

# 应用高密度电法探测北京南口—孙河隐伏断裂

侯治华<sup>1</sup>, 钟南才<sup>2</sup>, 郝彦军<sup>1</sup>, 何仲太<sup>1</sup>, 任俊杰<sup>1</sup>, 刘旭东<sup>1</sup>, 卢海峰<sup>1</sup>, 毛昌伟<sup>1</sup>

(1.中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; 2.防灾科技学院, 河北 三河 065201)

**摘要:** 举例说明了高密度电法在北京南口—孙河活隐伏活动断层勘测中的应用, 展现高密度电法在断层定位中的广阔应用前景。简单介绍了高密度电法的基本原理。视电阻率异常剖面揭示南口—孙河断裂为正断层, 北东盘上升, 南西盘下降, 推测断裂倾角  $60^{\circ} \sim 68^{\circ}$ 。视电阻率异常剖面与钻孔资料对应较好, 并与钻探资料分析的断裂活动特性基本吻合。

**关键词:** 第四纪地层; 地层结构; 高密度电法; 活动隐伏断层探测; 电阻率异常

**中图分类号:** P315.2(21)

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-8047(2011) 01-0001-06

## 0 前言

南口—孙河断裂位于北京冲洪积平原内, 上覆为厚达 600 m 的第四系松散堆积物。用高密度电法成像技术<sup>[1-6]</sup>, 对南口—孙河隐伏断层昌平区岔屯段, 进行多道直流高密度电阻率层析成像测量试验。研究表明, 运用高密度电法层析成像技术, 可探测到断裂的位置、错断的最浅地质层位、断裂的产状及活动性。并结合钻探、探槽等多种方法对断层进行了综合研究。

## 1 南口—孙河断裂的地质概况及研究现状

南口—孙河断裂带是北京平原区一条重要的隐伏、半隐伏活动断裂带, 是张家口—渤海地震构造带的重要组成部分(图 1)。断裂总体走向  $310^{\circ}$ , 长约 80 km。西北端起自昌平区南口镇, 向东南经雪山村、岔屯, 在马池口村南出研究区, 继续沿东南方向经百泉、孙河, 消失于通县东南。该断裂为一枢纽断裂, 断裂西北段, 倾向 SW, 控制 NW 向的马池口—沙河第四纪凹陷; 断裂东南段倾向 NE, 控制顺义南部的东坝第四纪凹陷。断裂西北端被 NE 向的南口山前断裂(F2)阻截。断裂发育在晚更新世的洪积台地上, 由于东北盘上升, 沿断裂形成了 6 km 长的地貌陡坎, 在雪山村以东消失。20 世纪 70 年代末, 通过钻探和物探证实了该断裂带在第四纪时期存在明显活动; 地貌学家依据平原古河道变迁, 提出该断裂带在全新世仍存在活动<sup>[7]</sup>;

向宏发等<sup>[8-9]</sup>对南口—孙河断裂带进行了调查, 浅钻探测证实断裂错断了上更新统地层, 在昌平区白泉庄开挖的探槽发现南口—孙河断裂在最近的 12ka 以来发生过 7 级左右的地震; 江娃利等<sup>[10]</sup>通过探槽揭示该断裂在全新世期间发生过 3 次古地震事件; 张世民等<sup>[11]</sup>在雪山村布设一排钻孔, 根据钻孔联合剖面分析, 南口—孙河断裂带北段 60kaB.P 以来表现为多期活动, 累计垂直位错量约为 27.5 m。

## 2 探测设备及探测原理

高密度电阻率法作为一种简单易行的无损探测方法, 在隐伏断裂探测方面取得了很好的应用效果。根据探测要求, 我们选用北京地质仪器厂生产的 DCX-2A 电法层析成像数据采集系统。该系统采用 PC104 工控机, 工作可靠; Windows 操作系统、中文菜单, 操作简练; 触摸式输入系统, 彩色液晶屏显示, 现场实时显示剖面图; 双向覆盖电缆“滚道”覆盖测量 180 道(图 2)。该仪器自动跟踪补偿自然电位; 分布式采集器自动分配地址。特点是: 可以同时测量高密度电阻率和高密度极化率。

