

doi: 10.12029/gc20190303

戚帮申, 丰成君, 谭成轩, 张鹏, 孟静, 张春山, 杨为民, 杨肖肖, 雷晓东. 2019. 京张地区延矾盆地北缘活动断裂带桑园镇隐伏段综合地球物理及钻孔地层剖面研究[J]. 中国地质, 46(3): 468–481.

Qi Bangshen, Feng Chengjun, Tan Chengxuan, Zhang Peng, Meng Jing, Zhang Chunshan, Yang Weimin, Yang Xiaoxiao, Lei Xiaodong. 2019. Application of comprehensive geophysical-drilling exploration to detect the buried North Boundary active Fault Belt of Yanqing–Fanshan Basin in Sangyuan town, Beijing–Zhangjiakou area[J]. Geology in China, 46(3): 468–481(in Chinese with English abstract).

## 京张地区延矾盆地北缘活动断裂带桑园镇隐伏段 综合地球物理及钻孔地层剖面研究

戚帮申<sup>1,2,3</sup>, 丰成君<sup>2,3</sup>, 谭成轩<sup>2,3</sup>, 张鹏<sup>2,3</sup>, 孟静<sup>2,3</sup>, 张春山<sup>2,3</sup>,  
杨为民<sup>2,3</sup>, 杨肖肖<sup>4</sup>, 雷晓东<sup>1</sup>

(1. 北京市地质勘察技术院, 北京 100120; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 3. 自然资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要:**京张高铁预选路线跨越延矾盆地北缘活动断裂隐伏段, 隐伏活动断裂的产状、活动性对高铁设计、建设和运营具有直接影响。针对盆地隐伏活动断裂的复杂性特征, 利用可控源音频大地电磁测深(CSAMT)、浅层地震、高密度电阻率综合地球物理探测, 以及钻孔地层剖面记录等方法, 分析延矾盆地北缘活动断裂隐伏段特征, 结果表明: (1) 延矾盆地北缘活动断裂隐伏段由两条次级断层组成(F2-1、F2-2), 二者大致平行分布, 走向N56°E, 倾角为50~70°, 平面上, 与地表出露段共同呈右阶雁列分布; (2) F2-1次级断层可分辨上断点埋深约10 m, 其晚更新世以来垂直滑动速率大约0.12 mm/a, 应是重大工程建设重点设防对象, 次级断裂F2-2可分辨上断点埋深约30 m, 晚更新世以来活动性弱; (3) 通过钻孔地层剖面记录与地球物理探测成果对比, CSAMT法与浅层地震勘探对基岩顶界面探测可靠有效, 高密度电阻率法对于该地区浅部第四系松散堆积物探测效果显著, 比较直观地反映出电性异常体的形态和规模, 通过综合地球物理探测, 能够做到优势互补, 减少隐伏活动断层解译的不确定性。

**关键词:**京张地区; 延矾盆地北缘断裂; 隐伏活动断裂; 综合地球物理探测; 钻孔联合剖面

**中图分类号:** P541 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2019)03-0468-14

## Application of comprehensive geophysical–drilling exploration to detect the buried North Boundary active Fault Belt of Yanqing–Fanshan Basin in Sangyuan town, Beijing–Zhangjiakou area

QI Bangshen<sup>1,2,3</sup>, FENG Chengjun<sup>2,3</sup>, TAN Chengxuan<sup>2,3</sup>, ZHANG Peng<sup>2,3</sup>, MENG Jing<sup>2,3</sup>,  
ZHANG Chunshan<sup>2,3</sup>, YANG Weimin<sup>2,3</sup>, YANG Xiaoxiao<sup>4</sup>, LEI Xiaodong<sup>1</sup>

**收稿日期:** 2018-03-19; **改回日期:** 2019-02-21

**基金项目:** 中国地质调查局地质调查项目“京津冀协同发展区活动构造与区域地壳稳定性调查”(DD20160267)、国家自然科学基金“断动导致地应力场耦联的机理研究”(41702341)和北京市地质矿产勘查开发局地质调查项目“延庆盆地1:2.5万高精度重力测量”(PXM2019-158307-000009)联合资助。

**作者简介:** 戚帮申, 男, 1988年生, 博士, 工程师, 主要从事新构造、活动构造、区域地壳稳定性研究; E-mail: qibangshen@126.com。

**通讯作者:** 谭成轩, 男, 1964年生, 博士, 研究员, 主要从事构造应力场、区域地壳稳定性评价和地质灾害研究;

E-mail: tanchengxuan@tom.com。

(1. *Beijing Institute of Geo-exploration Technology, Beijing 102218, China*; 2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*; 3. *Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China*; 4. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

**Abstract:** North Yanqing and Fanshan Basin active fault is a significant factor for engineering design of Beijing-Zhangjiakou high-speed railway, and buried section of this active fault in Yanqing and Fanshan Basin is complicated and unclear. In order to detect the location, characteristics and activity intensity of the buried active fault, the authors used many methods, such as the controlled source audio-frequency magnetotelluric (CSAMT), shallow seismic reflection, high density resistivity and drilling exploration. The results show that the buried North Yanqing and Fanshan Basin active fault consists of two secondary faults, i.e., F2-1, F2-2, which are distributed parallelly. The trending of the tow secondary faults is N56°E, and the dip angle of them is 50~70°. Meanwhile, they are right-stepped, oblique-arranged normal faults. The burial depth of distinguishable broken point is 10m for F2-1 secondary fault and 30m for F2-2 secondary fault. F2-1 secondary fault is an active fault, its vertical activity rate has been 0.12mm/a since the Late Pleistocene. Activity of F2-2 secondary fault has been weak since the Late Pleistocene. Compared with the result of drilling exploration, the CSAMT method and shallow seismic reflection method have some advantages in exploration of bedrock interface, whereas the high density resistivity method is good at exploration of shallow loose deposits and can display more effectively broken point of fault. By means of comprehensive geophysical-drilling exploration, researchers can achieve the complementary advantages, and can reduce the uncertainty of the interpretation for buried active faults exploration.

**Key words:** Beijing-Zhangjiakou area; North Yan-fan Basin fault; buried active fault; geophysical exploration; drilling exploration

**About the first author:** QI Bangshen, male, born in 1988, engineer, doctor, mainly engages in the study of neotectonic, active tectonic and regional crustal stability; E-mail: qibangshen@126.com.

**About the corresponding author:** TAN Chengxuan, male, born in 1964, senior researcher, doctor, mainly engages in the study of tectonic stress field, regional crustal stability and geohazard; E-mail: tanchengxuan@tom.com.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Program (No.DD20160267), National Science Foundation (No. 41702341), Beijing Geological Survey Program (No. PXM2019-158307-000009).

## 1 引言

张家口市及周边区域是京津冀协同发展城市群节点之一,一方面承接北京外迁产业,另一方面受到冬奥会承办的促进作用,京张地区基础建设发展迅速,作为京津冀地区城际铁路网重要一环的京张高铁便是重大工程之一。京张高铁工程正线将穿越延庆—矾山(延矾)、怀来—涿鹿(怀涿)、张家口—宣化(张宣)等一系列晚新生代断陷盆地,这些盆地内活动断裂发育,中强地震较为集中(徐锡伟和邓起东, 1988; Xu and Ma, 1992; 方仲景等, 1993; Pavlides et al., 1999),是重大工程规划、建设时着重勘察对象。

延矾盆地北缘断裂是延矾盆地的边界断裂,分段性比较明显:狼山以东呈锯齿状沿山前分布(图1),切割了大海陀山南麓晚更新世—全新世冲洪积物,是晚更新世—全新世的活动断裂(冉勇康等, 1992, 1998; 方仲景等, 1993; 程绍平等, 1994, 1995;

尹功明和卢演涛, 1996; 徐锡伟等, 2015; 刘文玉等, 2017);狼山乡以西次级活断裂多呈隐伏状,京张高铁便于土木镇—狼山乡一带穿越该隐伏断裂(图1)。大量的震例表明,活动断裂是地震的根源和元凶(徐锡伟等, 1996; 2002),地震灾害具有沿发震断层呈狭窄的带状分布特征(徐锡伟等, 1996)。然而,目前对于延矾盆地北缘活动断裂隐伏段的认识还有欠缺,其位置、产状、运动方式以及活动性等都是在京张高铁设计、建设中值得关注的问题。

