

罗林,庄儒新,毛先进,等. 2023. 综合探测在小江断裂带中段西支海风园断层调查中的应用[J]. 地震研究, 46(3): 354–365, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0036.

Luo L, Zhuang R X, Mao X J, et al. 2023. Application of the comprehensive detection of the investigation of the Haifengyuan Fault in the west branch of the middle segment of the Xiaojiang Fault Zone[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(3): 354–365, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0036.

综合探测在小江断裂带中段西支海风园断层调查中的应用*

罗林, 庄儒新, 毛先进, 陈刚, 李鉴林, 谢巍

(云南省地震局, 云南昆明 650224)

摘要: 以位于阳宗海北部地区的小江断裂带中段西支次级海风园断层为研究对象, 综合利用遥感数据解译和高密度电法探测, 结合野外实地调查和探槽开挖验证等技术手段揭示研究断层的空间展布位置及构造特征。结果表明: ①海风园断层是一条贯通的结构单一的断层, 遥感影像上断层线性特征清晰, 宏观地貌显著, 沿断层发育断层槽地、线性山脊、断塞塘、水系位错等活动地貌, 具有强烈的左旋走滑运动特征; ②高密度电法测线反演剖面在断层破碎带附近的电性结构异常特征与探槽开挖验证确定的断层位置、断层破碎带宽度及断层倾向具有很好的 consistency, 断层总体走向为 N20°E, 倾向为 SE, 可识别破碎带宽度为 60 m, 结合野外地质调查发现海风园断层错断了上覆全新统坡积层, 晚第四纪活动特征强烈, 属于全新世活动断层, 建设工程需要依据断层宽度进行合理避让; ③在第四系覆盖区开展活动断层探测, 采用遥感定展布、物探定结构、地质定结论的综合技术手段, 避免了采用单一方法在深度、广度、精度方面的不足, 可极大地提高活动断层定位结果的准确性和可靠性。

关键词: 遥感技术; 高密度电法; 海风园断层; 小江断裂带

中图分类号: P315.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2023)03-0354-12

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0036

0 引言

活断层与地震灾害的关系密切, 并决定着多数破坏性地震的发生位置。地震发生时, 上覆地层中的断层位置易产生应力集中、释放现象, 加剧断层的发育, 在地表产生变形或开裂的可能, 对上部建(构)筑物造成破坏(邓起东等, 2003)。目前人类所掌握的科技水平及工程手段尚无法阻止地震断层错动对地面建筑物造成的直接破坏。例如, 1995年1月17日日本阪神7.2级地震的重灾区就集中在地震断层沿线, 90%以上的震亡人员、30%以上的木质结构房屋, 均分布在地震断层沿线1 km宽的范围内(Kircher, 1996)。

1999年9月21日中国台湾集集7.6级地震的发震断层——车笼埔断层的地表错动将建在其上及两侧十几米范围内几乎所有建筑物夷为平地, 而之外的建筑物结构则基本完好(李锡堤等, 2000)。2008年5月12日四川汶川8.0级地震, 在极震区凡是跨越地震断层的房屋、桥梁、道路以及其它构筑物, 无论有无抗震设计, 均被地震断层错断、倾覆、完全摧毁或严重破坏。其中, 地震断层穿过北川老县城时, 形成近100 m宽的完全毁灭带; 前山断裂穿过小渔洞阶区时, 形成宽度近26 m的完全毁灭地带(赵纪生等, 2009)。历史地震震害实例表明, 活动断层的突发性错动是产生地震的主要根源, 地震时沿断层迹线的建筑物破坏最为严重, 直接建在发震活动断层上的建筑物基本全

* 收稿日期: 2022-10-25.

基金项目: 云南省地震局青年地震科学基金项目(2020K03); 云南省地震局科技人员传帮带项目(CQ3-2021002)。

第一作者简介: 罗林(1991-), 工程师, 主要从事活动构造及工程物探研究. E-mail: 1091282610@qq.com.

部垮塌,人员伤亡也明显大于断层两侧的其它区域,远离活动断层的建筑物破坏则较轻(徐锡伟等,2011;郭婷婷等,2017;王琳等,2021)。因此,探明活断层的准确位置,使重大工程、生命线工程、住宅区等重要建筑设施主动、有效地避开具有发震能力的活断层,可有效地减轻未来可能遭遇的地震灾害损失。

小江断裂带是全国著名的区域性深大活动断裂带,具有活动性强、地震烈度高、地质灾害强等特点。阳宗海地区主要位于小江断裂带的中段西支部位,地质构造背景复杂,断裂与地震活动频繁,新构造运动强烈,1833年9月6日嵩明8级地震就发生在该区域断裂带上(Ren, 2013)。因此,本文以位于阳宗海北部地区的小江断裂带中段西支次级海风园断层作为研究对象。

建设场地避让活动断层的首要任务是进行活动断层鉴定。根据1:20万昆明幅和宜良幅区域地质资料及前人研究成果(宋方敏等,1998),结合工区地形地貌特征,可以初步确定研究断层的大致范围。因海风园断层附近第四系广泛覆盖,人类活动改造强烈,断裂带上的同震地表破裂难以保存,现存地表形迹大多已模糊不清,断层露头出露不明显,仅仅依靠野外地质调查来确定断层的空间位置、产状参数等存在困难。本文以遥感解译为整体控制性方法,利用高密度电法探测的技术手段对目标断层的地下结构特征进行精细探测,并结合野外地质调查和探槽开挖验证,识别和定位活动断层的空间位置、几何展布和构造特征,确定活动断层的破碎带宽度,为这一地区的规划和发展提供基础资料。

1 地质概况

小江断裂带地处青藏高原东南缘,其形成与发育历史悠久,是康滇古陆或南北地震带的组成之一,系川滇菱形地块与华南地块的边界断裂带(李西等,2018)。小江断裂带北起巧家以北,南至建水东南,全长约400 km,总体走向呈南北向(宋方敏等,1998)。Guo等(2021)将小江断裂带由北至南分为3段:北段在巧家至东川之间,仅有一条主干断裂;中段位于东川至抚仙湖一带,由东、西两条分支断裂构成;南段为抚仙湖以南

至建水盆地北侧,由多条分支断裂组成(图1a)。新构造运动以来,小江断裂带构造活动十分活跃,以强烈左旋走滑为特征,山脊、水系、地质地貌体等位移明显。多位学者通过对各种断错地质地貌现象及被错体年龄的分析,估算出小江断裂的滑动速率为2~16.5 mm/a(陈睿,李坪,1988;宋方敏等,1998;Wang, Burchfiel, 2000;何宏林等,2002;俞维贤等,2004;韩竹军等,2017;陈君贤等,2021),与GPS结果吻合(唐文清等,2006;闻学泽等,2011),走滑速率呈现由北到南逐渐变小的趋势。

