Tianjin municipality[J]. Seismology and Geology, 26(1): 111-121. (in Chinese with English abstract)

CHOI J H, EDWARDS P, KO K, et al., 2016. Definition and classification of fault damage zones: a review and a new methodological approach[J]. Earth-Science Reviews, 152: 70-87.

COLLETTINI C, HOLDSWORTH R E, 2004. Fault zone weakening and character of slip along low-angle normal faults: insights from the Zuccale fault, Elba, Italy[J]. Journal of the Geological Society, 161(6): 1039-1051.

DENG Q D, 2007. Map of active tectonics in China[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

DU D, WANG G M, 2020. Evaluation of regional crustal stability in the joint area of Beijing, Tianjin and Hebei[J]. Geological Survey and Research, 43(3): 218-223. (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)

GAO B, JIA K, ZHOU S Y, 2016. Research of locations and source parameters of historical earthquakes equal and greater than *M*5.0 from 1900 to 1970 in North China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(11): 4089-4099. (in Chinese with English abstract)

GAO G L, LIU W, LI C, et al., 2023. A calculation method for the storage capacity of UGS rebuilt from oil reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 43(10): 132-140. (in Chinese with English abstract)

HAN G M, WANG L, XIAO D Q, et al., 2021. Magmatic hydrothermal fluid genesis of zeolite in the Paleogene Kongdian formation of Zaoyuan oilfield, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 48(5): 1101-1112.

HAO M, LI Y H, ZHUANG W Q, 2019. Crustal movement and strain distribution in east Asia revealed by GPS observations[J]. Scientific Reports, 9(1): 16797.

HU H T, 2001. The theory and method of evaluation of regional crustal stability based on concept of "safe island"[J]. Journal of Geomechanics, 7(2): 97-103. (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)

JING Y Q, LEI C, LIU K D, et al., 2023. Deposition environment and provenance of the Palaeogene Shahejie formation in Nanpu sag: evidences from trace and rare earth element geochemistry[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 42(1): 350-359. (in Chinese with English abstract)

KIM Y S, PEACOCK D C P, SANDERSON D J, 2004. Fault damage zones[J]. Journal of Structural Geology, 26(3): 503-517.

LI X T, XU B, HUANG D C, et al. , 1987. Theory and method of regional crustal stability[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

LIN X D, YUAN H Y, XU P, et al., 2017. Zonational characteristics of earthquake focal mechanism solutions in North China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(12): 4589-4622. (in Chinese with English abstract)

LIU B J, ZHANG X K, CHEN Y, et al., 2011. Research on crustal structure and active fault in the Sanhe-Pinggu earthquake (*M*8.0) zone based on single-fold deep seismic reflection and shallow seismic reflection profiling[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(5): 1251-1259. (in Chinese with English abstract)

LIU L, SUN Y H, CHEN C, et al., 2022. Fault reactivation in No. 4 structural zone and its control on oil and gas accumulation in Nanpu sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 49(4): 824-836.

MIN Z Q, WU G, JIANG Z X, et al. , 1995. Catalogue of Chinese historic strong earthquakes from BC 2300 to AD 1911[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

QIAO X, ZHOU Y, 2021. Geodetic imaging of shallow creep along the Xi-

anshuihe fault and its frictional properties[J]. Earth and Planetary Science Letters, 567: 117001.

RAN R K, WANG J B, PENG S Z, et al., 1995. Palaeoeakthquake traces along the southern boundary fault of Xuanhua Basin, Hebei Province[J]. Seismology and Geology, 17(1): 44-46. (in Chinese with English abstract)

RAN Y K, CHEN L C, XU X W, 2001. Quantitative data about active tectonics and possible locations of strong earthquakes in the future in northwest Beijing[J]. Acta Seismologica Sinica, 23(5): 502-513. (in Chinese with English abstract)

SHANG L, GAO G L, YAO D D, et al. , 2024. Characteristics of the fault system in Nanpu sag and its Cenozoic evolution[J/OL]. Acta Geologica Sinica, DOI: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2024122. DOI: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2024122 https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=i12nDYUbXpK0POlTEro-fT0ho3vF020oNuGpHvhCVsKP9GwAuHzLA8LNZQg7Jdh5yt1H1BB9tvBNx0fcsdJXZX-Ku9l4arTY_14mNJfnRQCwJ71cfJX5hEFc2x2gtuSbyJcED84bMF3cZLX-_Vbv2fhY7-xgA1NkyYs97o0iYGY2XzI7NM9DlpDog_1SpkJQVKq3q0KQks26o31f (in Chinese with English abstract)

SHU P, XU X W, FENG S Y, et al., 2023. Sedimentary and tectonic evolution of the Banquan pull-apart basin and implications for Late Cenozoic dextral strike-slip movement of the Tanlu Fault Zone[J]. Science China Earth Sciences, 66(4): 797-820.

