

安远盆地边缘断层高密度电法探测及活动特征^{*}

王爱国^{1,2}, 杨 斌¹, 周俊喜¹

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州基地, 兰州 730000 2. 甘肃省地震局, 兰州 730000)

摘要: 结合钻孔资料, 采用高密度电法对安远盆地边缘的毛毛山南麓活动断层 (F_1) 和金强河—毛毛山北麓活动断裂 (F_3) 进行了探测。结果表明, F_1 断层错断了盆地区内晚更新世晚期至全新世早期的 III 级阶地; 受拉分构造的影响, 该断层最新活动显示了向安远拉分盆地方向迁移的阶梯状递减的张性正断裂性质。 F_3 断层在走向上呈锯齿状, 错断了山前 I 级冲洪积阶地及全新统至上更新统地层, 断距大, 基岩破碎带宽, 新活动主要表现为断层附近原地连续沉降。这两条断层的发育特征及展布位置的确定, 为该区工程稳定性评价及建设提供了依据。

关键词: 安远盆地; 高密度电法; 毛毛山断层; 金强河—毛毛山断层; 甘肃

中图分类号: P542.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2008)03-0262-06

0 引言

安远盆地位于甘肃省天祝县城与古浪县城之间, 地处青藏高原东北缘北祁连山腹地, 为雷公山、乌鞘岭和毛毛山环绕, 盆地面积约 35 km², 平面上呈不对称梯形 (图 1)。安远盆地是由内地翻越祁连山通向河西走廊及新疆的交通要道, 盆地内有兰新铁路、312 国道等穿过, 即将修建的东西向连 (连云港) 霍 (霍尔果斯) 主干道也将从这里通过。由于该区地处北祁连地震活动区 (国家地震局兰州地震研究所等, 1993), 盆地周边存在毛毛山南麓活动断裂 (F_1)、小柳树沟—北岭沟断裂 (F_2)、金强河—毛毛山北麓活动断裂 (F_3) 等多条区域性活动断层 (甘肃省地质局, 1972), 因此工程地质与地震地质条件极为复杂, 给从盆地通过的交通枢纽工程建设带来很大的难度。由于盆地第四系覆盖层厚度大, 加之人工改造及植被覆盖等因素, 确定断层的具体位置及发育特征就成为困扰设计单位的难题。我们在连霍高速永登至古浪段隧道工程地震安全性评价工作中, 结合钻孔资料, 采用高密度电法对盆地边缘的毛毛山南麓活动断裂 (F_1) 和毛毛山北麓活动断裂 (F_3) 进行了探测, 确定了两断层在盆地边缘的具体位置及活动特征。

1 盆地地质构造条件

安远盆地位于金强河和毛毛山两条断裂左旋左阶区内, 是一个小型拉分盆地 (国家地震局地质研究所等, 1993), 其形成时间为早更新世晚期至中更新世早期。在中更新世晚期盆地南缘断层段逐渐停止活动, 南盘掀斜抬升, 形成了 4 级阶地及其由南向北的倾斜面。中更新世晚期至全新世, 整个盆地向西北边缘逐渐收缩, 下窑洞沟以西断层左旋走滑分量逐渐增加, 马家窝窝至下窑洞沟区段断层则基本为正断性质 (图 1) (何文贵, 1996)。

盆地内 I 级冲积阶地相对高度为 3~5 m, 顶部为 60 m 厚的黑色腐植土, 局部含砾石, 下部为砂砾石层。II 级阶地主要在盆地东缘安远镇及周边, 为基座阶地, 高 15~18 m, 其中基座高 12~15 m 上覆 3 m 多厚的冲洪积砾石层, 顶部为黄土状土; 盆地西缘极乐寺有少量堆积阶地分布, 属洪积成因。II 级阶地保存较好, 主要分布在盆地东南缘和中央, 形成一些高出盆地底面 30~50 m 的台地, 其上覆有黄土, 为冲洪积阶地, 形成于晚更新世至全新世早期。IV 级阶地只在盆地东缘孤立地保留一片, 阶地面不很平坦, 高出盆地面 100~200 m。根据阶地面高度及其剥蚀状况, 推测该阶地可能形成于中更新世, 阶地形成之后又经历了剥蚀残积

* 收稿日期: 2007-10-07.