本文利用综合地球物理、钻探等手段,探测和分析延矾盆地北缘活动断裂带桑园镇隐伏段的特征,为京张地区工程建设顺利实施、安全运营提供地质科技支撑。

## 2 区域地质背景

华北地区处于欧亚板块的东缘,新生代受到印度—欧亚板块的碰撞汇聚体系及西太平洋—印度尼西亚板块俯冲消减体系的共同影响下,经历了复

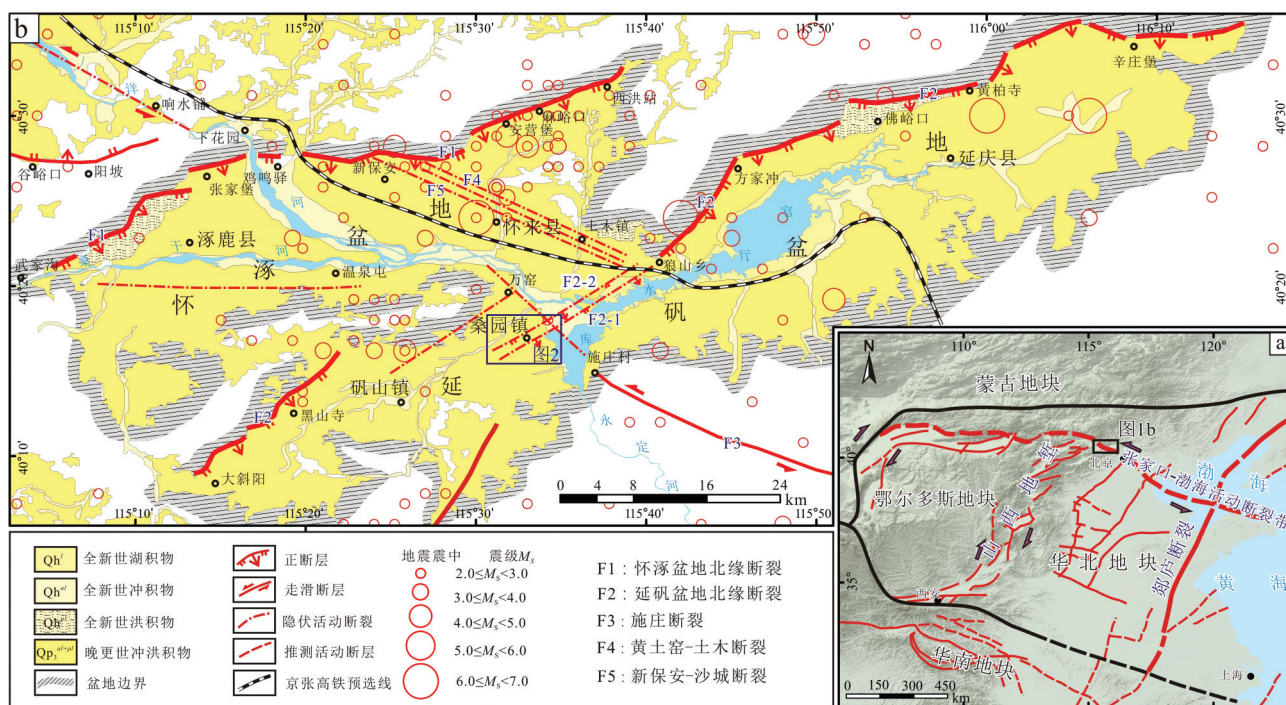


图1 延矾盆地活动构造简图

a—华北地区新构造简图;b—延矾盆地主要活动断裂和地质简图

Fig.1 Generalized map of active structure of Yanqing-Fanshan Basin

a—Generalized map of North China and its main neotectonic faults; b—Map of the main active faults and geology of the Yanqing-Fanshan Basin

杂的地质演化过程(Pavlidis et al., 1999; 张培震等, 2014)。中国东部构造环境由晚侏罗世到早白垩世强烈的挤压作用(张岳桥等, 2007; 董树文等, 2008)转变为上新世以来拉张环境(徐杰等, 2000; 李三忠等, 2010, 2011; 曹现志等, 2013), 记录了华北地区中—新生代区域性挤压、伸展以及岩石圈破坏构造演化过程, 揭示了由晚中生代东亚大陆多向汇聚体系(董树文等, 2008; 赵越等, 2017)转变为新近纪以来印度板块和欧亚板块碰撞, 所引发的向东扩张效应, 以及太平洋俯冲带的跃迁式东撤的联合效应这一过程(张岳桥等, 2004, 2006; 李三忠等, 2010, 2011; 曹现志等, 2013)。在此构造背景下, 中国东部晚新生代经历了多阶段的伸展构造变形, 发育一系列的山间盆地(Xu et al., 1993; Zhang et al., 1995; 1998, 2003; Li et al., 1998; Yin, 2010; Shi et al., 2015), 其中, 尤以山西地堑最为典型。山西地堑位于鄂尔多斯地块的东缘, 北侧为阴山—燕山构造带, 南侧是秦岭构造带, 由若干NE—NNE向的新近纪、第四纪断陷盆地组成(Xu and Ma, 1992; 张岳桥等, 2004, 2006; Shi et al., 2015)。

京张地区一系列的山间盆地便位于山西地堑北端, 并在此与张家口—渤海活动构造带的交汇(图1a)。区内发育有张宣、怀涿、延矾等新近纪、第四纪断陷盆地, 发育的主要地层包括: 中新统汉诺坝组( $E_3N_h$ ), 主要分布于盆地边缘外的地带多期喷发玄武岩系; 上新统石匣组( $N_{3s}$ )主要分布在盆地边缘地带, 与汉诺坝组玄武岩呈平行不整合或微角度不整合接触, 由棕红色黏土岩、砾岩组成; 早—中更新统泥河湾组( $Q_{p1n}$ )为一套淡水河湖相地层, 以粉砂或粉砂质黏土为主, 夹少量的粗砂、砂砾石(岩)和泥灰岩; 中更新统赤城组( $Q_{p2c}$ )由冲洪积的浅红、红黄色含钙质结核的亚黏土及粉砂质黏土、砾石层组成, 较坚硬致密, 含丰富的哺乳动物及软体动物化石; 上更新统马兰组( $Q_{p3m}$ )假整合于赤城组红黏土之上, 全新世堆积之下, 由黄土砾石层、黄土和次生黄土夹砂砾层三部分岩石组成; 全新世冲积物( $Q_{h^{cl}}$ )分布于河流河道及其两侧, 地貌上构成现代河床、河漫滩及河流一级阶地; 全新世风积物( $Q_{h^{col}}$ ), 主要分布于宣化盆地的东南部山麓前缘, 为褐黄色砂, 组成新月形、垅岗形砂丘, 东西向延长

(王继兴等, 1996)。

盆地形成演化受NE—NEE向活动断层控制作用明显。其中, NE—NEE向的怀涿盆地北缘断裂、延矾盆地北缘断裂作为延怀盆地的边界断裂, 均为全新世活动断裂(冉永康等, 1992, 1998; 程绍平等, 1994, 1995; 谢富仁等, 2007), 前人通过盆地边缘断裂出露段古地震探槽揭露怀涿盆地北缘断裂晚更新世以来垂直滑动速率为0.22~0.55 mm/a(徐锡伟等, 2015), 延矾盆地北缘断裂晚更新世以来垂直滑动速率0.10~0.58 mm/a(方仲景等, 1993; 程绍平等, 1994, 1995; 冉永康等, 1998; 徐锡伟等, 2015)。研究区中强地震较为集中(徐锡伟和邓起东, 1988; Xu and Ma, 1992; Pavlides et al., 1999; 方仲景等, 1993)(图1b), 据史料记载, 公元1300年以来共发生6次 $5 \leq M < 7$ 地震, 其中震级最大的为公元1720年沙城地震( $M=6 \frac{3}{4} \sim 7$ )(谢富仁等, 2007)。深部地球物理探测成果表明震中多发生在盆岭交汇处, 而震源位置处在物性结构梯度带上, 显示中下地壳的物性差异是研究区深部孕震环境(刘文玉等, 2017)。

### 3 综合地球物理探测方法

地球物理勘探手段为隐伏活动断裂探测的常用手段(邓起东等, 2003), 目前, 常用的地球物理勘探手段包括可控源音频大地电磁测深法(Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric, CSAMT)、高密度电阻率法(Resistivity Tomography)、浅层地震勘探等(方盛明等, 2002; 邓起东等, 2003; 李征西, 2005; 吴子泉等, 2005; 徐明才等, 2005; 刘万恩, 2007; 杜良等, 2012; 杨歧焱等, 2016)。研究区内不同岩性地层的密度、磁化率、剩磁强度、电阻率、极化率物性柱等物性特征存在明显的差异(董杰等, 2001; 雷晓东等, 2014), 具备开展电法、磁法、重力、地震等地球物理勘探的前提条件, 具体地球物理测线布置见图2。

#### 3.1 可控源音频大地电磁测深

CSAMT法是以有限长接地电偶极为场源, 在距偶极中心一定距离处同时观测电、磁场参数的一种电磁测深方法(何继善, 1990; 朴化荣, 1990; 石昆法, 1999)。该方法在金属矿、地热资源、地下水等勘探、城市隐伏断层探测中应用广泛(陈建生等,

1999; 王新建等, 2005; 李帝铨等, 2008; 董泽义等, 2010; 董延朋和许尚杰, 2012; 夏训银等, 2013; 雷晓东等, 2014; 关艺晓等, 2016)。CSAMT法具有勘探深度大、横向和纵向分辨率均较高, 抗干扰能力强等优点, 可以查明延矾盆地北缘活动断裂空间展布形态及基岩埋深。

CSAMT法勘探采用美国Zonge公司的GDP-32"型多功能电法仪, 采用标量测量, TM模式, 点距50 m。场源供电电极距AB约为1 km, 水平方向电场MN(MN=50 m)平行于场源AB, 角度差小于 $5^\circ$ , 收发距离9 km, 根据现场试验结果确定设定频率范围为1~8192 Hz。

#### 3.2 浅层地震勘探

浅层地震勘探是城市活动断裂探测中解决隐伏断裂定位及切割地层层位的最主要方法之一(邓起东等, 2003), 其主要任务是在收集整理工作区内的地质、CSAMT等资料基础上, 探测延矾盆地北缘断裂的空间展布、产状, 并分析其活动性特征(方盛明等, 2002; 邓起东等, 2003)。

浅层地震勘探设备采用美Geo-X公司生产的Aries数字地震仪, 以及28T可控震源车和夯击系统。地震数据采集系统是Summit II plus, 开通接收道数120道, 长排列接收, 检波器自然频率为60 Hz, 检波器为3只串联, 观测系统采用了单边激发多次覆盖接收方式。

#### 3.3 高密度电阻率法

高密度电阻率法(High Density Resistivity)是以岩、土导电性的差异为基础, 一次性布置一系列电极时可组合出十多种装置, 研究人工施加稳定电流场的作用下地下传导电流分布规律的一种电探方法。在CSAMT、浅层地震勘探基本确定断层位置的基础上, 进一步探查第四系内部土层结构以及主要活动断裂上断点位置及埋深情况(李志祥等, 2003; 朱涛等, 2007; 蓝星等, 2012; 温超等, 2015)。

