

基于地球物理电性特征的踏卡穹隆构造研究

姚文¹, 曹仁良¹, 谭洪旗², 张洪超¹, 严波¹

(1. 四川省地质调查研究院, 四川省金属地质调查研究所, 四川 成都 611730;

2. 四川省地质矿产(集团)有限公司, 四川 成都 610031)

摘要:这是一篇地球科学领域的论文。踏卡穹隆与江浪穹隆位于松潘—甘孜地块南缘,地质特征显示其物质组成、变质-变形特征较为相似。江浪穹隆发现有里伍、黑牛洞、中咀等铜锌矿床,但踏卡穹隆同层位还未发现相似矿床。为查明踏卡穹隆中深部构造特征及成矿的关系,本次开展了不同时代地层的地球物理电性参数测定和音频大地电磁测深剖面,以获得地下中、深部电性特征。结果表明,穹隆总体显示为两侧低、中阻,核部高阻为主夹杂低阻的特征,整体电性特征与穹隆结构的时空规律相吻合。深部电性剖面中出现3条主要低阻异常带,推断为低阻岩性、断层或构造破碎带的反映;3条主要高阻异常带,推断为踏卡穹隆内完整的中、高阻特征的中元古界里伍群上段(Pt_2^3)岩体反映。上述认识为探索踏卡穹隆中、深部地质空间结构提供了地球物理学上的证据。

关键词:地球科学;踏卡穹隆;中深部构造特征;地球物理;音频大地电磁测深;电性特征

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.01.005

中图分类号: P319 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2024)01-0032-09

引用格式:姚文,曹仁良,谭洪旗,等.基于地球物理电性特征的踏卡穹隆构造研究[J].矿产综合利用,2024,45(1):32-40.

YAO Wen, CAO Renliang, TAN Hongqi, et al. Structural research of Taka Dome based on geophysical electrical characteristics[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(1): 32-40.

松潘—甘孜造山带位居特提斯-喜马拉雅构造带东缘及环太平洋造山带的交汇部位,受印度板块、太平洋板块及欧亚板块的共同作用和影响,保存了古特提斯及新特提斯连续造山事件的构造证据^[1-2]。松潘—甘孜造山带南部的木里穹隆群由江浪穹隆、踏卡穹隆、长枪穹隆、恰斯穹隆和唐央穹隆组成。江浪穹隆核部里伍岩群中已发现有里伍、黑牛洞、中咀、挖金沟、柏香林矿、笋叶林、海底沟等铜锌矿床;江浪穹隆外围还发现有大牛场钨钨矿点、大黄坪子矿点、偏桥铜矿点、银洞子镍钴矿点。踏卡穹隆与江浪穹隆物质组成上相似,仅在外围发现黑尔巴矿点。

本次针对踏卡穹隆的核部、幔部、盖层位置开展基于地球物理电性特征的研究。本文在研究区域开展不同年代地层岩矿石的地球物理参数统

计和整理,总结电性参数特征,重点开展一条贯穿踏卡穹隆构造的音频大地电磁测深剖面,反演分析地下中、深部电性特征,结合地质背景信息,探索地层格架和刻画地层空间结构,为穹隆构造深部解析提供依据。

1 地质背景

踏卡穹隆位于扬子地台西缘,经历了多期变形变质作用和岩浆活动的叠加改造,多期构造置换与岩石变质作用相互交织,同步演变,构造、变质序列均十分复杂。大地构造处于康滇地轴西侧,松潘—甘孜造山带东南缘,北东向木里-锦屏山弧形推覆带南西侧后缘^[3-4]。区域地质构造主要由北东向木里-锦屏山弧形推覆构造带西侧后缘拆

收稿日期: 2023-07-10

基金项目: 四川省地质调查研究院科研项目(SCIGS-CZDXM-2023003)

