

谢兴隆,马雪梅,陈军,等.白龙江流域隐伏活断层的电性特征研究及分类[J].地震工程学报,2021,43(3):615-622.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.615

XIE Xinglong, MA Xuemei, CHEN Jun, et al. Classification of Electrical Characteristics of Buried Active Faults in Bailongjiang River Basin[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(3): 615-622. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.615

白龙江流域隐伏活断层的电性特征研究及分类

谢兴隆, 马雪梅, 陈 军, 高幼龙, 王高峰, 程正璞

(中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要: 白龙江流域构造位置特殊,新构造活动极为强烈,而针对本区隐伏活断层勘查的研究较少。高密度电法灵活高效、便于实施,非常适合地形复杂的白龙江流域,但在复杂地质环境下存在着严重的多解性问题。基于大量地球物理数据对该流域隐伏活断层的电性异常特征进行研究,并按照电性异常发生位置及特点将隐伏活断层的电性特征分为五类,可作为断层识别依据的有四类,主要表现为“高(低)阻背景、低(高)阻条带”的电性特征;电性异常难以识别的原因主要由“野外布设”与“地质背景”两类情况造成,每类中又包含多种影响因素。文章的研究成果显示,白龙江流域隐伏活断层的电性异常响应有迹可循,部分可以作为定性或定量描述隐伏活断层的依据,从而为高密度电法在本区隐伏活断层的勘查中提供重要的参考价值。

关键词: 白龙江流域; 隐伏活断层; 高密度电法; 地球物理勘探; 电性特征

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)03-0615-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.615

Classification of Electrical Characteristics of Buried Active Faults in Bailongjiang River Basin

XIE Xinglong, MA Xuemei, CHEN Jun, GAO Youlong, WANG Gaofeng, CHENG Zhengpu

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding 071051, Hebei, China)

Abstract: Due to the special tectonic location and strong Neotectonic activities in the Bailongjiang River Basin, there are rare researches on the exploration of buried active faults in the area. The high-density electrical method, which is flexible, efficient, and easy to implement, is very suitable for the Bailongjiang River Basin with complicated terrain, whereas, there exists a serious problem of multiplicity of solutions under the complex geological environment. Based on huge amounts of geophysical data, this paper studied the electrical anomaly characteristics of hidden active faults in the basin, and divided the electrical characteristics into five categories. Among them, four categories can be used as the basis for fault identification, which mainly showed the electrical characteristics of "high (low) resistance background, low (high) resistance band".

收稿日期: 2020-03-11

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20189630); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190646)

第一作者简介: 谢兴隆(1989-), 男, 硕士, 从事地球物理勘探与方法研究工作。E-mail: xxl0306@126.com。

通信作者: 马雪梅(1990-), 女, 硕士, 主要从事水文地质环境地质调查工作。E-mail: 247523354@qq.com。

There were two reasons why electrical anomalies are difficult to be identified, namely "field layout" and "geological background". The study results showed that the electrical abnormal response of hidden active faults in Bailongjiang River Basin can be followed, and some of them can be used as the basis for qualitative or quantitative description of hidden active faults. The results can provide important reference value for the exploration of hidden active faults in the study area with high-density electrical method.

Keywords: Bailongjiang River Basin; buried active fault; high-density electrical method; geophysical prospecting; electrical characteristics

0 引言

白龙江流域位于青藏高原东北缘,其构造位置特殊,处在南北向地震带和昆仑—秦岭构造带等多组深大断裂的交汇复合部位^[1-2],也是青藏、华南和华北三大I级活动地块区的交汇部位,涉及到祁连、柴达木、昆仑、华南和鄂尔多斯等五个活动地块,为

不同方向、不同性质活动断裂之间构造转换的关键地区,因此本区新构造活动极为强烈^[3-5],白龙江流域的范围及主要活动构造分布如图1所示。大量研究表明,频繁的构造运动在本区滑坡泥石流形成过程中起着重要的作用^[6-9],白龙江流域也是我国四大地质灾害高发区之一。