高密度电阻率法采用骄鹏科技有限公司(GeoPen)的E60DN电法工作站, 点距10 m, 工作装置形式主要采用温纳排列( $\alpha$ ), 所得剖面为倒梯形, 测线位于怀来县桑园镇附近(图2), 测线最大勘探深度为130 m。电法数据处理及反演采用瑞典RES2D高密度电法专用反演软件, 使用最小二乘圆

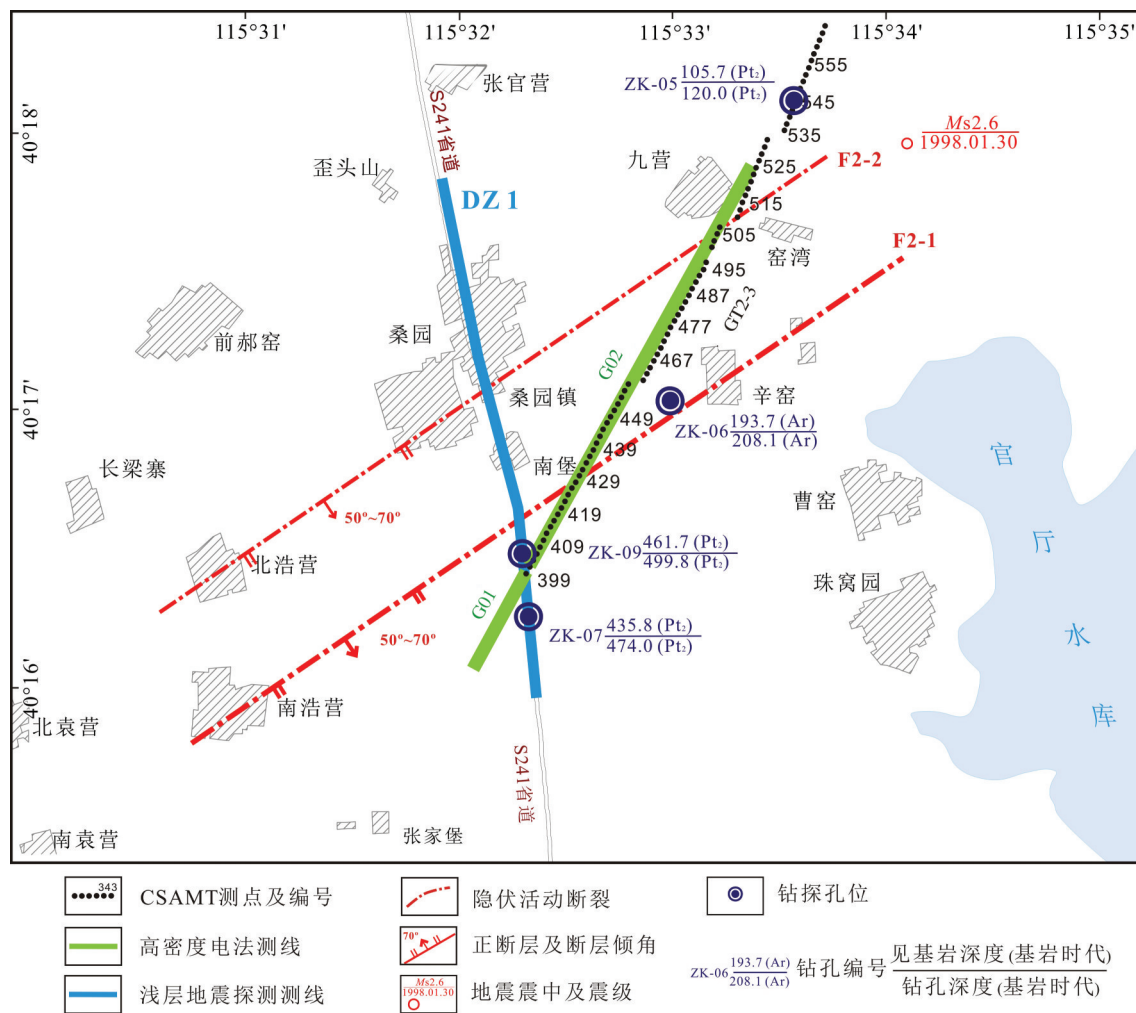


图2 延矾盆地北缘活动断裂隐伏段综合地球物理探测测线以及钻孔分布图  
Fig.2 Map of active fault, geophysical survey line and borehole distribution in the north boundary fault of Yanqing-Fanshan Basin

滑约束法进行二维反演处理。

## 4 数据处理与解译结果

### 4.1 CSAMT 数据处理与资料解译

考虑地下介质在水平和垂直方向上分段连续的变化,CSAMT 数据处理采用二维反演方法,能够反映地质结构的横向和纵向的变化情况(雷达等, 2004; 雷晓东等, 2014),图3为GT2-3测线二维反演电阻率等值线断面,纵向上,浅部电阻率值相对较低,推断浅部为新生界松散堆积物的反映。横向上,反演电阻率等值线形态较好,整体变化比较均匀。

GT2-3测线的418号点附近以南电阻率较低、等值线稀疏,以北电阻率高、等值线密集,二者之间存在反演电阻率等值线密集带,反演电阻率值出现

陡降,出现明显的电阻率分界线,为明显断层特征(图3),为延矾盆地北缘活动断裂次级断层(F2-1)显示。断层北侧、下盘地表至170~210 m深度,整体电阻率较低,浅部不均匀的高、低阻小型异常圈闭推断为第四系含水层分布不均所致,结合地层物性,低阻区域为晚新生界马兰组( $Q_{p3m}$ )、赤城组( $Q_{p2c}$ )、泥河湾组( $Q_{p1n}$ )以及石匣组( $N_{s5}$ );断层下盘170~210 m深度以下,电阻率高、等值线密集,结合地质物性,高阻区域可能为新太古代桑干群( $Ar_{3s}$ )深变质岩(图3b)。断层南侧、上盘地表至500 m深度,反演电阻率较低、等值线稀疏,浅部不均匀的高、低阻小型异常圈闭推断为第四系含水层分布不均所致,结合地层物性,低阻区域为晚新生界马兰组( $Q_{p3m}$ )、赤城组( $Q_{p2c}$ )、泥河湾组( $Q_{p1n}$ )

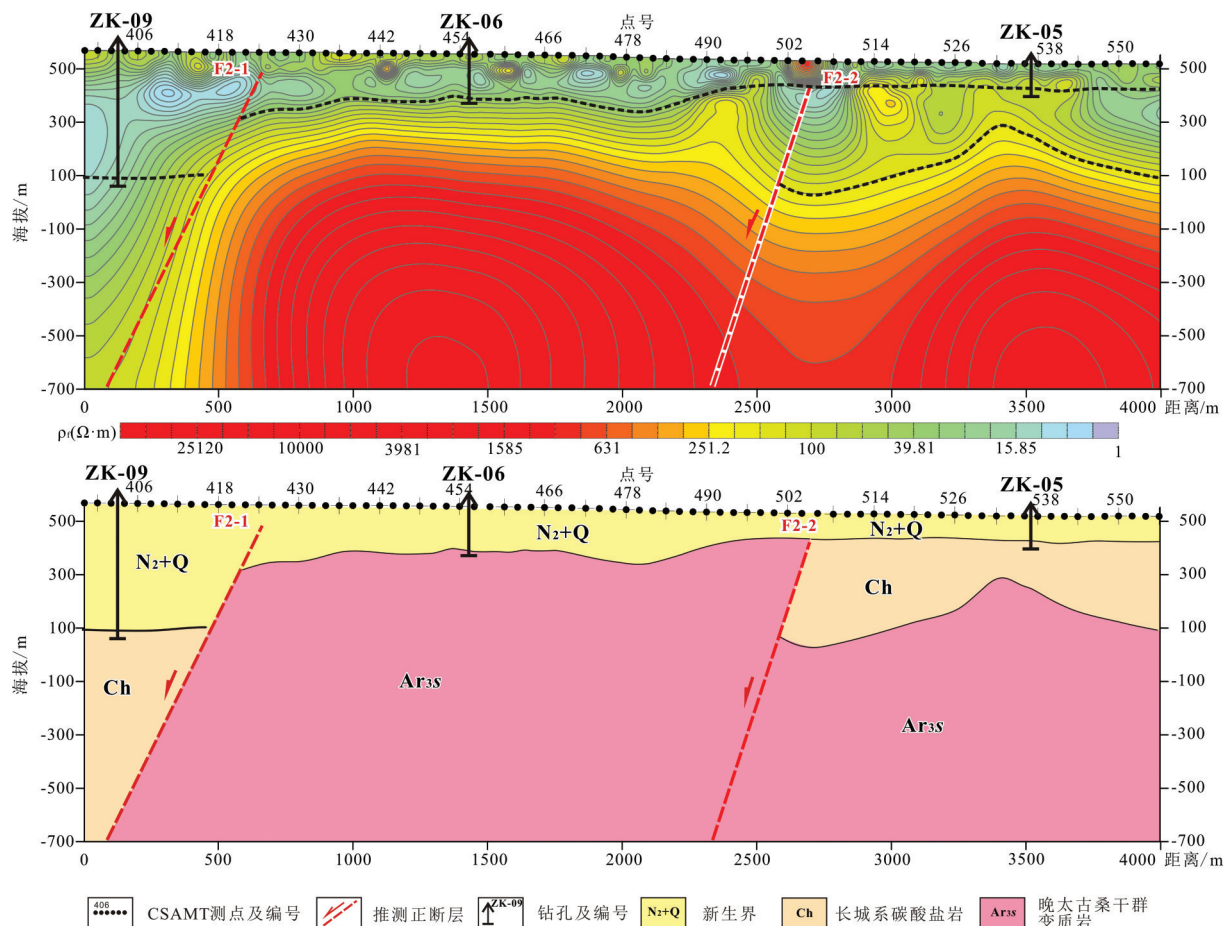


图3 GT2-3测线CSAMT反演电阻率等值线图

Fig.3 Contour map showing CSAMT inversion resistivity along the survey line GT2-3

