

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.060>



色拉哈断裂及邻区音频大地电磁三维阵列探测

张炯¹, 陈小斌^{1*}, 尹小康², 赵思为², 叶涛¹, 徐正宣², 蔡军涛¹,
王培杰³, 张赞昀¹, 刘钟尹³

1. 复合链生自然灾害动力学应急管理部重点实验室, 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085
2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031
3. 中国地震局地质研究所, 北京 100029

摘要: 为了能在川藏铁路色拉哈段隧道选址过程中最大限度地规避地质灾害体, 本文针对色拉哈断裂及邻区开展了音频大地电磁三维阵列探测研究, 获得了研究区可靠的三维精细电性结构. 结合地表活动断裂调查结果, 对区内三维电性分布特征进行了综合解释. 研究表明, 色拉哈断裂及邻区地表至 500 m, 整体表现为高阻特征, 局部受断裂控制的区域为低阻特征; 500 m 以下电阻率下降显著, 推测是断裂带在 500 m 以下的深部构造富含水体所致; 此外, 位于色拉哈断裂北侧的木格措南阶区以及南侧的断裂交汇区东侧发育两处高导体 C1 和 C2, 推测为区内含水的构造软岩, 在设计隧道路线的过程中, 应尽量避免.

关键词: 色拉哈断裂; 三维带地形反演; 电性结构; 地震地质.

中图分类号: P319

文章编号: 1000-2383(2022)03-856-11

收稿日期: 2021-12-31

3-D AMT Array Exploration in the Selaha Fault and Adjacent Area

Zhang Jiong¹, Chen Xiaobin^{1*}, Yin Xiaokang², Zhao Siwei², Ye Tao¹, Xu Zhengxuan², Cai Juntao¹,
Wang Peijie³, Zhang Yunyun¹, Liu Zhongyin³

1. Key Laboratory of Compound and Chained Natural Hazards Dynamics, Ministry of Emergency Management of China; National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China
2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, China
3. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract: In order to avoid the geological hazards to the greatest extent in the processing of tunnel routes in the Selaha segment of the Sichuan-Tibet Railway line, we use audio magnetotelluric (AMT) data and obtain a reliable 3-D electrical structure model in the Salaha fault and adjacent area. The 3-D electrical resistivity model is comprehensively interpreted with the investigation of active faults. There is a large-scale high resistivity body at the depth from surface to 500 m, where the local area controlled by the faults is of low resistivity. Beneath the shallow 500 m, the resistivity decreases significantly, which results from the fault zone rich in aqueous fluids. In addition, there are two high conductors C1 and C2 in the study region; one is in the Mugecuo south stage area at the northwestern side of the Salaha fault, and the other is in the eastern side of the fault intersection area. These high conductors are presumed to be structural soft rocks. Therefore, it should be avoided as far as possible in designing the tunnel route.

基金项目: 青藏高原第二次科考综合项目(No. 2019QZKK0708); 川藏铁路重大基础科学问题专项(No. 41941016-01); 川滇菱形地块北部电性结构探测研究(No. ZDJ2019-26).

作者简介: 张炯(1984—), 男, 博士后, 主要从事深部电性结构探测研究. ORCID: 0000-0002-1764-9338. E-mail: S060872@163.com

* **通讯作者:** 陈小斌, ORCID: 0000-0003-2584-0551. E-mail: cxb@pku.edu.cn

引用格式: 张炯, 陈小斌, 尹小康, 赵思为, 叶涛, 徐正宣, 蔡军涛, 王培杰, 张赞昀, 刘钟尹, 2022. 色拉哈断裂及邻区音频大地电磁三维阵列探测. 地球科学, 47(3): 856-866.

Citation: Zhang Jiong, Chen Xiaobin, Yin Xiaokang, Zhao Siwei, Ye Tao, Xu Zhengxuan, Cai Juntao, Wang Peijie, Zhang Yunyun, Liu Zhongyin, 2022. 3-D AMT Array Exploration in the Selaha Fault and Adjacent Area. *Earth Science*, 47(3): 856-866.

Key words: Selaha fault; 3-D inversion with topography; electrical structure; seismogeology.

0 引言

川藏铁路是人类文明史上最具挑战性的铁路工程,也是我国一项重大的国防工程、民生工程以及维护西藏地区长治久安的战略要道,对于促进西藏地区的经济和旅游产业发展具有重大的意义.然而,特提斯的构造变形演化以及青藏高原的隆升过程,使得川藏铁路沿线成为全球施工难度最为艰险的铁路工程,面临的疑难工程地质问题也是前所未有的(潘桂棠等,2020).

川藏铁路工程计划在四川西部的康定地区穿过鲜水河断裂带,该断裂带地处青藏高原东缘,是我国大陆内部活动性最强的一条大型左行走滑断裂带(Wen *et al.*, 2008),也是川滇地块与巴颜喀拉地块的边界断裂带(图 1a),全新世以来的滑动速率为 $9.5 \pm 1.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (Zhang, 2013).王哲威等(2021)提到针对鲜水河断裂带的铁路隧道选线工作已经开展十余载,线路计划在康定地区跨过鲜水河断裂带色拉哈段,如何预防和减轻地震诱发的地质灾害是选线工作的重点,但是碍于鲜水河断裂带穿过的地段地质条件极其复杂,地震风险性更是前所未遇,选线难度很大.目前,人们虽然围绕鲜水河断裂带的色拉哈段及邻区开展了大量的物探工作,也获得了多条二维电性结构剖

面,但是断裂带周边地下介质的构造属性复杂,分支断裂多(图 1b),显然采用传统的技术手段已无法满足在鲜水河断裂带选线的工作需求.对于铁路线路设计专家提到的技术难题,只有获得可靠的深部地质构造信息,才能对沿线地质体及周边构造环境做出准确的评价或者预测,为路线选址以及后续施工提供便利.

近 300 年以来,鲜水河断裂带已发生 4 次 7 级以上地震(徐锡伟等, 2005),徐锡伟等(2017)把鲜水河断裂带定义为一个地震危险区,地震风险性极高,除雅拉河段之外的鲜水河断裂其他段都曾发生过 6.5 级以上的地表破裂型地震(徐锡伟等, 2014).因此,在鲜水河断裂带所在地区开展铁路项目的工程地质勘察工作,其地震风险性评价与预防就成为工程设计专家必须考虑的首要因素,以免未来发生的地震灾害带来不可预估的风险与经济损失.

