

https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.018



# 基于人工地震的河西务断裂活动性及其设定地震模拟研究

高武平<sup>1,2</sup>, 俞言祥<sup>1</sup>, 彭远黔<sup>3\*</sup>, 张文朋<sup>2</sup>, 张安东<sup>2</sup>, 闫成国<sup>2</sup>

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2. 天津市地震局, 天津 300201

3. 河北省地震局, 河北石家庄 050021

**摘要:** 河西务断裂是一条处于京津冀城市群腹地规模较大的第四纪断裂, 围绕该断裂开展的一系列浅层人工地震及钻孔联合剖面勘探进一步揭示, 该断裂为一条晚更新世早期活动断裂. 近期天津市地震局跨该断裂完成的 4 条 28T 可控震源人工地震勘探测线, 为研究该断裂的断裂特征及活动性提供了新证据. 人工地震剖面显示: (1) 该断裂倾向南东, 视倾角  $55^{\circ}\sim 75^{\circ}$ , 向北延伸止于高王公路与京塘公路之间, 在北端剖面上呈上陡下缓的单一断层, 向南则呈雁列式或“Y”字型构造, 总长度约 50 余千米; (2) 不同剖面上显示的断层最浅上断点埋深存在差异, 但普遍达到 150 m 以上, 表明河西务断裂展布存在差异性, 但断裂断错中更新统底界, 并向上延伸至上更新统, 活动时代为晚更新世早期断裂. 区域资料显示, 该断裂向南延伸与牛东断裂相接, 二者共同组成了一条规模超 100 km 的断裂带, 存在发生 7 级以上地震可能. 从京津冀城市群防范大震风险需求出发, 对该断裂设定地震  $M_w 7.3$  进行了数值模拟, 潜在的长周期地震动可能对京津冀地区具有重要影响.

**关键词:** 河西务断裂; 冀中拗陷; 人工地震; 京津冀城市群; 地球物理学.

中图分类号: P315.2

文章编号: 1000-2383(2025)04-1499-15

收稿日期: 2023-10-26

## Activity Analysis of Hexiwu Fault Based on Artificial Earthquake and Its Set Earthquake Simulation Research

Gao Wuping<sup>1,2</sup>, Yu Yanxiang<sup>1</sup>, Peng Yuanqian<sup>3\*</sup>, Zhang Wenpeng<sup>2</sup>, Zhang Andong<sup>2</sup>, Yan Chengguo<sup>2</sup>

1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2. Tianjin Earthquake Administration, Tianjin 300201, China

3. Hebei Earthquake Administration, Shijiazhuang 050021, China

**Abstract:** The Hexiwu fault is a large-scale Quaternary fault in the hinterland of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, and a series of shallow artificial seismic surveys and drillhole joint profiles have been carried out around the fault, which further revealed that the fracture is an active fracture in the early Late Pleistocene. Recently, Tianjin Seismological Bureau completed four 28T controlled-source artificial seismic surveys across the rupture, providing new evidence for the study of the rupture

**基金项目:** 中国地震局地震科技星火计划项目(No. H23004YA); 河北省地震科技星火计划项目(No. DZ2023120500004).

**作者简介:** 高武平(1981-), 男, 高级工程师, 在读博士, 主要从事城市活动断层探测、城市地震灾害风险评估、地震动数值模拟等研究.  
E-mail: gwpp123@126.com

\* **通讯作者:** 彭远黔(1965-), 男, 高级工程师, E-mail: 744707073@qq.com

**引用格式:** 高武平, 俞言祥, 彭远黔, 张文朋, 张安东, 闫成国, 2025. 基于人工地震的河西务断裂活动性及其设定地震模拟研究. 地球科学, 50(4): 1499-1513.

**Citation:** Gao Wuping, Yu Yanxiang, Peng Yuanqian, Zhang Wenpeng, Zhang Andong, Yan Chengguo, 2025. Activity Analysis of Hexiwu Fault Based on Artificial Earthquake and Its Set Earthquake Simulation Research. *Earth Science*, 50(4): 1499-1513.

characteristics and activity of the rupture. The artificial seismic profiles show that: (1) the fracture extends northward and ends between Gaowang Highway and Jingtang Highway; (2) the depths of the shallowest upper fault point on different profiles vary, but generally reach more than 150 m, which indicates that the Heximo Fracture has a segmented distribution, but the rupture activity basically belongs to the same period. Regional data show that the fracture extends southward to connect with the Niudong Fault, which together form a 100 km-long fracture zone, and there is a possibility of earthquakes of magnitude 7 or above. From the demand of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration to prevent the risk of large earthquakes, numerical simulation of the rupture setting earthquake  $M_w7.3$  is carried out to analyze the impacts of potential long-period ground shaking on the Beijing-Tianjin-Hebei region.

**Key words:** Hexiwu fault; Jizhong depression; artificial earthquake; Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration; geophysics.

## 0 引言

华北盆地北部是中国东部地震活动最强烈的地区,历史上发生过多级7级大震并造成了大量的伤亡损失(谢卓娟等,2019)。在地质构造上,华北北部在古近纪发育了众多断陷盆地,形成了典型的盆岭构造,在新近纪整体下沉,在古近纪盆岭构造之上叠置发育,逐步成为了统一的大型坳陷盆地(高文学等,1993)。盆地内部发育有数十条规模较大且活动性较强的隐伏断层,近30年里的城市活动断层探测工作在盆地内展开,基本摸清了城市及周边地区的活动断层分布及其活动性。

大量物探资料显示,华北盆地内部平原区地势平坦,浅部发育了1~2 km的第四系和新近系,地层起伏较缓,下伏起伏剧烈的古近系,在构造上表现为深达数千米、长近百千米的盆地构造组合。国内外多次大地震的震害资料表明,沉积盆地会增加地震动的持时,显著地放大长周期地震动,从而加重长输管线、大跨桥梁等自振周期较长的工程结构震害。1995年阪神地震中的大阪盆地(Pitarka *et al.*, 1998)、1999年集集地震中的台北盆地和2008年汶川地震中的渭河盆地(王海云,2011)等均出现了由盆地内的沉积层引发的长周期地震动放大,从而导致了明显的震害加重现象。京津冀城市群拥有密集的人口及如高铁、南水北调等大量线性基础设施,也是我国高层、超高层最密集的地区之一,这些对长周期地震动敏感的工程安全一直是地震工程界关注的焦点,特别是大型隐伏断裂潜在大震及可能的长周期地震动影响,对京津冀城市群的长周期结构安全的不利影响尤其值得关注。

河西务断裂带是一条处于京津冀城市群腹地规模较大的断裂,也是控制廊固凹陷和武清凹陷的分界断裂(图1)。该断裂向北延伸至桐柏断裂附近,向南延伸与牛东断裂、高阳—博野断裂断续相接,

构成了华北平原区内部一条规模巨大的北东向断裂构造带。前人从油气勘探与预测角度出发,研究了河西务断裂带在新近系及以下层位的断裂分段、平面展布、构造演化等特征,但近地表的精确几何展布及活动特征研究成果还较少(赵红格等,2003;劳海港和吴孔友,2010;曾庆鲁,2010)。近年来,围绕河西务断裂河北省地震局和天津市地震局开展了大量探测工作,特别是近期开展的高精度浅层人工地震勘探工作,对该断裂带的展布特征、断裂活动性研究都有了更清晰的认识,在此基础上笔者详细讨论了河西务断裂构造特征及活动性,并对设定大震的长周期地震动进行了模拟,初步评价了其潜在的长周期地震动影响。

## 1 河西务断裂活动性探测与断裂活动性

河西务断层是渤海湾盆地冀中坳陷北部地区一条重要的控盆断裂,总体走向NE,倾向SE,向北延伸至桐柏断裂附近,向南延伸与牛东断裂相接,为廊固凹陷与武清凹陷的分界断裂,隐伏于冀中凹陷覆盖层之下。新近纪—第四纪时期渤海湾盆地整体进入热沉降阶段后,该断层仍然存在构造活动,断层错断了新近系顶面,造成千米左右的落差,第四纪以来,河西务断裂继续活动,控制着武清凹陷的发育,致使武清凹陷成为冀中坳陷的沉降中心,第四系厚度超过400 m(王少春等,2011)。河西务断层新近纪以来具有右旋走滑的张扭特征,平面上具有分段性,主体上可分为3段,南段和北段的长度都为15 km左右,上、下盘沉降幅度差异在时间剖面显示达到约2 km,北段和南段兼具右旋走滑和拉张的特征;中段长度约20 km,上、下盘沉降幅度差异相对较小,在时间剖面显示差异约900 m,中段主要表现为右旋走滑特征(周月玲等,2018;毛黎光等,2019)。

### 1.1 河西务断裂带的浅层地震探测

浅层地震勘探作为一种有效探测覆盖区隐伏活动断裂的地球物理探测手段,近年来在城市的活断层的探测中广泛应用,在第四系覆盖区的活动断裂定位和断裂活动性判定方面可起到关键性的作用.近年来围绕河西务断裂布设过一系列浅层人工地震测线,基本确定了该断裂的空间展布和断裂几何特征.河北省工程地震勘察研究院(2013,河北省活断层探测与地震危险性评价项目(廊坊市)技术报告)曾在廊坊市活断层探测项目中,布设了LF03、LF04、LF05、LF05-1共4条测线(图2),4条测线主要布设在河西务断裂的中段,使用的震源主要是夯源,探测深度受一定限制.在此基础上,天津市地震局针对该断裂不同段落布置了hwx1、hwx2、hwx3、hwx4共4条人工地震勘探测线,进一步探察了该断裂的空间展布、浅部构造特征和活动性,测线位置见图2.人工地震采用25T可控震源激发,道间距3 m、单边300道接收、37次覆盖的观测系统,采样间隔1 ms,记录长度2 s.