作者简介: 姚文(1989-),男,硕士,工程师,主要从事地球物理矿产勘查。

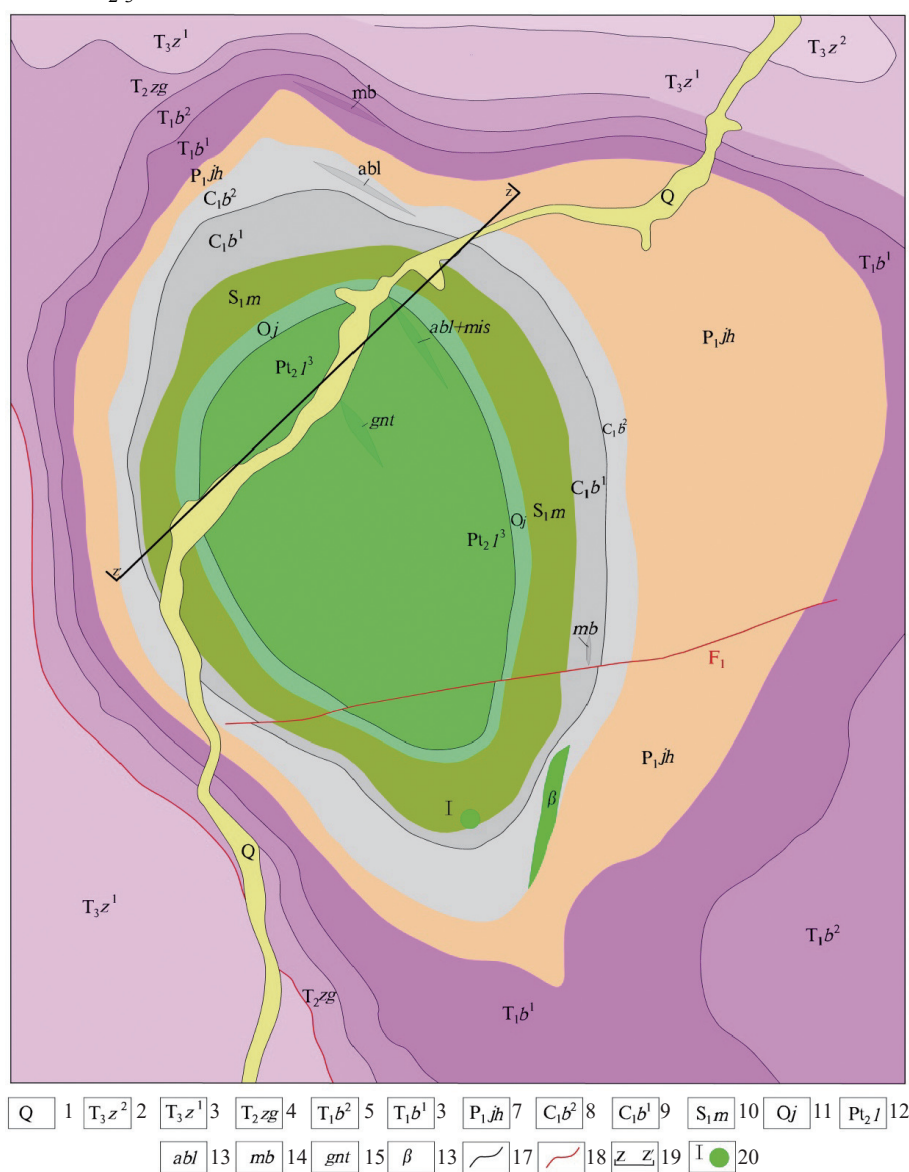
通信作者: 曹仁良(1988-),男,工程师,主要从事地球物理勘探应用与研究。

离出露的一系列由变质穹隆体，穹隆核部主要由元古界变质岩及浅变质的上古生界地层组成，向外依次出露中生界地层，推覆构造带内的穹隆均伴随有不同的矿产。

穹隆构造由核部、滑脱构造带及盖层组成，其中核部地层为中元古界里伍岩群上段（ Pt_2l^3 ）形成的堆垛地层系统，翼部地层为奥陶系江浪岩组（ Oj ）、志留系下统米黑组（ S_1m ）和石炭系下统甲黄沟组（ C_1b ）、二叠系中上统（ P_{1-2} ）组成，盖层为三叠系中上统（ T_{2-3} ）及第四系（图1）。穹

隆内部发育剥离断层、韧性剪切滑脱带、糜棱岩带等。各构造片岩带平面上呈圆弧形，平行主拆离面与核部地层分布。穹隆经历过多期变形-变质作用及不同程度的构造置换，形成不同的构造样式。

踏卡穹隆周边存在印支期（220~205 Ma）和燕山早期（165~150 Ma）花岗岩^[5-8]。踏卡穹隆外围花椒坪分布有约0.5 km²的花岗岩岩株，其成岩年龄为163 Ma。燕山期花岗岩的侵入和演化为穹隆构造的形成及成矿金属元素的活化迁移富集成矿提供了热力和动力条件。穹隆及周缘的岩浆活