小江断裂带上地震频发,强震丛集。历史记载最早的地震是1500年宜良7级地震,最大地震是1833年嵩明8级地震。最近500多年来已发生 $M \geq 6$ 地震16次,其中 $M \geq 7$ 地震4次、 $M 8$ 地震1次(国家地震局震害防御司,1995;闻学泽等,2011)。历史地震记录、古地震研究均表明小江断裂带晚第四纪以来活动十分强烈,是一条“壮年期”活动断裂(李西等,2018)。

本文研究区为小江断裂带中段西支,其内部结构较为复杂,主要是由一系列次级或更次级的剪切断层构成的复杂断裂系统(宋方敏等,1998)。区内展布的断层主要有海风园断层(f_1)、养殖场断裂(f_2)、姜家山—黎花庄断裂(f_3)、杨林—前所断层(f_4)、野猪箐断裂(f_5)(图1b)。其中海风园断层(f_1)和杨林—前所断层(f_4)属于小江断裂带西支次级剪切断层,是1833年嵩明8级地震地表破裂段,这些次级剪切断层晚第四纪活动强烈,全新世晚期的左旋走滑速率为3.1~9.5 mm/a(宋方敏等,1998),其余断裂均为早中更新世断裂(汪一鹏等,2013)。

海风园断层北起乌纳村东北,向南沿乌纳盆地东缘,经海风园和施家嘴,进入阳宗海湖盆中。断层延伸较短,陆上可见段长仅5 km,走向20°左右,倾向北西或南东,倾角50°以上。断层控制了不同时代地层的边界,东盘为二叠纪灰岩,西盘出露上新世红色黏土和褐色砾石层及第四纪冲、洪积和湖积层。由于区内地形起伏较大,整体地势中间高两侧低,中部为基岩山体,两侧为斜坡堆积,表层多被第四系松散沉积物所覆盖,覆盖层厚度不均匀,地表有低矮灌木和农作物,难以通过野外调查来

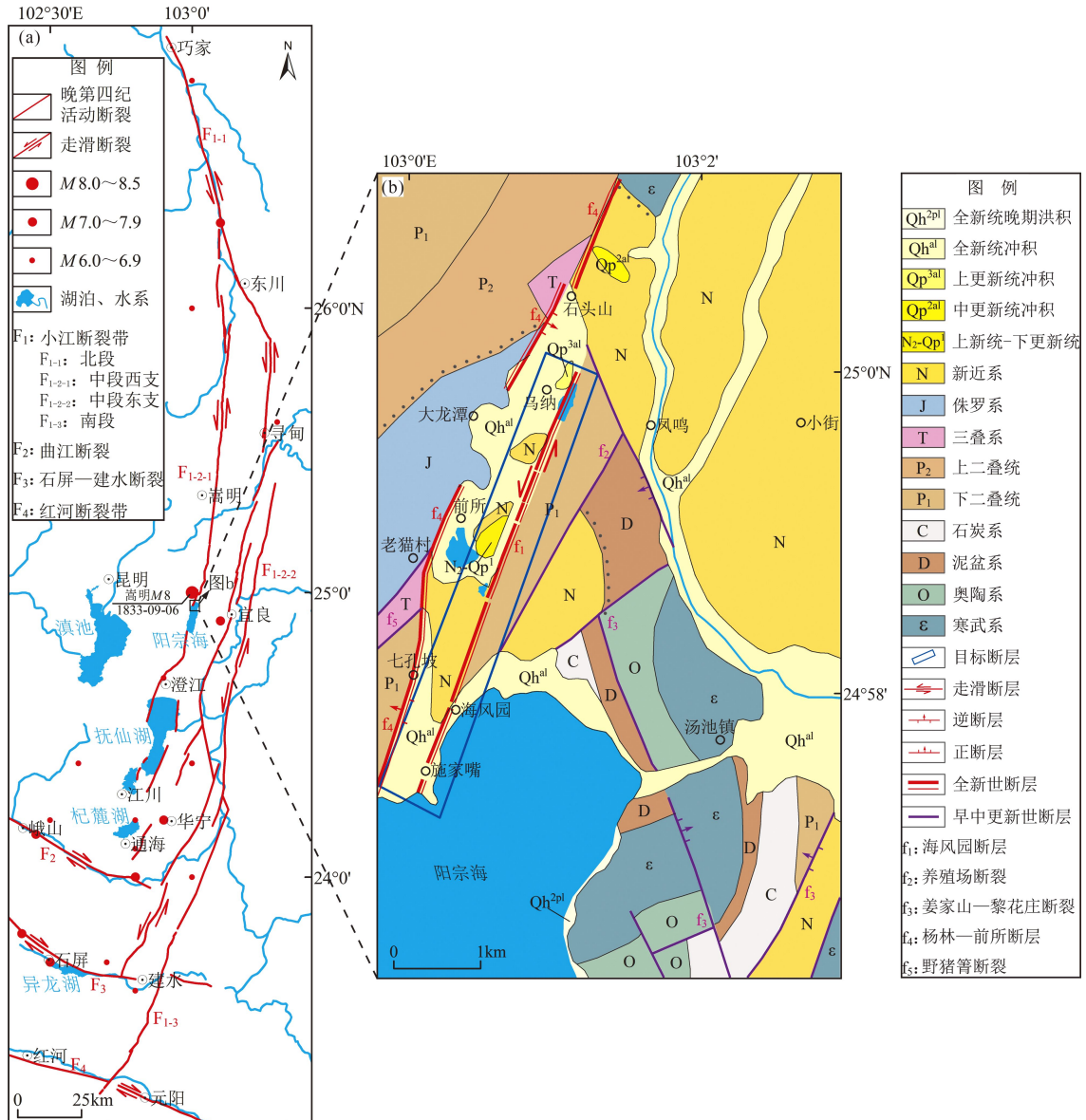


图1 小江断裂带及周边 $M \geq 6.0$ 地震分布 (a)、本文研究区地质构造简图 (b) (修改自汪一鹏等, 2013)

Fig. 1 Distribution of the $M \geq 6.0$ earthquakes in the Xiaojiang Fault Zone and its surrounding areas (a), schematic map of the geological structures in the study area (b) (modified from Wang *et al*, 2013)

准确判别目标断层的位置及破碎带宽度, 加大了活动断层识别的难度和精度。所以, 本文综合利用遥感解译和高密度电法探测的技术方法查找目标断层具体展布位置。

2 地质地貌调查

2.1 基于遥感技术的构造地貌调查

遥感技术具有影像覆盖面积广、信息量大、获取信息快等诸多特点。利用遥感技术可以获取大面积地表图像, 克服了传统断裂研究中野外考察耗费

大、周期长、局部性等不利因素, 提高工作效率。将遥感技术与构造地貌学方法相结合, 可以对活动断裂第四纪以来的构造地貌特征进行研究, 从而对断裂活动性进行定性分析与定量评价 (Kaya *et al*, 2004; 谢小平等, 2019)。本文基于对 ASTER GDEM、Google Earth 等多源遥感数据的处理, 结合遥感数据的色调异常、微地貌特征、水系和纹理特征等, 从宏观上解译海风园断层的几何结构和空间展布特征; 结合野外实地调查的方法, 获取活动断层的分布位置及几何展布形态, 进而分析断层的活动状态及其性质。

