

doi: 10.11720/wtyht.2020.1593

高武平, 闫成国, 张文朋, 等. 电阻率层析成像在沉积区隐伏断层探测中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1352–1360. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1593>

Gao W P, Yan C G, Zhang W P, et al. The application of high density electrical method to concealed fault detection in sedimentary plain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1352–1360. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1593>

电阻率层析成像在沉积区隐伏断层探测中的应用

高武平^{1,2}, 闫成国², 张文朋², 王志胜²

(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)

摘要: 电阻率层析成像是开展城市活动断层探测的方法之一。本文以天津蓟运河断裂探测为例, 对电阻率层析成像在沉积区隐伏断裂探测中的应用进行了尝试。野外施工中采取了多项针对性措施, 获得了较可靠的电阻率层析成像剖面; 在详细分析测区钻孔资料的基础上进行剖面的地质解释, 并与浅层人工地震结果进行了对比。探测结果显示, 蓟运河断裂为一条第四系断裂并表现出一定的分段性, 北段最浅上断点深达 25 m, 为一条晚更新世活动断层, 南段为 55 m 左右, 是一条中更新世中晚期断层。本次探测工作表明, 利用电阻率层析成像在沉积区进行隐伏断层探测可以获得良好的效果。

关键词: 电阻率层析成像; 沉积平原; 隐伏断裂; 蓟运河断裂; 城市地质勘探

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000–8918(2020)06–1352–09

0 引言

隐伏断层是在地表无显示或出露不明显, 潜伏在地表以下的断层。探明隐伏断层的展布和活动性, 对城市规划和城市建设都具有十分重大的意义^[1]。电阻率层析成像是以地下岩、土体的导电性差异为物质基础, 通过观测和研究人工建立的地下稳定电流场的分布规律来反演地质结构^[2], 具有低成本、高效率、解释方便等特点, 因此成为城市活动断层探测的方法之一^[3], 在多金属矿勘探、地质灾害、找水、工程勘察、考古等工程、环境、地质勘察等方面也得到了广泛应用^[4–6], 在隐伏断层探测方面也有许多应用实例^[7–12]。白登海等较早利用电阻率层析成像对福州市区及周边的活断层进行探测, 肯定了该方法在隐伏断层探测中的可行性与有效性^[13], 此后不断有学者对电阻率层析成像的现场施工技术、采集参数设置、剖面地质解释等展开讨论^[14–16], 朱涛等^[14–15]还归纳了断层在剖面中的典型形式, 并总结了剖面地质解释中宜采用的方法与步

骤, 为利用该方法探测活动断层提供了经验。另外, 张斌等^[17]通过实验研究给出了岩石中裂隙产生的电阻率图像, 这为解释和理解断层发育引起的视电阻率变化特征进一步提供了有益补充。

蓟运河断裂位于华北断坳北部, 是张家口—渤海断裂带中十分重要的一条断裂^[18], 也是唐山菱形块体的西边界^[19]。查明该断裂的空间展布形态、性质以及活动性, 对评估北京圈的地震灾害风险、产业功能转移、防震减灾对策研究等工作都具有十分重要的意义。蓟运河断裂绝大部分展布于第四系松散沉积内, 所经之处第四系厚度超过 300 m, 具有饱水、高孔隙率和土性不均等特点^[20–21], 已开展的浅层人工地震探测工作表明, 地层的这些特点对地震波的传播十分不利, 容易造成对高频信号能量的强烈耗散^[22], 限制了浅层人工地震的浅部分辨率。电阻率层析成像对浅层精细结构探测特别是 100 m 以浅范围具有其独特优势, 可为隐伏断层探测提供进一步补充。

为确定蓟运河断裂的空间展布, 评价其断裂活动性, “十二五”期间跨蓟运河断裂布置了多条电阻

收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2020-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772123); 天津市科技重大专项工程(18ZXJQSF00110)

作者简介: 高武平(1981–), 男, 中国地震局地球物理研究所固体地球物理学博士在读, 高级工程师, 主要研究方向为城市活动断层探测、城市地质工程、风险评估、地震动数值模拟。Email: gwpp123@126.com

率层析成像测线。本文以此次探测成果为基础,对探测相关情况进行详细介绍,并对探测中存在的假相异常等问题进行了探讨,希望能为其他地区开展类似工作提供参考。

1 地质概况与第四系

测区位于华北沉积平原区北部,构造上覆盖冀中拗陷、沧县隆起与黄骅拗陷的北部(图 1)。蓟运河断裂展布于天津宁河—宝坻一线,走向北西 40°,倾向 SW,倾角 70°,是燕山隆起与华北裂陷盆地的分界线^[23]。断裂形成于前古生代,断裂控制了古生界地层的发育和中生代盆地的形成。据石油地震勘

探资料,蓟运河断裂向下断至古生界,新近系明化镇组断距 280 m,向上进入第四系。虢顺民等^[19]的研究认为,该断裂不但控制了蓟运河的流向,而且断裂两侧的水系流向截然不同,西南侧流向南东,如海河、青龙湾河、潮白河等;东北侧流向南西,如陡河、沙河、青龙河、新滦河等。1976 年唐山 7.8 级地震期间,在该断裂附近还发生了 6.9 级强余震。

测区地势平坦,地表被广泛的第四系沉积层覆盖,第四系厚度 240~420 m,以冲积、湖积或海积为主,层位稳定,但由于地形地貌及沉积环境控制作用,不同构造单元的第四系沉积发育历史不完全相同,形成的相应沉积物类型、厚度都存在一定差异。陈宇坤等对本区第四系标准剖面进行过详细研究^[24]。