1、第四系；2、杂谷脑组二段；3、杂谷脑组一段；4、扎尕山组；5、菠茨沟组二段；6、菠茨沟组一段；7、甲黄沟组；8、坝央地组二段；9、坝央地组一段；10、米黑沟组；11、江浪岩组；12、里伍岩群；13、斜长角闪岩；14、大理岩；15、变粒岩；16、辉绿岩；17、实测地质界线；18、实测断层界线；19、物探测线；20、黑尔巴铜矿点及编号

图1 川西踏卡穹隆地质略图

Fig.1 Geological sketch map of the Taka dome

动频繁, 侵入相的主要为花岗岩, 少量基性岩和超基性岩, 喷发相的主要为基性火山岩, 及与各期岩浆活动有关的派生脉岩。

2 地球物理特征

针对研究区 4 种地层年代的标志性岩层分布情况, 系统采集和测定 166 块的岩矿石标本物性参数, 通过统计数值区间、算术平均值和直方图分布等, 总结岩矿石标本的电阻率参数的规律和特征见表 1 和图 2。

(1) 石炭系下统 (C_1b) 出露矿点的蚀变带矿化岩石与围岩的大理岩存在电阻率的差异, 蚀

变带矿物电阻率算术平均值为 $5\,360.69\ \Omega\cdot m$, 大理岩为 $8\,141.32\ \Omega\cdot m$, 均表现为高阻, 但差异较小; 大理岩的电阻率主要在 $1\,000\sim 30\,000\ \Omega\cdot m$ 区间, 近似正态分布。

(2) 踏卡穹隆不同年代的地层岩矿石标本具有不同的地球物理电性差异。奥陶系下统江浪岩组 (O_j) 纯白石英岩电阻率算术平均值为 $6\,223.08\ \Omega\cdot m$, 主要在 $3\,000\sim 10\,000\ \Omega\cdot m$ 区间, 集中度高, 表现为高阻; 古元古界里伍岩群上段 (Pt_2f^3) 的石英岩和黑云角闪斜长片岩处在同一岩群, 均表现为中阻, 电阻率算术平均值均在 $3\,000\ \Omega\cdot m$ 附近, 数值分布区间近似; 志留系下统米黑沟组

表 1 岩矿标本电性参数测定结果

Table 1 Statistical of electrical parameters of rock ore specimens

地层/年代	岩性	标本数量	电阻率 $\rho/(\Omega\cdot m)$			电性特征
			最小值	最大值	算术平均值	
石炭系下统 (C_1b)	大理岩	33	291.3	45 937.73	8141.32	高阻
	蚀变带矿化 (矿点)	9	7.06	18 735.39	5360.69	高阻
古元古界里伍岩群上段 (Pt_2f^3)	石英岩	31	294.9	7729.18	2679.47	中阻
	黑云角闪斜长片岩	31	208.45	19 520.22	3020.36	中阻
奥陶系下统江浪岩组 (O_j)	纯白石英岩	31	66.83	16 733.89	6223.08	高阻
志留系下统米黑沟组 (S_1m)	绿泥斜长片岩	31	17.3	2221.19	486.68	低阻