SU P, HE H L, TAN X B, et al., 2021. Initiation and evolution of the Shanxi rift system in North China: evidence from low-temperature thermochronology in a plate reconstruction framework[J]. Tectonics, 40(3): e2020TC006298.

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)

TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with Plasticine[J]. Geology, 10(12): 611-616.

TONG H M, FAN C W, MENG L J, et al., 2018. Manifestation and origin mechanism of the fault system complexity in rift basins in eastern-Southern China: case study of the Nanpu and Weixinan sags[J]. Acta Geologica Sinica, 92(9): 1753-1765. (in Chinese with English abstract)

WALDHAUSER F, ELLSWORTH W L, 2000. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 90(6): 1353-1368.

WAN T, JIANG Y L, DONG Y X, et al., 2012. Relationship between fault activity and hydrocarbon accumulation and enrichment in Nanpu depression[J]. Journal of China University of Petroleum, 36(2): 60-67. (in Chinese with English abstract)

WANG H Q, TAN C X, FENG C J, et al., 2022. Activity structure and crustal stability in Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development zone[J]. Geological Bulletin of China, 41(8): 1322-1341. (in Chinese with English abstract)

WANG H R, FU G, SUN T W, 2016. Recovery of oil-source fault ancient transfer zone and its favorable conditions to oil-gas transportation: taking fault F_{10} in No. 2 structure of Nanpu sag as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 27(10): 1848-1854. (in Chinese with English abstract)

WANG J W, DU J X, ZHANG Y C, et al., 2019. The geological conditions, resource potential and exploration direction in Nanpu sag of Jidong depression, Bohai Bay Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 24(3): 21-28. (in Chinese with English abstract)

WANG M, SHEN Z K, 2019. Present - day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(2): e2019JB018774.

WANG Q J, ZHANG Y, LIU X, 2003. Geological performance of Dazhangtuo underground gas storage and its operation efficiency analysis[J]. Natural Gas Industry, 23(2): 89-92. (in Chinese with English abstract)

WANG X, ZHOU Y, CHEN T, et al., 2021. Analysis of the Tangshan *M*5.1 earthquake on July 12, 2020[J]. China Earthquake Engineering Journal, 43(6): 1280-1287. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, ZHOU C J, TAN C X, et al., 2016. The active tectonics and regional crustal stability features in the area of Yangtze River economic belt[J]. Journal of Geomechanics, 22(3): 379-411. (in Chinese with English abstract)

XU J, NIU L F, WANG C H, et al., 1996. Tangshan-Hejian-Cixian newly-generated seismotectonic zone[J]. Seismology and Geology, 18(3): 193-198. (in Chinese with English abstract)

XU J, SONG C Q, CHU Q Z, 1998. Preliminary study on the seismotectonic characters of the Zhangjiakou-Penglai fault zone[J]. Seismology and Geology, 20(2): 146-154. (in Chinese with English abstract)

XU X W, MA X Y, 1992. Geodynamics of the Shanxi rift system, China[J]. Tectonophysics, 208(1-3): 325-340.

YAN X B, LI W Q, YOU W Z, et al., 2023. Study on creep evidence and deep deformation mechanism of the Chafangkou segment of the northern Piedmont fault of Xizhoushan[J]. Earthquake, 43(3): 91-101. (in Chinese with English abstract)

YANG S H, HE S M, YANG B, et al., 2003. The operation practice and evaluation for Dazhangtuo underground gas storage[J]. Natural Gas Geoscience, 14(5): 425-428. (in Chinese with English abstract)

YANG Y H, GAO G L, WANG F, et al., 2022. Layered in-situ stress measurement method for perforated interval of Nanpu Gas Storage, Jidong Oilfield[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 41(9): 1029-1035. (in Chinese with English abstract)

YI M C, 2003. Neotectonic activity and regional crustal stability[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

YIN A, YU X J, SHEN Z K, et al., 2015. A possible seismic gap and high earthquake hazard in the North China Basin[J]. Geology, 43(1): 19-22.