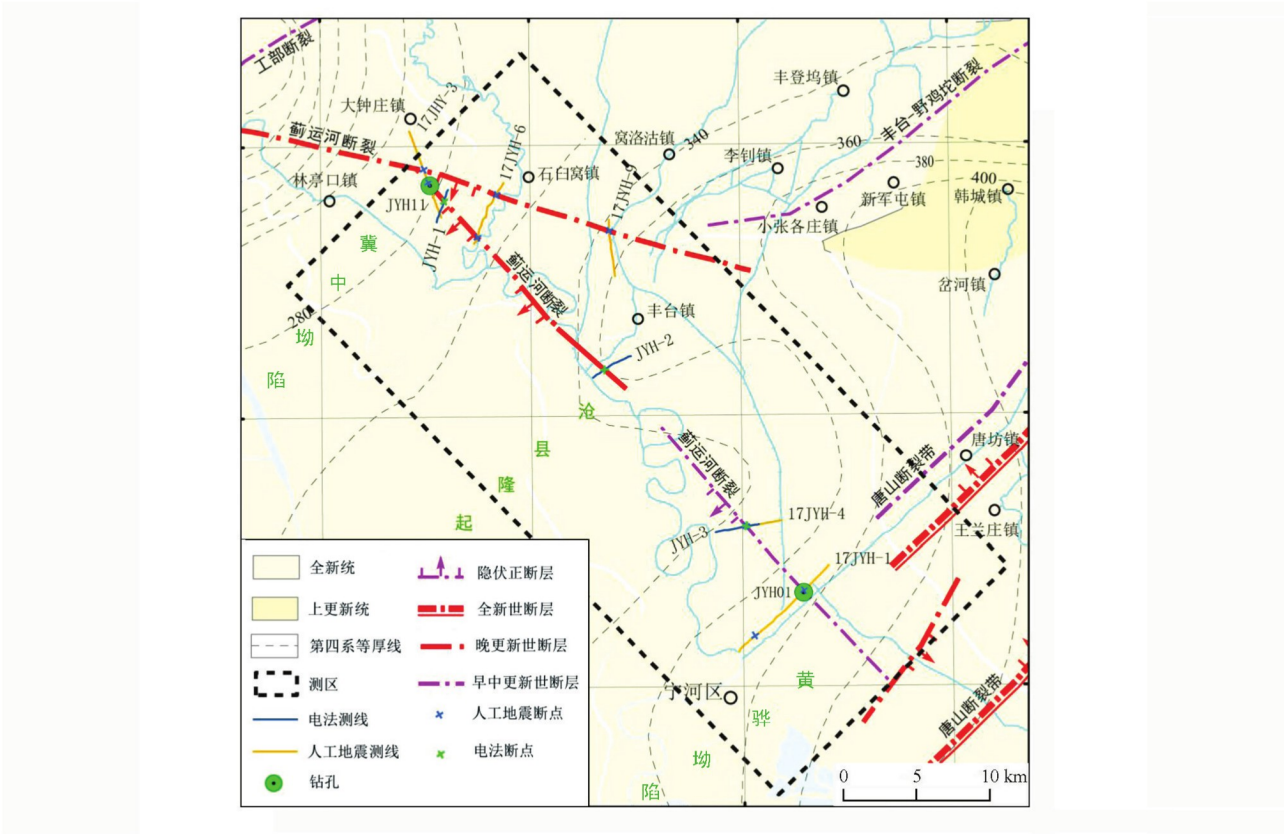


图 1 研究区地震地质图与测线位置

Fig.1 Outline map of geological structure in the studied area and locations of survey lines

2 数据采集与处理

2.1 测线布置

根据推测,蓟运河断裂可能在宝坻区刘兰庄村附近向东南拐折,然后基本沿蓟运河一直向东进入渤海湾。为确定蓟运河断裂的空间展布并评价其断裂活动性,在推测位置跨蓟运河断裂布置了 3 条电阻率层析成像测线(见图 1)。JYH-1 测线布置在刘

兰庄附近,沿乡间公路由南向北探测,长 1.9 km。JYH-2 测线布置在蓟运河东岸并与蓟运河垂直,沿梅丰公路由 S 向 N 探测,长 3 km。JYH-3 测线布置在蓟运河东岸苗庄镇附近,沿乡间公路由 E 至西探测,长 3 km。为了便于对比,将后期开展的浅层人工地震测线及其断点标注于图 1 中,其中 JYH-2 测线位置与人工地震测线 17JYH-4 完全重合。

2.2 仪器与观测系统

数据采集采用了重庆地质仪器厂生产的 DUK-

2A 高密度电法测量系统,该系统可实时显示曲线及测量电压、供电电流、视电阻率等,能够自动数据采集,也可人机交互采集,及时调整发现测量中可能出现的问题,保证数据采集质量。

针对测区环境实际情况,本次工作采用观测信号较强的温纳对称四极装置(温纳 α)采集数据,电极间距为 5 m,仪器总电极数为 120,最大隔离系数为 30。

2.3 数据采集质量保障措施

测区浅部地层天然含水量普遍较高,地层电阻率本身偏低,局部的降雨也可能对数据采集造成影响,测区冬季也存在冻土,较厚冻土对电阻率的影响也难忽视^[25]。同时,测量电极的接地电阻也直接影响数据采集质量。由于原始数据质量对后续数据处理影响大,甚至可能直接关系到最终成果的可靠性,为确保数据采集质量,采取了一些针对性的措施。

1) 施工时间选在春夏季节,避开降雨、冻土影响。一旦遭遇雨天直接停工,一般在雨停 3 天后再施工,严格控制临时性水分干扰。

2) 测量前,每阵列电极都进行接地电阻检查,要求阵列中每个电极的接地电阻控制在 1 k Ω 以内,同时要求每个接地电阻数值相对比较均匀。

3) 在测量中,一般要求电位差不得小于 5 mV,电流一般要求大于 5 mA,一旦出现此类问题,立刻采取加大供电电压等措施校正,以保证测量质量。

4) 在测量过程中,采用了电极滚动数据的覆盖式测量方式,每滚动一次将有 50% 的数据进行复测,复测误差不超过 3% 为合格,否则重新测量。

2.4 数据处理与反演

数据处理包括数据预处理与数据反演。本次野外探测获得的原始数据质量高,数据预处理主要是结合野外现场记录剔除了突变点和局部噪声引起的畸变数据,进行了必要的滤波,然后可进行直接反演。不同的反演方法适用于不同的地质条件,根据梁光河的研究^[26],对于层状介质而言,表层为低阻土层,RES2DINV 反演相对较好。文中选用 RES2DINV 软件进行数据处理与反演。