大地电磁测深方法是 20 世纪 50 年代初由 Tikhonov(1950)和 Cagniard(1953)分别独立提出的天然电磁场方法.受控于不同区段的测量频率,大地电磁测深方法可以细分为音频大地电磁测深(AMT)、宽频带大地电磁测深(MT)和长周期大地电磁测深(LMT)等.目前,音频大地电磁测深(AMT)是一种主要研究浅部(0~3 km)地下介质导

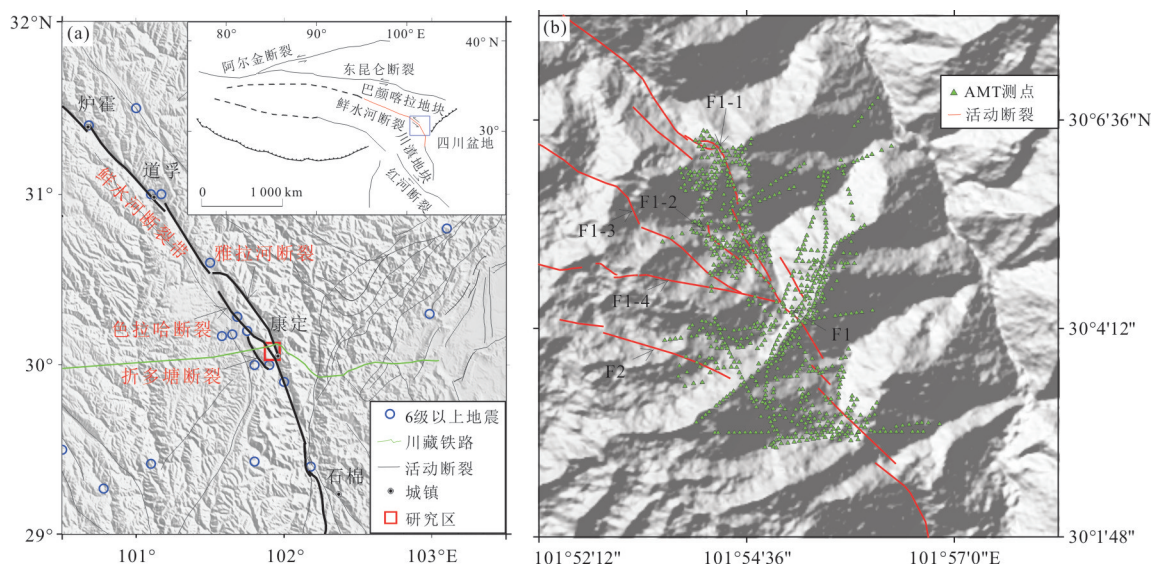


图 1 研究区构造简图(a)及音频大地电磁测点分布图(b)
Fig.1 Schematic tectonic setting of the study area (a) and locations of the AMT sites (b)
F1. 色拉哈断裂; F1-1、F1-2、F1-3、F1-4. 色拉哈分支断裂; F2. 木格措南断裂

电性的电磁方法,频率范围在 0.1~10 000 Hz,主要应用于工程地质勘察(朱光喜,2009;李鹏博等,2019)、地下水探测(Blake *et al.*, 2016)、火山区地热资源探测(刘营等,2020)以及矿产勘探(阮帅等,2015)等领域.由于其设备轻便、勘探成本低、施工效率高,相对于其他地球物理方法,音频大地电磁法更适合在山区作业,已经成为山区工程地质勘察不可或缺的技术手段.

音频大地电磁测深是隧道选址过程中常用的地球物理勘探方法,一般是采用二维测线形式的观测模式,通过二维电性结构剖面解释断裂以及构造软岩等地质体,一直以来鲜有学者在隧道选址项目中采用三维阵列探测.本文是以康定地区的色拉哈断裂及邻区为研究对象,首次开展对隧道选线的三维阵列音频大地电磁测深研究工作,采用最先进的三维带地形反演技术,获得了鲜水河断裂带色拉哈段及邻区高精度的三维电性结构,同时结合地表活动断裂调查的结果,厘定了色拉哈段各分支断裂的几何展布特征,并且圈定了两处高导异常区,为隧道选址提供了电磁学证据.

1 地质背景及测点分布

1.1 地质背景

鲜水河断裂带北西起自甘孜卡苏,向南经炉霍、道孚、康定、磨西至石棉一带,全长约 400 km,总体走向为北西 30°~40°(Bai *et al.*, 2018).断裂带在康定地区内分裂成多条北西-南东向的活动断裂,其中有雅拉河断裂、色拉哈断裂和折多塘断裂这 3 个主要的左行走滑次级断裂(闻学泽等,1989)(图 1a).潘家伟等(2020)通过高分辨率卫星影像资料以及野外构造填图工作,在色拉哈断裂和折多塘断裂之间新发现了一段长约 24 km 的全新世活动断裂,取名为木格措南断裂 F2(图 1b).沿断裂带分布一系列第三纪拉分盆地及花岗岩体,其中康定以西发育有长 70 km,宽 7~20 km 的折多山花岗岩体是鲜水河断裂带的同构造岩浆产物(许志琴等,2011).

从历史地震记录来看,康定地区曾经发生过 7 次 6 级以上地震,其中与色拉哈断裂有关的最近一次地震是 2014 年 11 月 22 日的康定 M6.3 地震,属于震群性地震(廖林等,2015),可以肯定的是色拉哈断裂具备独立孕育和发生大地震的构造能力.色拉哈断裂第四纪以来的水平滑动速率为 $5.5 \pm 0.6 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (周荣军等,2001),其与雅拉河断裂和折

多塘断裂共同分配了鲜水河断裂的滑动速率.低温年代学证据表明,断裂带的新构造活动都转移到色拉哈断裂上(Zhang *et al.*, 2017),进一步加重了色拉哈断裂发生构造变形和地震活动的风险.李海兵等(2021)认为巴颜喀拉地块的运动特征表现为刚性块体整体向东运动,变形主要集中在边界断裂带上,鲜水河断裂带未来仍有发生 M7 以上地震的风险.郭长宝等(2015)通过调查鲜水河断裂的活动习性和地质灾害发育特征,发现鲜水河断裂对周边的地质灾害体有着明显的控制作用,约 32.5% 的地震灾害发育在距离断裂带 0.5 km 范围内.王哲威等(2021)认为在康定地区存在高烈度地震与活动断裂、高位崩滑流、高陡岸坡失稳、高地应力岩爆和大变形、高地温、高压突涌水等一系列重大工程地质问题,在修建铁路过程中将会面临很多未知的地质风险.

图 1b 是色拉哈断裂 F1 以及色拉哈分支断裂 F1-1~F1-4,其中 F1-2 在地表未与周边断裂贯通,形成了一个小的挤压阶区——木格措南阶区.根据色拉哈断裂的几何展布特征以及地貌证据,笔者发现色拉哈断裂带及邻区的地形切割十分剧烈,起伏较大,海拔高程在 2 500~4 660 m,垂直高差达 2 160 m.鉴于色拉哈主断裂的分支断裂较多,且错综复杂,地震风险性很高,在很大程度上制约了铁路线路的走向,在隧道选址的过程中,如何把地灾风险降到最低,成为工程地质专家需要解决的第一任务.与钻探相比,三维音频大地电磁阵列探测研究,是一项既廉价又有效的技术手段.