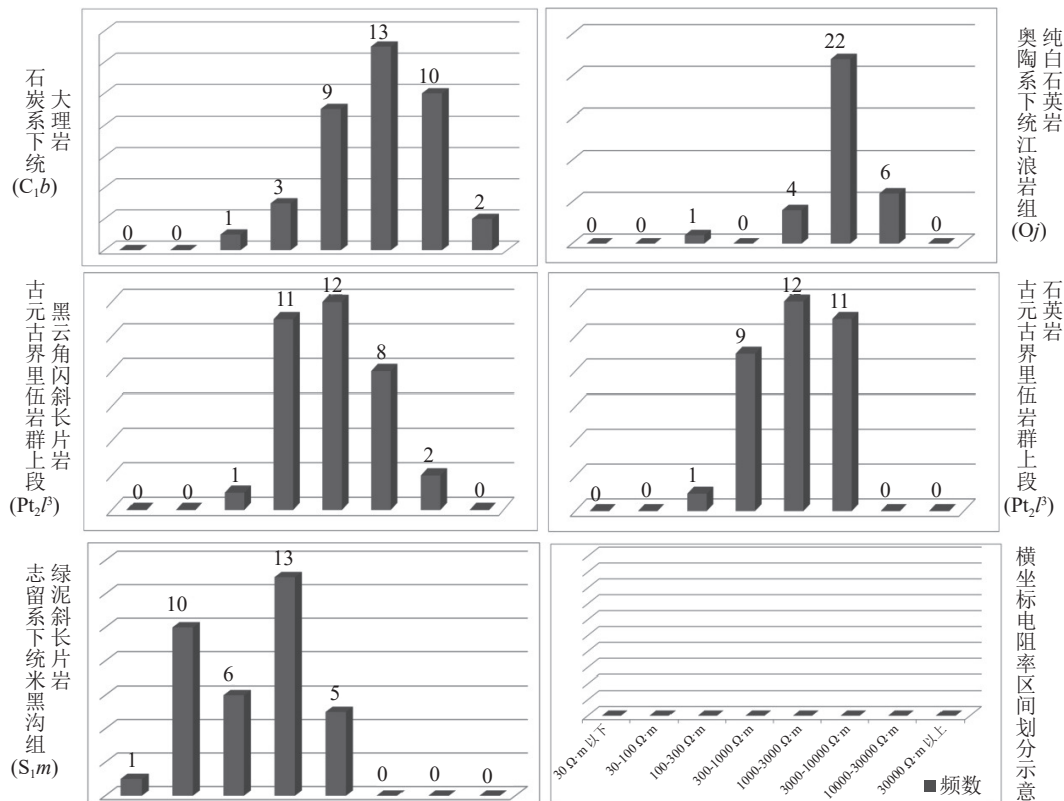


图 2 岩矿石标本电阻率

Fig.2 Resistivity of rock and ore specimens

(S_1m) 的绿泥斜长片岩呈现片状形态, 电阻率整体分布在低值区间, 算术平均值为 $486.68 \Omega.m$, 表现为明显的低阻, 主要原因为岩石构造呈现片状形态而且硫化矿物质含量多。

3 地球物理方法原理及参数

3.1 方法原理

根据踏卡穹隆不同地层的电阻率差异, 本次工作优选的地球物理勘查方法为音频大地电磁法 (AMT)。该方法是利用高空放电形成的高频电磁波作为勘探场源, 这种高空电磁场可近似为平面电磁波、垂直入射到大地介质中, 在大地介质中将产生感应电磁场, 此感应电磁场带来地下介质的电磁响应^[9-12]。其主要特点是装备轻便、无需人工源、信息丰富、技术成熟、处理手段多样化。根据工作的技术和任务要求, 以及地形、地质情况, 采用如下装置进行地面探测 (图3)。

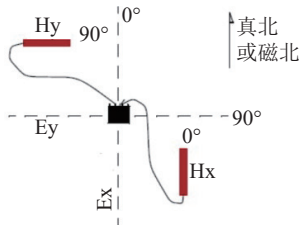


图3 音频大地电磁法野外布置

Fig.3 Field layout of audio magnetotelluric method

在均匀大地和水平层状大地情况下, 波阻抗 Z (单位 $\Omega.m$) 是电场 E 和磁场 H 的水平分量的比值。

$$Z = \left| \frac{E}{H} \right| e^{i(\varphi_E - \varphi_H)}$$

$$\rho_{xy} = \frac{1}{5f} |Z_{xy}|^2 = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{5f} |Z_{yx}|^2 = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2$$

式中, f 为频率 (单位 Hz); ρ 为电阻率 (单位 $\Omega.m$); E 为电场强度 (单位 mv/km); H 为磁场强度 (单位 nT); φ_E 为电场相位 (单位 rad), φ_H 为磁场相位 (单位 rad)。

在电磁理论中, 把电磁场 (E 、 H) 在大地中传播时, 其振幅衰减到初始值 $1/e$ 时的深度, 定义为穿透深度或趋肤深度 (δ), 即:

$$\delta = 503 \sqrt{\rho/f}$$

由上式可知, 趋肤深度 δ (单位 m) 将随电阻

率 (ρ) 和频率 (f) 变化。高频信息反映地下浅部地层电性特征, 反之, 低频信息反映地下中、深部地层电性特征。在一个宽频带上观测电场和磁场信息, 并由此计算出视电阻率和相位, 进而确定出大地的地电特征和地下构造。