数据处理中无需建立初始模型,选定反演参数后,直接采用基于准牛顿最优化非线性最小二乘算法即可进行反演,主要的反演参数为阻尼系数、模型层厚度、迭代次数和收敛条件等。当资料噪声大时,宜选相对大的初始阻尼系数,通常为 1/10~1/15,同时为了增强反演稳定性需要设定最小阻尼,一般为初始阻尼的 1/5。模型的层厚度,第一层的厚度由地层的实际厚度与单位电极距比值确定,一般为

0.5;第二层往下,可设定增加系数为 1~1.35。迭代次数一般取 3~5 次,迭代次数过多容易产生假相,收敛条件可自行设置,一般为迭代 RMS 误差减少百分比小于 2%~5%。本次工作各测线的反演参数取值都相同,反演初始阻尼系数选取 0.15,最小阻尼取 0.03,模型层厚度第二层下的增加系数取 1.2,迭代次数设为 5,收敛条件取 RMS 误差 $\leq 5\%$ 。从反演结果看,一般迭代 3~5 次结果即收敛,收敛 RMS 误差在 3% 以内。

图 2 给出了各测线的电阻率层析成像剖面,并将断层解释也标注其上。

3 电阻率层析成像剖面分析

3.1 剖面特征及与钻孔数据对比分析

由图 2 可见,各电阻率反演剖面显示的电性结构特征基本一致,均具有明显的纵向分层特征,由浅至深可大致分为三层:低电阻率层 A(0~10 $\Omega \cdot m$),过渡层 B(10~30 $\Omega \cdot m$),相对高层 C(30 $\Omega \cdot m$ 以上),这与乌鲁木齐、云南、甘肃等薄沉积层及基岩出露区获得的以成团、成块状为主要特征的电性剖面明显不同^[7-8,15]。从各层对应的厚度看,JYH-3 剖面上浅表低阻层 A 厚度最厚,JYH-1 次之,JYH-2 最薄。从高层 C 的电阻率数值看,JYH-2 测线剖面对应高层 C 的电阻率最高,JYH-1 的次之,JYH-3 的最低。从剖面的整体电性结构变化特征而言,JYH-1 和 JYH-3 测线剖面特征整体基本一致,层间变化相对均匀,而 JYH-2 的层间起伏变化比较强烈。结合各测线的地质构造及天津地区的第四系展布特征分析,上述差异可能是基底构造对第四系沉积不同控制作用有关。从图 1 可以看到,JYH-2 测线处于隆起区,对应位置的第四系等厚线有明显转折,JYH-1 和 JYH-3 测线则位于坳陷区,所处位置的第四系等厚线变化相对均匀。

为验证反演结果合理性,收集了测区相关钻孔资料^[27]以及在后期钻孔地层对比工作中获得的视电阻率测井曲线,与反演结果进行详细对比。JYH11 钻孔位于测线 JYH-1 以北数百米,JYH01 钻孔位于 JYH-3 以南。图 3 给出了测区 JYH01 和 JYH11 钻孔柱状图与电阻率测井曲线。

JYH01 钻孔电阻率测井曲线与 JYH-3 剖面对比可见,剖面上 0~50 m 深度对应电阻率为 10 $\Omega \cdot m$ 以内,50~65 m 深度对应电阻率为 10~30 $\Omega \cdot m$,65 m 以上深度对应电阻率为 30~40 $\Omega \cdot m$,JYH01 钻孔电阻率测井曲线对应深度的数值尽管偏小,但总体