1.2 测点分布

2020 年 9 月,笔者在康定地区进行了野外实地踏勘,踏勘过程中发现测区内植被发育,地表盖层较薄,局部地区又有基岩裸露,且地形起伏较大,甚至有部分测区无法到达,根本不具备观测数据的条件.测区内还有一条 100 kV 高压线穿过,现场有多家钻井队进行施工作业,人文环境也十分复杂.这些野外现场的状况对于笔者获取高质量的原始数据是一个很大的挑战.

鉴于研究区内山高林密以及地形复杂,传统布置测线的测量方式根本无法开展.随着大地电磁三维反演技术的发展,现在已经不需要以测线形式观测数据.因此,笔者提出一套适合复杂地形条件下开展音频大地电磁阵列探测的研究思路,即首先在研究区内进行野外实地踏勘,掌握研究区的道路、

高陡边坡、河流、灌木林以及高压线等,随后把野外踏勘的信息加载至 Google Earth 软件,后续在室内参考 1:10 000 的测区等高线图,沿等高线设计了测点位置,以保证在具备野外测量条件的区域开展观测数据的工作.同时,野外实测数据的测量人员拥有一定的自主选点权限,对于实地环境不能开展观测的区域进行微调,尽最大限度让所有测点均匀地分布在测区中.图 1b 是参与本次三维反演所有测点的分布,其中包括利用国家自然灾害防治研究院野外实测的数据 550 个,同时又融合了中铁二院提供的一部分数据约 500 个.

2 方法

大地电磁测深是利用天然电磁场在地球内部激发的电磁感应现象,研究地下由浅到深不同深度上的导电性结构(魏文博等, 2003).大地电磁测深的基本原理是依据不同频率的电磁波在地下介质传播过程中具有不同趋肤深度的原理,低频信号主要是反映地下深部的电性特征;反之,高频信号反映的是浅部的电性特征.对于任意 x 、 y 、 z 坐标系,在地表分别观测相互正交的电场分量 E_x 和 E_y ,以及相互正交的磁场分量 H_x 和 H_y ,其中 x 和 y 分别代表 N-S 和 E-W 方向,电磁场分量与阻抗张量 Z 组成一般关系式:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式(1)中阻抗张量 Z 的各个元素通过以下公式可求得视电阻率(ρ_{xy} 和 ρ_{yx})和阻抗相位(θ_{xy} 和 θ_{yx}):

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}|^2, \quad (2)$$

$$\theta_{xy} = \arctan \frac{\operatorname{Im}(Z_{xy})}{\operatorname{Re}(Z_{xy})}, \quad (3)$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{yx}|^2, \quad (4)$$

$$\theta_{yx} = \arctan \frac{\operatorname{Im}(Z_{yx})}{\operatorname{Re}(Z_{yx})}, \quad (5)$$

式中, ρ_{xy} 和 ρ_{yx} 是视电阻率分量,单位: $\Omega \cdot \text{m}$; ω 是角频率,单位: rad/s ; μ 是磁导率,单位: H/m ; Z 是阻抗张量,单位: Ω ; θ_{xy} 和 θ_{yx} 是阻抗相位分量,单位: $^\circ$.

在野外实际观测过程中,大地电磁测深仪器记录的原始资料是电磁场中各个分量随时间变化的时间序列,原始的时间序列经过傅里叶变换,可以把时间域信号转化成频率域信号.但是,

野外观测得到的是天然场信号,本身十分微弱,其中还包含了有效信号和噪声.为了提高信噪比,在求取阻抗张量的过程中,可以通过互功率谱分析、近参考和 robust 估计(Egbert, 1997; Gamble *et al.*, 1979)等方法压制噪声.

3 三维反演

2010 年以来,随着 ModEM 程序(Egbert and Kelbert, 2012; Kelbert *et al.*, 2014)的推广,极大减少了内存需求,并且提高了反演速度,大地电磁的三维反演技术逐渐在科研领域中得到广泛应用.直到最近几年,受益于算法技术的改进和节点机计算技术的发展,三维反演已经取代了二维反演成为大地电磁主流的反演技术.本次三维反演计算是在本文通讯作者陈小斌研究员主持研发的三维反演系统 toPeak 软件上实现的,选用的是该软件集成的 ModEM 程序,由于三维反演的计算量很大,因此计算工作是在国家超级计算中心广州天河 II 号上进行.

在开始三维反演计算工作之前,首先对数据进行筛选,剔除飞点,并对视电阻率和相位数据进行 Rhoplus 拟合(Parker and Booker, 1996),确保参与反演的数据是相互匹配的.这一部分工作是在陈小斌等(2004)自主研发的 MT-Pioneer 软件上进行.

鉴于测区地形起伏较大,必须采用三维带地形反演才能获得可靠的电性结构模型,在 5.1 节分别对平地形与带地形反演的结果进行了对比.文中以全国的 30 m 精度 DEM 数据为底部框架,构建了研究区内的地形文件(图 2).反演网格设计如下: x 方向和 y 方向的单元网格宽度都为 60 m, x 方向和 y 方向向外延展区网格数为 10 个,延展区步长为 1.8 倍; z 方向第一层厚度为 20 m,直到 2 200 m 之后按照 1.2 倍步长向下延展,反演网格数是 145(x 方向) \times 106(y 方向) \times 144(z 方向),总计为 2 213 280 个网格.受网格剖分限制,被分配在同一个网格的测点只能保留一个测点参与反演,最终参与反演计算的 AMT 测点为 826 个,反演使用的频率数是 22 个,频率范围是 2.81~1 500 Hz,反演数据选用的是反对角的视电阻率(ρ_{xy} 和 ρ_{yx})和相位(θ_{xy} 和 θ_{yx}).门槛误差:视电阻率取 5%,相位取 1.432 $^\circ$.

反演采用的初始模型分别为 100、200 和 500 $\Omega \cdot \text{m}$ 的均匀半空间模型,正则化因子 λ 从 1 000 开始,反演结束时 λ 为 3.2×10^{-8} ,经过 3 种不同初始

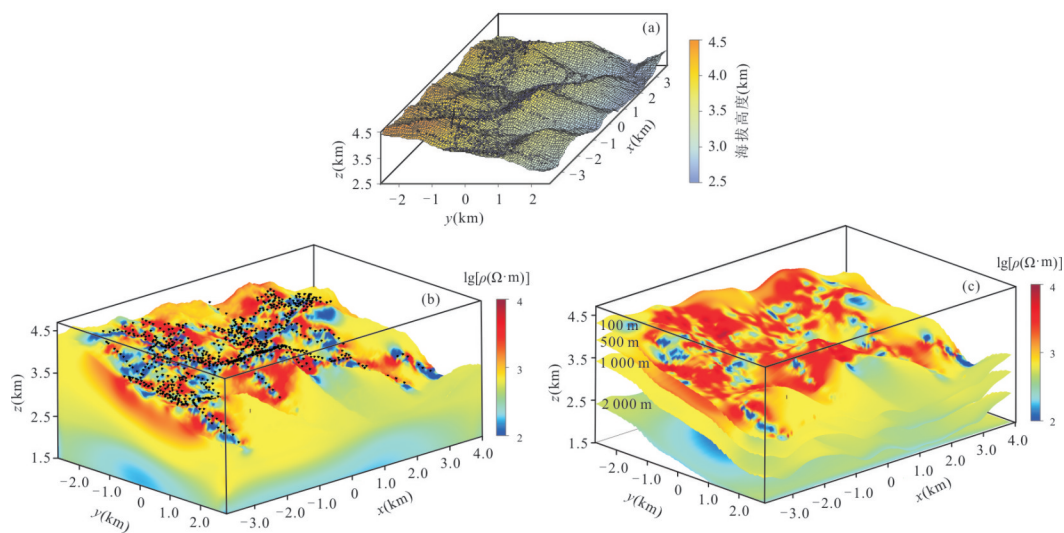


图2 测区地形模型(a)、三维电性结构模型(b)及不同深度的电阻率曲面模型(c)