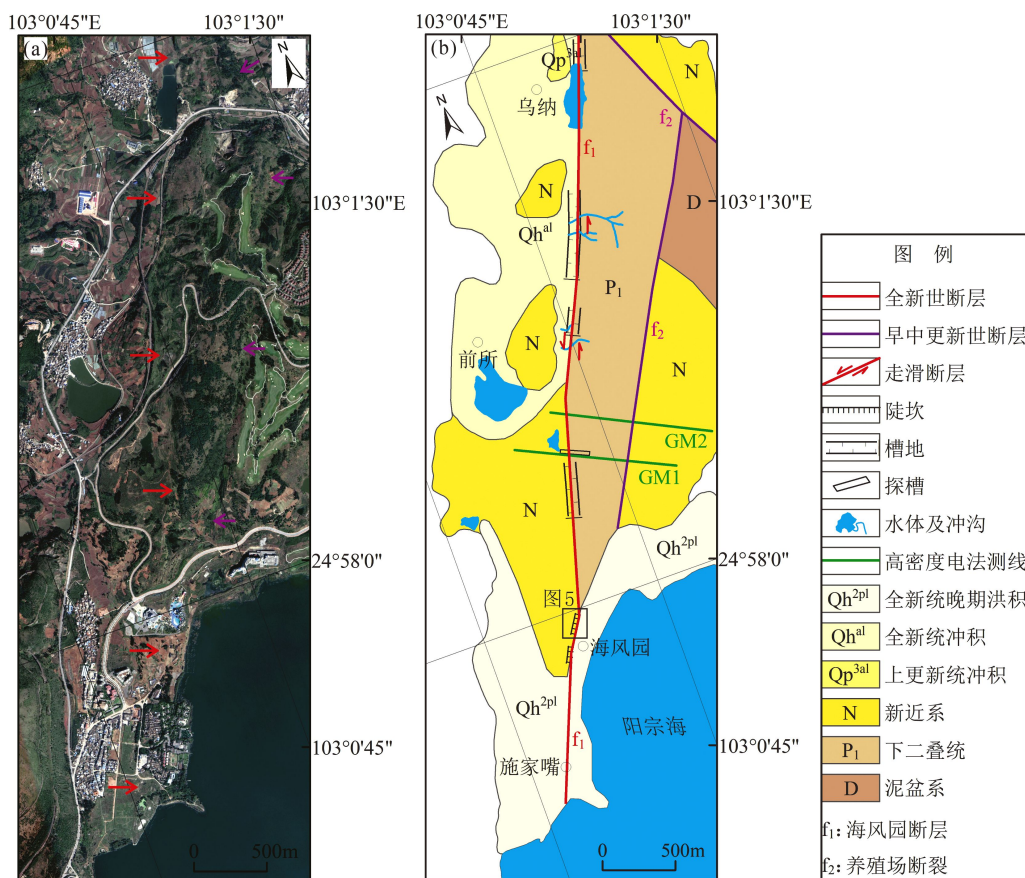


图2 研究区遥感影像 (a) 及其解译图 (b)

Fig. 2 A remote-sensing image of the study area (a) and its interpretation map (b)

在遥感影像上活动断裂一般界线清晰, 呈连续展布, 与两侧的色调有较大的差异, 可快速圈定活动断层的发育范围和延伸方向。从图 2a 可见, 海风园断层线性特征清楚, 且连续分布, 表现为一条贯通的、单一的断层构造, 长度约 5 km, 走向约 N20°E, 断层迹线直观并且明确。养殖场断裂位于研究区中东部, 在遥感影像上其断层迹线并非表现为单一线性, 局部存在折弯, 北段有分叉, 南段地貌线性特征清晰, 为早中更新世断裂 (汪一鹏等, 2013)。从图 2b 可见, 在遥感影像上海风园断层地貌清楚, 主要表现形式有断层槽地、线性山脊、断塞塘、陡坎等。养殖场断裂主要表现为断层沟槽地貌。

通过各种构造微地貌的综合分析, 可以明确活动断层的平面几何形态、结构特征以及运动性质等 (图 3)。海风园断层延伸长度虽短, 但在断层伸展方向上也有地质体发生明显的水平位移现象。如在前所村东侧及北东一带, 可见多条冲沟横跨断层出现同步左旋位错, 在图 3b 中每个冲沟

位错特征十分清晰, 其中最大左旋位移约 50 m, 最小左旋位移约 10 m。这些被位错的冲沟都是延伸长度不大、无阶地发育的 V 型小沟, 其形成时代应为全新世中、晚期, 因此反映了断层全新世中晚期以来的左旋运动特征 (宋方敏等, 1998)。

现场调查发现, 在海风园断层走向延伸方向上可见清楚的断层槽地, 且呈现断断续续的线性排列。断层槽地是断层活动过程中, 沿断裂带的物质被错动变疏松, 之后易受冲刷搬运而形成, 一般位于断层通过的山脚、地形斜坡或台地等部位。如在海风园北东一带断层主要表现为槽地地貌, 槽地长约 30 m, 宽约 15 m, 断层顺槽地发育, 形成笔直的断层槽地地貌 (图 4a)。在前所村东侧及北东一带可见明显的 NE 向狭长槽地, 沟槽基本连续, 断层顺槽地发育, 地貌上形成清楚且连续分布的线性断层槽或断层谷 (图 4b), 主要是由断层多期次错动而形成。

断塞塘是地震时地面拉张陷落, 后期在下陷部位形成积水或无积水的洼地 (宋方敏等,

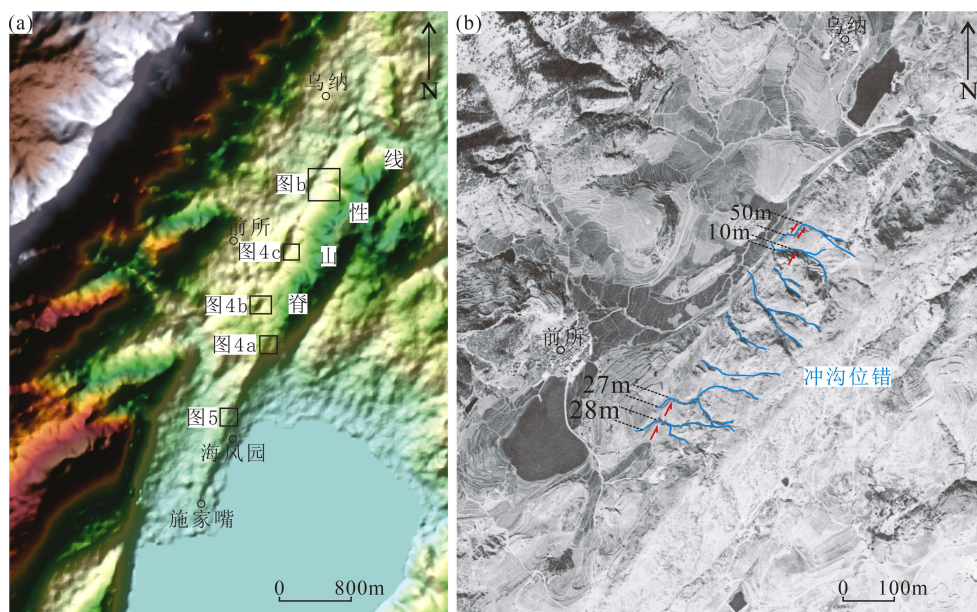


图3 研究区山体阴影图 (a) 以及成像于 20 世纪六七十年代的历史航片图 (b)