### 1.2 河西务断裂带地震剖面特征及其活动性

#### 1.2.1 地震剖面特征 (1)断裂北段人工地震剖面

特征.hwx3和hwx4测线布设于河西务断裂带北段.依据各反射同相轴的反射特征,hwx4测线剖面各反射界面可连续追踪,无错断现象,没有断层存在.

hwx3测线剖面显示1300 ms以上反射震相丰富,反射能量较强,地震反射轴清晰,反射震相能量横向差别不大,地震反射层位连续稳定,从上到下可以识别出11组反射震相( $T_{01}$ 、 $T_{02}$ 、 $T_{03}$ 、 $T_Q$ 、 $T_{11}$ ~ $T_{15}$ 、 $T_g$ ),识别出2条倾向相反正断层 $F_{3-1}$ 和 $F_{3-2}$ (图3).其中 $F_{3-2}$ 断层视倾向为南东,视倾角为 $55^\circ$ ~ $60^\circ$ ,在180 m、300 m、500 m、800 m、1150 m等处两侧反射同相轴存在明显的错断现象,断层两侧地层产状明显不一致,断层最浅明显错断中更新统底( $T_{03}$ ),止于上更新统( $T_{02}$ ),断距3~5 m,上断点埋深在125~130 m,为一条上陡下缓正断层,根据区域地震构造资料认为 $F_{3-2}$ 为河西务断裂.

(2)断裂带中段人工地震剖面特征.hwx1布设于河西务断裂带中段,剖面1200 ms以上反射震相丰富,反射能量较强,地震反射轴清晰,整条剖面上反射震相能量横向差别不大,地震反射层位连续稳定,从上到下可以识别出11组反射震相( $T_{01}$ ~ $T_{04}$ 、 $T_Q$ 、 $T_{11}$ ~ $T_{15}$ 、 $T_g$ ),识别出4条正断层 $F_{1-1}$ 、 $F_{1-2}$ 、 $F_{1-3}$ 和

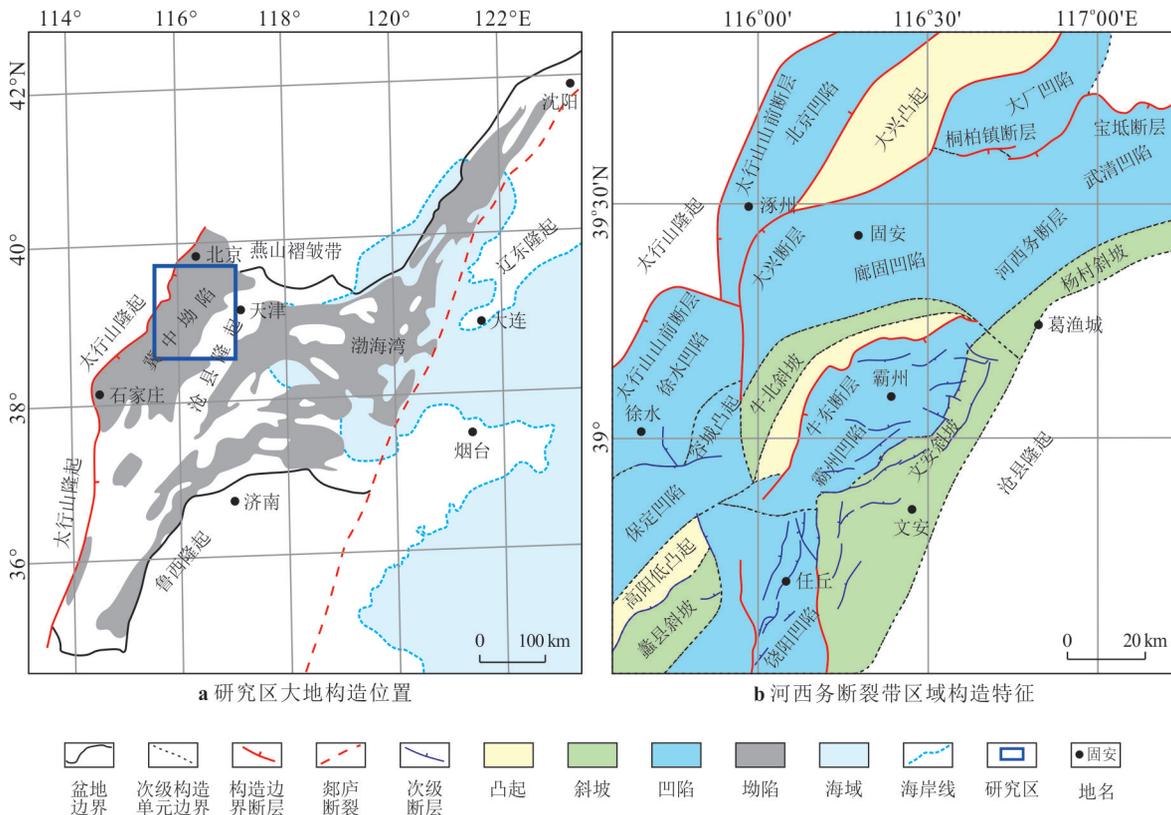


图 1 廊坊凹陷大地构造位置(引自杨德相等,2021)

Fig.1 Tectonic location of Langfang Depression (After Yang *et al.*, 2021)

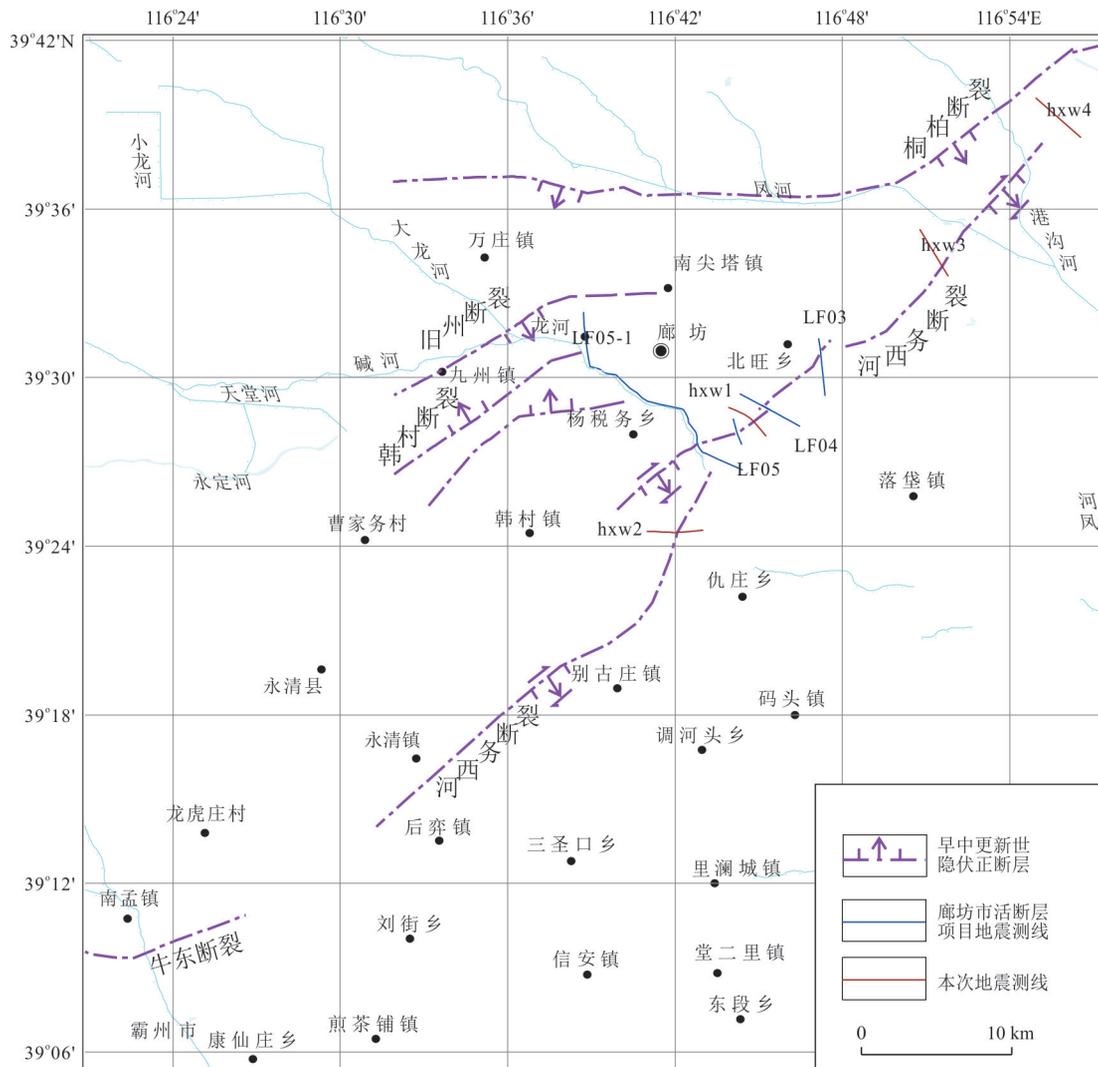


图2 河西务断层平面展布及探测资料分布

Fig.1 Distribution of Hexiwu fault and relevant sounding data

$F_{1-4}$ ,各断点两侧反射同相轴存在明显的错断现象,断层可靠,主断层明显在剖面上呈正花状结构(图4),根据区域地震构造资料推测 $F_{1-1}$ 断层为河西务断裂带的主断裂,在250 m、500 m、850 m、1 200 m等处两侧反射同相轴存在明显的错断现象,其视倾向为NE,视倾角 $62^{\circ}\sim 67^{\circ}$ ,断层错断了中更新统底( $T_{03}$ ),断距3~5 m,终止于上更新统( $T_{02}$ ),上断点埋深125~130 m, $F_{1-2}$ 、 $F_{1-3}$ 和 $F_{1-4}$ 可能在深部归并于 $F_{1-1}$ .