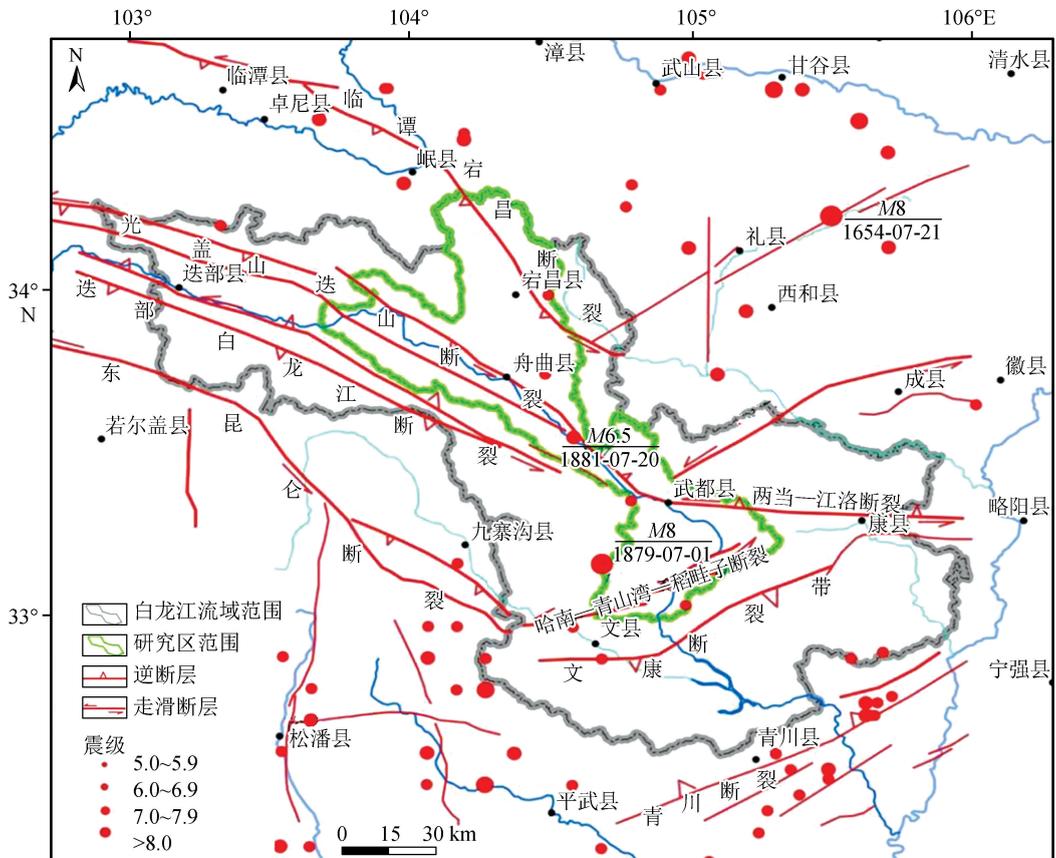


图1 白龙江流域活动构造分布图

Fig.1 Distribution of active faults in Bailong River Basin

虽然针对白龙江流域的断裂活动性及其影响已有较多研究,但大多数是基于区域性断裂带的统计性研究,针对本区隐伏活断层的研究较少。地球物理方法在隐伏断层探测中具有不可替代的作用,尤其是地震反射法在断层定位及性质的判定上具有较

高精度,有效解决了一些复杂断裂带的地学问题^[10-11],但地震反射法成本高、效率低而且对地形有着较高要求,因此在地形复杂的白龙江流域适用范围较窄。

高密度电法快捷轻便,是浅层地球物理方法中

重要的一员,近年来被广泛应用于岩溶勘查、水文调查、堤坝管涌探测、滑坡勘探等方面,取得了较好效果^[12-16]。白龙江流域地形起伏大,高密度主要优势在于布设方便,地形校正简单而且信息丰富,但高密度电法在复杂地质环境下存在着严重的多解性问题,在隐伏活断层的勘查中没有地震反射法立竿见影的效果。

近年来,笔者依托多个中国地质调查项目在甘肃南部白龙江流域开展了大量的地球物理勘查工作,研究区范围如图 1 绿线标注所示,重点集中在白龙江中游区域,后文所列举实例的地点均位于研究区内。高密度电法虽然存在较为严重的多解性问题,但对本区隐伏活断层的异常响应还是有迹可循,很多结果可以作为定性或定量描述隐伏活断层的依据。因此,为了更好地认识和勘查白龙江流域的隐伏活断层,本文基于大量地球物理勘查数据对该流域隐伏活断层的电性异常特征进行了研究并进行了合理分类。本文的研究成果从另一个方面展现了白龙江隐伏活断层的发育特点,也为某些隐伏活断层的勘查提供了参考依据。

1 电性特征的获取

高密度电法属直流电法的一种,与传统的电阻率法相比,高密度电法布设简单、成本低,效率高,信息丰富,解释方便。电极距可以视探测深度和探测目标体的尺度设置到很小的距离,充分体现了高密度电法信息多次覆盖的特点。由于白龙江流域地形地貌复杂,灵活高效、便于实施的高密度电法是该区域进行浅部物探的首选方法之一。