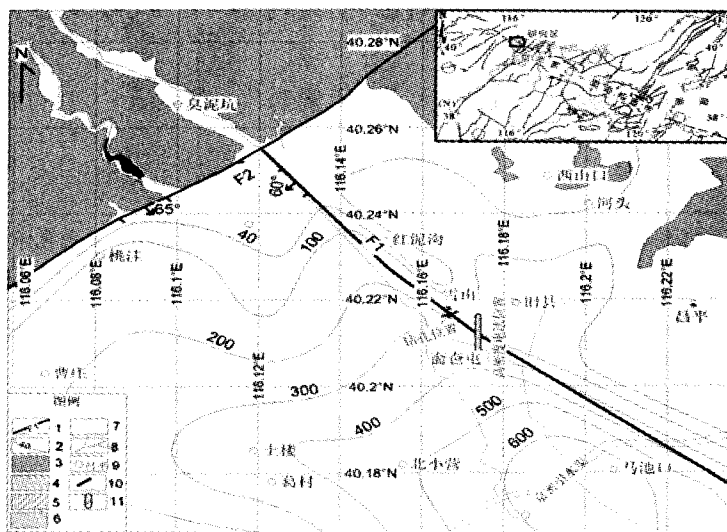
图 3 为高密度电阻率系统的结构示意图, 它包括数据的收录和资料的处理两个部分。野外测量时, 只需将全部电极(180 根)设置在一定间隔的测点上, 然后用多芯电缆将其连接到程控电极转换开关和微机控制电测仪, 便可实现数据的快速和自

收稿日期: 2010-10-26

基金项目: 国家发展和改革委员会发改项目(20041138); 地震科学联合基金(101103)

作者简介: 侯治华(1955—), 男, 云南永善人, 大学, 高级工程师, 现从事地震地质、活动构造和高密度电法研究。

动采集。当测量结果送入微机后,还可以对数据进行处理并给出关于地电断面分布的各种图示结果。



注: 1. 活动断裂; 2. 第四系等厚线; 3. 前第四系; 4. 下更新统; 5. 中更新统; 6. 上更新统; 7. 全新统; 8. 水系;  
9. 地名; 10. 钻孔位置; 11. 高密度电法布线位置断裂编号; F1 南口—孙河断裂; F2 南口山前断裂