3.2 观测参数优选

本次使用 V8 多功能综合电法仪。在噪音平静的区域开展仪器标定, 依据主机和磁棒的标定曲线, 标定数据预处理后, 主机仪器标定曲线振幅和相位在 $10\ 400\ Hz$ 以下稳定, 磁棒 H_x 和 H_y 的标定曲线基本一致, 振幅和相位在 $11.2 \sim 10\ 400\ Hz$ 之间稳定, 优选频率 $11.2 \sim 10\ 400\ Hz$ 范围数据参与最终反演^[13-14]。

结果比对确定观测时间 $40\ min$ 以上, 电极距为 $20\ m$, 在保障观测质量的情况下, 确保工作效率。开展的设备一致性, 测定视电阻率和相位的均方相对误差, 各指标均方相对误差均不大 2% , 说明仪器的稳定性强。

野外布设 AMT 剖面线设定为 Z 线, 方位为 45° , 点距为 $50 \sim 100\ m$, 共 80 个测点, 贯穿整个踏卡穹隆构造地层单元。数据采集张量模式数据 (以磁北方向为 X), 即采集相互垂直的两对电场 E_x 、 E_y 和垂直方向的磁场分量 H_x 、 H_y 。

3.3 数据处理

采用 SSMT-2000 进行数据的预处理, 得到各个观测点的视电阻率曲线, 之后使用成都理工大学研发的 MTSOFT2D 软件对数据进行处理。优选频率 $11.2 \sim 10\ 400\ Hz$ 范围数据参与最终反演, 设定反演深度不超过 $2\ km$; 比对 BOSTICK 和一维 OCCAM 初始模型, 选取初始电阻率 $500\ \Omega.m$ 的均匀半空间为初始模型, 进行起伏地形的二维非线性共轭梯度 [NLGC] 反演。

4 电性特征及构造分析

研究区内主要完成音频大地电磁测深 (AMT) 主测线 1 条, 方向为 45° , 贯穿踏卡穹隆内主要构造、岩层和地层, 选择反映主构造横切断面地电结构的 TM 模式反演^[15-18]。主测线的 AMT 地质-物探综合解释推断剖面图, 整体反演深度为 $2\ km$, 见图 4。

4.1 整体特征分析

整体反演剖面电阻率呈现: 穹隆两侧低、中阻, 核部高阻为主夹杂低阻的特征 (图 5)。穹隆两侧电阻率形态表现出一定的对称性, 与穹隆两侧的地层岩性分布的对称性具有一致性; 即穹隆两