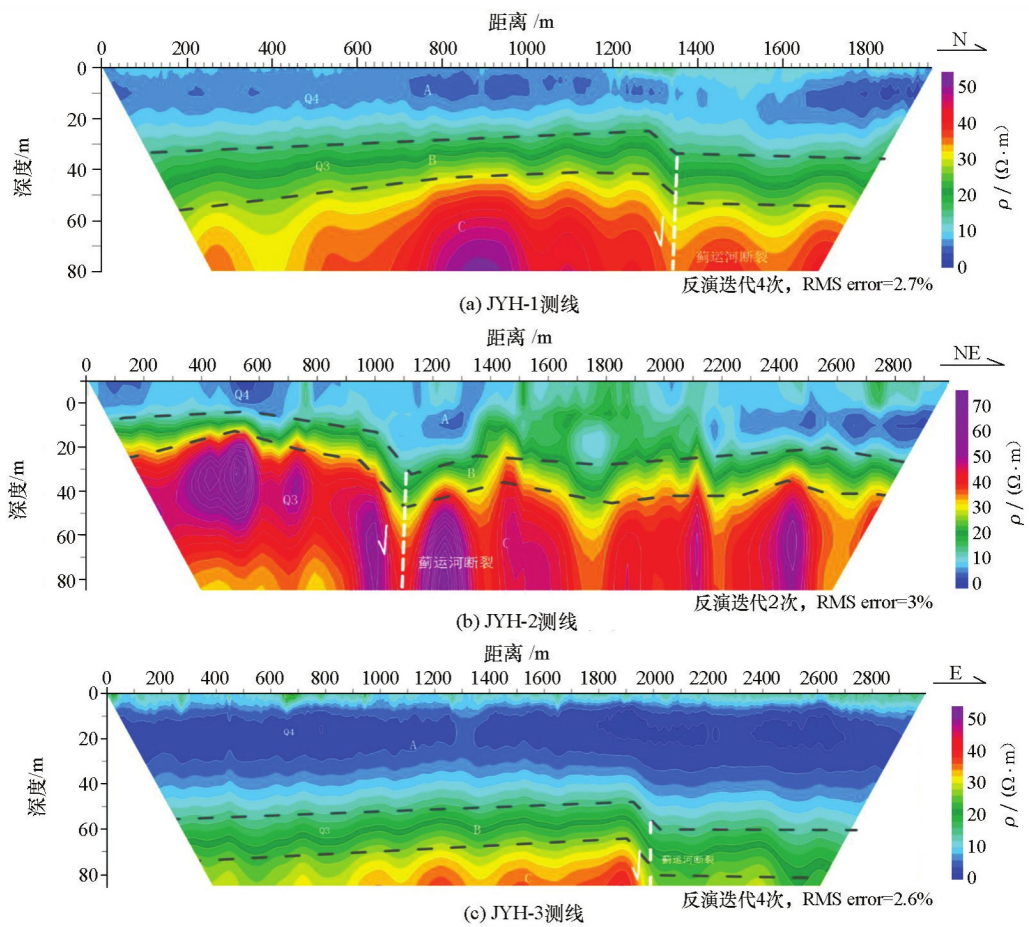


图 2 测线 JYH-1~JYH-3 的反演电阻率剖面

Fig.2 Resistivity section of line JYH-1~line JYH-3

趋势变化与此基本一致。JYH11 钻孔电阻率测井曲线与 JYH-1 剖面对比看,剖面上 0~20 m 深度对应电阻率为 10 Ω·m 以内,20~50 m 深度对应电阻率为 10~30 Ω·m,50 m 以上深度对应电阻率为 30~50 Ω·m,JYH11 钻孔电阻率测井曲线对应深度的电阻率数值与趋势变化均与此一致,也与王强等^[27]给出的黄庄洼 B-B' 剖面揭示的电阻率测井曲线变化趋势基本吻合。

同时,对比钻孔地层岩性与电阻率测井曲线还可以发现,浅部(10~70 m)砂层与黏性地层的电阻率差异很小,但深部(50 m 以下)砂层电阻率明显高于黏性地层,我们认为这与测区独特的沉积演化有关。自中更新世晚期以来,测区发生了多次海侵,并形成了多套咸水海相沉积地层。咸水地层由于矿化度高,导电离子多,将导致地层的电阻率普遍较低。根据郑文俊^[28]给出的测区咸水层底界埋深图,JYH11 钻孔附近的咸水层底界埋深约为 50~60 m,JYH01 附近约为 70~80 m,这与电阻率测井曲线结果基本一致。刘青勇等^[29]也认为,咸水层对砂层电阻率影响尤其显著,并进一步认为 20 Ω·m 可作为

咸水、淡水区的分界线。从 JYH-3 剖面 and JYH-1 剖面上显示的 20 Ω·m 等值线埋深看,对应深度分别为 65~75 m 和 40~60 m 范围,也与上述结果基本吻合。

由此可见,本次获得的电阻率反演剖面整体特征与钻孔电阻率测井曲线结果基本一致,与测区地层沉积演化也具有一定对应关系,说明剖面反演结果具有较高的可信度。

3.2 郯运河断裂的电性结构特征

通过对比 3 条电法剖面发现,在 JYH-1 剖面上的 1 360 m 处,JYH-2 剖面上的 1 100 m 处及 JYH-3 剖面上的 1 920 m 处,电阻率等值线在竖向上都存在明显的“下凹”特征。从本地区的浅层人工地震资料^[30]以及后期针对郯运河断裂开展的浅层人工地震剖面看,本地区的地层水平展布特征比较明显,在这种背景下电阻率等值线的竖向“下凹”异常可能意味着此处地层结构的变化。