图 1 南口—孙河断裂西北段地质构造略图

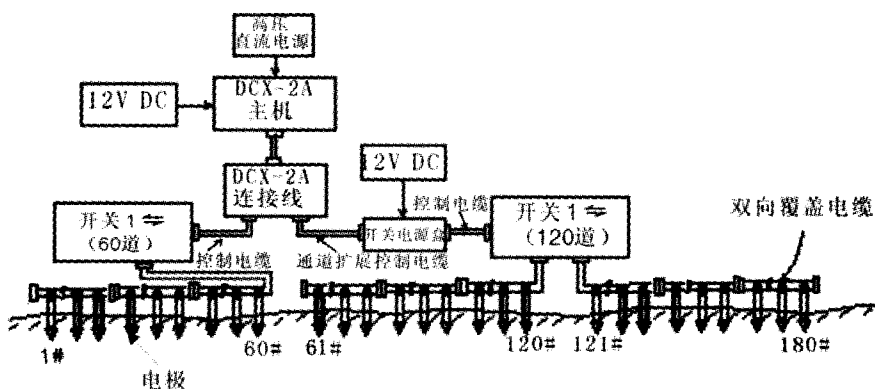


图 2 高密度电法硬件结构图

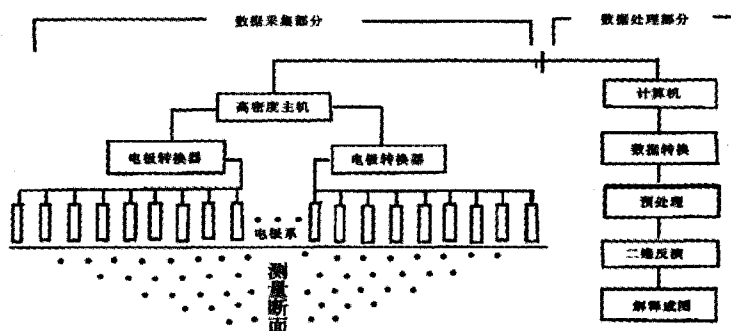


图 3 高密度电阻率系统的结构示意图

由于南口—孙河断裂在南口一带发育在平坦宽阔的冲洪积平原中,为了探测该断层南东延伸方向

所在的具体位置,高密度测线布置位置选择在昌平县的畜岔屯。野外物探剖面布置依据激电中梯面积测量工作成果,在激电异常部位进行电阻率层析成像剖面测量。在异常部位布置1条剖面,测线方向南北,起始点经纬度为:40° 12' 27.9" N, 116° 10' 25.5" E;向北300 m处经纬度为40° 12' 37.6" N, 116° 10' 24.9" E;向北600 m处经纬度为40° 12' 46.4" N, 116° 10' 24.6" E;向北900 m处经纬度为40° 12' 53.6" N, 116° 10' 25.0" E。电阻率层析成像剖面测量采用温纳装置形式观测,观测系统采用电极系列180道,道间距为5 m,隔离系数 $n_{\min}=1$ ,  $n_{\max}=30$ ,该设计能够满足60~180 m的测深要求。

采用中国地质大学电法科研组研发的高密度电阻率法数据处理和成像系统 `hdripinv_b` 解释程序(2008年6月发布),该程序用来对高密度电阻率法和激电法观测资料做数据处理和成像。其功能如下:1)对观测数据作预处理;2)对经过预处理的视电阻率数据作地形校正;3)输出未作和作过压

制干扰处理与地形校正的视参数数据,供专业绘图软件绘制视参数拟断面图;4)初始模型的建立;5)正演理论值;6)反演迭代;7)图像处理。

### 3 南口—孙河断层的地质表现形式与电性特征

地质方法确定的南口—孙河断裂的最新活动时间为全新世,断层活动性较强,出露段构造岩发育。图4为畜岔屯测线的高密度电阻率反演剖面,探测结果显示,第四纪地层厚度在78 m之内的视电阻率为30~270  $\Omega\cdot\text{m}$ 。分为上下两层。上层岩性为砂质土层、砾石块石混交层,视电阻率较高;下部为砂砾层、中砂层,视电阻率较低,视电阻率在20~40  $\Omega\cdot\text{m}$ 。断层本身的电阻率异常明显,断裂两侧的电阻率差异悬殊,在地表下5~10 m处,断裂下盘(北盘)视电阻率在240~260  $\Omega\cdot\text{m}$ 之间,而上盘(南盘)视电阻率在190~210  $\Omega\cdot\text{m}$ 之间,在地表下15~25 m视电阻率等值线有弯曲和断错的现象。

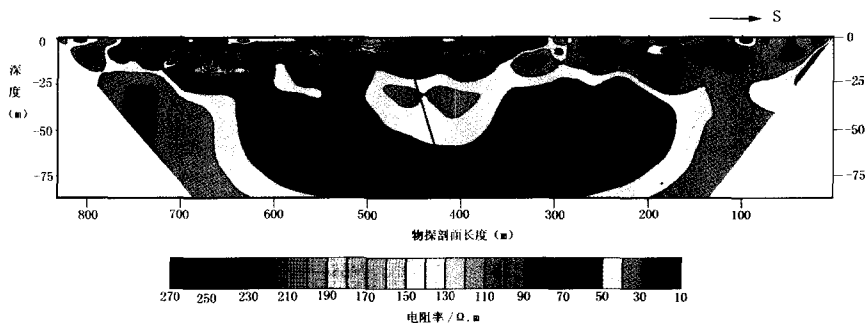


图4 南口—孙河断层电阻率反演剖面

从钻孔资料<sup>[11]</sup>结合高密度电阻率值反演剖面的异常位置的地质解译(图5、图6)中可以看出:

测线0~380 m区段,由上而下0~15 m为极低阻层,地电阻率值约10~30  $\Omega\cdot\text{m}$ ,因此该层应由全新统冲洪积粉砂、亚砂土构成;15 m以下为低阻层,电阻率值约60~100  $\Omega\cdot\text{m}$ ,因此该层应为粘质砂土层,等值线紊乱。