以及石匣组( $N_{2s}$ );断层上盘约500 m深度以下,电阻率较高、等值线较密集,结合地质物性,较高阻区域可能为中元古长城系碳酸盐岩(图3),次级断层F2-1上下盘的基岩顶界面错距为290~330 m。

GT2-3测线的488号点附近出现反演电阻率等值线密集带,电阻率值出现陡降,形成明显的高阻到低阻变化带,同样为明显的断层特征(图3),为延矾盆地北缘活动断裂次级断层(F2-2)。断层以北、下盘地表至100 m深度,整体电阻率较低,浅部不均匀的高、低阻小型异常圈闭推断为第四系含水层分布不均所致,结合地质物性,低阻区域为晚新生界马兰组( $Q_{p3m}$ )、赤城组( $Q_{p2c}$ )、泥河湾组( $Q_{p1n}$ )以及石匣组( $N_{2s}$ );断层下盘100 m深度至350~580 m深度内,电阻率较高,但是相对于断层上盘(F2-1断层下盘)新太古代桑干群( $Ar_{3s}$ )深变质岩反映的高电阻率,其电阻率特征要低,结合地质物性,该较高

阻区域为中元古长城系碳酸盐岩(图3);断层下盘350~580 m深度以下,电阻率较高、等值线较密集,结合地质物性,高阻区域可能为新太古代桑干群( $Ar_{3s}$ )深变质岩(图3),次级断层F2-2上下盘基岩顶界面错距为70~110 m。

#### 4.2 浅层地震数据处理与资料解译

浅层地震DZ1测线位于桑园镇,测线由南向北布设,和推测断裂基本垂直(图2)。根据时间剖面特征显示,在该剖面600 ms以上可识别出多套反射波组,其中,T1和T2反射层波组特征明显、信噪比较高、连续性较好、中-强振幅反射(图4)。T1反射层位于浅层一组中一强振幅、反射特征明显、连续性较好的反射波组,反射层下部地层反射强度较强,连续性较差。T2反射层位是一组强振幅、反射特征明显、连续性好的一套反射波组,反射层应属于基岩顶界面反射,容易追踪。

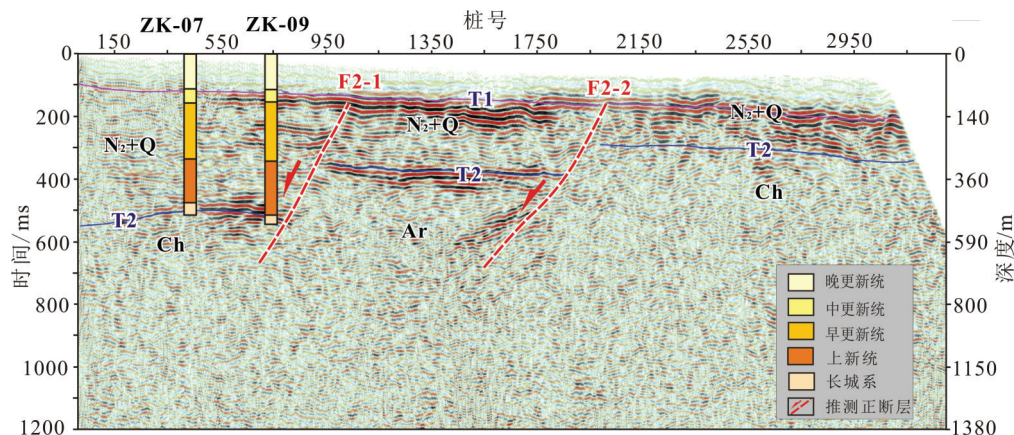


图4 DZ1测线浅层地震勘探剖面

Fig.4 The section of seismic reflections along the survey line DZ1

剖面显示T2反射层以上各反射层呈水平形态展布,起伏相对不大;T2反射层在测线南部基岩顶界面位置,有一定起伏,局部错动明显;T1反射层呈水平形态展布,起伏小,相对错动不明显(图4)。

判断断层存在的主要依据是反射波同相轴或波组发生错断,另一个主要依据是反射波强相位发生转换和上下波组的相互依赖关系,在地震剖面上,反射波同相轴数目的明显增减或消失、反射波同相轴形态和特征发生突变、反射零乱或出现空白异常带等,也是判断断层存在的重要依据。

地震剖面特征显示,在桩号800~1000段同相轴在T2反射层处扭曲并错断,解释为F2-1断点,该断层南倾,倾角上陡下缓,倾角为50~70°,基岩顶界面断距290~355 m,上断点延伸至第四系,埋深约116 m;在桩号1900~2000段T2同相轴均发生扭曲错断,为F2-2断层,倾向向南,倾角上陡下缓,基岩顶界面断距约120 m,上断点延伸至第四系,埋深约140 m。

#### 4.3 高密度电阻率法数据处理与资料解释

从G01测线反演电阻率等值线图像分析,电阻率大致均匀分布,物性层位清晰,有一定规律性(图4)。纵向上电阻值变化范围较大,推测浅层10~20 m内的低电阻层(电阻率小于100  $\Omega \cdot m$ )为表层土壤含水层;表层含水层下为砾石层(电阻率在1000~300  $\Omega \cdot m$ ),其厚度约为100 m。电阻率在横向上表现为:在100 m深度界面,21号点地下电阻率相对较低,一般小于100  $\Omega \cdot m$ ,而在51号点地下电阻率相对较高,一般大于200  $\Omega \cdot m$ ,推测由于砾石层厚度变化导致,测线东北侧埋深较大(图5)。

G02测线反演电阻率等值线图像分析,电阻率分布较均匀,有一定规律,物性层位较清晰,阻值变化较小,能够反映浅层含水层分布及砾石层发育情况。纵向上,G02测线西部电阻率由浅至深表现为低-高-低的特征,浅部低阻反映了表层地下水分布,推测为富水的晚更新统马兰组( $Qp_3m$ )细砂、含砾砂层;中部相对高阻层为砾石层的反映,推测为晚更新统马兰组( $Qp_3m$ )砾石层;深部低阻层(<60  $\Omega \cdot m$ )可能为富水的细砂、粉砂层,推测为中更新统赤城组( $Qp_2c$ )。横向上,由小号点到大号点,高阻层厚度逐渐减小且阻值也随之降低,推测可能是由砾石层岩性组合特征及厚度的变化引起,砾石层在130~134号点处尖灭。在134号点附近,出现低阻异常带,与两侧电阻率值有明显差异且自底部联通至埋深10 m位置,推断该处可能为活动断裂显示,其位置与CSAMT与浅层地震成果推断的延矾盆地北缘活动断裂的F2-1次级断层位置相一致。电性的分布特征反映出F2-1断层为上盘下降的张性正断层,电性结构间的倾向角基本约为60°,上盘黏土层出现和断裂活动相关的同沉积现象(图5)。

G02测线中东部反演电阻率由浅至深表现为较低-低的特征,浅部较低阻反映了富水的细砂、砂砾石层,推测为晚更新统马兰组( $Qp_3m$ );深部的低阻则反映了富水的细砂、粉砂层,推测为和中更新统赤城组( $Qp_2c$ )。

G02测线东部在314号点附近,出现一狭小的低阻异常带,与两侧反演电阻率值有明显差异且自底部联通至埋深30 m位置,其位置与CSAMT成果推断的

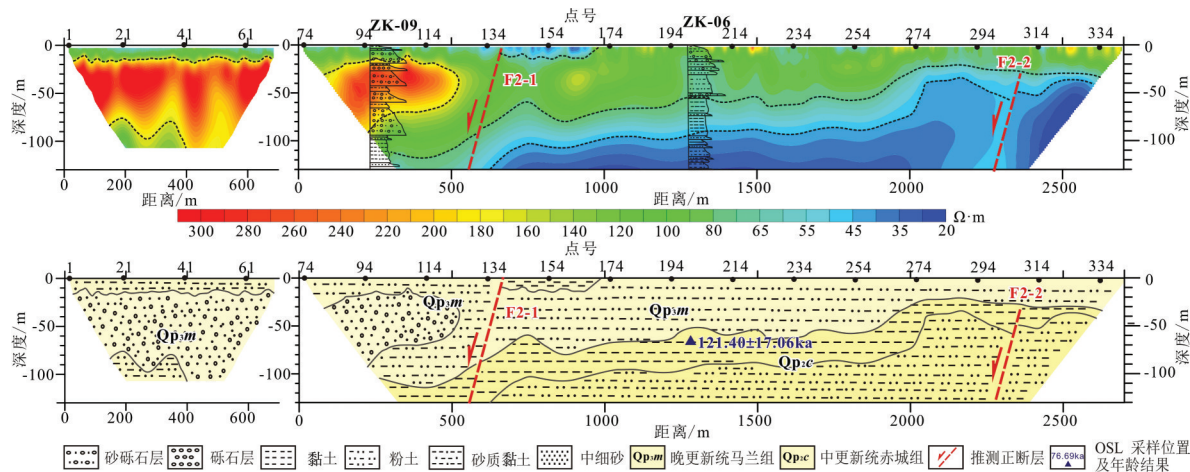


图5 G01和G02测线高密度电阻率法勘探剖面  
Fig.5 High density electrical sounding survey section along the survey line G01 and G02