Fig. 3 The hillshade map of the study area (a) and the historical aerial photos taken in the 1960s and 1970s (b)



图4 海风园断层构造地貌照片

Fig. 4 The typical tectonic landform photos of the Haifengyuan Fault

1998)。沿海风园断层进行追索,可见多个低洼地形和浅水塘呈线性分布,地形地貌特征明显。如在前所村南东方向约 500 m 处发现一积水的断塞塘,长约 100 m、宽约 70 m,常年积水无干涸现象(图 4c)。在断塞塘东侧约 100 m 的缓斜坡上可见显著的线性山脊(图 3a、4d)。据 ASTER GDEM 数据分析结果显示(图 3a),基岩山脊表现出明显的线性影像特征,从基岩山地到断塞

塘,地形变化急剧,海拔从约 1 950 m 迅速降到 1 820 m,构成了基岩与第四纪坡积物的界线,反映断层除了有走滑运动分量外,垂直运动分量也很明显。另外,有些断塞塘发育在较宽的断裂槽地中,构成了明显的低洼沉积区。如在前所村东侧展布的断层槽地中见到一处已干涸的小型断塞塘(图 4b),形成的干涸洼地地形相对更低,地貌特征极为醒目。

2.2 第四系断错剖面

根据遥感数据对研究断层空间展布特征的解译结果,沿断层展布方向进行野外地质调查,在海风园附近的一处陡坎上发现1个错断晚第四纪地层的断层剖面(图5),剖面坐标为(24.964°N,103.005°E)。该剖面出露的地层层序根据岩性特征自下而上主要划分为:①砾砂层,为冲洪积堆积物(Q_3^{pl}),棕黄色-褐黄色,砾石大小混杂,未见明显层理,分选一般,磨圆度中等,次棱角-次圆状,砾石空隙可见黏土物质充填,少量由砂类土充填,该层厚度较大,未揭穿底界;②黏土层,疑似湖积层(Q_3^l),褐红色-褐色,整体呈条带状展布,部分呈透镜体状延伸,在砾砂层中逐渐尖灭,厚度不等;③表土层,为全新世堆积物(Q_4^{dl}),棕褐色-浅红色,表层松散,易垮塌,混杂结构,植物根系发育,夹有大量的草根。

从图5b可见3条主干断层及1条分支断层发育,主干断层近平行排列,其产状分别为:10°/NW \angle 65°(f_{1-1}),15°/NW \angle 80°(f_{1-2}),12°/NW \angle 85°(f_{1-3})。 f_{1-1} 发育在砾砂层之中,被上覆表土层覆盖,主干断层向上出现分叉,左侧分支断层具有明显的逆冲性质,错断黏土层,右侧分支断层消失在砾砂层内,表明 f_{1-1} 在黏土层形成之后到表土层形成之前活动。 f_{1-2} 发育在砾砂层之内,并且向上延伸进入表土层,但未断错上覆的表土层,根据断层两侧被错断的黏土层,说明 f_{1-2} 为逆断层性质,错距约0.5 m,剖面上 f_{1-2} 的活动特征可以反映海风园断层的最新活动时代。 f_{1-3} 发育在砾砂层之内,并未延伸进入上覆表土层,根据断层附近黏土层发生的牵引变形特征,说明 f_{1-3} 为正断层性质,错距约0.2 m,其形成时代至少为黏土层形成之后到表土层形成之前。

在倾角近直立的情况下地表表现形式受多种因素的影响,其垂向运动方式可以表现出逆断层和正断层性质(哈广浩等,2022),可能与较复杂的断裂带几何分布有关(闻学泽等,2011)。整个断层剖面表明,海风园断层活动切割了全新统坡积或冲洪积层,直达表土层,虽未直通地表但表层仅覆盖有较薄的现代耕植土,说明晚第四纪以来断层活动强烈,属于全新世活动断层。

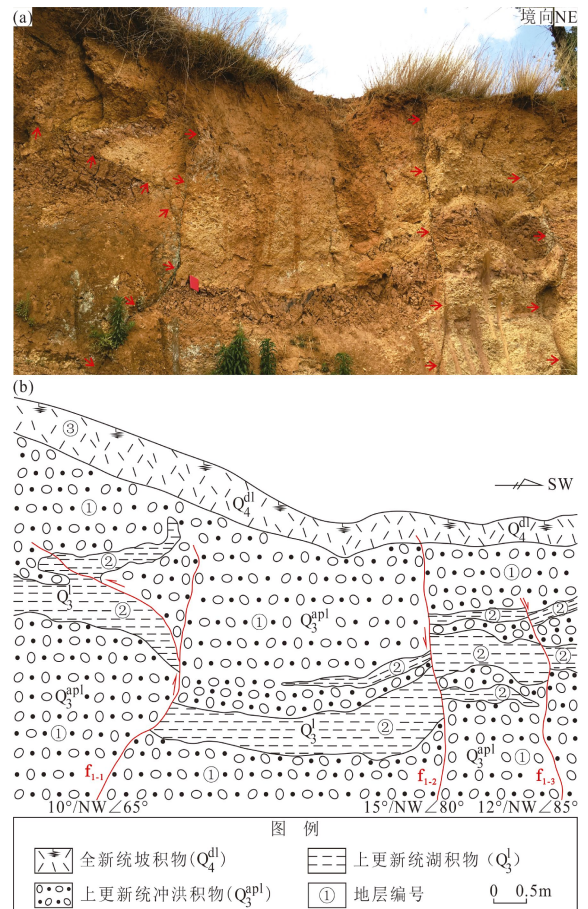


图5 海风园附近断层出露剖面(a)与素描图(b)

Fig. 5 Profile (a) and sketch map (b) of the fault outcrop near Haifengyuan Village

3 高密度电法探测

3.1 地球物理条件

高密度电法作为一种有效的地球物理探测方法,同时具备电阻率剖面和测深测量功能,具有采集信息量大、观测精度高、探测速度快和解释方便等优点,在隐伏断裂探测方面已有很多应用实例,并取得了很好的效果(李清林等,2006;朱涛等,2012;戚帮申等,2019)。

高密度电法是以岩土体导电性的差异为基础,研究人工建立的稳定电场在地下传导电流的分布规律。根据1:20万昆明幅和宜良幅区域地质资料和现场实地调查,测区附近发育的地层主要有二叠系和新近系,其中,二叠系以灰岩为主,新近系岩性主要是红色黏土和褐色砾石层,以及第四纪冲积、洪积和湖积层。断层带两侧地