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项基金 (2007690) 资助

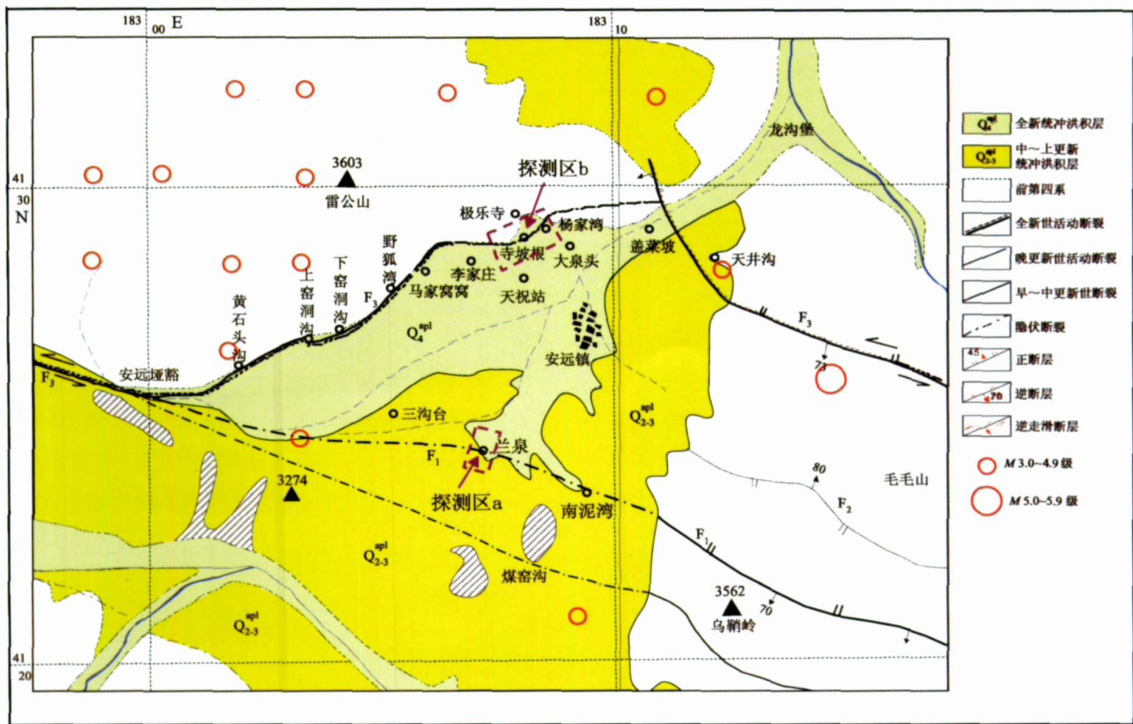


图 1 安远盆地及周边地震地质简图

作用。另外，盆地西缘可见到一系列全新世的小洪积扇，这些洪积扇的规模不大，多为数百平方米（图 1）（何文贵，1996）。

盆地南缘毛毛山南麓活动断裂（ F_1 ）亦称天河湾逆冲断裂，断裂在早期多次活动，主要表现为中—上奥陶统由南向北逆冲于上三迭统之上，在盆地东侧基岩山区可见断面，挤压破碎带宽 100~200 m，由碎裂岩、角砾岩及断层泥构成，泥钙质胶结较差。盆地区内断层穿过 II 级阶地，由于植被覆盖及农田改造未见断面。

盆地西北缘断层为毛毛山北麓断层与金强河北缘全新世左旋逆走滑断裂左阶雁列区段，断层西起安远埡豁，向北东方向通过黄石头沟、上窑洞沟、下窑洞沟、野狐湾、极乐寺至盖菜坡，呈锯齿状延伸长约 11 km。断层活动方式以倾滑为主，具正断层性质。在下窑洞沟以西可见到一些冲沟被左旋断错，水平位移量约 5~30 m。断层的垂直位移量较大，新活动较强，形成了丰富的垂直断错地貌。主要表现为断层三角面、断层崖、断层陡坎、断层沟槽、断错阶地及洪积扇等。断层断错上窑洞沟、下窑洞沟的 I、II 级阶地，上窑洞沟至野狐湾一带的全新世洪积扇都保留有清