Fig.2 Topographic grid data (a), 3-D electrical structure (b) and resistivity surface models of different depth (c)

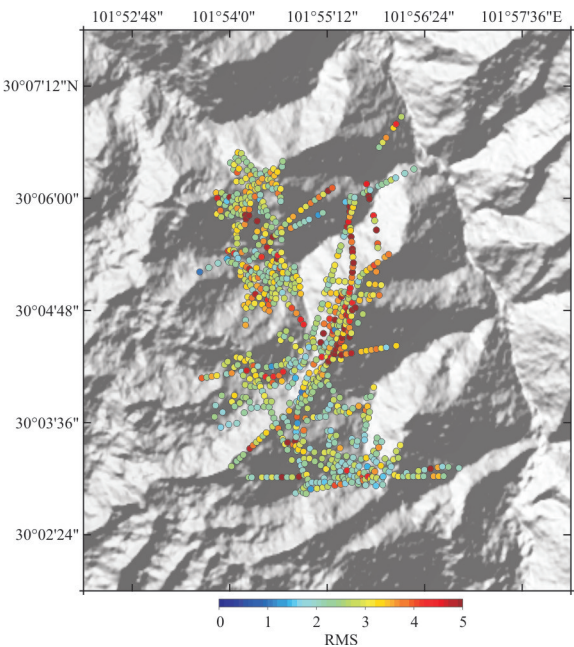


图3 RMS拟合误差

Fig.3 Site-by-site RMS misfit distribution of 3-D inversion

模型的试算后,发现初始电阻率模型为 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 的反演收敛速度最快,因此最终选用 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 作为均匀半空间初始模型.经过一次反演计算之后,在已有电性结构模型的基础上,后续通过采用印模法(叶涛等, 2013),确保已有反演结果的宏观轮廓信息,继续进行反演计算,经过多次反演过程,最终获得研究区内可靠的三维电性结构模型(图 2b).最终结果的 RMS 误差为 2.35,各测点 RMS 拟合误差如图 3 所示,可以发现绝大部分

测点的 RMS 是小于 3 的,也有部分测点 RMS 拟合误差大于 5,可能是与数据本身质量较差有关.

由于测区内地形起伏较大,采用传统的水平切片会导致大面积的地形空白区,不能很好地展示断裂构造与电性结构在水平方向上的关系.为了后续研究断裂构造与电性结构之间的关系,文中以地表每个网格点的海拔高程为基准点,从地表向下截取相等深度,并提取出相同位置的电阻率数据,该方法可以避免在水平切片出现空白区的现象.图 2c 分别展示了三维环境深度为 100、500、1 000 和 2 000 m 的电阻率曲面模型.

4 结果与地质解释

4.1 电阻率曲面模型

图 2b 是通过三维带地形反演得到的电性结构模型,表明研究区浅部主要以高阻体为主,电阻率值 $>1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,在深部则表现为低阻特征,电阻率值 $<300\ \Omega\cdot\text{m}$.图 4a~4h 分别展示了 100、200、350、500、700、1 000、1 400 和 2 000 m 不同深度的电阻率曲面模型.可以发现,不同深度的电阻率曲面模型基本反映了色拉哈断裂在地下的展布特征,其中研究区内浅部 0~500 m 主要表现为高阻背景,电阻率值 $>1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,局部地区可达 $5\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,可解释为浅部发育糜棱岩或者花岗岩体,且南部的高阻体较北部更加完整;进入 700 m 以下,逐渐表现为低阻特征,推断在 700 m 以下很可能是富集水体或者夹泥,且连通性较好的断裂破碎带.

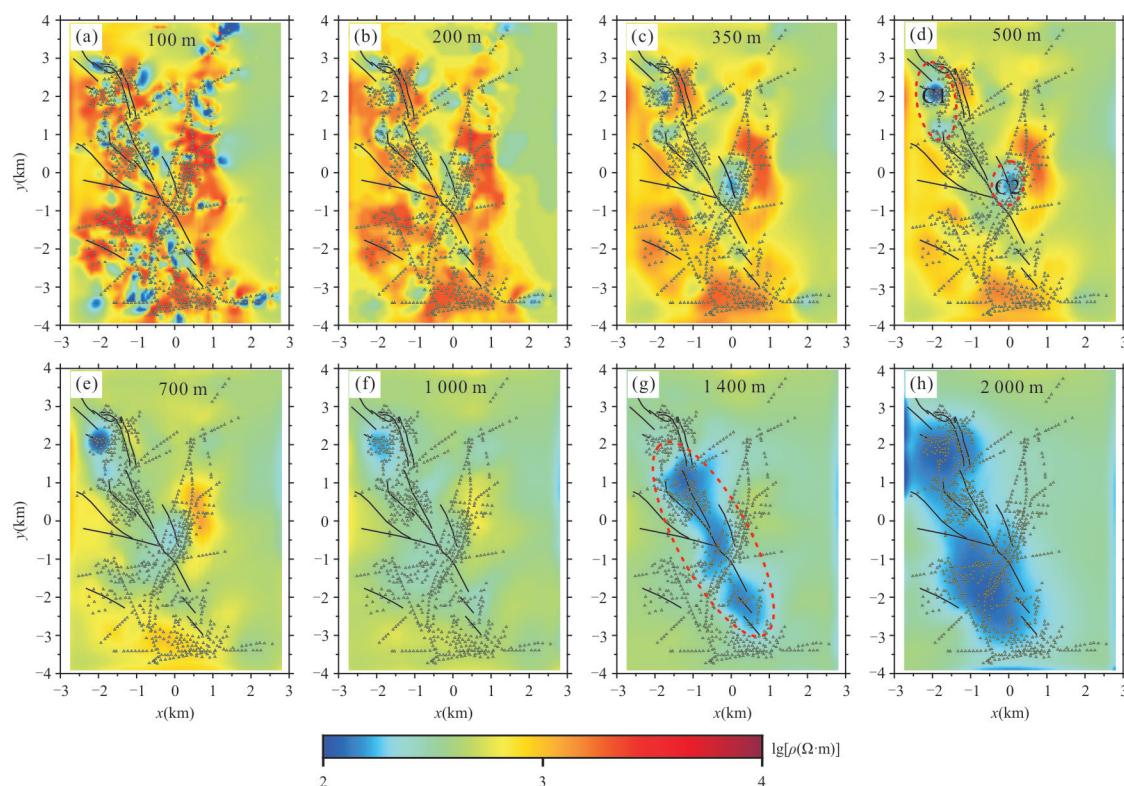


图4 100、200、350、500、700、1 000、1 400和2 000 m的电阻率曲面模型

Fig.4 Resistivity surface models of 100, 200, 350, 500, 700, 1 000, 1 400 and 2 000 m