层电性差异或断层破碎带与周围地层电性差异是识别断层的主要标志(朱涛等, 2009; 吴教兵等, 2019)。因此, 测区内不同地层岩性的电阻率物性特征存在明显的差异, 满足开展高密度电法勘探研究所需要的前提条件。为准确限定研究断层的空间位置, 在遥感影像解译断层大体空间位置的基础上, 跨断层布设了 2 条近似平行的高密度电法探测线。结合场地实况, 测线按照近东西向布设, 且与研究断层走向近似垂直(图 2b)。2 条测线均采用温纳排列系统进行观测, 每条测线实接电极数为 120 道, 电极间距 10 m, 测线总长均为 1 200 m。

3.2 物探成果及地质解释

测区地形起伏明显, 故对原始数据进行了地形校正。根据野外观测数据, 对实测原始数据进行处理, 采用相同的电阻率色标及其对数等值线对所有的剖面线进行反演, 便于 2 条测线反演结果的对比分析。

测线 1 (GM1) 高密度电法反演剖面显示(图 6a): 剖面中部的视电阻率值高于其左右两侧, 左右两侧区域的电阻率为 $6.63 \sim 73.1 \Omega \cdot \text{m}$, 推测为新近系黏土; 中部区域的电阻率为 $163 \sim 1\,797 \Omega \cdot \text{m}$, 现场调查发现中部山体上覆盖层较薄, 多处基岩出露, 风化程度低, 主要为下二叠统灰岩的电阻率反映。在剖面桩号 390 ~ 460 m 处, 出现大规模不规则低阻异常体圈闭现象, 异常区轮廓结构清晰, 显示为向下延伸较深且陡立的低阻异常区, 视电阻率为 $6.63 \sim 32.9 \Omega \cdot \text{m}$, 且与其左右两侧电阻率值差异巨大; 视电阻率值变化陡峭形成梯度带, 形成“两高夹一低”的现象(朱涛等, 2009), 推测为海风园断层的电阻率异常反映, 其视倾向为 SE, 视倾角约为 60° , 上断点埋深接近地表, 破碎带宽度约为 70 m。在剖面桩号 870 ~ 930 m 处, 存在一个明显的低阻异常区, 视电阻率为 $6.63 \sim 32.9 \Omega \cdot \text{m}$, 浅层异常中心发生圈闭, 深部异常一直延伸到剖面底部, 并且与其左侧电阻率值差异变化明显, 表现出明显的高-低阻异常现象; 现场调查为负地形地貌, 推测为养殖场断裂的电阻率异常反映, 其视倾向为 SE, 视倾角约为 40° , 上断点埋深接近地表。

测线 2 (GM2) 高密度电法反演剖面显示(图 6b): 左右两侧为低阻区, 视电阻率为 $7.80 \sim$

$109 \Omega \cdot \text{m}$, 推测为新近系黏土的电性显示; 中部处于高阻区, 视电阻率为 $210 \sim 783 \Omega \cdot \text{m}$, 主要与近地表出露的灰岩有关。剖面桩号 140 ~ 190 m 处, 存在一个明显的低阻异常区, 异常区轮廓结构清晰, 异常结构相对稳定, 异常现象从浅部一直延伸到剖面底部, 视电阻率为 $7.80 \sim 29.1 \Omega \cdot \text{m}$, 与其左右两侧电阻率差异巨大, 视电阻率变化陡峭形成梯度带, 具有中间低阻两侧高阻的特征, 形成“两高夹一低”的现象(朱涛等, 2009), 推测为海风园断层的电阻率异常反映, 其视倾向为 SE, 视倾角约为 70° , 上断点埋深接近地表, 破碎带宽度约为 50 m。在测线剖面桩号 680 ~ 760 m 附近, 存在一个明显的低阻异常区, 视电阻率为 $7.80 \sim 29.1 \Omega \cdot \text{m}$; 上部异常中心发生圈闭, 深部异常一直延伸到剖面底部, 与其左侧电阻率值差异变化明显, 表现出明显的高-低电阻异常现象, 并且为负地形地貌, 推测为养殖场断裂的电阻率异常反映, 其视倾向为 SE, 视倾角约为 40° , 上断点埋深接近地表。

4 探槽验证与分析

4.1 探槽验证

为了验证高密度电法探测结果的可靠性, 在测线 1 (GM1) 剖面桩号 390 ~ 460 m 的低电阻异常关键部位布设了一个大型探槽, 以确定研究断层的存在、精确定位断层的空间位置及断层断错最新地层的情况。探槽走向为 SEE, 与电法测线平行并且与目标断层走向垂直, 探槽位置见图 2b。

为了能精细地分析和表征断层的最新活动特征, 依据探槽所揭示的沉积结构和断层出露情况, 选取探槽中主干断层出露的重点区段进行描述(图 7)。通过探槽 N 壁和 S 壁揭露的地层对比划分, 主要出露的地层分为: ①褐黄色表土层, 为现代松散堆积物 (Q_4^{dl}), 厚度约 0.3 m, 植物根系发育; ②灰白色砂砾层 (Q_3^{sl}), 分选性和磨圆度一般, 砾石空隙为黏土物质充填, 局部地段相变为砂土, 探槽开挖未揭穿底界; ③褐红色黏土层 (N_2), 因失水收缩强烈, 故土层表面收缩, 裂隙发育, 完整性较差, 探槽开挖未揭穿底界。