晰的断层陡坎。另外在黄石头沟一带还可见到断层沟槽和断陷塘等现象。上窑洞沟和李家庄东支沟可见探槽剖面及天然剖面，这揭示断层大约 4 000 年前有过一次古地震活动（何文贵，1996；袁道阳，1996—1997）。李家庄以东，由于人为改造，断层最新活动显示不明显，只在杨家庄可见 II、II 级阶地断逝。

2 探测环境与方法

高密度电阻率法作为一种简单易行的无损探测方法，在工程领域已有广泛应用（董浩斌，2003），在隐伏断裂探测方面也有很多应用实例和探讨（王爱国，2006—2007；李志祥，2003），并取得了很好的效果。在本工程中，借助钻孔资料作为解译的参考，更增加了探测结果的可靠度和解译精度。本探测中采用重庆奔腾数控技术研究所最新研制的 WDJ-3 多功能数字直流激电仪为工程电测主机，配以该所研制的 WDJ-2 多路电极转换器构成高密度电阻率测量系统，使用 α 电极排列方式（温纳装置 AMNB），电极距 5 m，最大隔离系数 38。

对于盆地南缘边界断层，探测地点选择在兰泉村冲沟（图 2a）沿沟地形基本平坦，并有 01、02、07 和 08 号 4 个钻孔资料作为参考，其中 01、02 和 08 号钻孔位于断层破碎带上，07 号钻孔则位于基岩之上。钻孔资料揭示该处上部为全新统冲洪积卵石土（厚 5~6 m）和碎石土（厚 5~6 m），下伏由中—上奥陶统变质岩构成的 F_1 断裂影响带，由灰褐色、黄褐色压碎岩、角砾岩构成，岩体破碎呈散体状。测线 Gm_1-Gm_1' 方向 $N10^\circ E$ 穿过 01 号及 02 号钻孔，总长 750 m。地形南高北低，最大高差约 15 m。

盆地西缘边界断层探测主要针对极乐寺附近区段（图 2b），由于该断层为拉张正断，走向不规则，我们根据地形条件选择布置了 3 条测线，均位

于雷公山东南麓山前 I 级冲洪积阶地后缘，坡度 $10^\circ \sim 25^\circ$ 。其中 Gm_2-Gm_2' 沿寺坡根村中间一条北西向土路布设，测线方向大致为 $S0^\circ E$ ，测线长 600 m。地形北西高，南东低，最大地形比差约 85 m。 Gm_3-Gm_3' 沿寺坡村头一条田间小路布设，测线方向 $S75^\circ E$ ，测线长 750 m。地形北西高东南低，最大地形比差约 125 m。 Gm_4-Gm_4' 沿杨家湾西沟右岸布设，在 0~220 m 区段方向为 $S45^\circ E$ ，在 220~600 m 区段为 $S0^\circ E$ ，测线长 600 m。测点布设区域地形北西高南东低，最大地形比差 43 m。钻孔揭示该区晚第四纪冲洪积次生黄土厚度约 4 m，角砾土、块石碎石土厚度约 22 m，下伏由下志留统绢云千枚岩构成的 F_3 断裂破碎带。