(3)断裂带南段人工地震剖面特征.hxw2测线布设在河西务断裂的南段,测线剖面1 300 ms以上反射震相丰富,地震反射轴清晰,反射能量较强,整条剖面上反射震相能量横向差别不大,从上到下可以识别出11组反射震相( $T_{01}\sim T_{04}$ 、 $T_Q$ 、 $T_{11}\sim T_{15}$ 、 $T_g$ ),别出2条正断层 $F_{2-1}$ 和 $F_{2-2}$ ,其中, $F_{2-1}$ 断层在

150 m、300 m、600 m、1 000 m、1 350 m等处两侧反射同相轴存在明显的错断现象,反射特征明显,为河西务断裂带的主断裂.该断层视倾角 $69^{\circ}\sim 74^{\circ}$ ,断层错断了中更新统底( $T_{03}$ ),终止于上更新统( $T_{02}$ ),断距3~5 m,上断点埋深115~120 m,与 $F_{2-1}$ 断层共同呈现为Y字型特征.

**1.2.2 河西务断裂的活动时代** 人工地震勘探剖面揭示的浅部地层水平起伏均非常小,故在地层解释上参考了测线周边第四纪钻孔地层资料.这里参考的第四纪地层剖面位于图1中LF04线上,根据其揭示的第四纪地层资料,全新统埋深大致27~28 m,晚更新统底板埋深大约168~173 m,周月玲等(2018)基于浅层人工地震和钻孔联合剖面的探测结果,河西务断裂上断点埋深约150 m或以浅,第四系底界面的垂直错距为20~45 m,断裂的最新活

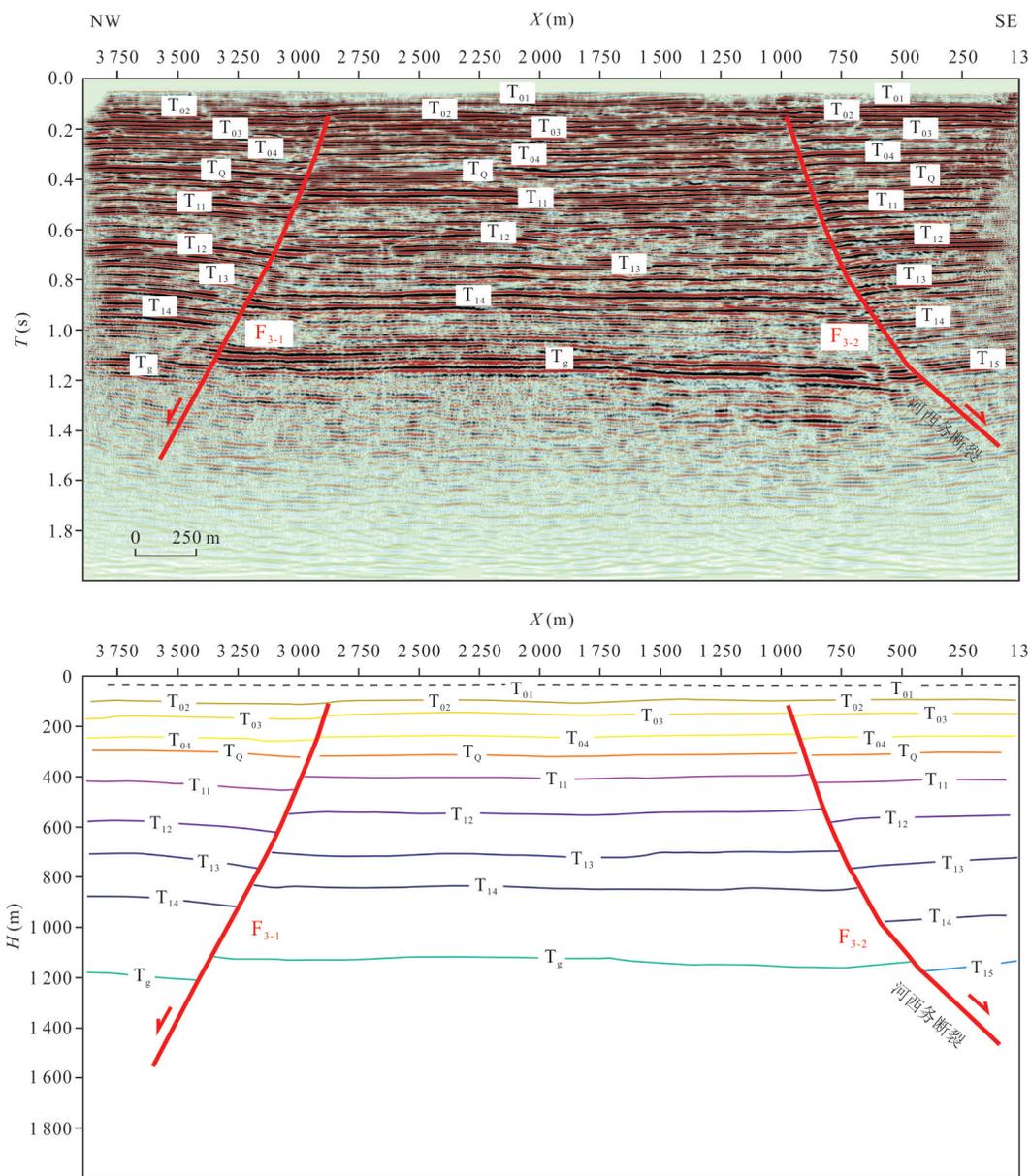


图3 hxw3人工地震测线反射时间剖面与深度解释剖面

Fig.3 Reflection time profile and depth interpretation profile of the line hxw3

动时代为晚更新世早期,晚更新世以来的平均垂直滑动速率为0.03 mm/a.本次探测工作为河西务断裂的活动性提供了新的证据.河西务断裂北段的hxw3测线揭示河西务断裂( $F_{3-1}$ 断层)上断点埋深130~135 m,错断中更新统底,断距3~5 m;位于河西务断裂带中段的hxw1测线上河西务断裂带的主断层 $F_{1-1}$ 上断点埋深125~130 m,错断中更新统底,断距3~5 m;位于河西务断裂带南段的hxw2测线上河西务断裂带的主断层 $F_{2-1}$ 上断点埋深115~120 m,错断中更新统底,断距3~5 m.上述结果表明,河西务断裂错断中更新统底,上断点埋深在115~135 m间,与周月玲等(2018)的钻孔联合剖面

揭示结果一致,揭示出河西务断裂不同段落在发育上虽有差异但基本属于同期活动,为一条晚更新世早期活动正断层.

### 1.3 河西务断裂带的发震能力

华北盆地几个大震区地震构造的研究表明,华北地区大震区的地壳具独特的地质结构构造组合,即上地壳为能量调整单元,存在早第三纪发育的铲状和平面状正断裂及其控制的断陷盆地;中地壳为能量积累单元,存在低速、高导体(层);下地壳为能量传递单元,发育高角度深断裂(陈国光等,2003).河西务断裂深部结构清晰,断裂两侧地层角度不整合,褶皱和伴生断裂发育,断层上陡下缓呈铲形,在