YOU H C, SHAO C R, YANG Q Y, et al., 2008. Some active evidences in Late Quaternary of Zhangjiakou Fault[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 3(4): 474-477. (in Chinese with English abstract)

ZHAN R, ZHU G, 2012. Cenozoic activity methods and evolution of the Tan-Lu fault zone in Bohai Bay: evidence from the Qingdong sag[J]. Chinese Journal of Geology, 47(4): 1130-1150. (in Chinese with English abstract)

ZHANG G W, JI Y, GUO H, et al., 2022. Complex fault geometry of the 1976 *M*s 7.8 Tangshan earthquake source region in North China[J]. Tectonophysics, 845: 229642.

ZHANG H Z, DIAO G L, CHEN Q F, et al., 2008. Focal mechanism analysis of the recent earthquakes in Tangshan seismic region of *M*7.6 in 1976[J]. Journal of Seismological Research, 31(1): 1-6. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Q, TEYSSIER C, DUNLAP J, et al. , 2007. Oblique collision between north and South China recorded in Zhangbaling and Fucha Shan (Dabie-Sulu transfer zone)[M]//ROESKE A M, TILL A B, FOSTER D

A, et al. Exhumation associated with continental strike-slip fault system. Boulder: Geological Society of America: 167-206.

ZHANG S X, YANG W M, MENG H J, et al., 2018. Regional crustal stability evaluation in Beijing-Zhangjiakou area[J]. Journal of Geomechanics, 24(1): 70-77. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y G, ZHENG W J, WANG Y J, et al., 2018. Contemporary deformation of the North China plain from global positioning system data[J]. Geophysical Research Letters, 45(4): 1851-1859.

ZHANG Y Y, GAO Y, SHI Y T, et al., 2015. Crustal thickness and Poisson's ratio beneath Zhangjiakou-Bohai seismic active belt and its neighboring regions[J]. Acta Seismologica Sinica, 37(4): 541-553. (in Chinese with English abstract)

ZHOU H M, WEI Z W, CAO Z H, et al., 2000. Relatioship between formation, evolution and hydrocarbon in Nanpu sag[J]. Oil & Gas Geology, 21(4): 345-349. (in Chinese with English abstract)

ZHU G, LIU G S, NIU M L, et al., 2009. Syn-collisional transform faulting of the Tan-Lu fault zone, East China[J]. International Journal of Earth Sciences, 98(1): 135-155.

ZHU G, LIU C, GU C C, et al., 2018. Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean: constraint from Late Mesozoic evolution of the Tan-Lu fault zone[J]. Science China Earth Sciences, 61(4): 386-405.

附中文参考文献

陈庆宣, 1992. 探索区域地壳稳定性评价途径[J]. 第四纪研究, 12(4): 289-292.

陈宇坤, 任峰, 张翠芬, 等, 2004. 天津海河隐伏断裂的晚第四纪活动特征研究[J]. 地震地质, 26(1): 111-121.

邓起东, 2007. 中国活动构造图[M]. 北京: 地震出版社.

杜东, 王国明, 2020. 京津冀结合部区域地壳稳定性评价[J]. 地质调查与研究, 43(3): 218-223.

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.

高彬, 贾科, 周仕勇, 2016. 华北地区 1900-1970 年 5 级以上地震发震位置与震源机制研究[J]. 地球物理学报, 59(11): 4089-4099.

高广亮, 刘伟, 李聪, 等, 2023. 油藏改建地下储气库库容量计算方法[J]. 天然气工业, 43(10): 132-140.

胡海涛, 2001. 区域地壳稳定性评价的"安全岛"理论及方法[J]. 地质力学学报, 7(2): 97-103.

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.

静禹钱, 雷闯, 刘克栋, 等, 2023. 南堡凹陷古近系沙河街组沉积环境和物源: 来自微量和稀土元素地球化学的证据[J]. 地质科技通报, 42(1): 350-359.

李兴唐, 许兵, 黄鼎成, 等, 1987. 区域地壳稳定性研究理论与方法[M]. 北京: 地质出版社.

林向东, 袁怀玉, 徐平, 等, 2017. 华北地区地震震源机制分区特征[J]. 地球物理学报, 60(12): 4589-4622.

刘保金, 张先康, 陈颙, 等, 2011. 三河-平谷 8.0 级地震区地壳结构和活动断裂研究: 利用单次覆盖深反射和浅层地震剖面[J]. 地球物理学报, 54(5): 1251-1259.

闵子群, 吴戈, 江在雄, 等, 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 191 年)[M]. 北京: 地震出版社.