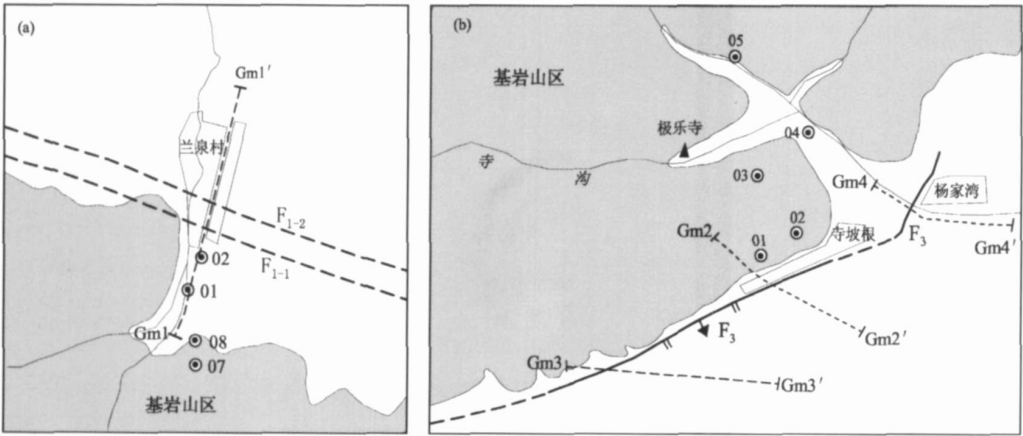


图 2 盆地南缘边界 (a) 及西缘边界 (b) 高密度测线布置及探测结果平面示意图

3 盆地南缘断层探测结果

图 3a 为测线 Gm_1-Gm_1' 反演电阻率剖面。从剖面图并结合 01 号及 02 号钻孔资料可以看出，该测线揭示的地电阻率基本分为 3 层，且界面稳定清晰，从地表向下呈现低阻—高阻—低阻的变化。分层深度在测线方向上可以划分为 3 段：

(1) 测线起点至 280 m 区段，由上而下 3~5 m 为低阻层，地电阻率值约 $50 \Omega \cdot m$ ，应由全新统冲洪积圆砾土构成；5~20 m 为高阻层，地电阻率值约 $500 \Omega \cdot m$ ，应由上更新统冲洪积碎石土构成；20 m 以下为低阻层，地电阻率值为 $100 \Omega \cdot m$ ，应为 F_1 挤压破碎带及其影响带，宽度 300 m 左右。

(2) 测线 280~410 m 区段，由上而下 5~10 m 为低阻层，地电阻率值约 $100 \Omega \cdot m$ ，应由全新统冲

洪积圆砾土构成；10~55 m 为高阻层，地电阻率值约 $200 \sim 300 \Omega \cdot m$ ，应为上更新统冲洪积碎石土构成；55 m 以下为低阻层，地电阻率值约 $100 \Omega \cdot m$ ，应为 F_1 强烈挤压破碎带，宽度约 115 m 左右。

(3) 测线 410~750 m 区段，由上而下 5~10 m 为低阻层，地电阻率值约 $100 \Omega \cdot m$ ，由全新统冲洪积圆砾土构成；10 m 以下为高阻层，地电阻率值约 $500 \Omega \cdot m$ ，应由上更新统冲洪积碎石土构成。

根据电阻率层在不同区段的差异表现，测线 280 m 附近两侧地电阻率所揭示的挤压破碎带埋深差异处及测线在 410 m 处两侧地电阻率揭示的挤压破碎带断逝和上更新统冲洪积层厚度的明显差异处，应是 F_1 断裂晚更新世活动断面的位置（图 3a）。断裂由两个活动断面组成，断面呈阶梯式向

北陡倾。根据断裂的地貌特征判定, F_1 晚更新世活动断面产状约 $N70^\circ W/NE\angle 75^\circ \sim 80^\circ$ 。综合钻孔与探测结果, 该处地质剖面如图 4b 所示。从图中可以看出, 由于受拉分构造的影响, 该断裂最新活动显示了其向安远拉分盆地方向迁移的阶梯状递减的张性正断裂性质, 断层断错了上更新统, 断距大于 80 m, 但地表 3~5 m 的全新统冲洪积圆砾土没有断错迹象。

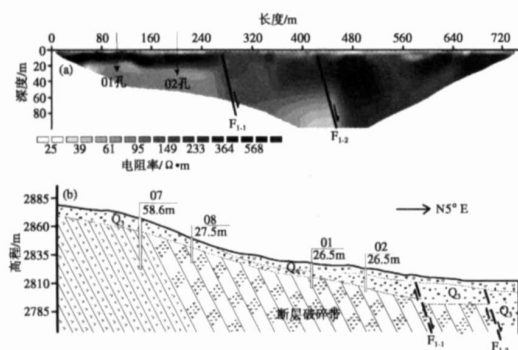


图 3 盆地南缘测线反演电阻率剖面 (a) 及综合地质剖面 (b)