同时,根据500 m的电阻率曲面模型(图4d),发现有两处高导体C1和C2,并且在5.2节分别对C1和C2进行了正演模型验证.其中C1位于木格措南阶区的西北侧,在200 m以上主要表现为高阻特征,随后电阻率逐渐下降,深度在350 m以下,低阻异常范围逐渐扩大,值得注意的色拉哈断裂在阶区处的深浅构造存在显著的电性差异,表明阶区本身已经发生了强烈的构造变形;C2位于整个测区的核心区,F1断裂的东北侧,宽度达1 km,C2南侧是色拉哈分支断裂的交汇区,也是断裂作用受力的关键地区,应该是应力相对集中的区域,更容易发生应变.根据700 m以下的电阻率曲面模型(图4e~4h),可以发现C1和C2向深部继续延伸,并且在1 400 m的电阻率曲面模型中合在一起.

4.2 色拉哈断裂几何特征

为了研究色拉哈断裂及其分支断裂深部的几何展布特征,笔者在有数据点控制的区域,垂直于色拉哈断裂的走向截取了4条二维剖面(图5a),测线名称分别是L1、L2、L3和L4,四条测线的走向为NE向.

L1线电性结构显示(图5b),F1-1是一条高角度深切断裂,在地表显示有一个宽度约100 m的低

阻带,位于F1-1断裂西南侧下方500 m处发育高导体C1,电阻率 $<200 \Omega \cdot \text{m}$,横向展布约500 m,深部向两侧延伸,推断是含水或夹泥的构造软岩.高导体上方覆盖的高阻体电阻率 $>1\,000 \Omega \cdot \text{m}$,推断是花岗岩或者糜棱岩建造.此外,断裂北东侧的高阻体还对高导体C1北东向的延伸起到了屏蔽作用.

L2线电性结构显示(图5c),F1-2是一条深切断裂,F1-2的倾角较F1-1角度略缓一些,倾向为北东向.在F1-2处地表发育长约500 m的低阻破碎带,深部逐渐向北东侧扩展.此外,位于剖面的北东段还发育一处低阻破碎带,需要进一步关注.

L3线电性结构(图5d)显示,位于剖面西南侧的F2处整体表现高阻特征,而且相对完整,推断F2可能不存在深部延伸.F1是一条高角度深切断裂,其北东侧对应的是高导体C2,沿剖面横向展布达500 m,C2顶部覆盖的是高阻体,推断是花岗岩或者糜棱岩建造.值得注意的是,F1西南侧还发育一条倾向为北东向的高角度隐伏断裂,但是地表活动断裂调查没有显示相关证据.

L4线电性结构显示(图5e),整体表现为高阻体特征,电阻率 $>1\,000 \Omega \cdot \text{m}$,而且分布均匀,仅在局部地区发育零星的高导异常.需要指出