浅层人工地震测线 17JYH-4 与电阻率层析成像测线 JYH-3 完全重合。图 4 为浅层人工地震测线 17JYH-4 反射时间剖面(局部),从中可以看到本地

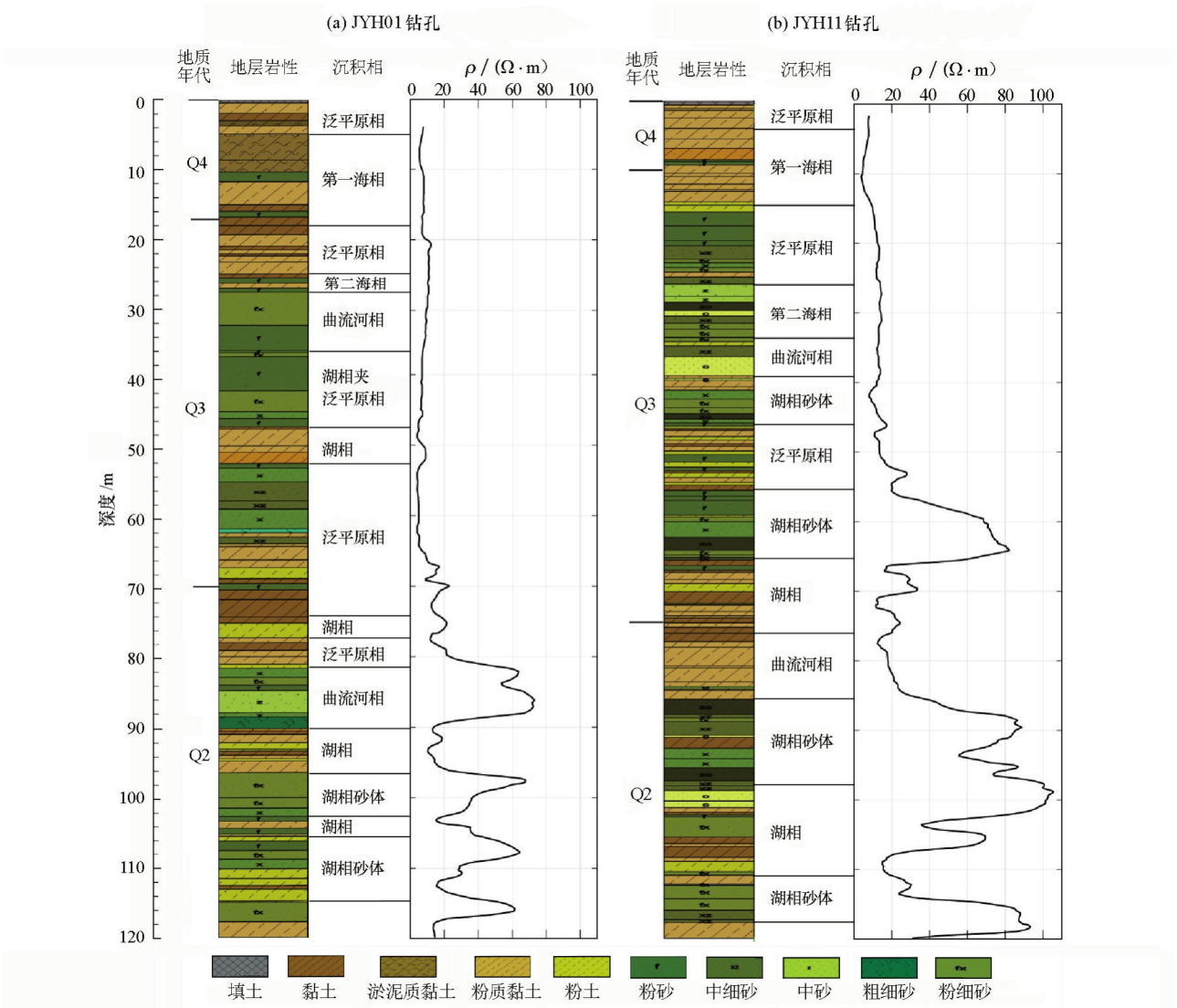


图 3 测区典型钻孔钻孔柱状图与电阻率测井曲线

Fig.3 Borehole histogram and resistivity curve of typical borehole strata in survey area

区的第四系地层展布水平,变化很小,但 100 m 以浅地层分辨率比较低。电法剖面主要显示了 100 m 以浅的地层电性特征,根据显示除“下凹”处外,地层特征也较为平坦。将电法剖面的“下凹”处标注在浅层人工地震剖面测线上发现,在浅层人工地震揭示的上断点的地面投影位置与电法剖面“下凹”处位置基本相当。

对电阻率层析成像测线 JYH-1 剖面进行了分析,虽然没有相同位置的浅层人工地震测线可对比,但两端有浅层人工地层 17JYH-3 和 17JYH-6 测线控制,对比分析显示,地层特征基本一致,同时 3 条测线给出的断层上断点投影位置可连成方向基本一致的直线。由此推测,电阻率的下凹“异常”即是蓟运河断裂错断地层的表现。

3.3 讨论

在测区地层水平分布的背景下,电阻率等值线

的竖向“下凹”异常显得十分的“突兀”,可能意味着此处地层结构的变化,但断层倾向是否可根据电阻率等值线的下凹特征进行判断是值得讨论的问题。

从一些薄沉积区及基岩区探测结果看^[14-15,31],基岩区大多由于沉积覆盖层薄、岩体成层性差,电性结构主要表现为较强的团块状、齿状特征,断层电阻率异常则表现为与围岩电阻率的强烈差异,可达 1~2 个数量级^[32],一般根据电阻率等值线特征形态就可以判断出断层上断点及埋深。但在本地区,因第四系沉积层较厚,在第四系近水平展布、地层岩性界限不明显、地层电阻率背景值低、隐伏断裂在第四系内延伸的断距小等条件下,要形成十分明显的破碎带很困难,反之有的可能会因为沉积作用而“愈合”,因此断裂在第四系的延伸可能不会表现为明显的强低阻带。仅就本次探测结果而言,如果仅从电阻率等值线的下错特征判断断层倾向是明显不合