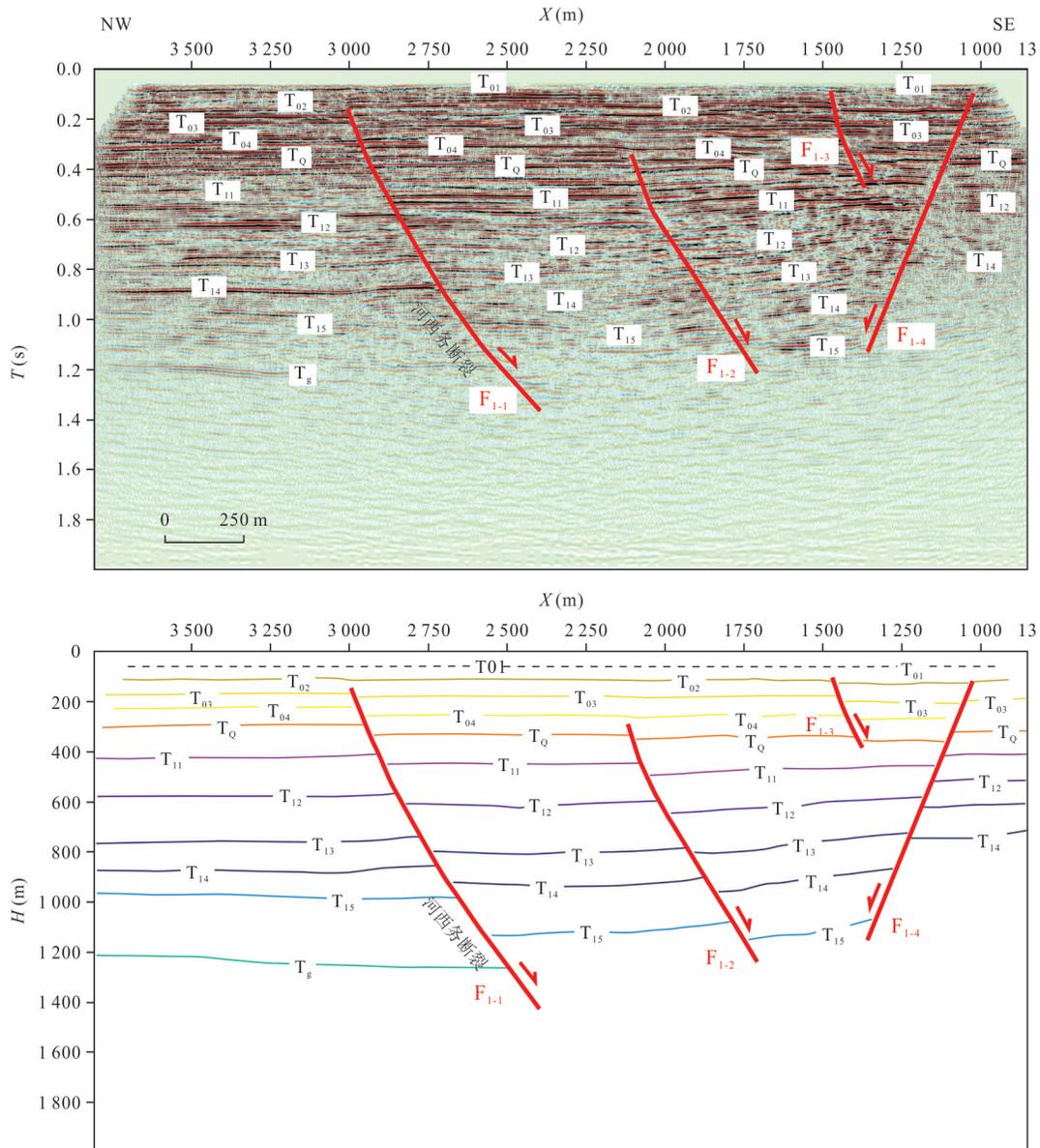


图4 hxw1人工地震测线反射时间剖面与深度解释剖面

Fig.4 Reflection time profile and depth interpretation profile of the line hxw1

深部 12.0 s (38 km) 左右与铲形一级大兴断裂汇聚向下延伸进入基底之中 (何登发等, 2017; 刘冠伸等, 2023)。

2008年汶川 8.0、2013年芦山 7.0、2021年漾濞 6.4级等地震的大地电磁探测揭示, 中强地震及余震与地下介质电阻率结构具有较强的相关性, 震源区均处于高、低阻过渡区附近且偏于高阻一侧 (詹艳等, 2013, 2017, 2021; 赵凌强等, 2019, 2022; Sun *et al.*, 2019, 2020; 叶涛等, 2021; 彭远黔等, 2022)。跨河西务断裂的大地电测剖面揭示河西务断裂下方电性异常差异带明显 (图 6), 延展深度较深, 并与中下地壳低阻层衔接, 在断裂下盘存在壳内低阻

带, 即壳内高导体 (层), 具有中强地震震源区的介质组合和断裂发育的电性结构特征。根据河西务断裂带附近的中小震重定位结果显示, 该区域地震的震源优势深度为 5~20 km (温超等, 2019)。

同时, 河西务断裂向南延伸后与牛东断裂相连接, 二者共同组成了一条规模 100 km 的北东向断裂带。根据苗全芸等 (2019)、张艺 (2014) 的研究, 古近纪沙三期以来, 牛东断层, 河西务断层取代大厂断层及大兴断层继续活动, 共同控制了武清—霸县断陷 (带)。汪新伟等 (2023) 分析认为垂直断距达 7 000 m 的牛东断裂带是一条导水导热的盆内隐伏型深断裂。雄安新区活动断层探测结果也显示, 牛

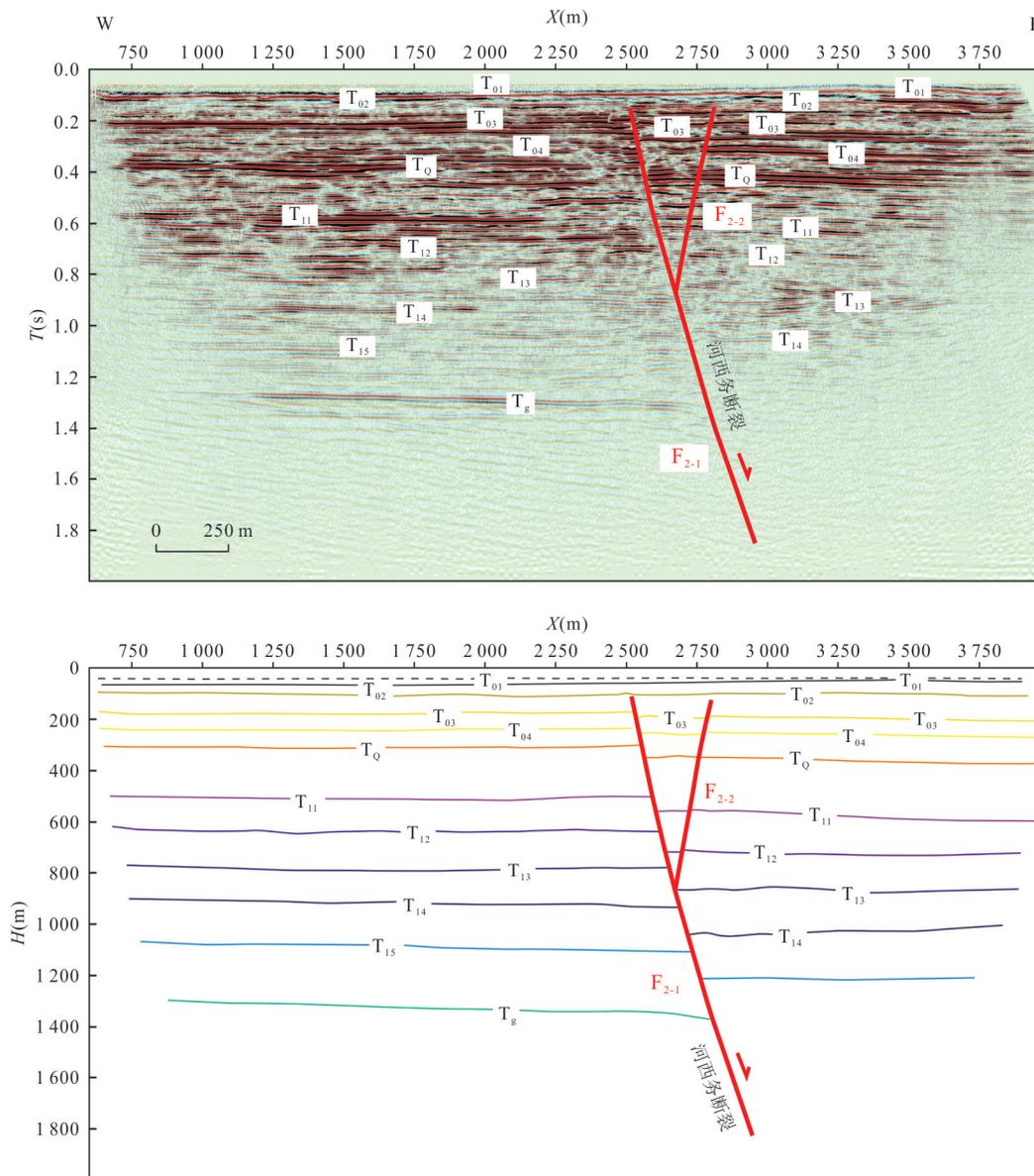


图 5 hxw2人工地震测线反射时间剖面与深度解释剖面

Fig.5 Reflection time profile and depth interpretation profile of the line hxw2

东断裂错断了埋深 80~85 m 的地层,在晚更新世早期有过活动.由此可知,河西务断裂和牛东断裂的最新活动时代一致.

从深部孕震环境、断层带整体规模、断裂最新活动时代分析,认为河西务—牛东断裂带具有发生中强以上地震的构造特征.根据用 Wesnousky (2008)提出的地震震级和破裂长度之间的经验关系式:

$$M_w = 5.30 + 1.02 \cdot \log L, \quad (1)$$

式中: $M_w$ 为矩震级, $L$ 为断裂破裂长度.根据张世民等(2006)的研究,河西务、牛东断裂带处于张家口—渤海断裂带与河北平原断裂带交汇区,均属坝

县—束鹿—邯郸断裂带的主要断裂,二者断层长度超过 100 km,活动时代为晚更新世,具有发生 7 级以上地震的构造条件.对活动断层的总结性分析也显示,晚更新世断裂存在发生  $\geq 6.5$  级地震的风险(吴中海,2019).故笔者进一步假设河西务断裂上单次地震事件的破裂长度为 50 km,断裂将会产生  $M_w 7.0$  级地震;考虑河西务断裂向南延伸与牛东断裂相连接,构成一条规模 100 km 的断裂带,若单次地震事件 100 km 的断裂带破裂,将会产生  $M_w 7.3$  级地震,从构造背景上及防范大震巨灾角度看,上述可能完全必要.