1.1 数据采集

数据采集前应开展详尽的场地踏勘,对现场地质环境条件、地形地貌、场地电磁干扰背景进行详细了解。高密度电法控制测量采用二维剖面,数据采集选用了 GEOPEN 公司的 E60DN 型电法仪、配套电缆及电极系统。根据工作任务要求和实地条件,合理选择电极距及测量装置。本文所选用的结果均是采用稳定性较好的温纳 α 装置,对于噪声较大区域,采集数据叠加 3 次,综合考虑勘查深度与精度,电极距基本在 3~5 m 之间。

使用高密度电法工作时会遇到勘查目标体较大,测线长度较长,一次采集难以满足勘探要求的情况,经过试验决定采用长排列、重叠采集、数据融合、拼接反演等技术手段。由于测量仪器误差、测量时间不同等原因,数据重叠部分应当进行适当处

理^[17-18]。为避免不同断面在重叠部分误差较大,建议同一测线的不同断面使用同一设备并在一天内完成。断面之间的重复长度根据勘探目标体的埋深确定,无数据区的深度应大于勘探目标的要求。

1.2 数据处理

高密度电法数据处理分为基础处理和反演 2 个阶段。基础处理包括格式转换、突跳点剔除、坏极剔除等。高密度数据的二维反演可根据数据质量和目标体的不同选择不同的反演方法,如阻尼最小二乘法、圆滑反演、鲁棒反演等。资料处理流程如图 2 所示。

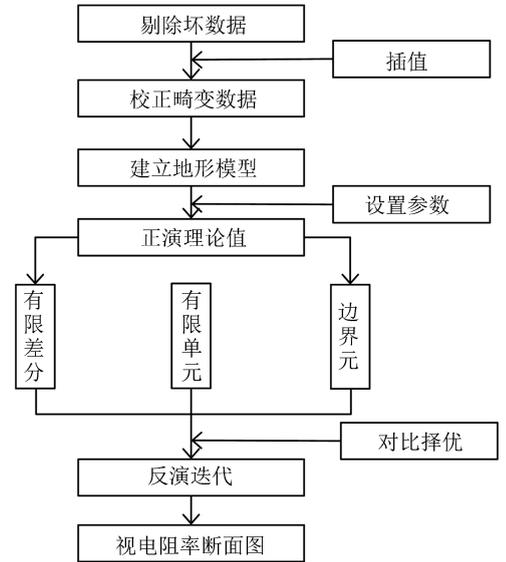


图 2 高密度电法处理流程图

Fig.2 Processing flow chart of high-density electrical method

由于白龙江流域地形起伏较大,反演时需对数据进行地形校正。一般处理中,地形线切割类型设置为线性最小二乘法,地形模型设置为带扭曲有限元网格的 S—C 变换。在数据处理过程中特别需要注意由于电阻率反演迭代引起的电阻率局部放大,因此需要对部分数据电阻率上下限进行合理限定。最后,针对不同数据选择合理的阻尼系数、迭代次数、收敛极限、视电阻率平滑等反演所需参数。

2 研究思路及分类

受区域构造格局影响,白龙江流域主要断裂带均呈现左旋走滑特征且第四系以来处于持续活动状态,除此之外,主要断裂还表现为明显的逆冲特点。大量地球物理结果也证实本区断层基本表现为逆断层形态,即断裂整体上表现为逆冲兼走滑性质。正是这种独特的断裂发育特点使得基岩或覆盖层出现有规律的电性异常,为研究白龙江流域隐伏活断层的电性特征提供了基础。

为了更好地说明本区隐伏活断层的电性特征,在大量的物探成果的基础上,特将隐伏活断层按照电性异常特点进行分类,研究思路如图3所示。首先结合钻孔、区域构造图等地质信息以及相关物探成果明确电性剖面中隐伏活断层的异常响应特征;然后按照电性异常是否可以作为识别隐伏活断层的依据分为“可识别”、“难识别”两大类;针对可识别的电性异常进一步归纳分类,明确电性异常的规律特征;对于难识别的电性异常则进一步明确影响因素,并对各种原因进行归纳总结。

最终,按照电性异常发生位置及特点将隐伏活断层的电性特征分为五类。为了便于说明,对这五类进行编号,如表1所列,其中可识别的电性异常又细分为I~IV四种类型。对V型隐伏活断层中难以识别的电性异常特征又细化了影响因素。本文将在