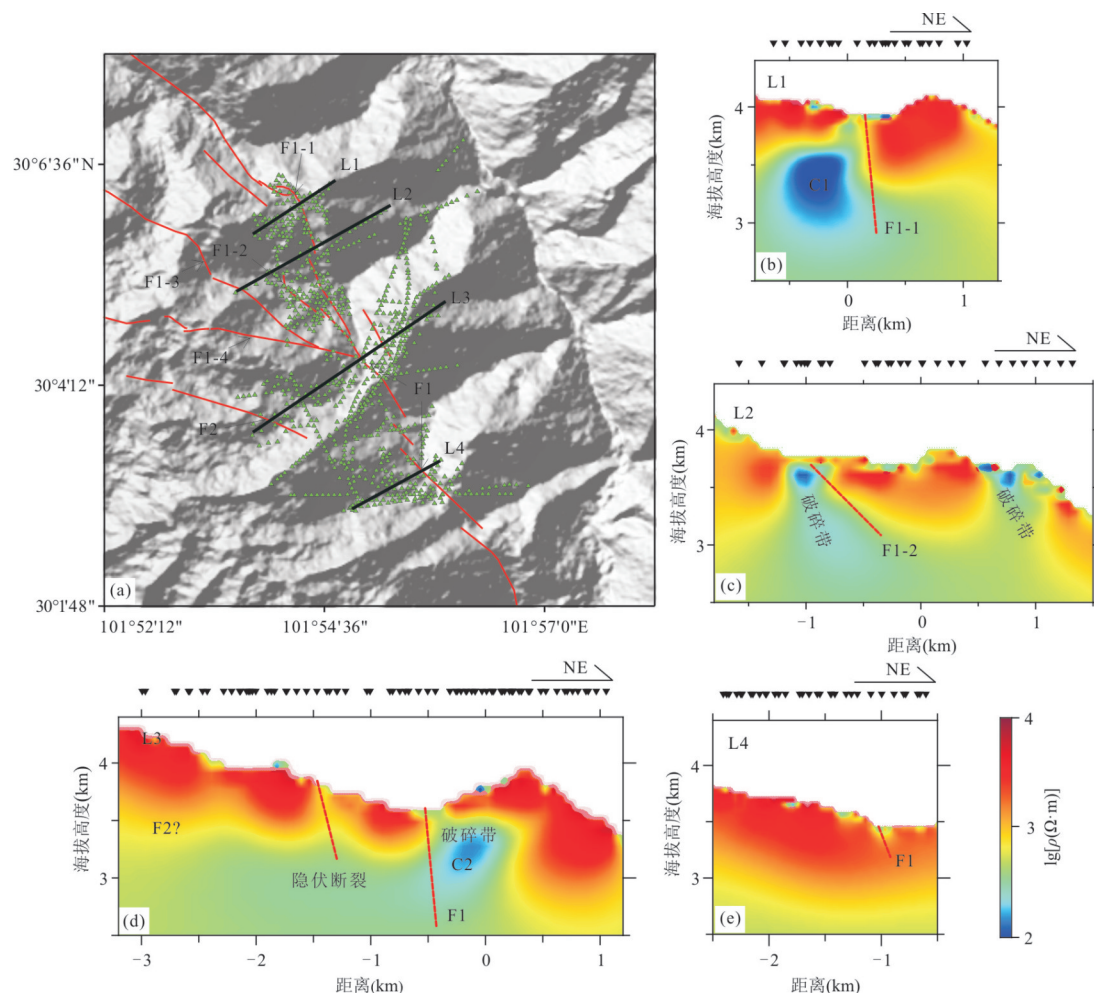


图5 色拉哈断裂不同区段的二维电性结构剖面

Fig.5 Electrical structure profiles of the Selaha fault in the region

的是F1在L4线的电性结构特征表现不够显著,可能与测点的分布有关。

4.3 地质灾害评估

铁路选线本身是以工程地质选线为主要原则,通过综合勘察手段对铁路线路沿线的地质环境与地质体的稳定性作出可靠的评价或者预测(余年等, 2017),才能最终确定具体的设计路线.本文采用三维带地形反演技术,发现在色拉哈断裂带及邻区发育有C1和C2两处高导异常体,是铁路选线工作人员在设计路线过程中进行避让的关键地区. C1靠近木格措南阶区,横向展布约500 m,反映了断裂本身已经发生强烈的构造变形,推测深部构造很可能是含水的破碎带或者是泥质的构造软岩. C2位于色拉哈主断裂F1的北东侧,属于多条分支断裂的交汇区,近年来色拉哈断裂本身地震频发,导致其库伦应力也明显增大(Wang *et al.*, 2009),这种断裂交汇区必然是应力主要集中的位置,而

C2本身应该也是一处含水或者夹泥的断裂破碎带,需要作出避让方案.同时,本文研究表明,除部分地区是受断裂控制的破碎带,地表至500 m以浅的电性结构主要表现为高阻特征,围岩相对稳定,且不易破裂变形,因此高阻区才是铁路路线设计的理想区域.电性结构进入700 m以下的深部地区主要表现为低阻特征,推测是多处分支断裂在深部延伸在一起,形成一条宽度达2 km的断裂破碎带,推测是含水或者夹泥的构造软岩区,这一认识可为隧道路线设计提供可靠的依据。

5 讨论

5.1 平地形与带地形反演结果对比

复杂地形条件下,采用带地形反演技术,可以更为接近实际的地质背景.为了进一步验证带地形反演工作的必要性,本文开展了平地形反演工作,

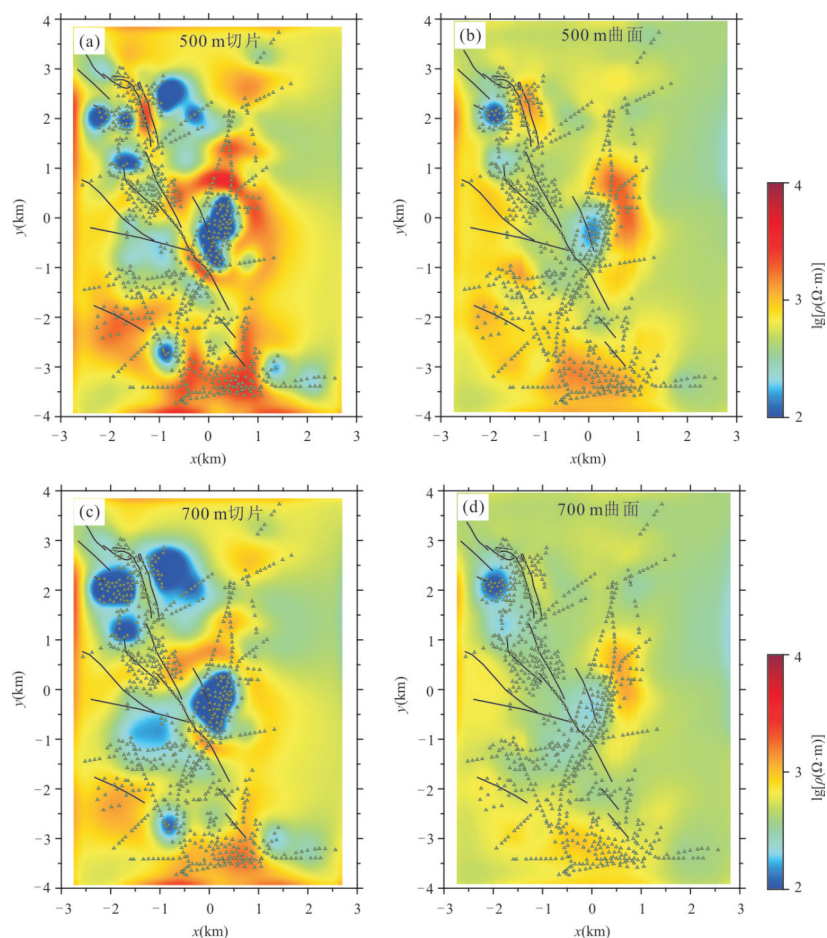


图6 平地地形与带地形反演电性结构对比

Fig.6 Electrical structure comparison between 3-D inversion without topography and 3-D inversion with topography

图a和c分别是500 m和700 m的电阻率切片;图b和d分别是500 m和700 m的电阻率曲面

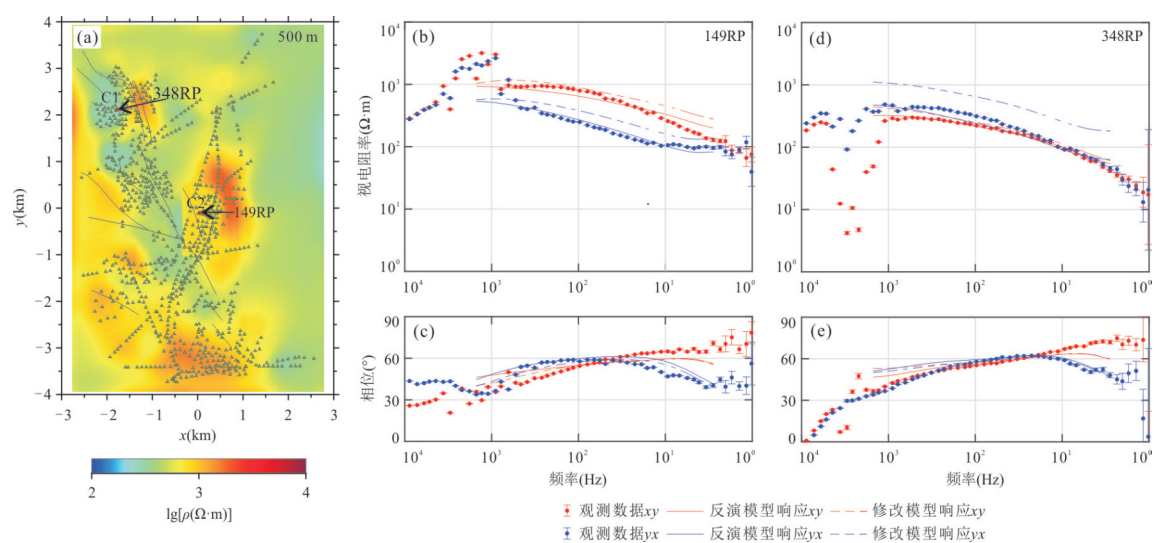


图7 电阻率模型的正演验证

Fig.7 Forward modeling test for resistivity models

在不改变任何反演参数的条件下,获得了测区内平地形的电性结构,最终 RMS 误差为 2.29。图 6 展示

的是 500 m 和 700 m 平地地形反演与带地形反演的电性结构对比示意图。二者对比后,带地形反演发现

的 C1 和 C2 在平地形的反演结果中更为显著,但是平地形反演的结果出现了更大范围的高导异常,其中有一部分高导异常很可能是受地形影响而出现的假异常,这些假异常对于开展断裂与电性结构的综合分析势必带来很大的影响.相比来说,带地形反演结果更真实地反映了地下介质的信息,更能反映色拉哈断裂与电性结构之间的关系,可以用于分析断裂的几何展布特征;而平地形反演结果则不能反映断裂与电性结构的关系,且容易产生假异常,不利于后续开展地质构造解释工作.