探槽剖面中间为主干断层经过区域, 在探槽 N、S 两壁上主干断层相互连通, 断层行迹非常清晰,

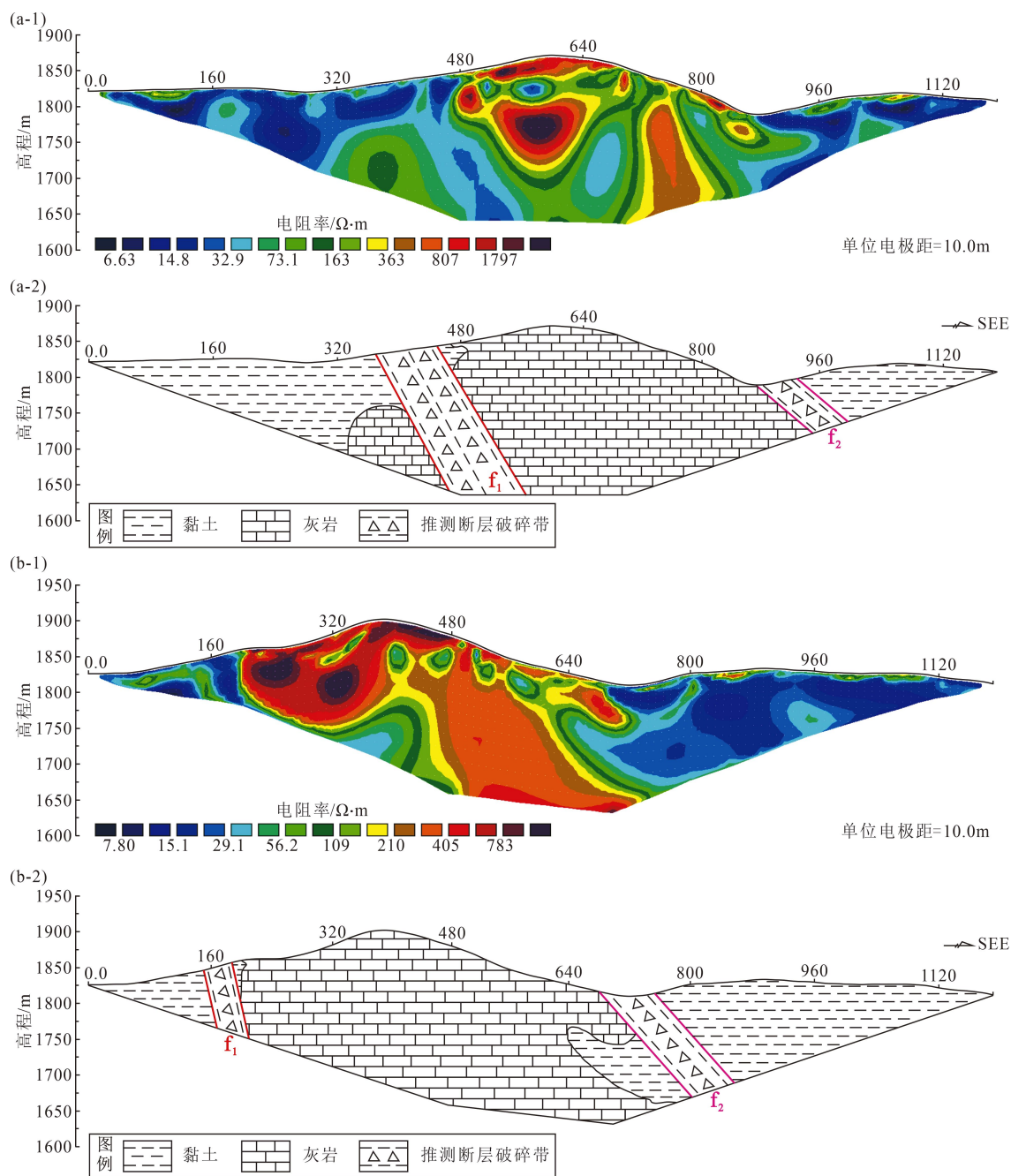


图6 测线1 (a) 和测线2 (b) 高密度电法反演剖面及地质解释推断结果

Fig. 6 Profiles inverted by the High-density Resistivity Method and inference maps of Line 1 (a) and Line 2 (b) by geological interpretation

断层产状为 $17^{\circ}/SE \angle 50^{\circ}$ 。断层面附近见灰黑色淤泥质土发育并具有强烈的扰动和变形现象，灰黑色断层泥带向上延伸进入上覆表土层，接近于地表，错断上覆全新统坡积物。通过断层与第四纪覆盖层之间的错断关系，可用于约束断层活动的最新时代，再次说明海风园断层为全新世活动断层。

探槽内主干断层出露点在地形地貌上因人类

改造强烈，但隐约显示出横切斜坡地形发育的微型陡坎地貌，具有反向逆冲陡坎的性质特征，与剖面上断层导致的地层挤压变形呈上冲形态相呼应，表现为新近系褐红色黏土层逆冲在第四系砾砂层之上。因此，根据地表构造地貌形态及剖面地层变形特征，判断海风园断层最新活动特征表现为逆冲性质的断层。但本文没有对剖面上断层

的活动年代进行精确的测年,从而无法精确约束断层活动的最新时代。经探槽验证,高密度电法测线反演剖面在断层破碎带附近的电性结构异常特征与探槽剖面揭露的地质特征大体上是一致的,

能够完好地控制海风园断层的空间展布特征及空间位置。不难看出,电性结构异常位置与断层出露位置一致,并且电阻率异常区倾向与主干断层倾向相同。

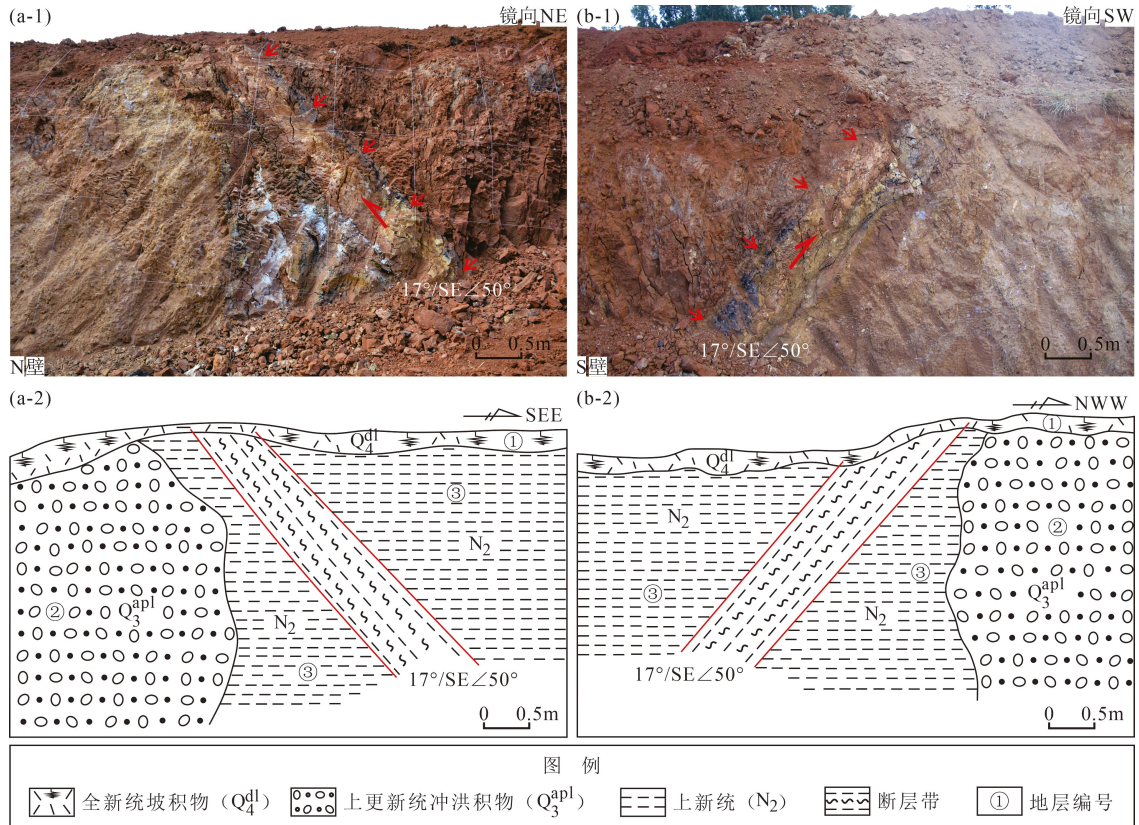


图 7 探槽 N 壁 (a) 和 S 壁 (b) 揭露的断层剖面

Fig. 7 Fault profile exposed by the north wall (a) and the south wall (b) of the trench