后续小节分别对“可识别”、“难识别”的电性特征进行详细论述。

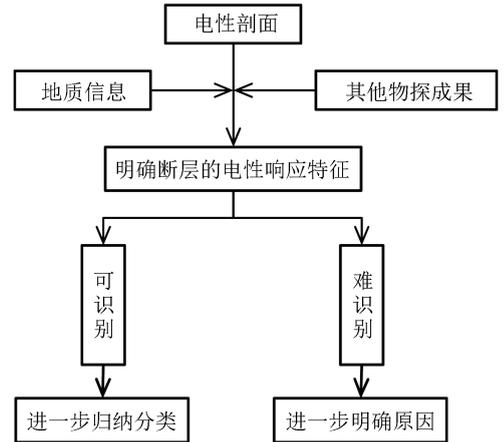


图3 研究思路图

Fig.3 Research idea diagram

表1 隐伏活断层电性特征分类表

| Table1 Classification table of electrical characteristics of buried active faults | | | |
|---|------|-------------------------|------|
| 断层识别性 | 异常位置 | 电性特征 | 类型编号 |
| 可识别 | 覆盖层 | 低阻背景,高阻条带 | I |
| | | 高阻背景,低阻条带 | II |
| | 基岩 | 低阻背景,高阻条带 | III |
| | | 高阻背景,低阻条带 | IV |
| 难识别 | 难以明确 | 电性异常杂乱,无明显规律,不能作为单独划分依据 | V |

3 可识别的电性特征

3.1 覆盖层电性异常

覆盖层中的电性异常主要是因为白龙江流域隐伏活断层的活动性导致,持续的断层活动导致覆盖层内部物质成分发生变化,从而出现电性异常。电性异常通常表现为条带电阻异常,与隐伏活断层的倾角、位置等有较好对应关系,可以作为隐伏活断层判定的依据。

I型隐伏活断层的电性异常发生在覆盖层,覆盖层一般为黏土等低阻物质,主要表现为低阻背景,高阻条带异常,此种电性特征在本区较为常见。白

龙江流域断层活动性较强,断层的持续活动造成第四系松散覆盖物内部松动,产生较多空隙,电阻率变大表现为相对高阻。

I型隐伏活断层的示例如图4所示。该测线位于陇南两水镇杜家沟沟底,测线沿冲沟方向布置。表面高阻层为后期堆积碎石土,主要由滑坡堆积碎石土及冲洪积碎石土共同组成。高阻层下的低阻体为黄土状黏土,受构造影响,电阻率起伏较大。经与同线地震反射剖面对比可知,低阻体内的高阻条带在位置、倾向、倾角均与地震揭示的断层有良好的对应关系,可以明确为断层影响。

II型隐伏活断层的电性异常发生在覆盖层,覆

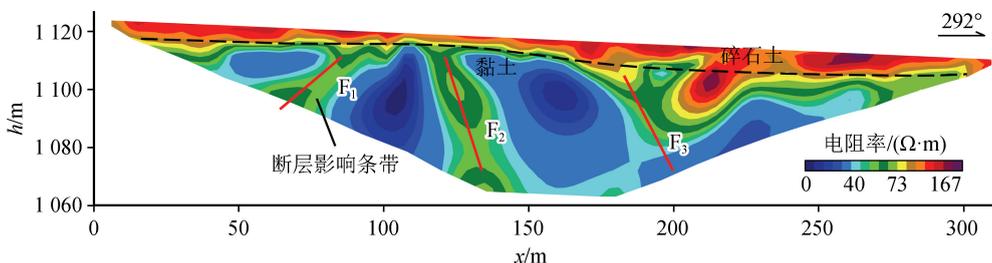


图4 杜家沟电阻率反演剖面图

Fig.4 Inversion section of resistivity in Dujiagou

盖层一般为碎石土、卵砾石土等高阻物质,主要表现为高阻背景,低阻条带异常,此种电性特征基本出现在水流附近区域。与 I 型隐伏活断层不同的是,II 型覆盖层内的低阻条带异常为断层活动引起的裂隙含水导致。

II 型隐伏活断层的示例如图 5 所示。该测线位于陇南石门乡石门沟口,测线沿泥石流沟扇纵向布设,其中测线起点东距白龙江约为 80 m。覆盖层主要为第四系冲洪积卵砾石土,卵砾石含量较高,表现