在高密度电法测线380~500 m处电阻率有明显差异。从地表往下可分为6层:

1) 1.5~2.5 m为表层土(层A),电阻率值没有明显差异。但在2.5 m以下(层B)南口—孙河隐伏断层两侧呈现出明显的视电阻率异常,断裂西南侧地层为含砾砂土,电阻率值为70~80  $\Omega\cdot\text{m}$ ;而东北侧含砾粉砂土,电阻率值为100~110  $\Omega\cdot\text{m}$ ;

2) 2~7 m为粘质砂土层,电阻率值60~70  $\Omega\cdot\text{m}$ ,颜色为黑灰色,等值线紊乱;

3) 7~12 m为粘质粉土、砂质粉土、粉质粘土互层,含水量较低,电阻率高,电阻率值为180~250  $\Omega\cdot\text{m}$ 。断裂西南侧电阻率值为190~210  $\Omega\cdot\text{m}$ ;而东北侧电阻率值为240~270  $\Omega\cdot\text{m}$ ;

4) 12~20 m为粘质粉土、砂质粉土,含水量比第三层高,电阻率低,其值为60~80  $\Omega\cdot\text{m}$ 。电阻率等值线反映向西南方向倾斜,可能是地层向西南方向倾斜所致,断裂两侧电阻率值有明显变化;

5) 20~50 m为含砾砂土,砂质粉土,可能为古河道,含水量比第四层高,电阻率低,其值为40~50  $\Omega\cdot\text{m}$ 。电阻率等值线反映微向西南方向倾斜的勺形,其间夹一层厚4~6 m的含砾砂土,电

阻率值为  $30 \sim 40 \Omega \cdot \text{m}$ , 为古河道堆积物。断裂两侧的电阻率值有明显变化, 等值线不连续, 断裂垂直断错  $3 \sim 4 \text{ m}$ ;

6)  $50 \sim 87 \text{ m}$  为砂土、砂质粉土、砂砾石、细砂、粉砂互层, 含水量比第五层低, 电阻率相对上层段高, 其值为  $50 \sim 60 \Omega \cdot \text{m}$ , 并反映地层向西南倾斜, 现代河道向西南迁移到吝吝屯以南, 视电阻率值为  $10 \sim 20 \Omega \cdot \text{m}$ 。

可见在测线  $380 \sim 500 \text{ m}$  附近, 其两侧的电阻率揭示了挤压破碎带断逝及上覆晚第四纪冲洪积物厚度有明显差异, 该处应是 F, 全新世断裂最新活动剖面的位置, 南口—孙河断裂为一走向北西、倾向西南、倾角  $60^\circ \sim 68^\circ$ , 第四纪以来存在活动的正断裂。探测发现断裂两侧的地层有错动现象, 地表下  $2 \sim 5 \text{ m}$  深的全新世地层垂直断错  $1 \sim 1.5 \text{ m}$ ;

埋深  $5 \sim 20 \text{ m}$  的晚更新世地层被错断  $2 \sim 3 \text{ m}$ ; 埋深  $20 \sim 30 \text{ m}$  的晚更新世地层被错断  $3 \sim 4 \text{ m}$ 。该点附近可见 II 级冲洪积阶地形成较明显的陡坎地貌。

测线  $500 \sim 700 \text{ m}$  区段:

1)  $1.5 \sim 2.5 \text{ m}$  为表层土(层 A), 电阻率值  $100 \sim 110 \Omega \cdot \text{m}$ 。但在  $2.5 \sim 5 \text{ m}$  以下(层 B)呈现出明显的视电阻率异常, 地层主要为砾粉砂土, 电阻率值为  $120 \sim 140 \Omega \cdot \text{m}$ ; 局部地段为粉砂粘土, 电阻率值为  $200 \sim 240 \Omega \cdot \text{m}$ ;

2)  $5 \sim 15 \text{ m}$  以下为中层, 地电阻率值约  $100 \Omega \cdot \text{m}$ , 该层应由全新统至上更新统冲洪积圆砾土、亚砂土构成;