4 盆地西缘断层探测结果

图 4 为盆地西缘各测线反演地电阻率剖面及断层解译图, 可以看出各剖面揭示的地电阻率低阻及高阻层界面清晰稳定, 从而也清晰地反映了地下岩体及断层破碎带的特征。

(1) Gm_2-Gm_2 测线探测结果

测线 0~250 m 区段, 由上而下 0~10 m 为极低阻层, 地电阻率值约 $50 \Omega \cdot m$, 因此该层应由全新统坡洪积—冲洪积圆砾土、亚砂土构成; 10 m 以下为低阻层, 地电阻率值约 $100 \Omega \cdot m$ 左右, 因此该层应为下志留统变质岩构成的 F_3 强烈挤压破碎带, 其宽度约 150 m。

测线 250~600 m 区段, 由上而下 0~15 m 为低阻层, 地电阻率值约 $100 \Omega \cdot m$, 因此该层应由全新统冲洪积圆砾土、亚砂土、耕土构成; 15 m 以下为高阻层, 地电阻率值大于 $300 \Omega \cdot m$, 因此该层应由上更新统冲洪积碎石土夹亚砂土构成。

根据电阻率差异可见, 在测线 250 m 附近, 其南北两侧地电阻率揭示了挤压破碎带断逝及其上覆晚第四纪沉积物厚度有明显差异, 该处应是 F_3 最新

活动断面的位置。断面向南陡倾, 倾角约 75° 。

(2) Gm_3-Gm_3 测线探测结果

测线 0~160 m 区段, 由上而下 0~5 m 为极低阻层, 地电阻率约 $50 \Omega \cdot m$, 因此该层应由全新统冲洪积含碎石亚砂土构成; 5 m 以下在山边宽度约 40 m 左右为低阻层, 地电阻率值约 $100 \Omega \cdot m$, 因此该层应为下志留统变质岩构成的 F_3 断裂强烈挤压破碎带; 在山体内为高阻层, 地电阻率值约 $300 \Omega \cdot m$, 因此该层应由下志留统变质岩构成的 F_3 断裂影响带。

测线 160~750 m 区段, 由上而下 0~10 m 为低阻层, 地电阻率约 $150 \Omega \cdot m$, 因此该层应由全新统冲洪积含碎石亚砂土、耕土构成; 10~40 m 为高阻层, 地电阻率值大于 $300 \Omega \cdot m$, 因此该层应由上更新统冲洪积碎石土构成; 40 m 以下为低阻层, 地电阻率值约 $150 \Omega \cdot m$, 应由中—上更新统冲洪积碎石土构成。

测线在 160 m 附近南北两侧地电阻率所揭示的挤压破碎带断逝及其上覆晚第四纪冲洪积物厚度的明显差异, 应是 F_3 全新世断裂最新活动断面的位置。断面倾向南, 由于测线与断层交角较小, 视倾角也较小。断层面对应地表恰好位于山前一级冲洪积扇断崖陡坎处。

(3) Gm_4-Gm_4 测线探测结果

测线 0~135 m 区段, 由上而下 0~10 m 为极高阻层, 地电阻率值约 $300 \Omega \cdot m$, 应由全新统冲洪积碎石土构成; 10 m 以下为低阻层, 地电阻率值约 $100 \Omega \cdot m$, 应由下志留统变质岩构成的 F_3 断裂强烈挤压破碎带构成, 宽度约 100~120 m。

测线 135~600 m 区段, 由上而下 0~15 m 为低阻层, 地电阻率约 $150 \Omega \cdot m$, 因此该层应由全新统圆砾土及亚砂土构成; 15~65 m 区段为高阻层, 地电阻率值约 $500 \Omega \cdot m$, 因此该层应由上更新统碎石土构成; 65 m 以下为低阻层, 地电阻率值约 $150 \Omega \cdot m$, 可能由中—上更新统含水碎石土及亚砂土构成。