为明显的高阻。经与同线地震剖面对比,高阻中的低阻条带异常确定为断层活动所致,推测为断层的活动使得白龙江与断层破碎带相连通,江水进入断层破碎带表现为低阻异常。电阻率低阻条带延伸至第四系卵砾石土中,且连续性较好,推测该处断层在冲洪积卵砾石土形成后仍处于活动状态,通过毛细作用使得卵砾石土含水,并表现为低阻异常,卵砾石土中的低阻异常又明显受重力影响,偏向海拔低处。本示例同时也具备 IV 型隐伏活断层特征。

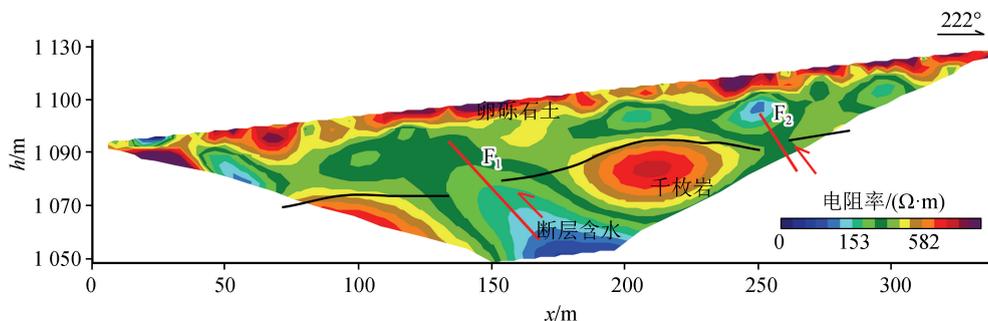


图 5 石门高密度反演成果剖面图

Fig.5 Inversion section of resistivity in Shimen

3.2 基岩电性异常

基岩中的电性异常主要是由隐伏活断层在基岩内部形成的断层破碎带导致的,持续的活动使得破碎带形成一定规模从而表现出电性异常。电性异常通常表现为条带电阻异常,与隐伏活断层的倾角、位置等有较好对应关系,可以作为隐伏活断层判定的依据。

III 型隐伏活断层的电性异常发生在基岩内部,基岩一般为炭质千枚岩、炭质板岩等低阻物质,主要表现为低阻背景,高阻条带异常。由于白龙江流域炭质基岩多有分布,此种电性特征在本区较为常见。

III 型隐伏活断层的示例如图 6 所示。该测线位于武都坪垭藏族乡坪垭村大沟里滑坡,测线沿垂向于滑坡主滑方向的土路布设,为滑坡横测线。松散覆盖物主要为碎石土,表现为相对高阻,下伏志留系炭质千枚岩表现为相对低阻,存在着明显的电性差异,分层效果较好。剖面 360 m 后表层开始出现低阻,这与实际炭质千枚岩露头信息一致。经综合分析确定,基岩内部的两条高阻条带为断层引起,断层的活动使得基岩内部产生裂隙破碎,电阻率变大表现为相对高阻。受断层持续活动影响,基岩破碎带较宽,引起条带异常的宽度约为 60 m。