4.2 综合对比分析

经过遥感影像和 DEM 数据联合解析可知,海风园断层是一条贯通的、由单条断层构成的平直断层构造。遥感影像上断层线性特征清晰,连续性较好,宏观地貌显著,沿断层发育断层槽地、线性山脊、断塞塘、水系位错等活动地貌,这些构造地貌单元均指示了断层的展布位置。利用遥感影像快速解译明确了海风园断层的穿越位置,有效圈定了断层的展布范围,缩小了调查区域,为后续的野外地质调查和进一步的高密度电法精细化探测起到了关键作用。

本文利用 2 条测线组成平行测线组,测线所处的总体地质环境相近,周围干扰因素较少,探测条件相同,获取控制同一断层的电性剖面在相似位置都出现低阻异常反应,异常位置可以相互对

比和补充,避免了单一测线的局限性,能够有效反映断层构造的相关地质参数。通过 2 条电法测线反演的断面图可知,电法探测对断层构造展布位置和大致倾向反映较为一致,异常形态和异常结构特征较为明显。海风园断层破碎带宽度为 50 ~ 70 m,视倾向为 SE,视倾角为 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$;养殖场断层视倾向为 SE,视倾角为 40° 。根据 2 条测线剖面上电阻率异常位置的对应关系,构成断层的延伸方向,可确定出断层的空间展布特征。海风园断层在测线 1 上出露的位置为桩号 390 ~ 460 m 处,延伸到测线 2 上出露的位置在桩号 140 ~ 190 m 处,走向近似为 $N20^{\circ}E$ 。养殖场断层在测线 1 上出露的位置为桩号 870 ~ 930 m 处,延伸到测线 2 上出露的位置在桩号 680 ~ 760 m 处,走向近似为 $N30^{\circ}E$ 。高密度电法确定的断层走向与遥感解译结果较一

致,直观地指示了目标断层在地表的投影位置。所以,高密度电法进一步查明了海风园断层的位置、破碎带范围、产状及其浅部结构特征,具有较好的勘探效果。

根据探槽开挖验证,结合剖面揭露的断层信息以及断层切、盖地层关系分析,探槽剖面上主干断层倾向为SE,倾角为 50° ,实测倾角与高密度电法探测解译结果有一定的偏差(罗登贵等,2014)。但是探槽剖面地质特征与高密度电法探测剖面中显示的在断层破碎带附近的电性结构间断面位置是大体一致的,能够准确地控制海风园断层的空间展布特征及位置。同时,经过仔细清理和详细观察整个探槽剖面,可见多条分支及次级小断层,主要位于主干断层两侧。多条分支小断层与主干断层走向大致相同,沿主干断层呈平行条带状分布,识别出包括主干断层、分支或次级断层在内的宽度约60 m的变形带,与高密度电法反演剖面解译的低阻异常区域较一致。因此,探槽开挖结果进一步证实了高密度电法在探测断层位置、划分破碎带范围以及精细显示断层浅部结构特征方面的可靠性和高效性。

理论与实践表明,在第四系覆盖地区开展活动断层探测应充分利用多种技术手段,遵循“先整体后局部、先粗略后精细,多种技术结合使用、互相验证、互相补充、互相约束”的综合探测体系要求。各种技术手段的组合应该按照以下原则,全面、准确地进行活动断层探测:

(1) 整体探测。利用遥感技术快速、高效的特点对目标断层可能存在的区域进行整体探测,快速识别活动断层在沟谷、斜坡、基岩、堆积体等不同地貌上的表现特征,控制断层的宏观走向,有效圈定断裂的位置与范围,缩小调查区域。

(2) 局部精细探测。利用高密度电法野外工作便利、效率高、成本较低、受地形影响小等优点,对活动断层可能存在的重点区域进行精细探测,揭示活动断层的浅部电性特性和电性结构,进而准确查明断层的中心位置,划分出断层破碎带的宽度范围。

(3) 地质调查。针对物探异常区选择最适合开挖探槽验证的关键位置,采用探槽揭露法来进一步确定目标断层的位置、规模和产状,验证物探解译的活动断层与破碎带宽度是否与实际相符,

提高探测结果的可靠性。

遵循上述体系原则,活断层判识采用“遥感定展布、物探定结构、地质定结论”的技术体系进行综合研究是完全可行的。不仅考虑到每一种技术方法具有不同的探测优势、工作效率和成本;而且可以避免单一方法的多解性,实现优势互补,相互佐证,达到最佳组合方式;又能有效地减少探槽开挖的工作量,大幅度降低人员的劳动强度,保证了第四系覆盖区活动断层探测结果的准确性和可靠性,取得良好的勘探效果。

5 结论

通过对小江断裂带中段西支海风园断层进行多源遥感数据解译和高密度电法探测,并结合野外实地调查、探槽开挖验证以及综合对比分析,得到以下结论:

(1) 多源遥感数据解译与野外地质地貌调查结果表明,海风园断层基本上是一条贯通的单一断层构造,北起乌纳村东北,向南经海风园、施家嘴,然后进入阳宗海湖盆中,断层延伸较短,陆上可见段长仅5 km。断层地表活动形迹明显,连续性强,遥感影像上断层线性特征清晰,宏观地貌显著,沿断层发育断层槽地、线性山脊、断塞塘、水系左旋位错等活动地貌。现场调查断层出露剖面显示,最新的断层活动切割了上覆全新统坡积层,直达表土层,虽未直通地表但表层仅覆盖有较薄的现代耕植土,说明晚第四纪以来断层活动特征明显,为全新世活动断层。

(2) 2条高密度电法测线探测结果显示,海风园断层在2条电性剖面的相似位置都出现低阻异常区,异常位置可以相互对比和补充,表现出较强的整体性差异,避免了单一测线的局限性,基本上控制了海风园断层的展布位置及空间形态特征。断层总体走向具有很好的一致性,近似为 $N20^{\circ}E$,倾向为SE,视倾角约为 60° ,破碎带宽度为50~70 m,解译结果显示断层上断点已接近地表。经过探槽开挖验证,探槽剖面地质特征与高密度电法探测剖面中显示的在断层破碎带附近的电性结构异常空间分布特征相互对应,进一步探明了目标断层的具体位置。探槽剖面上揭示出多条分支断层与主干断层走向大致相同,沿主断层呈长条带

状分布,主断层两侧可识别的变形带宽度约 60 m。主干断层反映了目标断层的最新活动特征,其倾向为 SE,倾角为 50° ,错断了上覆全新统坡积层,上断点埋深接近地表,具有逆断性质。运用高密度电法探测和探槽开挖验证,精确厘定了海风园断层及其破碎带的具体位置、几何展布特征以及最新活动方式,可为合理、有效避让活动断层提供科学依据。

鉴于人类活动改造和植被覆盖等因素的影响,在隐伏活动断层进行工程避让之前,首先应查明隐伏断层的空间展布特征。采用“遥感定展布、物探定结构、地质定结论”的技术手段进行综合研究是完全可行的,可极大地提高活动断层空间定位和断层活动性鉴定结果的准确性和可靠性,又能有效地提高工作效率和工作成本,可以在实际生产活动中推广应用。