3)  $15 \text{ m}$  以下为低阻层, 地电阻率值大于  $70 \sim 90 \Omega \cdot \text{m}$ , 因此该层应由上更新统冲洪积碎石土夹亚砂土构成。

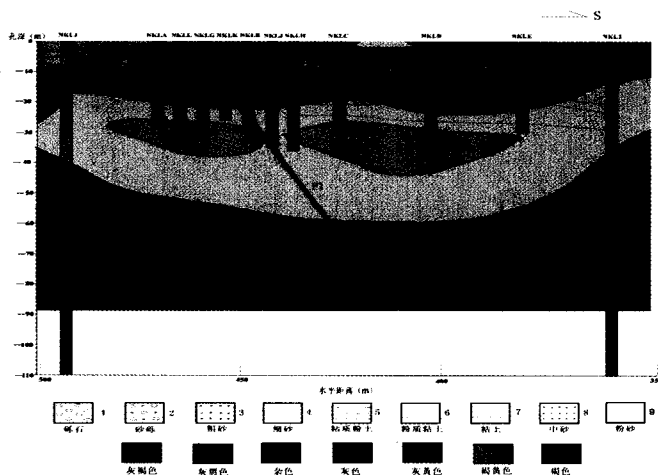


图 5 南口—孙河隐伏断层高密度电阻率反演剖面与钻孔资料剖面对比图

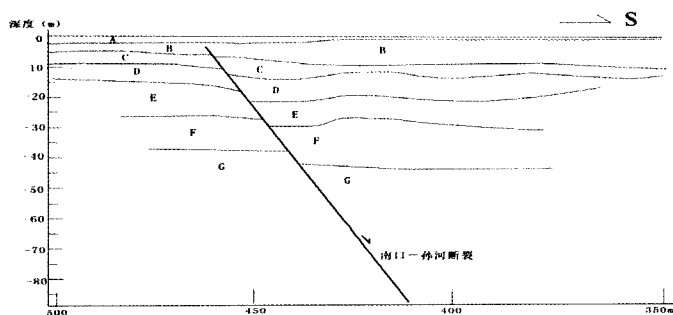


图 6 高密度电阻率地质解译图

#### 4 钻孔资料验证

浅层地震勘探结果证实, 南口—孙河断裂带主断面在浅地表的影响带宽度约为  $80 \text{ m}$ 。为查明南

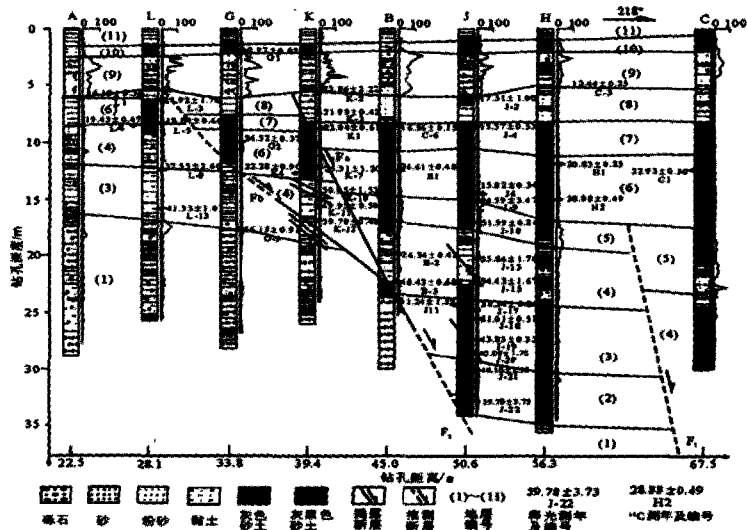
口—孙河断裂的位置和活性, 张世民等<sup>[11]</sup>在雪山村南, 大致垂直于断裂走向布设了 1 条走向为  $NE38^\circ$  的钻孔剖面线, 确保钻孔穿过断裂带, 设计了两个深度为  $100 \text{ m}$  钻孔(图 7)。1 号钻孔位于断