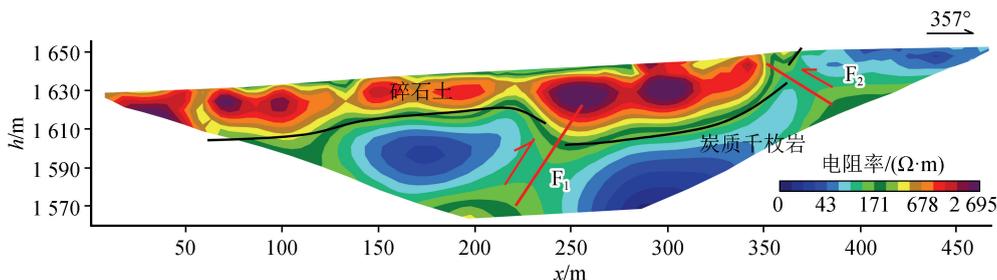


图 6 大沟里高密度反演成果剖面图

Fig.6 Inversion section of resistivity in Dagouli

IV 型隐伏活断层的电性异常发生在基岩内部,基岩一般为灰岩、千枚岩等高阻物质,主要表现为高阻背景,低阻条带异常,此种电性特征基本出现在水

流附近区域。与 III 型隐伏活断层不同的是,IV 型基岩内的低阻条带异常为断层破碎带含水导致。

IV 型隐伏活断层的示例如图 7 所示。该测线位

于甘南舟曲锁儿头滑坡前缘,测线南距白龙江约 30 m。松散覆盖物为灰黑色炭质碎石土,表现为相对低阻,下伏石炭系灰岩表现为相对高阻,存在着明显的

电性差异,分层效果较好。测线 300 m 处灰岩高阻体内有明显低阻条带,经综合分析推测为白龙江江水充满断层破碎带导致,引起条带异常的宽度约为 40 m。

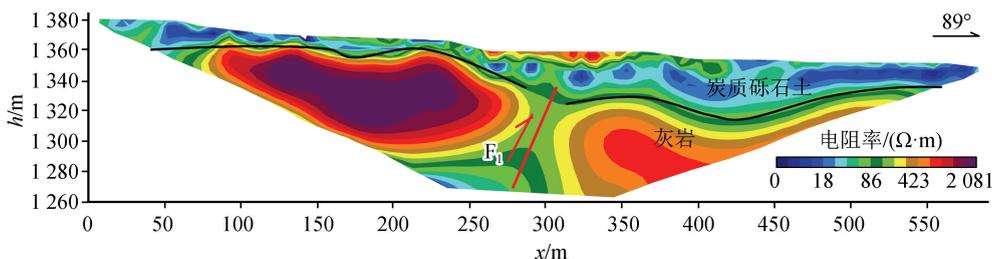


图7 锁儿头高密度反演成果剖面图

Fig.7 Inversion section of resistivity in Suertou

4 难以识别的电性异常

4.1 原因归类

虽然白龙江流域隐伏活断层引起的电性异常特征明确,利用高密度电法可以定量或定性地描述隐伏活断层性质,但由于种种原因,还有一些隐伏活断层的电性异常在高密度成果剖面中难以识别,不能作为单独解释断层的依据。基于本区大量地球物理勘查结果,笔者对难以识别的电性异常进行分类说明,难以识别的电性异常主要原因有两个,一个主要出现在野外布设方面,另一个与地质背景相关(表2)。

表2 难以识别的电性异常影响因素归纳表

Table 2 Table of factors influencing electrical anomalies that are difficult to identify

| 主要原因 | 影响因素 |
|-------|---------------|
| 野外布设 | 测线长度 |
| | 测线方向 |
| | 原始数据 |
| 地质背景 | 覆盖层背景电性特征 |
| | 基岩背景电性特征 |
| | 基岩岩性 |
| | 断层分布 |
| 多因素混杂 | 具有以上两种或两种以上情况 |

因野外布设导致的电性异常难以识别的主要因素如下:

(1) 测线长度问题。白龙江流域地形地貌复杂多变,测线长度往往受场地限制,而高密度电法的勘探深度与测线长度相关,勘探深度较浅直接影响Ⅲ、Ⅳ型隐伏活断层的识别。另外,本区断层活动影响带及破碎带宽度平均在 20 m 以上,测线过短不利于电性异常识别。

(2) 测线方向问题。受地质认识和地形的限制,测线布设方向与断层走向近乎平行或者两者夹

角较小,此类测线的布设方式不利于隐伏活断层的识别。

(3) 数据质量问题。受地形地貌限制,电极空置较多、数据背景噪声较大、接地不良等均会影响勘探质量及精度,从而导致反演结果不能客观地反映隐伏活断层的电性异常特征。

因地质背景导致的电性异常难以识别的主要情况如下:

(1) 覆盖层电性背景与断层引起的电性异常相近。如覆盖层为碎石土、卵砾石土等高阻电性背景,则非含水隐伏活断层的电性异常在覆盖层较难识别,因为两者电性差异较小。

(2) 基岩电性背景与断层引起的电性异常相近。如基岩为千枚岩、灰岩等高阻电性背景,则非含水隐伏活断层的破碎带引起的电性异常在基岩内部较难识别。总之,覆盖层或基岩等电性背景特征需与隐伏活断层引起的电性异常存在一定的电性差异,只有建立在此种物性差异的基础上,才可以对隐伏活断层的电性异常进行分析。

(3) 基岩岩性复杂多变。基岩岩性多变主要表现为基岩背景电性特征难以明确,从而导致隐伏活断层异常难以识别。如基岩为炭质千枚岩与千枚状板岩互层结构,低阻岩性与高阻岩性交替出现,基岩电性背景杂乱,严重干扰隐伏活断层的正常电性异常特征。