延矾盆地北缘断裂F2-2次级断层位置相近。电性的分布特征反映出F2-2断层为上盘下降的张性正断层,电性结构间的倾向角约为60°,浅部较低阻反映的马兰组细砂、粉砂层错动不明显(图5)。

5 钻孔地层剖面记录

基于野外调查、综合地球物理探测的结果,在关键构造部位(推测断层以及断层上下盘)进行工程地质钻探,揭示断层两侧地层结构、断层产状、断层活动方式、活动速率、断裂带结构等,并对地球物理探测结果加以验证。

ZK-05 钻孔位于河北省怀来县土木镇窑湾村北(115°33'40"E; 40°18'9"N),孔口海拔473 m,孔深120 m; ZK-06 钻孔位于河北省怀来县土木镇辛窑村西(115°33'6"E; 40°17'N),孔口海拔507 m,孔深208.06 m; ZK-07 钻孔位于河北省怀来县土木镇桑园镇南堡村南(115°32'27"E; 40°16'17"N),孔口海拔529 m,孔深474.02 m; ZK-09 钻孔位于河北省怀来县桑园镇南堡村南(115°32'24"E,40°16'31"N),孔口海拔535 m,孔深381.30 m。延矾盆地从盆地中心

向边缘地貌类型依次有河流阶地、洪积扇或洪积台地、坡积裙等,分带性明显,本次工程地质钻探孔位均分布于三级台地上,是盆地内发育最为普遍的地貌类型。三级台地的沉积物复杂,主要有上新统棕红色泥岩、砾岩,下更新统湖相沉积,中更新统湖相沉积,以及上更新统黄土。

钻孔岩心揭露岩性特征,并结合光释光(OSL)测年结果(表1,图6)以及与区域地层(王继兴等,1996)对比可知,延矾盆地新生代地层主要有石匣组(N<sub>s</sub>)、泥河湾组(Q<sub>p1n</sub>)、赤城组(Q<sub>p2c</sub>)和马兰组(Q<sub>p3m</sub>)(图6)。石匣组(N<sub>s</sub>)下部为深棕色、褐红色含钙结核黏土岩,底部具不稳定的灰紫色砾岩;上部为浅棕红色砂、砾岩互层夹粉砂质黏土岩,顶部为浅棕黄—浅粉红色砂岩的一套半固结—固结的沉积岩层组成。泥河湾组(Q<sub>p1n</sub>)为一套淡水河湖相地层,以灰黑—灰白色及少量淡黄褐色的粉砂、粉砂质黏土为主,少量的粗砂、砂砾石(岩)夹泥灰岩等,普遍含钙质结核,富含介壳类化石、植物孢粉、介形虫等。赤城组(Q<sub>p2c</sub>)由冲洪积的浅红、红黄色含钙质结核的粉砂质黏土及粉砂质黏土、砾石层组成,

表1 OSL 年龄测试结果  
Table 1 OSL dating parameters and test results of samples

| 野外编号        | U/(μg/g) | Th/(μg/g) | K/%  | 实测含水量/% | 环境剂量率/(Gy/ka) | 测试粒径/μm | 等效剂量/Gy      | 年龄/ka        |
|-------------|----------|-----------|------|---------|---------------|---------|--------------|--------------|
| 29.0m-zk-05 | 0.88     | 5.56      | 2.50 | 16.81   | 3.12          | 4~11    | 345.64±33.22 | 110.90±15.38 |
| 73.3m-zk-06 | 1.91     | 9.62      | 1.99 | 15.63   | 3.46          | 4~11    | 420.60±41.53 | 121.40±17.06 |
| 50.8m-zk-07 | 1.83     | 11.70     | 2.37 | 16.38   | 4.00          | 4~11    | 315.38±25.56 | 78.94±10.16  |

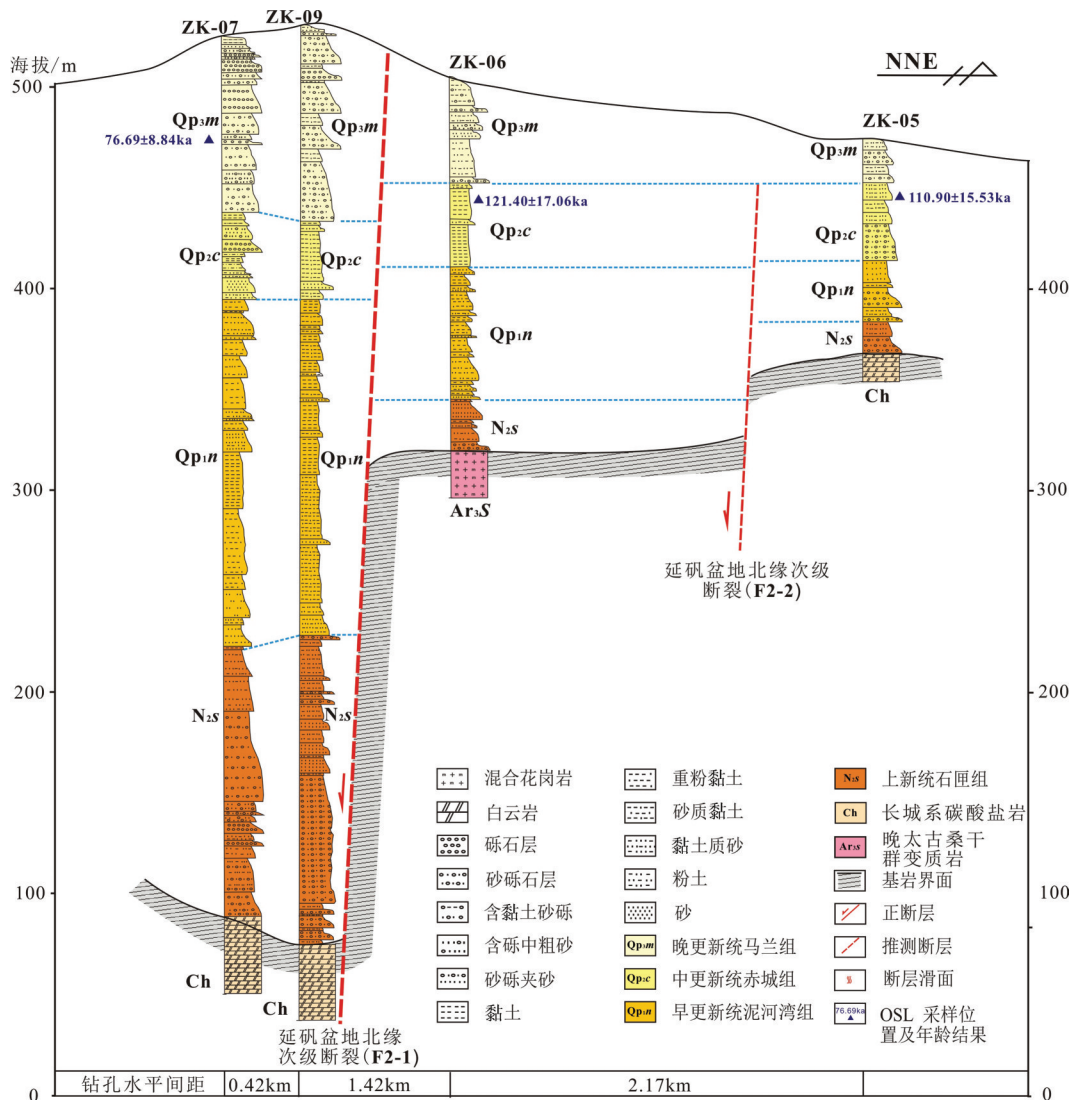


图6 延矾盆地北缘断裂钻孔联合剖面图

Fig.6 Composite drilling geological section across the north boundary fault of Yanqing-Fanshan Basin

岩石较坚硬致密,具大孔隙,质均匀,无层理,夹含砾粗砂透镜体,底部常有砾石层。马兰组(Q<sub>pm</sub>)不整合于赤城组红黏土之上,全新世堆积之下,由砾石层、黄土和次生黄土夹砂砾层三部分岩石组成(图6)。

钻孔揭露延矾盆地北缘断裂F2-1次级断层基岩顶界面错距约248.58 m(图6),与CSAMT与浅层地震探测结果显示基岩顶界面断距290~355 m基本一致;F2-2次级断层基岩顶界面错距约为43.40 m(图6),与CSAMT与浅层地震探测结果显示基岩顶界面断距70~120 m基本一致。考虑到钻孔之间水平距离较大因素,断层两侧沉积局部相变可能性大,因此时代越老的估算的断层垂直位移量越不可

靠,因此,本文主要关注晚更新世以来断层活动速率。钻孔岩心揭露延矾盆地北缘断裂次级断裂F2-1上盘ZK-09孔晚更新统底界埋深95.50 m,孔口海拔535 m,断裂下盘ZK-06孔晚更新统底界埋深52.20 m,孔口海拔507 m,反映次级断裂F2-1晚更新世以来活动断层累积垂直位移15.30 m,垂直滑动速率大约0.12 mm/a。次级断裂F2-2上盘ZK-06孔晚更新统底界埋深52.20 m,断裂下盘ZK-05孔晚更新统底界埋深17.70 m,孔口海拔473 m,反映次级断裂F2-2晚更新世以来断层累积垂直位移约为0.50 m,活动性弱,这主要受延矾盆地北缘断裂“铲式”断层组合特征控制。