冉勇康, 王景钵, 彭斯震, 等, 1995. 河北宣化盆地南缘断裂的古地震遗迹[J]. 地震地质, 17(1): 44-46.

冉勇康, 陈立春, 徐锡伟, 2001. 北京西北活动构造定量资料与未来强震地点的讨论[J]. 地震学报, 23(5): 502-513.

商琳, 高广亮, 姚丹丹, 等, 2024. 南堡凹陷断裂系统特征及其新生代构造演化[J/OL]. 地质学报. DOI: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2024122 https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=i12nDYUbXpK0POlTEro-fT0ho3vF020oNuGpHvhCVsKP9GwAuHzLA8LNZQg7Jdh5ytlH1BB9tvBNx0fcsdJXZX-Ku9l4arTY_14mNJfnRQCwJ71cfJX5hEFc2x2gtuSbyJcED84bMF3cZLX-_Vbv2fhY7-xgA1NkyYs97o0iYGY2XzI7NM9DlpDog_1SpkJQVKq3q0KQks26o31f

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.

童亨茂, 范彩伟, 孟令箭, 等, 2018. 中国东-南部裂陷盆地断裂系统复杂性的表现形式及成因机制: 以南堡凹陷和涠西南凹陷为例[J]. 地质学报, 92(9): 1753-1765.

万涛, 蒋有录, 董月霞, 等, 2012. 南堡凹陷断层活动与油气成藏和富集的关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 36(2): 60-67.

王浩然, 付广, 孙同文, 2016. 油源断裂古转换带恢复及其输导油气的有利条件: 以南堡凹陷 2 号构造 F_{10} 断裂为例[J]. 天然气地球科学, 27(10): 1848-1854.

王惠卿, 谭成轩, 丰成君, 等, 2022. 京津冀协同发展区活动构造与地壳稳定性[J]. 地质通报, 41(8): 1322-1341.

王建伟, 杜景霞, 张永超, 等, 2019. 南堡凹陷石油地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. 海相油气地质, 24(3): 21-28.

王起京, 张余, 刘旭, 2003. 大张坨地下储气库地质动态及运行效果分析[J]. 天然气工业, 23(2): 89-93.

王想, 周依, 陈婷, 等, 2021. 2020 年 7 月 12 日唐山 5.1 级地震分析[J]. 地震工程学报, 43(6): 1280-1287.

吴中海, 周春景, 谭成轩, 等, 2016. 长江经济带地区活动构造与区域地壳稳定性基本特征[J]. 地质力学学报, 22(3): 379-411.

徐杰, 牛娈芳, 王春华, 等, 1996. 唐山-河间-磁县新生地震构造带[J]. 地震地质, 18(3): 193-198.

徐杰, 宋长青, 楚全芝, 1998. 张家口-蓬莱断裂带地震构造特征的初步探讨[J]. 地震地质, 20(2): 146-154.

闫小兵, 李文巧, 由文智, 等, 2023. 系舟山北麓断裂茶房口段蠕滑证据及深部变形机制研究[J]. 地震, 43(3): 91-101.

杨树合, 何书梅, 杨波, 等, 2003. 大张坨地下储气库运行实践与评价[J]. 天然气地球科学, 14(5): 425-428.

杨跃辉, 高广亮, 王芳, 等, 2022. 冀东南堡储气库射孔段分层地应力测量方法[J]. 油气储运, 41(9): 1029-1035.

易明初, 2003. 新构造活动与区域地壳稳定性[M]. 北京: 地震出版社.

尤惠川, 邵翠茹, 杨歧焱, 等, 2008. 张家口断裂发现第四纪晚期活动证据[J]. 震灾防御技术, 3(4): 474-477.

詹润, 朱光, 2012. 渤海海域郯庐断裂带新生代活动方式与演化规律: 以青东凹陷为例[J]. 地质科学, 47(4): 1130-1150.

张宏志, 刁桂苓, 陈祺福, 等, 2008. 1976 年唐山 7.8 级地震震区现今地震震源机制分析[J]. 地震研究, 31(1): 1-6.

张树轩, 杨为民, 孟华君, 等, 2018. 京张地区区域地壳稳定性评价[J]. 地质力学学报, 24(1): 70-77.

张莹莹, 高原, 石玉涛, 等, 2015. 张家口-渤海地震活动带及其邻区的地壳厚度与泊松比分布[J]. 地震学报, 37(4): 541-553.

周海民, 魏忠文, 曹中宏, 等, 2000. 南堡凹陷的形成演化与油气的关系[J]. 石油与天然气地质, 21(4): 345-349.