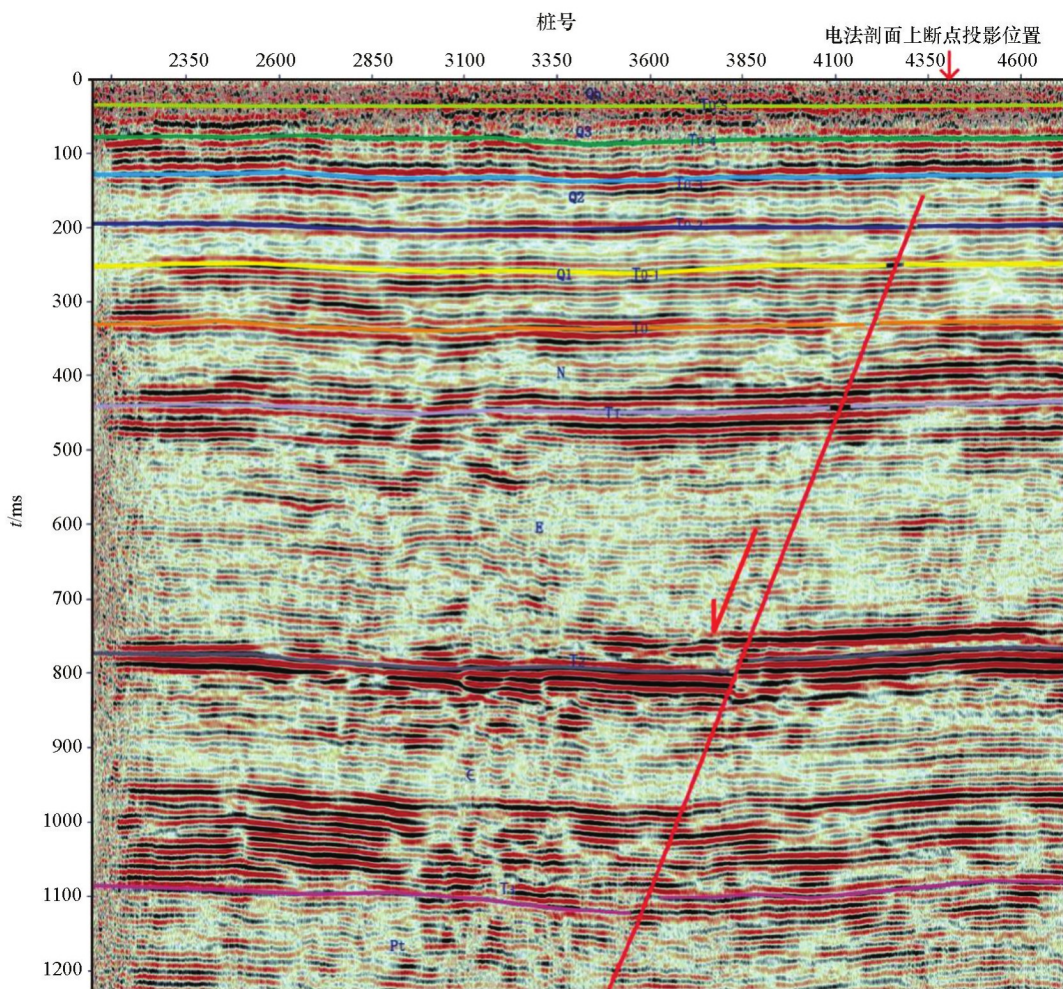


图 4 浅层人工地震 17JYH-4 测线时间剖面及电阻率层析成像剖面上断点投影位置

Fig.4 Time profile of shallow artificial earthquake line 17JYH-4 and projection position on resistivity tomography profile

理的。根据本地区的第四系资料,剖面 JYH-1、JYH-2、JYH-3 揭示深度为 80 m,对应为中更新世以上地层,按照剖面的显示,意味着中更新世的垂直下错接近 10 m,这与测区研究结果是不相符的^[30],也难以从地质学上解释(在浅部 60~70 m 深度存在 10 m 断错而在上部地层没有明显响应)。另外,如果在这一深度垂直断距达到 10 m,对应的浅层人工地震剖面上也会有所显示。因此,在本次探测剖面中,断层倾向参考了浅层人工地震勘探结果。

那么电阻率等值线这样的垂向落差是如何造成的? 目前的研究^[33]表明,影响地层电阻率的因素比较多,土壤种类、孔隙率、饱和度、水质盐度、污染种类/浓度等都可能造成地层电阻率的异常变化^[34],而受地质构造、沉积演化环境等变化影响地层结构也会产生局部变化。根据上文 3.1 节的分析,我们认为这样的落差可能与测区的咸水层分布有关。郑文俊^[29]认为天津地区的咸水层底界及埋深总体上受到第四系沉积及古地貌的控制,而活动幅度较大

的断裂构造对咸水底界形态有明显的控制作用。

综上所述,根据 JYH-1、JYH-2 和 JYH-3 剖面的显示,可判断蓟运河断裂为一条延伸至第四系的断层。JYH-1 和 JYH-2 剖面上断层上断点约为 25 m, JYH-3 剖面上断层上断点约为 55 m,后续钻孔地层对比结果揭示在钻孔 JYH11 处断层上断点为 25.04 m,在钻孔 JYH01 处为 79.9 m,故推测蓟运河断裂的上断点埋深存在南深北浅特征,表明蓟运河断裂可能存在分段性。结合测区第四系资料分析,蓟运河南段最新活动时代为中更新世中晚期,北段为晚更新世活动断裂。

4 结论

本文详细介绍了电阻率层析成像在天津蓟运河断裂探测中的应用,着重对数据采集、反演及地质解释进行了重点介绍,对电阻率层析成像在沉积区的隐伏断层探测进行了探索。

根据电阻率层析成像剖面显示并结合后续钻孔地层对比结果分析认为,蓟运河为一条第四系断裂,北段上断点埋深达到 25 m 左右,为一条晚更新世活动断裂,南段上断点埋深为 55 m 左右,最新活动时代为中更新世中晚期,与钻孔地层对比结果基本一致,但比浅层人工地震勘探结果更浅。这表明,即使在沉积区,通过合理布设测线、合理设置采集参数并采取适当措施保证数据采集质量,电阻率层析成像也可以较清晰显示断裂的上断点埋深情况,可以有效补充浅层人工地震探测对浅部地层的分辨不足。但电阻率层析成像也有明显的不足,如沉积区地层的电阻率受沉积岩性、含水量、盐分等多种因素影响,同时地球物理反演也存在不唯一性,反演剖面中不可避免地存在一定的假相。特别在对沉积区电性反演剖面进行地质解释时,如断层上断点埋深、断层倾向的判断等,除了应紧密结合测区沉积演化环境变化、基底地质构造影响、导电离子密度等带来的对反演解释不利的影响因素外,特别需要与其他探测成果相对比,以保证相关证据的协调统一。

本次工作中采用了温纳对称四极装置(温纳 α)采集数据,但不同装置对异常地质体的探测在分辨率、信号强度、勘探深度等方面都存在差异,有学者通过模拟认为探测低阻薄层下的隐伏直立低阻异常体,使用温纳 β 装置的探测效果可能更好^[35],也有学者经过实例分析建议在野外数据采集中最好采用两种或两种以上的装置,便于资料的对比和室内解释^[36]。因此,未来有必要使用不同的装置或多种装置开展数据采集进一步验证对比。

参考文献(References):

[1] 马志飞.探测城市隐伏断层保障城市建设安全[J].城市与减灾,2010,70(1):22-25.
Ma Z F. Detect buried faults in cities, guarantee security of urban construction [J]. Cities and Disaster Reduction, 2010, 70(1):22-25.

[2] 祁民,张宝林,梁光河,等.高分辨率预测地下复杂采空区的空间分布特征——高密度电法在山西阳泉某复杂采空区中的初步应用研究[J].地球物理学进展,2006,21(1):256-262.
Qi M, Zhang B L, Liang G H, et al. High-resolution prediction of space distribution characteristics of complicated underground cavities——Preliminary application of high-density electrical technique in an area of Yangquan, Shanxi[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1):256-262.