参考文献:

- 陈君贤,韩竹军,程捷. 2021. 小江断裂带南段新寨盆地新构造运动特征[J]. 华南地震,41(3):82-91.
- 陈睿,李坪. 1988. 小江西支断裂的滑动速率与强震重复周期[J]. 地震地质,10(2):1-13.
- 邓起东,徐锡伟,张先康,等. 2003. 城市活动断裂探测的方法和技术[J]. 地学前缘,10(1):93-104.
- 郭婷婷,徐锡伟,于贵华,等. 2017. 活动断层及其“避让带”宽度的研究历史与现状[J]. 地球物理学进展,32(5):1893-1900.
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪-公元 1911 年)[M]. 北京:地震出版社.
- 哈广浩,朱孟浩,闵伟,等. 2022. 河西走廊西端花海断裂晚第四纪活动特征[J]. 地震工程学报,44(3):592-604.
- 韩竹军,董绍鹏,毛泽斌,等. 2017. 小江断裂带南段全新世活动的地质地貌证据与滑动速率[J]. 地震地质,39(1):1-19.
- 何宏林,池田安隆,宋方敏,等. 2002. 小江断裂带第四纪晚期左旋走滑速率及其构造意义[J]. 地震地质,24(1):14-26.
- 李清林,秦建增,谢汝一,等. 2006. 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,28(4):589-596.
- 李西,冉勇康,吴富晓,等. 2018. 小江断裂带西支晚第四纪强震破裂特征[J]. 地震地质,40(6):1179-1203.
- 李锡堤,康耿豪,郑锦桐,等. 2000. 9·21 集集大地震之地表破裂及地盘变形现象[J]. 地工技术,81:5-16.
- 罗登贵,刘江平,王京,等. 2014. 活动断层高密度电法响应特征与应用研究[J]. 地球物理学进展,29(4):1920-1925.
- 戚帮申,丰成君,谭成轩,等. 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.
- 宋方敏,汪一鹏,俞维贤,等. 1998. 小江活动断裂带[M]. 北京:地震出版社.
- 唐文清,刘宇平,陈智梁,等. 2006. 云南小江断裂中南段现今活动特征[J]. 沉积与特提斯地质,26(2):21-24.
- 汪一鹏,宋方敏,曹忠权,等. 2013. 小江活动断裂带地质图(1:50000)[M]. 北京:地震出版社.
- 王琳,罗浩洁,杨天青,等. 2021. 2019 年贵州沿河 $M_s4.9$ 级地震烈度调查与震害特征[J]. 华南地震,41(3):132-140.
- 闻学泽,杜方,龙锋,等. 2011. 小江和曲江—石屏两断裂系统的构造动力学与强震序列的关联性[J]. 中国科学:地球科学,41(5):713-724.
- 吴教兵,高鹏飞,陆俊宏,等. 2019. 综合物探方法在广西柳州隐伏断裂探测中的应用[J]. 地质与勘探,55(4):1026-1035.
- 谢小平,白毛伟,陈芝聪,等. 2019. 龙门山断裂带北东段活动断裂的遥感影像解译及构造活动性分析[J]. 国土资源遥感,31(1):237-246.
- 徐锡伟,赵伯明,马胜利,等. 2011. 活动断层地震灾害预测方法与应用[M]. 北京:科学出版社.
- 俞维贤,汪一鹏,王彬,等. 2004. 云南小江西支断裂古地震及现今地震危险性研究[J]. 地震研究,27(S1):29-32.
- 赵纪生,吴景发,师黎静,等. 2009. 汶川地震地表破裂周围建筑物重建的避让距离[J]. 地震工程与工程振动,29(6):96-101.
- 朱涛,冯锐,周建国,等. 2009. 利用电成像结果推断隐伏断裂的方法及其典型形式[J]. 地震地质,31(1):34-43.
- 朱涛,周建国,沈坤,等. 2012. 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,34(3):467-476.
- Guo P, Han Z J, Dong S P, et al. 2021. Latest Quaternary active faulting and paleoearthquakes on the southern segment of the Xiaojiang fault zone, SE Tibetan plateau[J]. Lithosphere, (1):1-17.
- Kaya S, Müftüoğlu O, Tüysüz O. 2004. Tracing the geometry of an active fault using remote sensing and digital elevation model: Ganos segment, North Anatolian Fault zone, Turkey[J]. International Journal of Remote Sensing, 25(19):3843-3855.
- Kircher C A. 1996. The Kobe Earthquake: Ground shaking, damage and loss[C]//ASCE Structures Congress. Washington DC: American Society of Civil Engineers.
- Ren Z K. 2013. Geometry and deformation features of the most recent coseismic surface ruptures along the Xiaojiang Fault and its tectonic implications for the Tibetan plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 77(15):21-30.
- Wang E Q, Burchfiel B C. 2000. Late Cenozoic to Holocene deformation in southwestern Sichuan and adjacent Yunnan, China, and its role in formation of the southeastern part of the Tibetan Plateau[J]. Geological Society of America Bulletin, 112(3):413-423.

Application of the Comprehensive Detection of the Investigation of the Haifengyuan Fault in the West Branch of the Middle Segment of the Xiaojiang Fault Zone

LUO Lin, ZHUANG Ruxin, MAO Xianjin, CHEN Gang, LI Jianlin, XIE Wei
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

The secondary Haifengyuan Fault in the west branch of the middle section of the Xiaojiang Fault Zone in the northern part of Yangzonghai is selected as the research sample. By interpretation of the multi-source, remote-sensing data and the high-density electrical detection, together with field investigation and trench excavation verification, the spatial distribution and structural characteristics of the target fault are revealed. Results show that: ①The Haifengyuan Fault is basically a straight and single fault. The linear characteristics of the fault on the remote sensing image are clear, and the macroscopic geomorphology is obvious. There are active landforms such as fault troughs, linear ridges, fault plug ponds, and water system dislocations along the fault. The fault is characterized as a sinistral strike slip movement. ②The electrical structure anomaly of the inverted profile of the high-density electrical survey line near the fault-fracture zone are in good agreement with the location, the fracture-zone width and the dip of the fault confirmed by trench excavation. The overall strike of the fault is N20°E and the dip is SE, and the width of the fracture zone can be identified as 60 m. The geological survey finds that the Haifengyuan Fault faulted the overlying Holocene diluvium, showing significant active characteristics in the late Quaternary. The Haifengyuan Fault belongs to the Holocene active fault, which must be kept away from by the construction projects. ③To carry out an active-fault detection in quaternary-covered area, it is advisable to take the comprehensive technical means of remote sensing and geophysical exploration, to determine the distribution and structure of the fault and then draw a conclusion in a geological way. Thus, the accuracy and reliability of active-fault location can be greatly improved.

Keywords: remote sensing; high-density electrical method; the Haifengyuan Fault; the Xiaojiang Fault Zone