## 6 讨 论

CSAMT法GT2-3测线二维反演电阻率等值线断面(图3)显示其基岩顶界面错动明显,根据反演电阻率的变化,并结合地质物性特征,推测F2-1次级断层上盘基岩顶界面埋深约500 m(图3),和后期钻孔ZK-09岩心揭示的基岩顶板487 m深度(图6)比较吻合,F2-1次级断层上盘基岩为中元古长城系(Ch)白云岩;F2-1次级断层上盘(即F2-2次级断层下盘)基岩埋深170~210 m(图3),与ZK-06孔揭示的基岩顶板195 m深度(图6)比较一致,下盘基岩为新太古代桑干群(Ar<sub>3s</sub>)深变质岩;F2-2次级断层下盘推测基岩顶界面埋深约100 m,和后期钻孔ZK-05岩心揭示的基岩顶板105 m深度(图6)比较吻合,下盘基岩上部为中元古长城系(Ch)白云岩,下部为新太古代桑干群(Ar<sub>3s</sub>)深变质岩(图3)。总的来说,CSAMT法在隐伏活动断裂探测中的应用是有效的,特别是在前人工作基础比较薄弱地区,对隐伏活动断裂初期调查有重要意义,特别是对基岩顶界面错距明显断裂勘探方面优势明显。值得注意的是,在城市及周边地区施工,受电磁干扰较大,特别是高压电线、通讯电缆等干扰源要极力避让,以保证采集数据的质量。另外,CSAMT法对于第四系松散堆积物地层的探测结果显示整体电阻率较低,不均匀的高、低阻小型异常圈闭,这主要是受第四系含水层分布不均所致,浅层的探测效果不佳,还需要结合其他地球物理手段综合进行探测和解译。

浅层地震勘探时间剖面特征显示,在该剖面600 ms以上可识别出两套明显反射波组(T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>)(图4),T<sub>2</sub>反射层位是一组强振幅、反射特征明显、连续性好的一套反射波组,反射层应属于基岩顶界面反射,根据T<sub>2</sub>反射层位错动特征反映该断层南倾,倾角上陡下缓,倾角为50~70°,基岩顶界面断距为290~350 m,上断点延伸至第四系,埋深约116 m。同时,基本确定F2-2次级断层基岩面断距约120 m,上断点延伸至第四系,埋深约140 m。T<sub>1</sub>反射层位于浅层一组中一强振幅、反射特征明显、连续性较好的反射波组,反射层下部地层反射强度较强,连续性较差,错动不明显。在软土地层内,由于断层的错断,不会形成破碎带,这就使得在软土内根据地震剖面确定断层比在胶结成岩的地层内确

定断层更困难,在软土内断层的特征不如在硬岩石地层内断层的特征明显。根据地震时间剖面解释落差最小的断层取决于地震记录的分辨率,而地震记录的分辨率与地震波的波长有关(地震波的波长正比于地震波的速度,反比于地震波的频率),因此对于一些断距较小的断层或者规模较小的地质体在地震资料有限的分辨率内难以发现。此外,人工地震剖面显示F2-1与F2-2之间的基岩具有反射层特征(图4),不是CSAMT剖面(图3)与钻孔ZK-06岩心揭露的新太古代桑干群深变质岩(图6)所具有的特征,从邻近区域基岩出露显示的地层发育状况看,推测为长城系碳酸盐岩(图4),这可能是受中生代燕山运动的强烈挤压作用,逆冲断裂活动导致的地质体叠置现象,具体情况还需更多资料进行验证。

高密度电阻率法剖面可以看出F2-1次级断层处出现低阻异常带,与两侧反演电阻率值有明显差异且自底部联通至埋深10 m位置,F2-2次级断层同样出现一狭小的低阻异常带,与两侧电阻率值有明显差异且自底部联通至埋深40 m位置,二者的推测断层位置与CSAMT和浅层地震成果推断的延矾盆地北缘活动断裂的次级断层位置相一致。电性的分布特征反映出F2-1次级断层、F2-2次级断层为上盘下降的张性正断层,电性结构间的倾向角约为60°,并在F2-1次级断层上盘的黏土层出现和断层活动相关的同沉积现象(图5)。高密度电阻率法探测结果和CSAMT与浅层地震解译结果相对比,可以看出其对延矾盆地北缘活动断裂隐伏段探测可靠有效,对于浅部第四系松散堆积物地层探测效果显著,能比较直观地反映出电性异常体的形态和规模,结合其他方法手段可以较准确地推断断层上断点发育情况。钻孔岩心揭露延矾盆地北缘断裂为活动断裂,F2-1次级断层晚更新世以来垂直滑动速率约为0.12 mm/a,次级断裂F2-2晚更新世以来活动弱,这主要受延矾盆地北缘断裂“铲式”断层组合特征控制。虽然受钻孔之间水平距离较大、沉积局部相变等因素影响,可能导致推测数据存在误差,但是与前人通过盆地边缘断裂出露段古地震探槽揭露的垂直滑动速率0.10~0.58 mm/a(方仲景等,1993;程绍平等,1994,1995;冉勇康等,1998;徐锡伟等,2015)相比较,具有一定的一致性。

## 7 结 论

通过对延矾盆地北缘活动断裂带桑园镇隐伏段进行CSAMT法、高密度电阻率法、浅层地震法综合地球物理勘探,以及钻孔联合剖面研究,初步得到以下结论:

(1)延矾盆地北缘活动断裂带桑园镇隐伏段走向N56°E,倾角为50~70°,由两条次级断层(F2-1、F2-2)组成。活动性质为正断层,和地表出露段相比较,平面上呈右阶雁列分布,盆地内沉积物厚度表现为北西深、南东浅的不对称特征,呈“铲式”断陷。

(2)延矾盆地北缘断裂为活动断裂,受延矾盆地北缘断裂“铲式”断层组合特征控制,F2-1次级断层晚更新世以来活动垂直滑动速率约为0.12 mm/a,次级断裂F2-2晚更新世以来活动性弱。

(3)钻孔岩心揭示综合地球物理探测结果和实际地质情况较吻合,CSAMT法与浅层地震勘探对基岩顶界面探测可靠有效,高密度电阻率法对于浅部第四系松散堆积物探测效果显著,比较直观地反映出电性异常体的形态和规模。尽管各个地球物理探测方法存在各自的局限性,但是通过综合各个方法手段的勘探结果,能够做到优势互补,减少隐伏活动断层解译的不确定性。

**致谢:**中国地质科学院地质力学研究所王苗苗博士、牛琳琳博士,中国地质大学(北京)任思起硕士、范玉璐硕士等参与野外调查、选线工作;地球物理探测与解译由北京市地质勘察技术院李晨高级工程师、关伟高级工程师等协助完成;钻孔岩心编录由江苏省地质调查研究院宗开红教授指导完成;光释光年龄测试由中国地震局地壳应力研究所(地壳动力学重点实验室)赵俊香高工协助完成,谨表感谢。

## References

Cao Xianzhi, Li Sanzhong, Liu Xin, Suo Yanhui, Zhao Shujuan, Xu Liqing, Dai Liming, Wang Pengcheng, Yu Shan. 2013. The intraplate morphotectonic inversion along the Eastern Taihang Mountain Fault Zone, North China and its mechanism[J]. Earth Science Frontiers, 20(4): 88–103(in Chinese with English abstract).  
Chen Jiansheng, Zhang Faming, Yang Liang, Zhao weibing. 1999. Research on the comprehensive tracer method for surveying seepage of dam embankment by pass in rock stratum of reservoir[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1: 34–38

(in Chinese with English abstract).  
Cheng Shaoping, Fang Zhongjing. 1995. On segmentation of the fault zone along the northern margin of yanqing basin and earthquake prediction[J]. Seismology and Geology, 17(3): 231–240(in Chinese with English abstract).  
Cheng Shaoping, Yang Guizhi, Yang Zhe. 1994. The latest Pleistocene faulting along the canfangying segment of the fault zone along the northern margin of Yanqing Basin[J]. Seismology and Geology, 16(4): 346–354(in Chinese with English abstract).  
Deng Qidong, Xu Xiwei, Zhang Xiankang, Wang Guangcai. 2003. Methods and techniques for surveying and prospecting active faults in urban areas[J]. Earth Science Frontiers, 10(1): 93–104(in Chinese with English abstract).  
Dong Jie, Guo Youli, Lü Shengyuan, Mei Xinzong. 2001. Characteristics of regional stratigraphic petrophysical column of Hebei province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, (5): 344–349(in Chinese with English abstract).  
Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Chen Xuanhua, Long Changxing, Wang Tao, Yang Zhenyu, Hu Jianmin. 2008. the formation and deformational characteristics of east Asia multi-direction convergent tectonic system in late Jurassic[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(3): 306–317(in Chinese with English abstract).  
Dong Yanpeng, Xu Shangjie. 2012. Detect hidden defects of dam seepage by comprehensive geophysical exploration technique[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 40(1): 91–94.  
Dong Zeyi, Tang Ji, Zhou Zhiming. 2010. Application of CSAMT to buried active faults investigation[J]. Seismology and Geology, 32(3): 442–452(in Chinese with English abstract).  
Du Liang, Ge Bao, Zhu Lili, Tan Zhaoyi. 2012. The research and application of comprehensive geophysical exploration technique to buried fault detection[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 40(1): 81–85(in Chinese with English abstract).  
Fang Shengming, Zhang Xiankang, Xu Xiwei, Bai Denghai, Ji Jifa. 2002. Geophysical methods for the exploration of urban active faults[J]. Seismology and Geology, 24(4): 606–608(in Chinese with English abstract).  
Fang Zhongjing, Cheng Shaoping, Ran Yongkang. 1993. Yanhuai basin-ridge structure and some features of late Quaternary fracture movement[J]. Progress in Geophysics, 4: 274–275(in Chinese with English abstract).  
Guan Yixiao, Lu Jintian, He Taijian, Mei Rong, Liu Xiaoyu, Zong Kaihong. 2016. The application of CSAMT exploration to detecting buried faults in city[J]. Shanghai Land and Resources, 37(1): 90–93(in Chinese with English abstract).  
He Jishan. 1990. Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric[M]. Changsha: Central South University of Technology Press (in Chinese).  
Lan Xing, Zhang Wei, Wang Kunpeng, Zhou Wu, Li Yangsen. 2012. The application of shallow seismic reflection and high density