[3] 姜早峰.高密度电法 CT 成像技术在活断层探测中的应用[J].东北地震研究,2004,20(1):40-43.
Jiang Z F. Application of complex resistivity ct tomography technology in active fault survey[J]. Seismological Research of North-east China, 2004, 20(1):40-43.

[4] 董浩斌.高密度电法的发展与应用[J].地学前缘,2003,10(1):171-176.
Dong H B. Development and application of 2D resistivity imaging surveys[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1):171-176.

[5] 底青云,石昆法,王妙月,等. CSAMT 法和高密度电法探测地下水资源[J].地球物理学进展,2001,16(3):54-58.
Di Q Y, Shi K F, Wang M Y, et al. Water resources exploration with csamt and high density electric resistivity method[J]. Progress in Geophysics, 2001, 16(3):54-58.

[6] 严加永,孟贵祥,吕庆田,等.高密度电法的进展与展望[J].物探与化探,2012,36(4):576-583.
Yan J Y, Meng G X, Lyu Q T, et al. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(4):576-583.

[7] 葛鸣,赵纯青,刘景元.电阻率层析成像在乌鲁木齐西山断裂探测中的应用[J].内陆地震,2014,28(2):147-155.
Ge M, Zhao C Q, Liu J Y. Application of high-density electrical method in xishan fault detection,Urumqi [J]. Inland Earthquake, 2014, 28(2):147-155.

[8] 王爱国,杨斌,周俊喜.安远盆地边缘断层电阻率层析成像探测及活动特征[J].地震研究,2008,31(3):262-267.
Wang A G, Yang B, Zhou J X. High-density resistivity surveying and the features of boundary fault along the edge of Anyuan basin [J]. Journal of Seismological Research, 2008, 31(3):262-267.

[9] 侯治华,钟南才,郝彦军.应用电阻率层析成像探测北京南口—孙河隐伏断裂[J].防灾科技学院学报,2011,13(1):1-6.
Hou Z H, Zhong N C, Hao Y J. Detecting Nankou-Sunhe Buried Faulty by High Density Resistivity Method [J]. Journal of Disaster-Prevention Science and Technology, 2011, 13(1):1-6.

[10] 高武平,陈宇坤,张文朋,等.高密度电阻率法在西藏日喀则地区隐伏断裂探测中的应用[J].地震学报,2016,38(5):776-783.
Gao W P, Chen Y K, Zhang W P, et al. Application of high density resistivity method to exploring buried faults in Xigaze region of Xizang[J]. Acta Seismologica Sinica, 2016, 38(5):776-783.

[11] Rizzo E, Colella A, Lapenna V, et al. High-resolution Images of the fault-controlled High Agri valley basin (southern Italy) with deep and shallow electrical resistivity tomographies[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2004, 29(4-9):321-327.

[12] Alexis M, et al. Shallow electrical resistivity imaging of the limón fault, Chagres river watershed, Panama Canal [J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, 138:135-142.

[13] 白登海,王立凤,孙洁,等.城市活断层探测中电磁噪音和环境干扰对浅层电磁方法的影响[J].地震地质,2002,24(4):549-556.
Bai D H, Wang L F, Sun J, et al. Effects of urban noise on electromagnetic methods [J]. Seismology and Geology, 2002, 24(4):549-556.