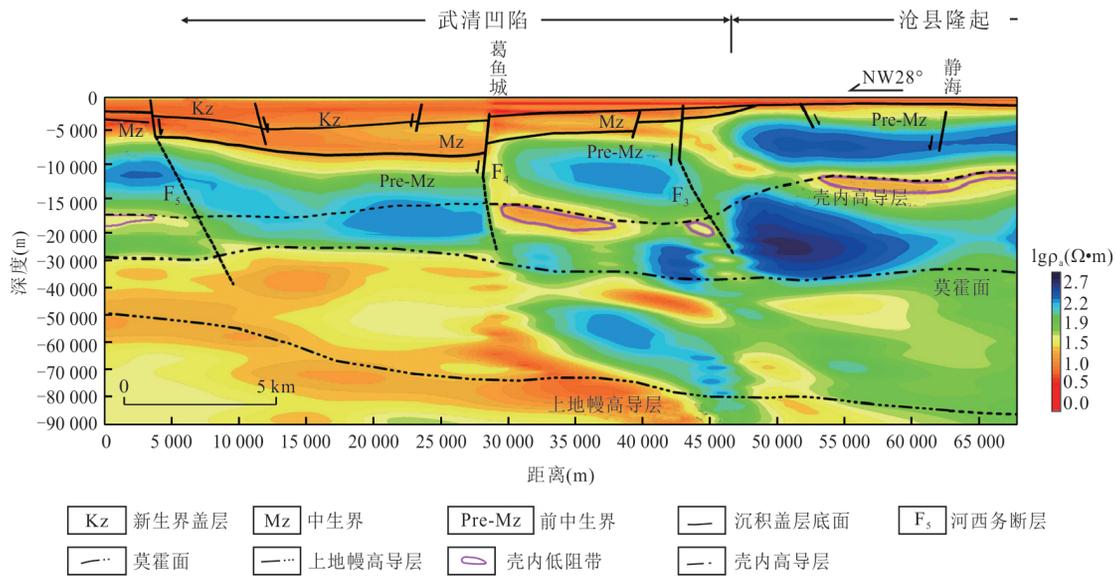


图6 天津大港—河北廊坊大地电磁剖面部分段落(徐新学等,2007)

Fig.6 Partial section of the Tianjin Dagang-Hebei Langfang magnetotelluric profile (After Xu *et al.*, 2007)

## 2 河西务断裂设定地震的长周期地震动影响

不少学者的研究表明,强震的长周期地震动分量相当大(谢礼立等,1990;俞言祥等,2005).河西务断裂处于京津冀腹地,是冀中拗陷内的一条重要断裂,一旦发生中强以上地震,京津冀城市群存在大量供水、供气、供油管道等基础设施,以及高层、超高层等重大工程建筑将受到严重威胁.为此,笔者根据目前的活动断层探测成果,从防大震角度出发,设定河西务断裂带发生 $M_w7.3$ 级地震,利用现在成熟的有限差分方法模拟分析了其潜在的长周期地震动影响.

### 2.1 数值模拟参数

基于河西务断裂的活动断层探测成果,按照Somerville *et al.*(1999)给出的原则,参考其他学者对震源模型的相关研究成果(陈学忠等,2005;龙锋等,2006;付长华等,2012;张勇等,2013;朱耿尚,2014;刘成利等,2014),建立了设定地震 $M_w7.3$ 级震源模型,相关参数见表1,震源平均滑动分布见图7.结合近30年河西务断裂周边区域的活动断层探测成果,以及华北地下三维结构分层模型HBcrust1.0模型(段永红等,2016),构建了本次模拟的地下三维结构模型,尺寸为:280 km×280 km×45 km,介质参数见表2,介质参数结果主要基于地区物探研究成果(王峻等,2009;姜文亮等,2012;段

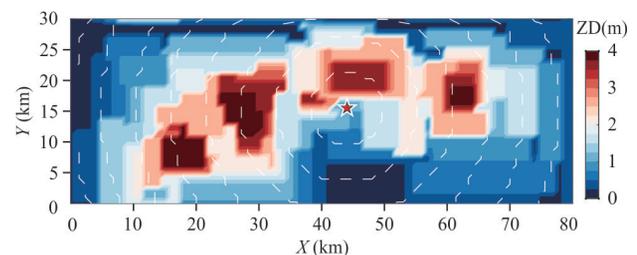


图7 设定地震震源破裂平均滑动量分布及破裂过程

Fig.7 Average sliding quantity distribution and fracture process of the source rupture

红色五角星表示破裂起始点,白色等值线虚线表示破裂传播时间,单位为s

永红等,2016;闫成国等,2020;张文朋等,2022).丁振坤和夏祖讽(2013)的研究结果,基岩(沉积层底)剪切波速取为2.4 m/s,沉积层内有关界面见图8.采用可处理地形有限的曲线网格有限差分方法进行数值模拟计算(张伟,2006),网格步长80 m,采用指数衰减吸收层作为吸收边界(Cerjan *et al.*, 1985),宽度为30层,衰减系数为0.05.根据网格步长和最低速度分析可知,模拟精确到的最小周期为1.6 s,满足对长周期的地震动作用分析.

### 2.2 长周期地震动响应分析

**2.2.1 设定地震的PGV分布** 地震动峰值速度(PGV)表征了地震动的中低频信息,对其进行研究对工程抗震设防有非常重要的作用(张斌,2019).图9给出了设定地震的地震动峰值速度(PGV)分布.图中黑色虚线为新构造单元边界.

表 1 设定地震的震源模型参数

Table 1 Source model parameters of scenario earthquake

参数	震级 ( $M_w$ )	破裂面走向、倾角、 滑动角	断层性质	破裂尺寸 (km)	震源深度 (km)
数值	7.3	NNE15°、80°、-45°	正走滑	80×29	14
参数	平均滑动量 (m)	地震矩 ( $N\cdot m$ )	凹凸体的平均滑动量 (m)	凹凸体面积百分比占比 (%)	凹凸体位置 (沿断层走向 km×沿断层倾向 km)
数值	1.41	$1.0951 \times 10^{20}$	3.545 5	10.95	9×11,9×5,5×6

表 2 介质模型物理参数

Table 2 Physical parameters of the medium model

速度层	S~IQ底	IQ底~IN	IN~G	G~C	C~Moho	Moho~
密度( $g\cdot cm^{-3}$ )	2.05~2.45	2.45~2.73	2.73~2.73	2.73~2.89	3~3	3.34~
$V_p(km\cdot s^{-1})$	1.5~2.2	2.2~2.7	2.7~4.15	4.15~6.2	6.2~6.9	7.9~
$V_s(km\cdot s^{-1})$	0.5~1.02	1.02~1.4	1.4~2.4	2.4~3.6	3.6~3.73	4.6~
$Q_0$	100~150	150~200	200~500	500~800	1 000~1 000	1 000

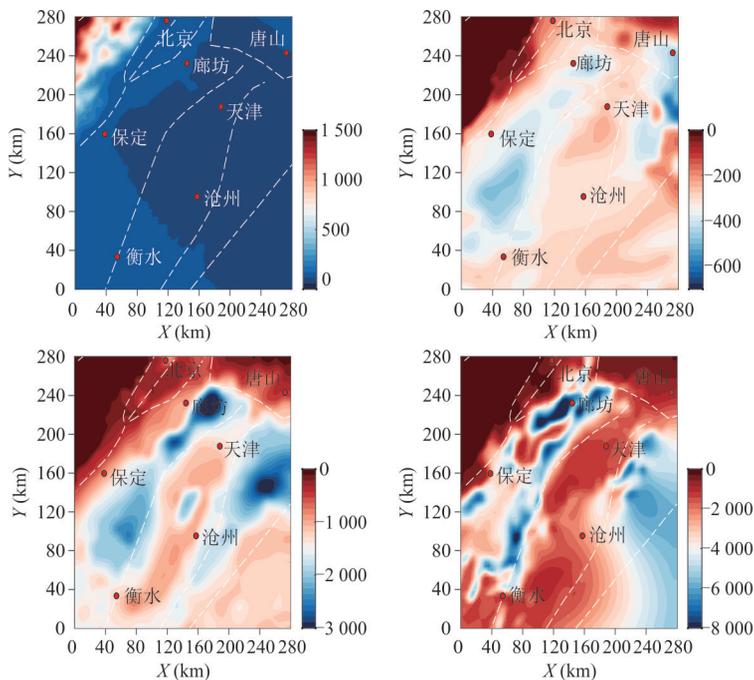


图 8 华北盆地北部沉积层内各地层界面埋深

Fig.8 Buried depth of stratigraphic interface in the northern part of North China Basin

由图 9 可见,PGV 分布呈北东向展布,显示出明显的方向性效应,其分布特征与杜晨晓等(2010)给出的 1976 年唐山地震模拟加速度分布特征基本一致,与朱耿尚(2014)给出的芦山地震模拟 PGV 分布特征也较相似,断层两侧附近区域的 PGV 最高接近 2 m/s.PGV>0.35 m/s 等值线包围区域,相当于地震烈度 IX~X 度,明显受到东北部的燕山断块隆起和西北部的太行山隆起限制,主要限制在冀中拗陷内;PGV>0.1 m/s 区域,相当于地震烈度 VII~VIII

度(中国地震烈度表,GB/T17742~2020),覆盖了广大京津冀地区,北京、天津、保定等重要城市均处于该区域,在冀中拗陷内的延伸更为显著,一直接近衡水,根据贾晓辉(2019)、Michael and O'Rourke(1999)的研究,当峰值速度小于 0.15 m/s 时,管道基本不发生破坏,但≥0.15 m/s 将破坏将呈线性递增,显然将给这些地区对峰值速度敏感的供水、供气管道等基础设施构成较大威胁.