- resistivity method to the exploration in Hanwang Area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 9(6): 654–658(in Chinese with English abstract).
- Lei Da, Meng Xiaohong, Wang Shumin. 2004. The two– dimension inversion technique for controllable source audio frequency magnetotelluric sounding (CSAMT) data under complex topography and effectiveness[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 28(4): 323–325(in Chinese with English abstract).
- Lei Xiaodong, Guan Wei, Guo Gaoxuan, Zhu Liqiong. 2014. Application of CSAMT in the survey of karst water in the eastern Yanqing basin of Beijing[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 42(5): 89–92(in Chinese with English abstract).
- Li Diqian, Di Qingyun, Wang Guangjie, Li Yingxian, Shi Kunfa, Yue Anping, Bai Dawei. 2008. Fault detection by CSAMT and its application to new district planning in Beijing[J]. Progress in Geophysics, 23(6): 1963–1969.
- Li Sanzhong, Suo Yanhui, Dai Liming, Liu Liping, Jin Chong, Liu Xin, Hao Tianzhao, Zhou Lihong, Liu Baohua, Zhou Juntao, Jiao Qian. 2010. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 17(4): 64–89(in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Zhang Guowei, Zhou Lihong, Zhao Guochun, Liu Xin, Suo Yanhui, Liu Bo, Jin Chong, Dai Liming. 2011. The opposite Meso– Cenozoic intracontinental deformations under the super– convergence: Rifting and extension in the North China Craton and shortening and thrusting in the South China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 18(3): 79–107(in Chinese with English abstract).
- Li Y L, Yang J C, Xia Z K, Mo D W. 1998. Tectonic geomorphology in the Shanxi Graben System, northern China[J]. Geomorphology, 23: 77–89.
- Li Zhengxi, Zeng Zhaoafa, Li Enze, Yi Bing, Wang Zhejiang, Xue Jian. 2005. The function of geophysical method in active fault detection and discuss of combining methods[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 35(S1): 109–114(in Chinese with English abstract).
- Li Zhixiang, Mao Xianjin, Han Ming, Lü Ming, Long Delong. 2003. An application of high– density resistivity method to surveying blind fault[J]. Journal of Seismological Research, 26(3): 275–278.
- Liu Wanen. 2007. The Application of exploring bedrock relief and embedded fracture via High– density Resistivity method[J]. Shanghai Geology, 28(3): 51–53(in Chinese with English abstract).
- Liu Wenyu, Li Tonglin, Han Jiangtao, Liu Guoxing, Chen Yan, Han Fengqing, Han Song. 2017. The deep seismogenic environment beneath the Huailai—Zhuolu area and the mechanism of the Zhuolu M4.3 earthquake on 6 September 2014[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(7): 2693–2706(in Chinese with English abstract).
- Pavlidis S B, Zouros N C, Fang Z, Cheng S, Tranos M D, Chatzipetros A A. 1999. Geometry, kinematics and morphotectonics of the Yanqing—Huailai active faults (northern China) [J]. Tectonophysics, 308: 99–118.
- Piao Huarong. 1990. Principle of Electromagnetic Sounding[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Ran Yongkang, Fang Zhongjing, Duan Ruitao, Li Zhiyi, Wang Jingbo, Yang Zhe, Ji Fengju, Li Jianping. 1998. Model for paleoearthquake recurrence along baying segment of the north margin fault of Fanshan Basin in Hebei Province[J]. Earthquake Research in China, 14(1): 47–58(in Chinese with English abstract).
- Ran Yongkang, Fang Zhongjing, Li Zhiyi, Wang Jingbo, Li Rucheng. 1992. Paleoseismicity and segmentation along the active fault at the north boundary of Huailai—Zhuolu Basin, Hebei Province[J]. Earthquake Research in China, 8(3): 74–85(in Chinese with English abstract).
- Shi Kunfa. 1999. Theory and Application of CSAMT Method[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Shi W, Cen M, Chen L, Wang Y, Chen X, Li J, Chen P. 2015. Evolution of the late Cenozoic tectonic stress regime in the Shanxi Rift, central North China Plate inferred from new fault kinematic analysis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 114: 54–72.
- Wang Jixing, Wang Xifeng, Deng Shaoying, Lu Xueliang, Tian Yanping, Xu Hongcai, Li Xiang, Li Shengzhi, Chen Yinggong, Zhang Chongshan, Xu Guilin. 1996. Lithostratigraphy in Hebei Province[M]. Beijing: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- Wang Xinjian, Chen Jiansheng, Chen Liang. 2005. Application of natural tracer method to leakage detection for ash field earth dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 25(6): 67–71(in Chinese with English abstract).
- Wen Chao, Hao Haiqiang, Wang Shenwen, Liu Guohui. 2015. Application of a comprehensive method for geophysical prospecting to seismic safety evaluation on an engineering site in Zhangjiakou city, China[J]. Chinese Earthquake Engineering Journal, 37(1): 271–275(in Chinese with English abstract).
- Wu Ziquan, Liu Yuansheng, Liu Baojin, Wang Chenghu. 2005. Application of geophysical method to the precise positioning of urban seismic mobile moving fault[J]. Progress in Geophysics, 20(2): 528–533(in Chinese with English abstract).
- Xia Xunying, Wang Shenlong, Fei Haiyan, Wang Hongsheng, Li Fuqing, Li Baokai. 2013. The application of CSAMT exploration to detecting urban concealed faults[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 37(4): 667–669(in Chinese with English abstract).
- Xie Furen, Zhang Hongyan, Cui Xiaofeng, Jing Zhenjie, Li Ruisha. 2007. Active fault movement and recent tectonic stress field in Yanhuai Basin[J]. Seismology and Geology, 29(4): 693–705(in Chinese with English abstract).
- Xu Jie, Gao Zhanwu, Song Changqing, Sun Jianbao. 2000. The structural characters of the piedmont fault Zone of Taihang

- Mountain[J]. *Seismology and Geology*, 22(2): 111–122.
- Xu Mingcai, Gao Jinghua, Liu Jianxun, Rong Lixin. 2005. Application of the seismic method to detecting active faults[J]. *Earthquake Research in China*, 21(1): 17–23(in Chinese with English abstract).
- Xu X, Ma X, Deng Q. 1993. Neotectonic activity along the Shanxi rift system, China[J]. *Tectonophysics*, 219: 305–325.
- Xu X, Ma X. 1992. Geodynamics of the Shanxi Rift system, China[J]. *Tectonophysics*, 208(1/3): 325–340.
- Xu Xiwei, Deng Qidong. 1988. The basin–range structure in the tensile area at the northern part of Shanxi Province and its mechanism of formation[J]. *Earthquake Research in China*, 4(2): 21–29(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, Yang Xiaoping, Yang Zhongdong. 1996. The initial theory of urban earthquake geological disaster and its prediction[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (3): 32–35(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, Yu Guihua, Ma Wentao, Ran Yongkang, Chen Guihua, Han Zhujun, Zhang Lanfeng, You Huichuan. 2002. Evidence and methods for determining the safety distance from the potential earthquake surface rupture on active fault[J]. *Seismology and Geology*, 24(4): 470–83(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, Yu Guihua, Ran Yongkang, Yang Xiaoping, Zhang Liming, Sun Fuliang, Du Wei, Liu Baoquan. 2015. An Introduction to Urban Active Faults in China[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- Yang Qian, Peng Yuanqian, Zhou Yueling, Sheng Yanrui, Li Dahu. 2016. Application of comprehensive geological–geophysical exploration to the detect the fault in the intermountain basin—taking Zhangjiakou fault as example[J]. *Progress in Geophysics*, 31(6): 2451–2457(in Chinese with English abstract).
- Yin A. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis[J]. *Tectonophysics*, 488: 293–325.
- Yin Gongming, Lu Yanchou. 1996. The Quaternary tectonic events in the Yanqing faulting–down basin, Beijing[J]. *North China Earthquake Sciences*, 14(4): 19–30(in Chinese with English abstract).
- Zhang Peizhen, Zhang Huiping, Zheng Wenjun, Zheng Dewen, Wang Weitao, Zhang Zhuqi. 2014. Cenozoic tectonic evolution of continental eastern Asia[J]. *Seismology and Geology*, 36(3): 574–585(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Q, Ma Y S, Yang N, Shi W, Dong S W. 2003. Cenozoic extensional stress evolution in North China[J]. *Journal of Geodynamics*, 36: 591–613.
- Zhang Y Q, Mercier J L, Vergdly P. 1998. Extension in the graben systems around the Ordos (China), and its contribution to the extrusion tectonics of south China with respect to Gobi–Mongolia[J]. *Tectonophysics*, 285: 41–75.
- Zhang Y Q, Vergely P, Mercier J L. 1995. Active faulting in and along the Qinling Range (China) inferred from SPOT image and extrusion tectonics of south China[J]. *Tectonophysics*, 243: 69–95.
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Zhao Yue, Zhang Tian. 2007. Jurassic tectonics of North China: A synthetic view[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1462–1480(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen, Shi Wei, Hu Bo. 2006. Neotectonic evolution of the peripheral zones of the Ordos Basin and geodynamic setting[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(3): 285–297(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Zhao Yue, Dong shuwen, Yang Nong. 2004. Tectonic evolution stages of the Early Cretaceous rift basins in Eastern China and adjacent areas and their geodynamic background[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 123–133(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Zhai Mingguo, Chen Hong, Zhang Shuanhong. 2017. Paleozoic–early Jurassic tectonic evolution of North China Craton and its adjacent orogenic belts[J]. *Geology in China*, 44(1): 44–60(in Chinese with English abstract).
- Zhu Tao, He Zhengqin, Feng Rui, Hao Jinqi, Zhou Jianguo, Wang Hualin, Wang Shuoqing. 2007. Experiment on joint detection by seismic reflection and electrical imaging: With an example of exploration of active fault in Zibo city[J]. *Seismology and Geology*, 29(2): 373–380(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 曹现志, 李三忠, 刘鑫, 索艳慧, 赵淑娟, 许立青, 戴黎明, 王鹏程, 余珊. 2013. 太行山东麓断裂带内构造地貌反转与机制[J]. *地学前缘*, 20(4): 88–103.
- 陈建生, 张发明, 杨立昂, 赵维炳. 1999. 探测库水绕坝基岩体渗漏的综合示踪方法研究[J]. *工程勘察*, 1: 34–38.
- 程绍平, 方仲景, 杨桂枝, 杨喆. 1995. 论延庆盆地北缘断裂带的分段与地震预测[J]. *地震地质*, 17(3): 231–240.
- 程绍平, 杨桂枝, 杨喆. 1994. 延庆盆地北缘断裂带蚕房营段晚更新世晚期断层作用[J]. *地震地质*, 16(4): 346–354.
- 邓起东, 徐锡伟, 张先康, 王广才. 2003. 城市活动断裂探测的方法和技术[J]. *地学前缘*, 10(1): 93–104.
- 董杰, 郭友钊, 吕生元, 梅新忠. 2001. 河北省区域地层物性柱特征[J]. *物探与化探*, (5): 344–349.
- 董树文, 张岳桥, 陈宣华, 龙长兴, 王涛, 杨振宇, 胡健民. 2008. 晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征[J]. *地球学报*, 29(3): 306–317.
- 董延朋, 许尚杰. 2012. 应用综合物探方法探查坝体渗漏隐患[J]. *工程勘察*, 40(1): 91–94.
- 董泽义, 汤吉, 周志明. 2010. 可控源音频大地电磁法在隐伏活动断裂中的应用[J]. *地震地质*, 32(3): 442–452.
- 杜良, 葛宝, 朱丽丽, 谭昭怡. 2012. 综合物探技术在隐伏断层探测中的研究与应用[J]. *工程勘察*, 40(1): 81–85.
- 方盛明, 张先康, 刘保金, 徐锡伟, 白登海, 姬继法. 2002. 探测大城市活断层的地球物理方法[J]. *地震地质*, 24(4): 606–608.
- 方仲景, 程绍平, 冉勇康. 1993. 延怀盆地构造及其晚第四纪断裂运