(4) 断层错综复杂。白龙江流域构造极其发育,隐伏活断层往往成组出现,内部关系复杂,部分断层距离较近,电性异常区域连成一片,从而造成识别困难。

隐伏活断层的电性异常难以识别有时并非单一情况导致,而是受多种不同因素共同作用导致,由于影响因素复杂多变,需具体问题具体分析。

4.2 相关示例

图 8 的示例测线位于舟曲县憨班乡黑峪沟内,黑峪沟受坪定—化马断裂带的影响,基岩破碎,次级断裂极为发育。由地震反射结果知测线 60 m 处有断裂发育,但由于测线较短,勘探深度有限,未能在基岩内部出现“低阻背景,高阻条带”的异常特征,而覆盖层电性背景与断层引起的电性异常相近,不能作为判断断层依据,故此线的高密度难以进行断层识别。

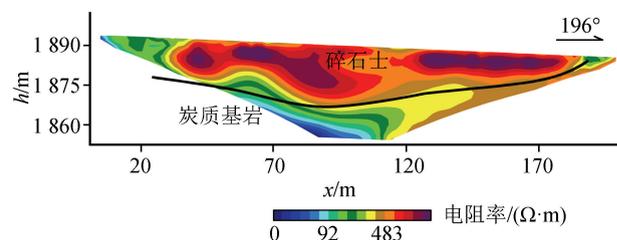


图 8 黑峪沟高密度反演成果剖面图

Fig.8 Inversion section of resistivity in Heiyugou

图 9 示例测线为舟曲老沟村查拉滑坡中上部一横测线,地震反射揭示测线 120~200 m 处发育有两条倾向相对的逆断层,由于断层距离较近,两者引起的高阻异常连成一片,难以对断层进行定性解释;再加之查拉滑坡松散覆盖层中的碎石土、含砾粉质黏土及漂石土交错分布,也对识别断层的电性异常产生了干扰。

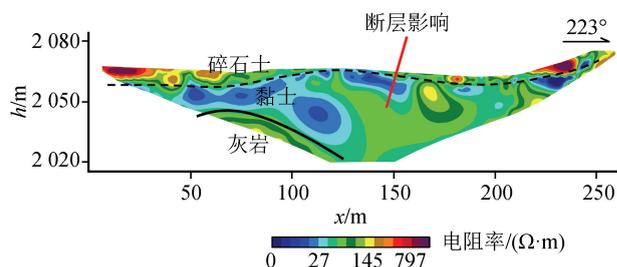


图 9 查拉高密度反演成果剖面图

Fig.9 Inversion section of resistivity in Zala

5 结语

白龙江流域新构造活动极为强烈,本文在大量物探结果的基础上总结出了隐伏活断层的电性异常响应特征,为高密度电法在本区进行有效的断层勘查提供了参考依据。通过研究归类,主要认识如下:

(1) 白龙江流域隐伏活断层电性特征可分为五类,其中可作为断层识别依据的有四类,不可识别的统归为一类。

(2) 隐伏活断层引起的电性异常与其电性背景

存在着明显的电性差异是电性异常可识别的物性基础,异常发育位置包含覆盖层与基岩两处,断层含水性又分为含水与非含水两种,从而形成了“高(低)阻背景、低(高)阻条带”的电性特征,具体情况需要进行辩证分析。

(3) 造成电性异常难以识别的原因主要为“野外布设”与“地质背景”两类情况,每类中又包含多种影响因素。通常情况下,隐伏活断层的电性异常难以识别是由多种影响因素共同造成的。

(4) 本文提出了一种基于电性差异的隐伏活断层分类方法,并给出了相关示例。本文的研究成果对白龙江流域隐伏活断层的勘查有一定的指导作用,也为高密度电法在其他地区开展断层勘查提供了参考价值。

参考文献(References)

- [1] 张国伟,郭安林,姚安平.中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J].地学前缘,2004,11(3):23-32.
ZHANG Guowei, GUO Anlin, YAO Anping. Western Qinling—Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 23-32.
- [2] 张会平,张培震,袁道阳,等.南北地震带中段地貌发育差异性及其与西秦岭构造带关系初探[J].第四纪研究,2010,30(4):803-811.
ZHANG Huiping, ZHANG Peizhen, YUAN Daoyang, et al. Differential landscape development of the central N-S seismic zone and its relation to the west Qinling tectonic belt[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(4): 803-811.
- [3] WANG Q, ZHANG P Z, FREYMUELLER J T, et al. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements[J]. Science, 2001, 294(5542): 574-577.
- [4] LEIGH H R, CLARK B, ROBERT W K, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern tibet[J]. Science, 2001, 276: 788-790.
- [5] 李传友,宋方敏,冉勇康.龙门山断裂带北段晚第四纪活动性讨论[J].地震地质,2004,26(2):248-258.
LI Chuanyou, SONG Fangmin, RAN Yongkang. Late quaternary activity and age constraint of the northern Longmenshan fault zone[J]. Seismology and Geology, 2004, 26(2): 248-258.
- [6] 孟兴民,陈冠,郭鹏,等.白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(4):1-15.
MENG Xingmin, CHEN Guan, GUO Peng, et al. Research of landslides and debris flows in Bailong River Basin: progress and prospect[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(4): 1-15.
- [7] 李淑贞,戴霜,王华伟,等.白龙江地区断裂构造与滑坡分布及发生关系[J].兰州大学学报(自然科学版),2015,51(2):145-152.
LI Shuzhen, DAI Shuang, WANG Huawei, et al. Fault features