5.2 灵敏度测试

文中针对 C1 和 C2 开展了正演模型验证,以确保这两处高导体是受观测数据约束的.正演验证方法如下:对 C1 处异常体填充电阻率为 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 的围岩,对 C2 处异常体填充电阻率为 $800\ \Omega\cdot\text{m}$ 的围岩.图 7 是正演计算验证的结果,分别展示了控制 C1 和 C2 两处高导体的测点 149RP 和 348RP 的反演模型响应以及修改后的模型响应.研究表明,C1 和 C2 都是受观测数据约束的真实结果,这为笔者进行电性结构的解释提供了可靠依据.

6 结论

本文采用大地电磁的三维带地形反演技术,反演网格数超过 200 万个,参与反演测点数目达 826 个,最终获得了色拉哈断裂带及邻区高分辨率的三维电性结构,主要取得以下 3 点认识:

(1) 本项研究工作野外观测的测点呈面状分布,改变了传统隧道选址过程中沿测线布设的野外观测模式,后续采用的是三维带地形反演技术,对于复杂地形条件的隧道选址工作发挥了重要作用.

(2) 研究区内浅部 0~500 m 整体表现为高阻特征,且测区南部较北部的高阻体更加完整,推断为测区内地表出露的花岗岩或者糜棱岩建造;500~2 000 m,电阻率下降显著,整体表现为低阻特征,推测是色拉哈分支断裂在深部交汇在一起,并且在裂隙内可能因含水导致电阻率降低,反映深部具有很好的连通性.

(3) 研究表明,测区内发育两处高导异常体,一处是位于木格措南阶区西北侧的 C1 ($<100\ \Omega\cdot\text{m}$),一处是色拉哈分支断裂的交汇区东北侧的 C2 ($<100\ \Omega\cdot\text{m}$),两处高导体都有一定的规模,推测为富集水体或者夹泥的断裂破碎带,应及时修改相关设计方案,予以避让,以免在后续线路施

工过程中带来更大的风险.

致谢:感谢三位审稿人提出的宝贵意见!

References

- Bai, M. K., Chevalier, M. L., Pan, J. W., et al., 2018. Southeastward Increase of the Late Quaternary Slip-Rate of the Xianshuihe Fault, Eastern Tibet. Geodynamic and Seismic Hazard Implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 485: 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.12.045>
- Blake, S., Henry, T., Muller, M. R., et al., 2016. Understanding Hydrothermal Circulation Patterns at a Low-Enthalpy Thermal Spring Using Audio-Magnetotelluric Data: A Case Study from Ireland. *Journal of Applied Geophysics*, 132: 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.06.007>
- Cagniard, L., 1953. Basic Theory of the Magneto-Telluric Method of Geophysical Prospecting. *Geophysics*, 18(3): 605–635. <https://doi.org/10.1190/1.1437915>
- Chen, X. B., Zhao, G. Z., Zhan, Y., 2004. A Visual Integrated Windows System for MT Data Process and Interpretation. *Oil Geophysical Prospecting*, 39(Suppl.): 11–16 (in Chinese with English abstract).
- Egbert, G. D., 1997. Robust Multiple-Station Magnetotelluric Data Processing. *Geophysical Journal International*, 130(2): 475–496. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb05663.x>
- Egbert, G. D., Kelbert, A., 2012. Computational Recipes for Electromagnetic Inverse Problems. *Geophysical Journal International*, 189(1): 251–267. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05347.x>
- Gamble, T. D., Goubau, W. M., Clarke, J., 1979. Magnetotellurics with a Remote Magnetic Reference. *Geophysics*, 44(1): 53–68. <https://doi.org/10.1190/1.1440923>
- Guo, C. B., Du, Y. B., Zhang, Y. S., et al., 2015. Geohazard Effects of the Xianshuihe Fault and Characteristics of Typical Landslides in Western Sichuan. *Geological Bulletin of China*, 34(1): 121–134 (in Chinese with English abstract).
- Kelbert, A., Meqbel, N., Egbert, G. D., et al., 2014. ModEM: A Modular System for Inversion of Electromagnetic Geophysical Data. *Computers & Geosciences*, 66: 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.01.010>
- Li, H. B., Pan, J. W., Sun, Z. M., et al., 2021. Continental Tectonic Deformation and Seismic Activity: A Case Study from the Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 95(1): 194–213 (in Chinese with English abstract).