[14] 朱涛,何正勤,冯锐,等.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,2007,29(2):373-380.
Zhu T, He Z Q, Feng R, et al. 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*, 2007, 29(2): 373–380.
- [15] 朱涛,周建国,沈坤,等.玉溪盆地内普渡河断裂的电阻率层析成像探测[J]. *地震地质*, 2012, 34(3): 467–476.
- Zhu T, Zhou J G, Shen K, et al. Application of electrical resistivity tomography to the detection of Pudu river fault in Yuxi basin [J]. *Seismology and Geology*, 2012, 34(3): 467–476.
- [16] 程邈,傅焰林,李振宇.电阻率层析成像在查明潜伏断裂中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2011, 8(4): 417–420.
- Cheng M, Fu Y L, Li Z Y. Application of high density resistivity method to hidden fault investigation [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2011, 8(4): 417–420.
- [17] 张斌,朱涛,周建国.岩石电阻率图像及各向异性变化的实验研究[J]. *地震学报*, 2017, 39(4): 478–494.
- Zhang B, Zhu T, Zhou J G. Experimental studies on the changes of rock resistivity image and anisotropy [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2017, 39(4): 478–494.
- [18] 徐杰,宋长青,楚全芝.张家口-蓬莱断裂带地震构造特征的初步探讨[J]. *地震地质*, 1998, 20(2): 146–154.
- Xu J, Song C Q, Chu Q Z. Preliminary study on the seismotectonic characters of the Zhangjiakou-Penglai fault zone [J]. *Seismology and Geology*, 1998, 20(2): 146–154.
- [19] 魏顺民,李志义,程绍平,等.唐山地震区域构造背景和发震模式的讨论[J]. *地质科学*, 1977, 12(4): 305–321.
- Guo S M, Li Z Y, Cheng S P, et al. Discussion on the regional structural background and the seismogenic model of the Tangshan earthquake [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1977, 12(4): 305–321.
- [20] 杨锦贤.天津平原软土层分布规律及工程地质层划分[J]. *天津大学学报*, 1991(s): 126–131.
- Yang J X. Distribution patterns of soft soil layers and the classification of engineering geology layers in tianjin plain [J]. *Journal of Tianjin University*, 1991(s): 126–131.
- [21] 张俊红.天津软土地区工程抗震设计中应注意的问题[J]. *岩土工程界*, 2008, 11(11): 74–76.
- Zhang J H. Problems needing attention in ASEISMIC design of engineering in Tianjin soft soil area [J]. *Geotechnical Engineering World*, 2008, 11(11): 74–76.
- [22] 何正勤,陈宇坤,叶太兰,等.浅层地震勘探在沿海地区隐伏断层探测中的应用[J]. *地震地质*, 2007, 29(2): 363–372.
- He Z Q, Chen Y K, Ye T L, et al. Application of shallow seismic exploration in detection of buried fault in coastal areas [J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(2): 363–372.
- [23] 张四昌,刁桂苓.唐山地震序列的构造过程[J]. *中国地震*, 1992, 8(2): 73–80.
- Zhang S C, Diao G L. The tectonic process of the Tangshan earthquake sequence [J]. *Earthquake Research in China*, 1992, 8(2): 73–80.
- [24] 陈宇坤,李振海,邵永新,等.天津地区第四纪年代地层剖面研究[J]. *地震地质*, 2008, 30(2): 383–399.
- Chen Y K, Li Z H, Shao Y X, et al. Study on the quaternary chrono stratigraphic section in Tanjin area [J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(2): 383–399.
- [25] 袁海峰,王伟.高密度电法在冻土地区查找基岩面中的应用[J]. *陕西建筑*, 2014, 225: 43–45.
- Yuan H F, Wang W. Application of high density resistivity method in finding bedrock surface in frozen soil area [J]. *Shaanxi Architecture*, 2014, 225: 43–45.
- [26] 梁光河.小心陷阱!电阻率层析成像勘探要避免这些“误区”! [OL]. <http://www.vccoo.com/v/d8f7e8.2016>.
- Liang G H. Watch out for the traps! These “mistakes” should be avoided in resistivity tomography exploration! [OL]. <http://www.vccoo.com/v/d8f7e8.2016>.
- [27] 王强,李从先.中国东部沿海平原第四系层序类型[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 1–7.
- Wang Q, Li C X. The type of quaternary sequence in the east china coastal plain [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4): 1–7.
- [28] 郑文俊.天津地区咸水层底界埋深与地质构造关系[J]. *地震学刊*, 1989(4): 144–147.
- Zheng W J. Relationship between burial depth of brackish water layer and geological structure in Tianjin area [J]. *Journal of Seismology*, 1989(4): 144–147.
- [29] 刘青勇,董广清.电阻率法在防治莱州湾地区海水入侵中的应用[J]. *物探与化探*, 1999, 23(5): 368–372.
- Liu Q Y, Dong G Q. The application of resistivity technique to the prevention of seawater encroachment in Laizhou bay area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1999, 23(5): 368–372.
- [30] 陈宇坤,赵国敏,闫成国,等.天津市活动断层探测与地震危险性评价[M]. 北京:科学出版社, 2013: 139–168.
- Chen Y K, Zhao G M, Yan C G, et al. Active fault detection and seismic risk assessment in Tianjin [M]. Science Press Beijing China, 2013: 139–168.
- [31] 周锡明,陈超,王佩业.电阻率层析成像在山区浅表层结构调查中的应用[J]. *物探与化探*, 2012, 36(2): 198–201.
- Zhou X M, Chen C, Wang P Y. The application of the high density resistivity method to the investigation of shallow layer structure in the mountain area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36(2): 198–201.
- [32] 朱涛,周建国,冯锐.电成像方法在淄博市活断层探测中的应用[J]. *物探与化探*, 2008, 32(1): 87–95.
- Zhu T, Zhou J G, Feng R, et al. The application of the electric imaging method to the detection of active faults in Zibo city [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2008, 32(1): 87–95.
- [33] 周蜜,王建国,黄松波,等.土壤电阻率测量影响因素的试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(11): 3269–3275.
- Zhou M, Wang J G, Huang S B, et al. Experimental investigation on influencing factors in soil resistivity measurement [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(11): 3269–3275.
- [34] 林志平,林俊宏,吴柏林,等.浅地表地球物理技术在岩土工程中的应用与挑战[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(8): 2664–2680.
- Lin Z P, Lin J H, Wu B L, et al. Applications and challenges of near surface geophysics in geotechnical engineering [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(8): 2664–2680.
- [35] 郑冰,李柳德.电阻率层析成像不同装置的探测效果对比[J].

工程地球物理学报,2015,12(1):33-39.

Zheng B, Li L D. Comparison of detection effects of different electrical resistivity tomography devices [J]. Engineering Geophysics, 2015, 12(1):33-39.

[36] 马志飞,刘鸿福,叶章,等. 高密度电法不同装置的勘探效果对比[J]. 物探装备,2009,19(1):53-55,67.

Ma Z F, Liu H F, Ye Z, et al. Comparison of exploration effects of different devices in high-density resistivity method [J]. Geophysical Equipment, 2009, 19(1):53-55,67.

The application of high density electrical method to concealed fault detection in sedimentary plain

GAO Wu-Pin^{1,2}, YAN Cheng-Guo², ZHANG Wen-Peng², WANG Zhi-Sheng²

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 2. Tianjin Earthquake Administration, Tianjin 300201, China)

Abstract: Resistivity tomography is a part of the methods for conducting fault detection in urban areas. In this paper, the application of resistivity tomography to the detection of concealed faults in sedimentary areas was attempted with the fault detection of the Tianjin Canal as an example. The Wenner symmetrical quadrupole device (Wenner α) was employed to data acquisition. In order to obtain higher quality raw data, the authors adopted a number of targeted measures in the field construction. Data processing and inversion adopted a wide range of engineering circles. Using the RES2DINV software, the authors obtained a more reliable resistivity tomography profile. In the geological interpretation of the section, detailed analysis was carried out based on borehole data of the survey area in comparison with the results of shallow artificial earthquakes. The results show that the Jiyunhe fault is a Quaternary fault and shows a definite segmentation. The shallowest upper fault point in the northern section is about 25 m deep, which is a late Pleistocene active fault, and the southern section is about 55 m, which is a middle late Pleistocene fault. This probing work shows that the use of resistivity tomography for the detection of concealed faults in the sedimentary area can achieve good results, but in the process of geological interpretation, the sedimentary evolutionary environment, the geological structure of the basement, and the conductive ion density of the formation should be closely combined with each other. The impact is particularly dependent on other detection results to ensure the harmonization of relevant consequences.

Key words: resistivity tomography; sedimentary plain; concealed faults; Jiyunhe fault; urban geological exploration

(本文编辑:沈效群)