2.2.2 长周期放大效应 河西务—牛东断裂所在

的华北北部盆地大部分地区都覆盖了较厚的松散层,且其下方潜藏了数千米厚的古近系盆地结构,松散沉积层对长周期地震动的影响早已为大家认识,付长华等(2012)通过对北京盆地的长周期地震动放大作用数值模拟研究,指出盆地结构一直是控制3~10 s长周期地震动加速度反应谱放大的主导因素.为研究京津冀城市群所在的广大区域下方潜

藏的盆地结构是否会进一步加剧长周期地震动的影响,笔者建立了平层模型予以对比,进一步分析其长周期地震动放大作用.平层模型仅各层界面埋深与真实模型由差异,各界面(IQ底、IN、G、C、Moho)取值分别为300 m、1 300 m、3 000 m、22 km和35 km,其他各层属性参数与真实模型完全一致(表2),网格剖分、计算范围及模拟计算参数也完全一致.这里,定义放大系数为真实盆地模型反应谱与平均模型反应谱之比.

图10给出了3~8 s周期地震动加速度反应谱放大系数分布.本文给出的北京地区模拟结果与付长华(2012)的模拟结果基本一致,大厂凹陷、武清凹陷都显示出明显的长周期地震动放大效应,仅在放大数值(这与放大系数定义有关)上有所不同.由图10可知,3 s以上长周期主要放大区域分布在A、B、C三个区域,A区呈较规则圆弧形分布,位于冀中拗陷内;B呈带状分布,位于沧县隆起中部里坦凹陷,并延伸到黄骅凹陷, C区呈团块状分布,位于黄骅拗陷东北角.对于不同周期地震动的放大作用强弱也有所变化,A区对3~4 s周期地震动放大作用较强,更长周期的则放大作用有所减弱,B区对6~8 s地震动放大作用较强,而C区对3~8 s有较强放

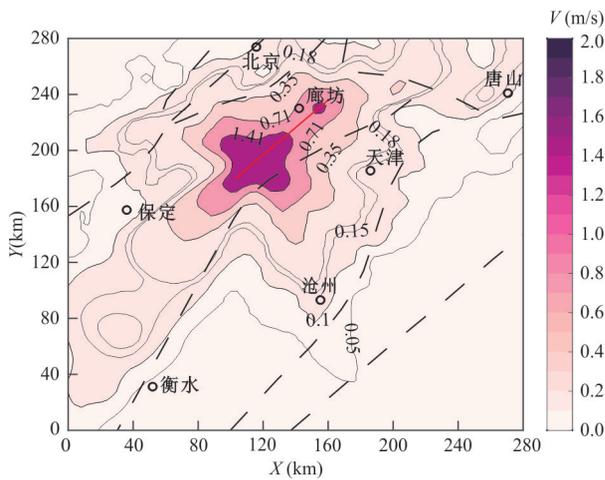


图9 河西务断裂设定地震(Mw7.3)PGV分布  
Fig.9 PGV distribution of the scenario earthquake for the Hexiwu fault (Mw7.3)

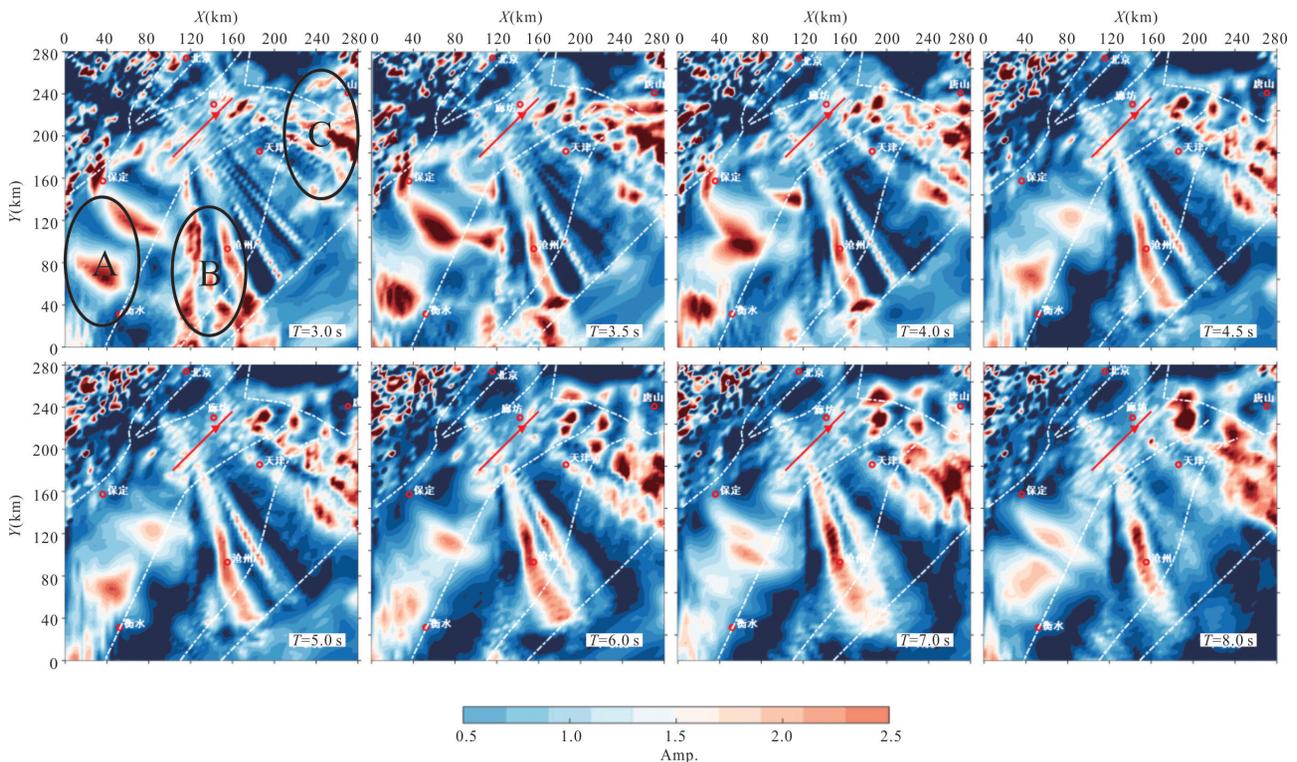


图10 河西务—牛东断裂带周边区域的放大系数分布(Mw7.3)  
Fig.10 Amplification coefficient distribution of the Hexiwu-Niudong fault zone and adjacent area

大作用.与图3对比分析可知,放大作用显著区这些区域的沉降中心分布有较明显对应关系,A区基本与冀中拗陷第四纪和新近纪沉积中心相对应,B区对应的第四纪沉降特征不显著,但处于新近系小型沉积中心,C区在第四纪和新近纪都显示为显著的沉降中心.这充分表明华北平原盆地下方潜藏的新近纪、古近纪盆地结构会对长周期地震动产生显著的放大作用,盆地沉积中心可能达到2倍以上.从图中京津冀城市群的位置看,除沧州之外,其他较大城市均未明显处于盆地构造中心,其长周期放大作用并不会因为盆地结构的影响而显著增强.

### 3 结论

通过对浅层人工地震勘探剖面的分析和设定地震的数值模拟分析,主要获得如下认识:

(1)新开展的人工地震剖面进一步揭示出,河西务断裂是一条倾向南东,视倾角 $55^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 的晚更新世早期活动断裂.其断裂不同段落的最浅上断点埋深存在差异,但普遍达到150 m以上,最浅上断点埋深达到了115 m,与周月玲等(2018)研究结果一致,由此推测河西务断裂展布存在差异性但断裂活动时间基本在中更新末期—晚更新世早期.

(2)人工地震勘探剖面显示,河西务断裂自别古庄镇西向北东经别北旺乡东延伸,止于高王公路与京塘公路之间,向南与同样活动的牛东断裂相接,共同组成了一条规模超100 km的北东向断裂带.根据华北地区地震活断层的震级—破裂长度的经验关系,结合深部构造环境认为,该断裂具有发生7级以上地震可能.

(3)基于设定河西务—牛东断裂发生 $M_w 7.3$ 地震的模拟分析结果,地震在广大京津冀地区激发显著的长周期地震动, $PGV > 0.15$  m/s区域十分广泛,基本覆盖了京津冀城市群大部分区域,将对京津冀城市群中供水、供气管道以及城市间输油管道等基础设施造成严重威胁;但由于京津冀城市群核心区均未处于古近系及新近系沉降中心地带,其长周期地震动放大作用不会受盆地结构影响而显著加剧.

### References

Cerjan, C., Kosloff, D., Kosloff, R., et al., 1985. A Nonreflecting Boundary Condition for Discrete Acoustic and Elastic Wave Equations. *Geophysics*, 50(4): 705—708.