- and their implications on distribution and formation of landslides in Bailongjiang region[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2015, 51(2): 145-152.
- [8] BAIS B, CHENG C, WANG J, et al. Regional scale rainfall- and earthquake-triggered landslide susceptibility assessment in Wudu County, China[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(5): 743-753.
- [9] 黎志恒, 文宝萍, 贾贵义, 等. 甘肃省白龙江流域滑坡分布规律及其主控因素[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(6): 768-776.
- LI Zhiheng, WEN Baoping, JIA Guiyi, et al. Characteristics of the landslide distribution along the Bailongjiang River Basin and its controlling factors[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science), 2015, 51(6): 768-776.
- [10] 李大虎, 廖华, 梁明剑, 等. 龙门山中央断裂南段盐井—五龙断裂的浅层地球物理方法探测[J]. 地震工程学报, 2016, 38(1): 26-35.
- LI Dahu, LIAO Hua, LIANG Mingjian, et al. Detection of the Yanjing—Wulong fault in the southern segment of the Longmenshan central fault zone by using shallow geophysical method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(1): 26-35.
- [11] 刘薇, 李大虎, 梁明剑. 鲜水河断裂带南东段康定—色拉哈断裂的浅层地球物理勘探[J]. 地震工程学报, 2018, 40(6): 1287-1294.
- LIU Wei, LI Dahu, LIANG Mingjian. Detection of the Kangding—Selaha fault in the southeast section of the Xianshuihe fault zone using shallow geophysical method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1287-1294.
- [12] 郑智杰, 曾洁, 甘伏平, 等. 高密度电法在柳州太阳村镇岩溶塌陷区调查中的应用研究[J]. 地质与勘探, 2017, 53(1): 124-132.
- ZHENG Zhijie, ZENG Jie, GAN Fuping, et al. Application of high-density electrical resistivity imaging to karst collapse investigation at the Taiyangcun Town, Liuzhou[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(1): 124-132.
- [13] 陈松, 余绍文, 刘怀庆, 等. 高密度电法在水文地质调查中的应用研究: 以江平圩幅为例[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 849-855.
- CHEN Song, YU Shaowen, LIU Huaqing, et al. Application and research of high density resistivity method in hydrogeological prospecting—a case study on Jiangping Town map[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(2): 849-855.
- [14] 陈军, 杨川, 陈泽元. 地下隐蔽水库的高密度电法探测研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 934-939.
- CHEN Jun, YANG Chuan, CHEN Zeyuan. Study on high density resistivity method of underground reservoir[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 934-939.
- [15] 张光保, 褚家营巨型滑坡的高密度电法勘察及效果分析[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2716-2721.
- ZHANG Guangbao. Exploration and effectiveness analysis of high-density resistivity method on Chujiaying giant landslide site[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(6): 2716-2721.
- [16] 张建清, 徐磊, 李鹏, 等. 综合物探技术在大坝渗漏探测中的试验研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(1): 432-440.
- ZHANG Jianqing, XU Lei, LI Peng, et al. Experimental study on comprehensive geophysical prospecting technology in dam leakage detection[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(1): 432-440.
- [17] 姚健, 曾昭发, 李芳. 高密度电阻率法测量多排列数据拼接及误差校正方法研究[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(3): 209-212.
- YAO Jian, ZENG Zhaofa, LI Fang. Study on data combination and the method of correcting errors of multiple arrays in resistivity imaging method[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(3): 209-212.
- [18] 席景昌, 刘海飞, 张赛民. 长断面高密度电阻率数据处理解释[J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(3): 314-317.
- XI Jingchang, LIU Haifei, ZHANG Saimin. Processing and interpretation of high density resistivity data for long-range section[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 33(3): 314-317.