可见在测线 135 m 附近, 其南北两侧地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_3 全新世断裂最新活动剖面的位置, 断面向南陡倾, 倾角约 85° 。该点附近可见 II 级及 II 级冲洪积阶地形成较明显的陡坎地貌。

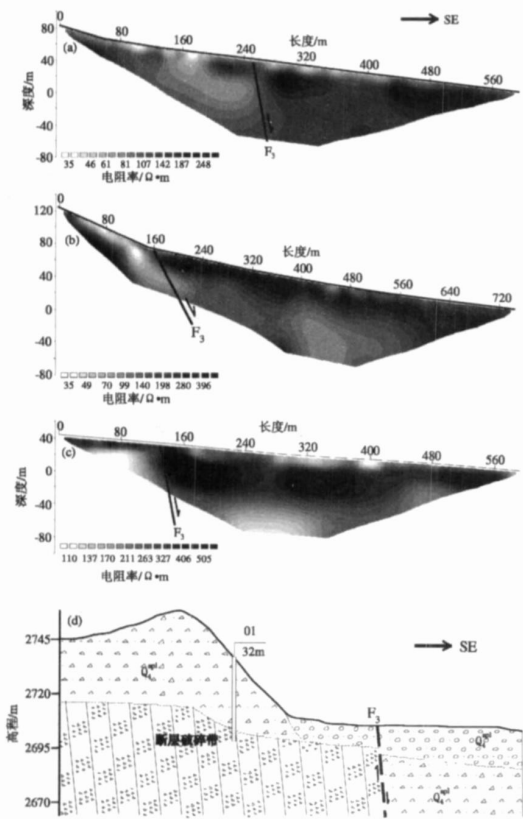


图 4 盆地西缘测线反演电阻率剖面及综合地质剖面
(a) Gm₂—Gm₂测线; (b) Gm₃—Gm₃测线;
(c) Gm₄—Gm₄测线; (d) 地质剖面

综合上述 3 条测线结果及钻孔资料, 我们绘制了盆地西缘雷公山东麓断裂综合地质剖面 (图 4 d), 该断裂断层走向呈锯齿状 (图 2 b), 它错动了山前 I 级冲洪积阶地及全新统至上更新统地层, 断距较大, 基岩破碎带较宽, 其新活动主要表现为断层附近原地连续沉降。

5 结论

由于测试地点位于祁连山区, 接地条件好,

干扰因素少, 测试数据采集稳定, 加上有钻孔资料作为电阻率剖面的解译参考, 整体测试效果较好, 测试反演电阻率剖面很好地反映了安远盆地边缘断层的位置及活动特征。根据综合解译结果, 安远盆地南缘断裂断错了晚更新世晚期以来的 III 级洪积阶地。盆地地区新活动表现为向安远拉分盆地方向迁移的阶梯状递减的张性正断裂性质。盆地西缘断层走向呈锯齿状, 错动山前 I 级冲洪积阶地及全新统至上更新统地层, 断距较大, 基岩破碎带较宽, 断层新活动主要表现为断层附近原地连续沉降。本次探测结果与区域地质考察所获得的断层活动性质基本一致, 表明结果可信, 可作为工程设计与建设的参考。

参考文献:

董浩斌 王传雷 . 2003 高密度电法的发展和应用 [J]. 地学前缘 10 (1): 171—176.
甘肃省地质局第一区域地质测量队 . 1972 J—48—X X V 天祝幅 1: 20万地质图及说明书 [R]. 兰州: 甘肃省地质局 .
国家地震局兰州地震研究所, 甘肃省计划委员会 . 1993 甘肃省地震危险区划研究 [M]. 兰州: 兰州大学出版社 .
国家地震局地质研究所, 国家地震局兰州地震研究所 . 1993 祁连山—河西走廊活动断裂系 [M]. 北京: 地震出版社 .
何文贵, 刘百箴, 吕太乙, 等 . 1996 天祝盆地边缘断层的全新世活动及盆地的演化与形成 [J]. 西北地震学报, 18 (1): 61—66.
李志祥, 毛先进, 韩明, 等 . 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.
王爱国 马巍, 张向红, 等 . 2006 隐伏断层电性特征及浅层电法探测 [J]. 西北地震学报, 28 (3): 242—247.
王爱国 马巍, 王大雁 . 2007 高密度电法不同电极排列方式的探测效果对比 [J]. 工程勘察, 35 (1): 72—75.
袁道阳 刘百箴, 吕太乙, 等 . 1996 毛毛山断裂带位移累积滑动亏损特征及其分段意义讨论 [J]. 西北地震学报, 18 (4): 59—67.
袁道阳 刘百箴, 吕太乙, 等 . 1997 利用黄土剖面的古土壤年龄研究毛毛山断裂的滑动速率 [J]. 地震地质, 19 (1): 1—8.