- 动的某些特征[J]. 地球物理学进展, 4: 274-275.
- 关艺晓, 卢进添, 何泰健, 梅荣, 刘晓瑜, 宗开红. 2016. 可控音频大地电磁测深在城市隐伏断层探测中的应用[J]. 上海国土资源, 37(1): 90-93.
- 何继善. 1990. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙: 中南工业大学出版社.
- 蓝星, 张炜, 王堃鹏, 周武, 李洋森. 2012. 浅层地震和高密度电法在汉旺地区勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 9(6): 654-658.
- 雷达, 孟小红, 王书民. 2004. 复杂地形条件下的可控源音频大地电磁测深数据二维反演技术及应用效果[J]. 物探与化探, 28(4): 323-325.
- 雷晓东, 关伟, 郭高轩, 朱丽琼. 2014. 可控源音频大地电磁测深在北京延庆盆地东部岩溶水勘查中的应用[J]. 工程勘察, 42(5): 89-92.
- 李帝铨, 底青云, 王光杰, 李英贤, 石昆法, 岳安平, 白大为. 2008. CSAMT探测断层在北京新区规划中的应用[J]. 地球物理学进展, 23(6): 1963-1969.
- 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 刘丽萍, 金宠, 刘鑫, 郝天珩, 周立宏, 刘保华, 周均太, 焦倩. 2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. 地质前缘, 17(4): 64-89.
- 李三忠, 张国伟, 周立宏, 赵国春, 刘鑫, 索艳慧, 刘博, 金宠, 戴黎明. 2011. 中、新生代超级汇聚背景下的陆内差异变形: 华北伸展裂解和华南挤压逆冲[J]. 地质前缘, 18(3): 79-107.
- 李征西, 曾昭发, 李恩泽, 易兵, 王者江, 薛建. 2005. 地球物理方法探测活动断层效果和方法最佳组合分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 35(S1): 109-114.
- 李志祥, 毛先进, 韩明, 吕明, 龙德龙. 2003. 高密度电阻率法在隐伏断层探测中的应用[J]. 地震研究, 26(3): 275-278.
- 刘万恩. 2007. 高密度电法探测基岩起伏和隐伏断裂中的应用[J]. 上海地质, 28(3): 51-53.
- 刘文玉, 李桐林, 韩江涛, 刘国兴, 陈闰, 韩凤清, 韩松. 2017. 怀-涿地区深部孕震环境研究与涿鹿地震发震机制的讨论[J]. 地球物理学报, 60(7): 2693-2706.
- 朴化荣. 电磁测深原理[M]. 北京: 地质出版社.
- 冉勇康, 方仲景, 段瑞涛, 李志义, 王景铎, 杨哲, 计凤桔, 李建平. 1998. 河北矾山盆地北缘断层八营段的古地震重复模型[J]. 中国地震, 14(1): 47-58.
- 冉勇康, 方仲景, 李志义, 王景铎, 李如成. 1992. 河北怀来—涿鹿盆地北缘活断层的古地震事件与断层分段[J]. 中国地震, 8(3): 74-85.
- 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- 王继兴, 王喜富, 邓绍颖, 卢学良, 田燕平, 许洪才, 李翔, 李声之, 陈英功, 杨有世, 张崇山, 徐桂林. 1996. 河北省岩石地层[M]. 北京: 中国地质大学出版社.
- 王新建, 陈建生, 陈亮. 2005. 天然示踪法在贮灰场土坝渗漏探测中的应用[J]. 水利水电科技进展, 25(6): 67-71.
- 温超, 郝海强, 汪慎文, 温来福, 刘国辉. 2015. 综合物探方法在张家口某工程场地地震安全性评价中的应用研究[J]. 地震工程学报, 37(1): 271-275.
- 吴子泉, 刘元生, 刘保金, 王成虎. 2005. 地球物理方法在城市地震活动断层精确定位中的应用[J]. 地球物理学进展, 20(2): 528-533.
- 夏训银, 李毅, 王身龙, 费海岩, 王洪生, 李福庆, 李保凯. 2013. CSAMT在城市隐伏断层探测中的应用[J]. 物探与化探, 37(4): 667-669.
- 谢富仁, 张红艳, 崔效锋, 荆振杰, 李瑞莎. 2007. 延怀盆地活动断裂运动与现代构造应力场[J]. 地震地质, 29(4): 693-705.
- 徐杰, 高战武, 宋长青, 孙建宝. 2000. 太行山山前断裂带的构造特征[J]. 地震地质, 22(2): 111-122.
- 徐明才, 高景华, 刘建勋, 荣立新. 2005. 应用于城市活断层调查的地震方法技术[J]. 中国地震, 21(1): 17-23.
- 徐锡伟, 邓起东. 1988. 晋北张性区盆岭构造及其形成的力学机制. 中国地震, 4(2): 21-29.
- 徐锡伟, 杨晓平, 杨忠东. 1996. 城市地震地质灾害及其预测问题初论[J]. 水文地质工程地质, (3): 32-35.
- 徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 冉永康, 陈桂华, 韩竹军, 张兰凤, 尤惠川. 2002. 活断层地震地表破裂“避让带”宽度确定的依据与方法[J]. 地震地质, 24(4): 470-483.
- 徐锡伟, 于贵华, 冉永康, 杨晓平, 张黎明, 孙福梁, 杜玮, 刘保全. 2015. 中国城市活动断层概论[M]. 北京: 地震出版社.
- 杨歧焱, 彭远黔, 周月玲, 盛艳蕊, 李大虎. 2016. 综合地质-地球物理方法在山间盆地断裂探测中的应用——以张家口断裂为例[J]. 地球物理学进展, 31(6): 2451-2457.
- 尹功明, 卢彦涛. 1996. 北京延庆盆地50万年以来的主要构造事件及年代学的初步研究[J]. 华北地震科学, 14(4): 19-30.
- 张培震, 张会平, 郑文俊, 郑德文, 王伟涛, 张竹琪. 2014. 东亚大陆新生代构造演化[J]. 地震地质, 36(3): 574-585.
- 张岳桥, 董树文, 赵越, 张田. 2007. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识[J]. 地质学报, 81(11): 1462-1480.
- 张岳桥, 廖昌珍, 施炜, 胡博. 2006. 鄂尔多斯盆地周边地带新构造演化及其区域动力学背景[J]. 高校地质学报, 12(3): 285-297.
- 张岳桥, 赵越, 董树文, 杨农. 2004. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段[J]. 地质前缘, 11(3): 123-133.
- 赵越, 翟明国, 陈虹, 张拴宏. 2017. 华北克拉通及相邻造山带古生代—侏罗纪早期大地构造演化[J]. 中国地质, 44(1): 4-60.
- 朱涛, 何正勤, 冯锐, 郝锦琦, 周建国, 王华林, 王硕卿. 2007. 地震-电成像联合探测试验——以淄博市活断层探测为例[J]. 地震地质, 29(2): 373-380.