层上升盘, 距主断层约 40 m; 2 号钻孔位于断层下降盘, 距主断层约 95 m。钻探揭示, 2 号钻孔在 10 m 深度以下地层存在显著差异。据此, 在 1 和 2 钻孔之间, 又等间距 (22.5 m) 地布设了 5 个进尺约 30 m 的钻孔, 钻孔编号分别为 A<sub>0</sub>、B<sub>0</sub>、C<sub>0</sub>、G<sub>0</sub>、

H<sub>0</sub>、J<sub>0</sub>、K<sub>0</sub>、L<sub>0</sub>, 在断层附近钻孔深度加深为 35 m。为了对比断层两侧的地层, 钻孔的地层层序自下向上依次编号为层 (1) 至层 (11)。各层的岩性特征和磁化率值描述见表 1。图 6 为钻孔剖面。

表 1 南口—孙河断裂带钻孔年代、磁化率和地层

层序	沉积相	岩性描述	磁化率 (sI)	地层时代 (ka)
11	耕植土, 人工填土	黄褐色粘质粉土, 含碎砖、碎瓦片		
10	漫滩、洪积相	灰褐色粉质粘土, 灰黑色腐植团块	$12\times 10^{-8}\sim 20\times 10^{-8}$	3.0~3.7
9	河床相	褐色、灰黄色砂层, 含细砾	$10\times 10^{-8}\sim 84\times 10^{-8}$	8.0~4.0
8	漫洪相、河床相	黄褐色粉土、砂层, 粒度向上变粗	$3\times 10^{-8}\sim 5\times 10^{-8}$	12~16
7	漫洪相	灰褐色粘质粉土、砂质粉土、粉质粘土互层	$5\times 10^{-8}\sim 7\times 10^{-8}$	16~20
6	沼泽相	灰黑色淤泥、粉质粘土, 有机质高	$6\times 10^{-8}\sim 9\times 10^{-8}$	20~28
5	河床相	灰褐色、褐黄色含砾砂层、粉砂层, 向上变细	$16\times 10^{-8}\sim 39\times 10^{-8}$	28—32
4	漫洪相	灰褐、褐黄色粉质粘土与粘质粉土互层, 向上粒度变粗	$6\times 10^{-8}\sim 12\times 10^{-8}$	32—37
3	漫洪相	灰褐、灰黑色粉质粘土与粘质粉土互层	$7\times 10^{-8}\sim 9\times 10^{-8}$	37~47
2	漫洪相	灰褐、灰黑色粉质粘土与粘质粉土互层	$6\times 10^{-8}\sim 9\times 10^{-8}$	60~47
1	洪冲积相	砂砾石与粘质粉土、粉质粘土互层	$5\times 10^{-8}\sim 15\times 10^{-8}$	上更新世



(注: 钻孔柱状图右侧为磁化率曲线, 标度为 0~100×10<sup>-8</sup>SI; 测年数据单位为 ka)

图 7 南口—孙河断裂带钻孔年代地层剖面 (张世民, 2007)

从表 1 可知, 低水位体系域的磁化率值大, 变幅也大; 水进体系域磁化率值中等, 变幅中等, 总体向上由大变小; 高水位体系域的磁化率值小, 变幅也小; 水退磁化率值中等, 变幅中等, 总体向上

由小变大。  
据含水量测量的磁化率结果, 结合图 4 中高密度电法等值线分析: 低水位体系域的磁化率值大, 电阻率值也高, 电阻率值一般为 190~250 Ω·m,

变幅也大;水进体系域磁化率值中等,变幅中等,总体向上由大变小;高水位体系域的磁化率值小,电阻率值也低,电阻率值一般为  $30\sim 40\ \Omega\cdot\text{m}$ ,变幅也小;水退体系域磁化率值中等,变幅中等,电阻率值一般为  $80\sim 150\ \Omega\cdot\text{m}$ ,总体向上由小变大。总之,分析研究区为含水量大的地层,视电阻率值低;反之视电阻率值则高。