- Li, P. B., Li, Z., Li, H., 2019. Application of High-Frequency Magnetotelluric Method to Railway Tunnel Exploration. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 16(5): 713—717 (in Chinese with English abstract).
- Liao, L., Yao, Q., Liu, J., et al., 2015. Discussion on Seismogenic Structures of the 2014 Kangding Ms6.3, Ms5.8 Earthquakes with Multiple Mainshocks. *Earthquake Research in China*, 31(4): 638—646 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Hu, D. G., Xu, S. F., et al., 2020. Electrical Anisotropic Structure in the Quaternary Volcanic Region of North Hainan Island and Its Geological Implications. *Earth Science*, 45(1): 330—340 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Ren, F., Yin, F. G., et al., 2020. Key Zones of Oceanic Plate Geology and Sichuan-Tibet Railway Project. *Earth Science*, 45(7): 2293—2304 (in Chinese with English abstract).
- Pan, J. W., Li, H. B., Chevalier, M. L., et al., 2020. A Newly Discovered Active Fault on the Selaha-Kangding Segment along the SE Xianshuihe Fault: The South Mugecuo Fault. *Acta Geologica Sinica*, 94(11): 3178—3188 (in Chinese with English abstract).
- Parker, R. L., Booker, J. R., 1996. Optimal One-Dimensional Inversion and Bounding of Magnetotelluric Apparent Resistivity and Phase Measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 98(3—4): 269—282. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(96\)03191-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(96)03191-3)
- Ruan, S., Zhang, J., Sun, Y. B., et al., 2015. AMT Impedance Phase Invariant Correction Based on 3D MT Modeling Technology. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(2): 685—696 (in Chinese with English abstract).
- Tikhonov A. N., 1950. On Determining Electrical Characteristics of the Deep Layers of the Earth's crust. *Doklady*, 73(2):295—297.
- Wang, H., Wright, T. J., Biggs, J., 2009. Interseismic Slip Rate of the Northwestern Xianshuihe Fault from InSAR Data. *Geophysical Research Letters*, 36(3): L03302. <https://doi.org/10.1029/2008GL036560>
- Wang, Z. W., Xu, Z. X., Feng, T., et al., 2021. Geological Line Selection of Xianshuihe Structural Zone of Sichuan-Tibet Railway. *Journal of Engineering Geology*, 29(2): 466—477 (in Chinese with English abstract).
- Wei, W. B., Jin, S., Ye, G. F., et al., 2003. Methods to Study Electrical Conductivity of Continental Lithosphere. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 15—22 (in Chinese with English abstract).
- Wen, X. Z., Allen, C. R., Luo, Z. L., et al., 1989. Segmentation, Geometric Features, and Their Seismotectonic Implications for the Holocene Xianshuihe Fault Zone. *Acta Seismologica Sinica*, 11(4): 362—372 (in Chinese with English abstract).
- Wen, X. Z., Ma, S. L., Xu, X. W., et al., 2008. Historical Pattern and Behavior of Earthquake Ruptures along the Eastern Boundary of the Sichuan-Yunnan Faulted-Block, Southwestern China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 168(1—2): 16—36. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2008.04.013>
- Xu, X. W., Cheng, J., Xu, C., et al., 2014. Discussion on Block Kinematic Model and Future Themed Areas for Earthquake Occurrence in the Tibetan Plateau: Inspiration from the Ludian and Jinggu Earthquakes. *Seismology and Geology*, 36(4): 1116—1134 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Wu, X. Y., Yu, G. H., et al., 2017. Seismological Signatures for Identifying $M \geq 7.0$ Earthquake Risk Areas and Their Preliminary Application in Mainland China. *Seismology and Geology*, 39(2): 219—275 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Zhang, P. Z., Wen, X. Z., et al., 2005. Features of Active Tectonics and Recurrence Behaviors of Strong Earthquakes in the Western Sichuan Province and Its Adjacent Regions. *Seismology and Geology*, 27(3): 446—461 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Li, H. B., Tang, Z. M., et al., 2011. The Transformation of the Terrain Structures of the Tibet Plateau through Large-Scale Strike-Slip Faults. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3157—3170 (in Chinese with English abstract).
- Ye, T., Chen, X. B., Yan, L. J., 2013. Refined Techniques for Data Processing and Two-Dimensional Inversion in Magnetotelluric(III): Using the Impressing Method to Construct Starting Model of 2D Magnetotelluric Inversion. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(10): 3596—3606 (in Chinese with English abstract).
- Yu, N., Hu, X. Y., Li, J., et al., 2017. Electrical Structure of the Longling Area in Western Yunnan and Its Effect on Route Selection of the Dali-Ruili Railway. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(6): 2442—2455 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. Z., 2013. A Review on Active Tectonics and Deep Crustal Processes of the Western Sichuan Region, Eastern Margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 584: 7—22. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.02.021>
- Zhang, Y. Z., Replumaz, A., Leloup, P. H., et al., 2017. Cooling History of the Gongga Batholith: Implications

- for the Xianshuihe Fault and Miocene Kinematics of SE Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 465: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.02.025>
- Zhou, R. J., He, Y. L., Huang, Z. Z., et al., 2001. The Slip Rate and Strong Earthquake Recurrence Interval on the Qianning-Kangding Segment of the Xianshuihe Fault Zone. *Acta Seismologica Sinica*, 23(3): 250–261 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. X., 2009. Application of Audio Magnetotelluric in Geological Engineering Exploration of Railway Tunnel. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 6(3): 294–298 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈小斌, 赵国泽, 詹艳, 2004. MT 资料处理与解释的 Windows 可视化集成系统. 石油地球物理勘探, 39(增刊): 11–16.
- 郭长宝, 杜宇本, 张永双, 等, 2015. 川西鲜水河断裂带地质灾害发育特征与典型滑坡形成机理. 地质通报, 34(1): 121–134.
- 李海兵, 潘家伟, 孙知明, 等, 2021. 大陆构造变形与地震活动: 以青藏高原为例. 地质学报, 95(1): 194–213.
- 李鹏博, 李铮, 李海, 2019. 高频大地电磁法在铁路隧道勘察中的应用. 工程地球物理学报, 16(5): 713–717.
- 廖林, 姚琪, 刘杰, 等, 2015. 2014 年康定 Ms6.3、Ms5.8 震群型地震发震机理讨论. 中国地震, 31(4): 638–646.
- 刘营, 胡道功, 许顺芳, 等, 2020. 琼北第四纪火山区电各向异性结构及其地质意义. 地球科学, 45(1): 330–340.
- 潘桂棠, 任飞, 尹福光, 等, 2020. 洋板块地质与川藏铁路工程地质关键区带. 地球科学, 45(7): 2293–2304.
- 潘家伟, 李海兵, Chevaliter, M. L., 等, 2020. 鲜水河断裂带色拉哈-康定段新发现的活动断层: 木格措南断裂. 地质学报, 94(11): 3178–3188.
- 阮帅, 张炯, 孙远彬, 等, 2015. 基于三维正演的音频大地电磁阻抗相位不变量校正技术. 地球物理学报, 58(2): 685–696.
- 王哲威, 徐正宣, 冯涛, 等, 2021. 川藏铁路鲜水河构造带地质选线研究. 工程地质学报, 29(2): 466–477.
- 魏文博, 金胜, 叶高峰, 等, 2003. 大陆岩石圈导电性的研究方法. 地学前缘, 10(1): 15–23.
- 闻学泽, Allen, C.R., 罗灼礼, 等, 1989. 鲜水河全新世断裂带的分段性、几何特征及其地震构造意义. 地震学报, 11(4): 362–372.
- 徐锡伟, 程佳, 许冲, 等, 2014. 青藏高原块体运动模型与地震活动主体地区讨论: 鲁甸和景谷地震的启示. 地震地质, 36(4): 1116–1134.
- 徐锡伟, 吴熙彦, 于贵华, 等, 2017. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用. 地震地质, 39(2): 219–275.
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 等, 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型. 地震地质, 27(3): 446–461.
- 许志琴, 李海兵, 唐哲民, 等, 2011. 大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造. 岩石学报, 27(11): 3157–3170.
- 叶涛, 陈小斌, 严良俊, 2013. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(三): 构建二维反演初始模型的印模法. 地球物理学报, 56(10): 3596–3606.
- 余年, 胡祥云, 李坚, 等, 2017. 滇西龙陵地区地壳电性结构及其对大瑞铁路地质选线影响研究. 地球物理学报, 60(6): 2442–2455.
- 周荣军, 何玉林, 黄祖智, 等, 2001. 鲜水河断裂带乾宁-康定段的滑动速率与强震复发间隔. 地震学报, 23(3): 250–261.
- 朱光喜, 2009. 音频大地电磁在铁路隧道工程勘察中的应用. 工程地球物理学报, 6(3): 294–298.