<https://doi.org/10.1190/1.1441945>

- Chen, G.G., Xu, J., Gao, Z.W., 2003. Seismotectonic Features of the Bohai Bay Basin in North China. *North China Earthquake Sciences*, 21(2): 7—15(in Chinese with English abstract).
- Chen, X.Z., Xu, X.T., Zhai, W.J., 2005. Variation of Stress during the Rupture Process of the 1995  $M_L=4.1$  Shacheng, Hebei, China, Earthquake Sequence. *Acta Seismologica Sinica*, 27(3): 276—281(in Chinese with English abstract).
- Ding, Z.K., Xia, Z.F., 2013. Research on Definition of Hard Rock Shear Wave Velocity of Site for Nuclear Power Plant. *Nuclear Techniques*, 36(4): 300—303(in Chinese with English abstract).
- Du, C.X., Xie, F.R., Zhang, Y., et al., 2010. 3D Modeling of Dynamic Fault Rupture and Strong Ground Motion of the 1976 Ms 7.8 Tangshan Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(2): 290—304(in Chinese with English abstract).
- Duan, Y.H., Wang, F.Y., Zhang, X.K., et al., 2016. Three Dimensional Crustal Velocity Structure Model of the Middle-Eastern North China Craton (HBCrust1.0). *Scientia Sinica (Terrae)*, 46(6): 845—856(in Chinese).
- Fu, C.H., Gao, M.T., Chen, K., 2012. A Study on Long-Period Response Spectrum of Ground Motion Affected by Basin Structure of Beijing. *Acta Seismologica Sinica*, 34(3): 374—382, 425(in Chinese with English abstract).
- Gao, W.X., Ma, J., 1993. Seismo-Geological Background and Earthquake Hazard in Beijing Area. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- He, D.F., Li, D.S., Wang, C.S., et al., 2017. Advances and Challenge of Structural Geology of Deep Sedimentary Basins in China. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 219—233(in Chinese with English abstract).
- Jia, X.H., 2019. Seismic Analysis of Urban Underground Gas Pipeline and Construction of Earthquake Disaster Scenario (Dissertation). Institute of Geophysics China Earthquake Administration, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Jiang, W.L., Zhang, J.F., 2012. Fine Crustal Structure beneath Capital Area of China Derived from Gravity. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(5): 1646—1661(in Chinese with English abstract).
- Lao, H.G., Wu, K.Y., 2010. Accommodation Tectonic Analsis in the Hexiwu Structure Belt. *Inner Mongolia Pet-*

- rochemical Industry*, 36(14): 30–32(in Chinese).
- Liu, C.L., Zheng, Y., Xiong, X., et al., 2014. Rupture Process of  $M_{6.5}$  Ludian Earthquake Constrained by Regional Broadband Seismograms. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(9): 3028–3037(in Chinese with English abstract).
- Liu, G.S., He, D.F., Lu, R.Q., et al., 2023. Geological Structure and Tectonic Evolution of Yangshuiwu Buried-Hill Belt in Langgu Sag, Bohai Bay Basin. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 58(1): 226–239(in Chinese with English abstract).
- Long, F., Wen, X.Z., Xu, X.W., 2006. Empirical Relationships between Magnitude and Rupture Length, and Rupture Area, for Seismogenic Active Faults in North China. *Seismology and Geology*, 28(4): 511–535(in Chinese with English abstract).
- Mao, L.G., Tian, J.Z., Zhang, H.W., et al., 2019. Structures and Evolution of Hexiwu Fault, Northern Jizhong Depression since the Neogene. *Geological Journal of China Universities*, 25(4): 578–582(in Chinese with English abstract).
- Miao, Q.Y., Qi, J.F., Ma, B.S., et al., 2019. Differential Deformation and Control Mechanism of Paleogene Structures in Northern Jizhong Depression. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(1): 46–57(in Chinese with English abstract).
- Michael, J., O'Rourke. 1999. Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects. The Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Peng, Y.Q., Sun, X.Y., Zhan, Y., et al., 2022. 3D Deep Electrical Structure and Seismogenic Environment in Zhangbei Earthquake Region. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(9): 3464–3480(in Chinese with English abstract).
- Pitarka, A., Irikura, K., Iwata, T., et al., 1998. Three-Dimensional Simulation of the Near-Fault Ground Motion for the 1995 Hyogo-Ken Nanbu (Kobe), Japan, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(2): 428–440. <https://doi.org/10.1785/bssa0880020428>
- Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., et al., 1999. Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion. *Seismological Research Letters*, 70(1): 59–80. <https://doi.org/10.1785/gssrl.70.1.59>
- Sun, X. Y., Zhan, Y., Unsworth, M., et al., 2020. 3-D Magnetotelluric Imaging of the Easternmost Kunlun Fault: Insights into Strain Partitioning and the Seismotectonics of the Jiuzhaigou  $M_{7.0}$  Earthquake. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 125(5): e2020JB019731. <https://doi.org/10.1029/2020JB019731>
- Sun, X. Y., Zhan, Y., Zhao, L. Q., et al., 2019. Electrical Structure of the Kunlun–Qinling Fault System, Northeastern Tibetan Plateau, Inferred from 3-D Inversion of Magnetotelluric Data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 181: 103910. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.103910>
- Wang, H. Y., 2011. Amplification Effects of Soil Sites on Ground Motion in the Weihe Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(1): 137–150(in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Liu, Q.Y., Chen, J.H., et al., 2009. Three-Dimensional S-Wave Velocity Structure of the Crust and Upper Mantle beneath the Capital Circle Region from Receiver Function Inversion. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(10): 2472–2482(in Chinese with English abstract).
- Wang, S.C., Men, X.Y., Qian, Z., et al., 2011. Compound Characteristics of Oil and Gas Systems and Favorable Plays in the Wuqing Depression, Bohai Bay Basin. *Natural Gas Industry*, 31(11): 59–62, 124(in Chinese with English abstract).
- Wang, X.W., Guo, S.Y., Gao, N.A., et al., 2023. Detection of Carbonate Geothermal Reservoir in Niudong Fault Zone of Xiongan New Area and Its Geothermal Exploration Significance. *Geological Bulletin of China*, 42(1): 14–26(in Chinese with English abstract).
- Wen, C., Zhu, K.J., Meng, L.P., et al., 2019. Deep and Shallow Structural Characteristics of Hexiwu Fault in Northeastern Jizhong Depression. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 40(5): 29–35 (in Chinese with English abstract).
- Wesnousky, S. G., 2008. Displacement and Geometrical Characteristics of Earthquake Surface Ruptures: Issues and Implications for Seismic-Hazard Analysis and the Process of Earthquake Rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(4): 1609–1632. <https://doi.org/10.1785/0120070111>
- Wu, Z.H., 2019. The Definition and Classification of Active Faults: History, Current Status and Progress. *Acta Geoscientifica Sinica*, 40(5): 661–697(in Chinese with Eng-

- lish abstract).
- Xie, L.L., Zhou, Y.N., Hu, C.X., et al., 1990. Characteristics of Response Spectra of Long-Period Earthquake Ground Motion. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 10(1): 1—20(in Chinese with English abstract).
- Xie, Z.J., Lü, Y.J., Fang, Y., et al., 2019. Research on the Seismic Activity of the Beijing-Tianjin-Hebei Region. *Progress in Geophysics*, 34(3): 961—968(in Chinese with English abstract).
- Xu, X.X., Chen, Y.K., Liu, J.C., et al., 2007. The Crust and Upper Mantle Electrical Conductivity Structure along the Profile of Hebei Langfang-Tianjin Dagang. *China Earthquake Engineering Journal*, 29(4): 364—370(in Chinese with English abstract).
- Yan, C.G., Cao, J.Q., Chen, Y.K., et al., 2020. Fine Crustal Structures of Zhangjiakou-Bohai Tectonic Zone in Tianjin Area Revealed by a Deep Seismic Reflection Profile. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(12): 4431—4439(in Chinese with English abstract).
- Yang, D.X., Chen, Y., Li, X.D., et al., 2021. Evidence from Fluid Inclusions for Hydrocarbon Accumulation of Yangshuiwu Buried Hill in Langgu Sag, Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 42(10): 1325—1336(in Chinese with English abstract).
- Ye, T., Chen, X.B., Huang, Q.H., et al., 2021. Three-Dimensional Electrical Resistivity Structure in Focal Area of the 2021 Yangbi  $M_s6.4$  Earthquake and Its Implication for the Seismogenic Mechanism. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(7): 2267—2277(in Chinese with English abstract).
- Yu, Y.X., Hu, Y.X., Pan, H., 2005. Study on Impact of Focal Mechanism on Long-Period Ground Motions. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(17): 3113—3118(in Chinese with English abstract).
- Zeng, Q.L., 2010. Faults Feature and Hydrocarbon Accumulation in Hexiwu Structural Belt of Langgu Depression. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 36(17): 109—111(in Chinese with English abstract).
- Zhan, Y., Liang, M.J., Sun, X.Y., et al., 2021. Deep Structure and Seismogenic Pattern of the 2021.5.22 Madoi (Qinghai)  $M_s7.4$  Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 64(7): 2232—2252(in Chinese with English abstract).
- Zhan, Y., Yang, H., Zhao, G.Z., et al., 2017. Deep Electrical Structure of Crust beneath the Madongshan Step Area at the Haiyuan Fault in the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau and Tectonic Implications. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(6): 2371—2384(in Chinese with English abstract).
- Zhan, Y., Zhao, G.Z., Martyn, U., et al., 2013. Deep Structure and Seismogenic Environment of Lushan Earthquake Zone with  $M = 7.0$  of 4.20 in Southwest Section of Longmenshan Fault Zone. *Chinese Science Bulletin*, 58(20): 1917—1924(in Chinese).
- Zhang, B., 2019. Study on the Attenuation Relationship between Horizontal Peak Velocity and Peak Displacement (Dissertation). Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.M., Lu, Y.J., Ren, J.J., 2006. Seismotectonics and Potential Seismic Source Zonation of the North China Plain. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 1(3): 234—244(in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., 2006. Finite Difference Algorithm for Seismic Wave Propagation in Three-Dimensional Inhomogeneous Media with Undulating Terrain and Its Application in Strong Ground Motion Simulation (Dissertation). Peking University, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W.P., Zhang, C.L., Gao, W.P., et al., 2022. Quaternary Activity Characteristics of the Jiyunhe Fault Revealed by Shallow Seismic Prospecting Data. *China Earthquake Engineering Journal*, 44(1): 183—191(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., 2014. Study on Cenozoic Fault Activity in Three-Dimensional Continuous Area of Jizhong Depression (Dissertation). China University of Petroleum (Huadong), Dongying(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Xu, L.S., Chen, Y.T., 2013. Rupture Process of the Lushan 4.20 Earthquake and Preliminary Analysis on the Disaster-Causing Mechanism. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(4): 1408—1411(in Chinese with English abstract).
- Zhao, H.G., Liu, C.Y., 2003. Detachment Gliding Structures of Langgu Sag. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 33(3): 315—319(in Chinese with English abstract).
- Zhao, L.Q., Sun, X.Y., Zhan, Y., et al., 2022. The Seismogenic Model of the Menyuan  $M_s6.9$  Earthquake on