High-density Resistivity Surveying and the Features of Boundary Fault along the Edge of Anyuan Basin

WANG Aiguo^{1,2}, YANG Bihai, ZHOU Junxi

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

(2. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract

The south foot fault of Maomaoshan Mountain (F_1) and the north foot fault of Jinqianghe River Maomaoshan Mountain (F_2) develop along the edge of Anyuan Basin. We conducted high-density resistivity surveying combining with boring data across F_1 and F_2 . The results show that F_1 cut the 3rd terrace which formed in late Pleistocene, and the last activity was extensional normal slip by echelonment falling down toward the basin. F_2 stroke zigzag and cut the 1st alluvial proluvial terrace and Holocene stratum with large displacement of fault and wide fracture zone in bedrock, and the last activity is the continuous falling around the fault. The survey confirms the characteristics and locations of the faults along the basin edge, which provides the evidence for engineering stability evaluation and construction.

Key words: Anyuan Basin; high-density resistivity tomography; Maomaoshan Mountain fault; Jinqianghe River Maomaoshan fault; Gansu



温瑞智 中国地震局工程力学研究所信息技术与工程材料室主任、研究员,中国地震局新世纪百人计划人选。1994年毕业于大连理工大学工程力学系,获硕士学位。1999年毕业于中国地震局工程力学研究所,获博士学位,随即入哈尔滨工业大学力学博士后流动站和北京工业大学土木工程博士后流动站工作。中国地震学会会员、中国地理信息系统协会会员、加拿大土木工程协会会员、加拿大地震工程协会会员。主要从事强震动观测、断层对地震动影响、信息技术在防灾减灾领域中的应用等研究。



潘纪顺 中国地震局地球物理勘探中心高级工程师。2002年毕业于中国科学技术大学地球与空间科学学院固体地球物理学专业,获理学硕士学位。2007年毕业于中国地震局地球物理研究所固体地球物理学专业,获理学博士学位。主要从事浅层地震勘探、地震宽角折射、反射勘探、高分辨率折射地震勘探、火山监测、桩基检测等工作,主要研究方向是地震数据处理、地震成像与反演。



杜方 四川省地震局研究员。1992年毕业于武汉测绘科技大学,获硕士学位。主要从事现今地壳运动及动力学、前兆机理与地震预测方法等研究。



刘勇健 广东工业大学副教授。1993年毕业于成都理工学院油气地质与勘探专业,获工学硕士学位。现在中国科学院广州地球化学研究所地质构造专业攻读博士学位。主要从事岩土工程的教学与研究工作。



刘琼仙 云南省地震局高级工程师。1988年毕业于江苏工学院计算机及应用专业,获工学学士学位。主要从事强震动观测网络及信息的研究工作。



耿杰 山东省地震局副研究员。1985年毕业于山东科技大学地质系。主要从事地震分析预报与研究工作。



胡先明 四川省地震局高级工程师。1981年毕业于国家地震局天水地震学校地球物理专业,1988年毕业于中国科学技术大学地球物理专业。主要从事水库诱发地震研究和地下水观测等工作。



王爱国 中国地震局地震预测研究所兰州基地副研究员。1994年毕业于兰州大学地质系,2002年获中国地震局兰州地震研究所硕士学位。主要从事地震地质、工程地震及数值模拟等方面的研究工作。