## 5 结束语

综上所述,由于电阻率异常剖面与钻孔资料对应较好。斋堂屯北南口—孙河断裂位置的地层呈二元结构,上部覆盖较薄的粉土层,其中多夹杂卵石,且含水率较低,下部为卵石层,含水量高;在地表下  $12\sim 20\ \text{m}$  段的地层为粘质粉土、砂质粉土,含水量比上层高,电阻率低;地表下  $25\sim 35\ \text{m}$  段为古河道堆积的卵砾石夹砂砾石层,该段地层被垂直断错  $3\sim 4\ \text{m}$ ,测线断裂两侧的视电阻率异常形态为上高下低;在地表下  $60\sim 87\ \text{m}$  段的地层为砂土、砂质粉土、砂砾石、细砂、粉砂互层,含水量比上层较低,电阻率相对上层段高。电阻率值为  $50\sim 60\ \Omega\cdot\text{m}$ ,并反映地层向西南倾斜。探测表明测线视电阻率值变化部位与目标断层的可能经过位置吻合。推测南口—孙河断裂北东盘上升,南西盘下降,断裂倾角  $60\sim 68^\circ$ ,为正断活动特征,与钻探资料揭示、分析的断裂活动特性基本吻合。

致谢:北京地质仪器厂的刘永东老师进行了野外指导,在写作过程中得到张世民研究员、马保起研究员的指导,在此一并感谢!

## 参考文献:

- [1] 李志祥. 高密度电阻率法在隐伏断层探测中的应用[J]. 地震研究, 2003, 26(3): 276-278.
- [2] 谭明, 吴传勇, 刘景元. 高密度电法在乌鲁木齐市活断层项目中的应用实例[J]. 内陆地震, 2008, 22(2): 324-326.
- [3] 王爱国. 隐伏断层电性特征及浅层电法探测[J]. 西北地震学报, 2006, 28(3): 243-247.
- [4] 赵成斌. 松散覆盖层内隐伏断层探测研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 27(2): 108-112.
- [5] 李清林. 高密度电阻率二维层析成像在郯庐断裂带山东潍坊段试验结果的初步分析[J]. 地震地质, 2006, 28(4): 590-596.
- [6] 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(2): 40-43.
- [7] 徐海鹏, 李树德, 杨景春. 北京南口山前断裂及其地貌发育的影响[A]. 中国地理学会地貌专业委员会编. 中国地理学会第一次构造地貌学会讨论会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1984, 40-46.
- [8] 向宏发. 北京平原区隐伏断裂晚第四纪活动特征的联合剖面研究[J]. 地震研究, 1995, 8(1): 75-79.
- [9] 向宏发, 方仲景, 贾三发. 隐伏断裂研究及其工程应用: 以北京平原区为例[M]. 北京: 地震出版社, 1994, 1-97.
- [10] 江娃利, 侯治华, 谢新生. 北京平原南口—孙河断裂带昌平旧县探槽古地震事件研究[J]. 中国科学辑, 2001, 31(6): 501-509.
- [11] 张世民. 北京南口—孙河断裂带北段晚第四纪活动的层序地层学研究[J]. 地质, 2007, 29(4): 729-743.

## Detecting Nankou-Sunhe Buried Faulty by High Density Resistivity Method

Hou Zhihua<sup>1</sup>, Zhong Nancai<sup>2</sup>, Hao Yanjun<sup>1</sup>, He Zhongtai<sup>1</sup>, Reng Junji<sup>1</sup>, Liu Xudong<sup>1</sup>, Lu Haifeng<sup>1</sup>, Mao Changwei<sup>1</sup>

(1. Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085; 2. Institute Of Disaster Prevention, Yanjiao 065201)

**Abstract:** By exempling and explaining the application of high density electrical method in Nankou-Sunhe active buried fault project, we exhibited the wide application prospect of high density electrical method in the fault localization. And we introduced briefly the basic principle of high density electrical method. We showed that the Nankou-Sunhe active buried fault is a normal fault; its northeast wall rises and the southwest wall drops. The speculated dip of the fault is  $60^\circ\sim 68^\circ$ . And the characteristics of the active fault from borehole data are basically consistent with the resistivity data.

**Key words:** Quaternary system; stratum structure; high density electrical method; active buried fault detection; abnormality of electronic resistance rate