- January 8, 2022, Qinghai Province and Segmented Extensional Characteristics of the Lenglongling Fault. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(4): 1536–1546(in Chinese with English abstract).
- Zhao, L.Q., Zhan, Y., Sun, X.Y., et al., 2019. The Hidden Seismogenic Structure and Dynamic Environment of the 21 January Menyuan, Qinghai,  $M_s$ 6.4 Earthquake Derived from Magnetotelluric Imaging. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(6): 2088–2100(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y.L., Peng, Y.Q., Chen, J.Q., et al., 2018. Comprehensive Survey and Study on the Activity of the Hexiwu Fault in Langfang Area, Hebei Province. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 13(3): 610–618(in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. S., 2014. Application of Finite Difference Method in Strong Ground Motion Simulation (Dissertation). University of Science and Technology of China, Hefei (in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 陈国光, 徐杰, 高战武, 2003. 华北渤海湾盆地地震的构造特征. *华北地震科学*, 21(2): 7–15.
- 陈学忠, 许向彤, 翟文杰, 2005. 1995年7月20日河北沙城  $M_L$ 4.1地震序列破裂过程中应力变化的研究. *地震学报*, 27(3): 276–281.
- 丁振坤, 夏祖讽, 2013. 核电站场地基岩剪切波速度定义范围研究. *核技术*, 36(4): 300–303.
- 杜晨晓, 谢富仁, 张扬, 等, 2010. 1976年  $M_s$ 7.8唐山地震断层动态破裂及近断层强地面运动特征. *地球物理学报*, 53(2): 290–304.
- 段永红, 王夫运, 张先康, 等, 2016. 华北克拉通中东部地壳三维速度结构模型(HBCrust1.0). *中国科学: 地球科学*, 46(6): 845–856.
- 付长华, 高孟潭, 陈颀, 2012. 北京盆地结构对长周期地震动反应谱的影响. *地震学报*, 34(3): 374–382, 425.
- 高文学, 马瑾, 1993. 首都圈地震地质环境与地震灾害. 北京: 地震出版社.
- 何登发, 李德生, 王成善, 等, 2017. 中国沉积盆地深层构造地质学的研究进展与展望. *地学前缘*, 24(3): 219–233.
- 贾晓辉, 2019. 城市地下燃气管道抗震分析及地震灾害情景构建(博士学位论文). 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 姜文亮, 张景发, 2012. 首都圈地区精细地壳结构: 基于重力场的反演. *地球物理学报*, 55(5): 1646–1661.
- 劳海港, 吴孔友, 2010. 河西务构造带调节构造特征分析. *内蒙古石油化工*, 36(14): 30–32.
- 刘成利, 郑勇, 熊熊, 等, 2014. 利用区域宽频带数据反演鲁甸  $M_s$ 6.5级地震震源破裂过程. *地球物理学报*, 57(9): 3028–3037.
- 刘冠仲, 何登发, 鲁人齐, 等, 2023. 渤海湾盆地廊固凹陷杨税务潜山带地质结构与构造演化. *地质科学*, 58(1): 226–239.
- 龙锋, 闻学泽, 徐锡伟, 2006. 华北地区地震活断层的震级—破裂长度、破裂面积的经验关系. *地震地质*, 28(4): 511–535.
- 毛黎光, 田建章, 张宏伟, 等, 2019. 冀中拗陷北部河西务断层结构及新近纪以来的活动特征分析. *高校地质学报*, 25(4): 578–582.
- 苗全芸, 漆家福, 马兵山, 等, 2019. 冀中拗陷北部古近纪构造差异变形及控制因素. *大地构造与成矿学*, 43(1): 46–57.
- 彭远黔, 孙翔宇, 詹艳, 等, 2022. 张北地震区三维深部电性结构与孕震环境. *地球物理学报*, 65(9): 3464–3480.
- 王海云, 2011. 渭河盆地中土层场地对地震动的放大作用. *地球物理学报*, 54(1): 137–150.
- 王峻, 刘启元, 陈九辉, 等, 2009. 根据接收函数反演得到的首都圈地壳上地幔三维S波速度结构. *地球物理学报*, 52(10): 2472–2482.
- 王少春, 门相勇, 钱铮, 等, 2011. 渤海湾盆地武清凹陷含油气系统的复合性特征与有利勘探区带. *天然气工业*, 31(11): 59–62, 124.
- 汪新伟, 郭世炎, 高楠安, 等, 2023. 雄安新区牛东断裂带碳酸盐岩热储探测及其对地热勘探的启示. *地质通报*, 42(1): 14–26.
- 温超, 朱坤静, 孟立朋, 等, 2019. 冀中拗陷东北部河西务断裂深构造特征. *地震地磁观测与研究*, 40(5): 29–35.
- 吴中海, 2019. 活断层的定义与分类: 历史、现状和进展. *地球学报*, 40(5): 661–697.
- 谢礼立, 周雍年, 胡成祥, 等, 1990. 地震动反应谱的长周期特性. *地震工程与工程振动*, 10(1): 1–20.
- 谢卓娟, 吕悦军, 方怡, 等, 2019. 京津冀地区的地震活动性研究. *地球物理学进展*, 34(3): 961–968.
- 徐新学, 陈宇坤, 刘俊昌, 等, 2007. 河北廊坊—天津大港剖面地壳上地幔电性结构特征. *西北地震学报*, 29(4): 364–370.
- 闫成国, 曹井泉, 陈宇坤, 等, 2020. 深地震反射剖面揭示的天津地区张渤带地壳精细结构. *地球物理学报*, 63(12): 4431–4439.
- 杨德相, 陈勇, 李小冬, 等, 2021. 渤海湾盆地廊固凹陷杨税务潜山油气成藏的流体包裹体证据. *石油学报*, 42

- (10): 1325—1336.
- 叶涛, 陈小斌, 黄清华, 等, 2021. 2021年5月21日云南漾濞地震( $M_s$ 6.4)震源区三维电性结构及发震机制讨论. 地球物理学报, 64(7): 2267—2277.
- 俞言祥, 胡聿贤, 潘华, 2005. 地震震源机制对长周期地震动的影响研究. 岩石力学与工程学报, 24(17): 3113—3118.
- 曾庆鲁, 2010. 廊固凹陷河西务构造带断裂特征与油气成藏. 内蒙古石油化工, 36(17): 109—111.
- 詹艳, 梁明剑, 孙翔宇, 等, 2021. 2021年5月22日青海玛多 $M_s$ 7.4地震深部环境及发震构造模式. 地球物理学报, 64(7): 2232—2252.
- 詹艳, 杨皓, 赵国泽, 等, 2017. 青藏高原东北缘海原构造带马东山阶区深部电性结构特征及其构造意义. 地球物理学报, 60(6): 2371—2384.
- 詹艳, 赵国泽, Martyn, U., 等, 2013. 龙门山断裂带西南段4.20芦山7.0级地震区的深部结构和孕震环境. 科学通报, 58(20): 1917—1924.
- 张斌, 2019. 水平向峰值速度、峰值位移衰减关系研究(博士学位论文). 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 张世民, 吕悦军, 任俊杰, 2006. 华北平原强震构造带与潜在震源区划分. 震灾防御技术, 1(3): 234—244.
- 张伟, 2006. 含起伏地形的三维非均匀介质中地震波传播的有限差分算法及其在强地面震动模拟中的应用(博士学位论文). 北京: 北京大学.
- 张文朋, 张春丽, 高武平, 等, 2022. 用浅层地震勘探资料研究蓟运河断裂的第四纪活动特征. 地震工程学报, 44(1): 183—191.
- 张艺, 2014. 冀中坳陷三维连片区新生代断裂活动性研究(博士学位论文). 东营: 中国石油大学(华东).
- 张勇, 许力生, 陈运泰, 2013. 芦山4.20地震破裂过程及其致灾特征初步分析. 地球物理学报, 56(4): 1408—1411.
- 赵红格, 刘池洋, 2003. 廊固凹陷的拆离滑脱构造. 西北大学学报(自然科学版), 33(3): 315—319.
- 赵凌强, 孙翔宇, 詹艳, 等, 2022. 2022年1月8日青海门源 $M_s$ 6.9地震孕震环境和冷龙岭断裂分段延展特征. 地球物理学报, 65(4): 1536—1546.
- 赵凌强, 詹艳, 孙翔宇, 等, 2019. 利用大地电磁技术揭示2016年1月21日青海门源 $M_s$ 6.4地震隐伏地震构造和孕震环境. 地球物理学报, 62(6): 2088—2100.
- 周月玲, 彭远黔, 陈建强, 等, 2018. 河西务断裂活动性的综合探测研究. 震灾防御技术, 13(3): 610—618.
- 朱耿尚, 2014. 有限差分方法在强地面运动模拟中的应用(硕士学位论文). 合肥: 中国科学技术大学.