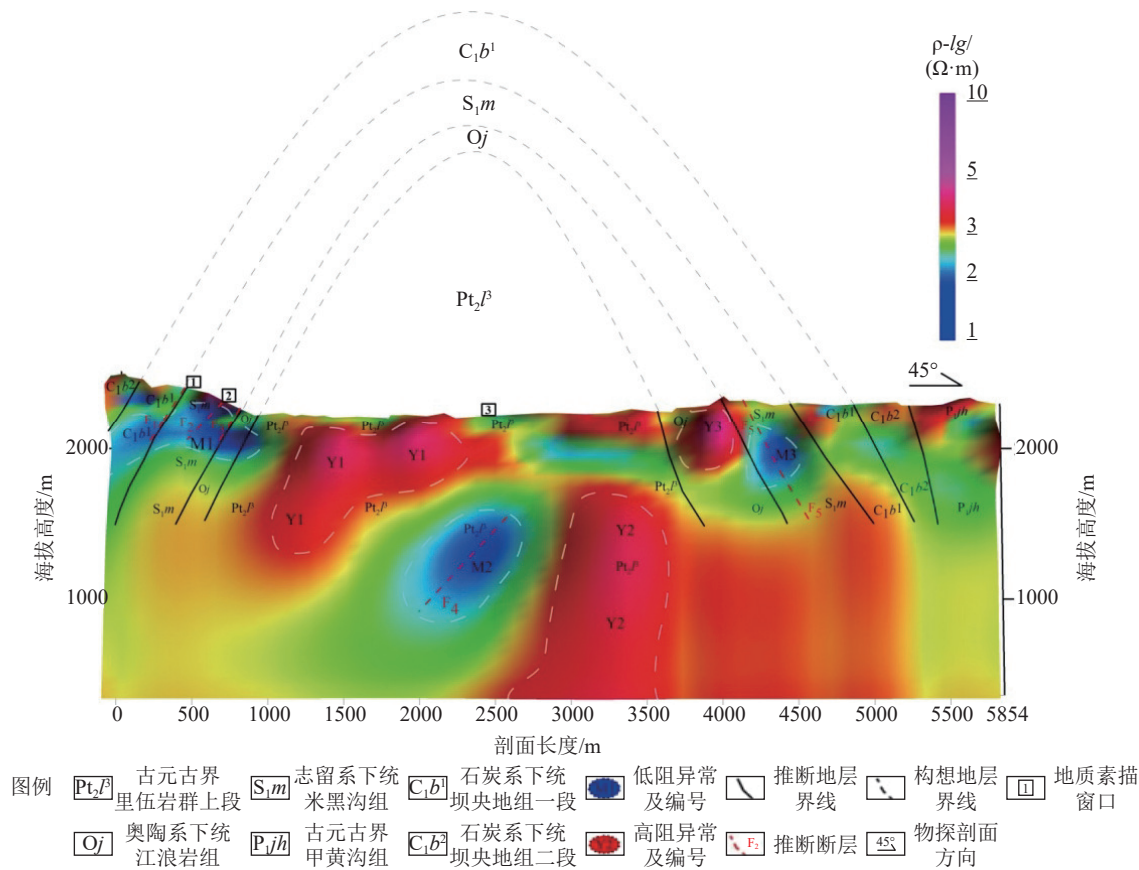


图4 踏卡穹隆地质-物探综合解释

Fig.4 Geological-geophysical interpretation integrated map of the Taka Dome

侧的志留系下统米黑沟组 (S_1m)、石炭系甲黄沟组一段 (C_1b^1) 和石炭系坝央地组二段 (C_1b^2) 地层的电性总体特征为中、浅层均表现为相对中、低阻, 中、深层均表现为相对中、高阻。核心区域呈现高阻夹杂低阻, 推断为穹隆核部中元古界里伍群上岩带 (Pt_2f) 较完整的高阻岩体的反映, 夹杂隐伏的构造破碎带^[19-21]。

根据穹隆构造机理和穹隆演化过程 (图5), 与岩浆作用相关的核部花岗岩或者混合岩完整致密, 会呈现高阻特征; 岩浆作用前期穹隆核部上顶岩层会遭到挤压而使得岩层破碎^[22-25], 随着岩浆冷却收缩, 压扁区和收缩区均会呈现岩层破碎带, 出现低阻带空间; AMT 反演剖面反映的地下整体电性特征, 与穹隆结构的演化时空规律相吻合。

(2) 高阻异常分析

AMT 主测线, 划分出 3 条高阻异常带 Y1、Y2 和 Y3, 推断为穹隆构造内完整的高阻特征的岩体反映。

① 高阻红色异常带 Y1 和 Y2 处于踏卡穹隆核部区域。

高阻异常带 Y1 隐伏较浅, 异常形态为宽条

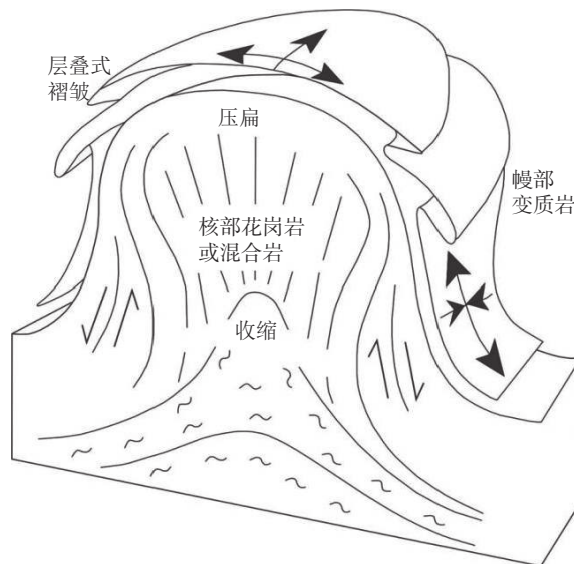


图5 与岩浆作用相关的穹隆结构示意 (据文献 [26])

Fig.5 Schematic of dome structure associated with magmatism

带, 整体向东北倾斜扭曲, 倾角为 $0 \sim 45^\circ$, 下伏低阻异常带 M2, 异常中心轴长约 1500 m, 短轴约 450 m, 电阻率数值范围为 $1600 \Omega \cdot m$ 以上 (说

明：剖面图中电阻率取10的对数成图，下同)，推断为电性参数呈现为中、高阻的中元古界里伍群(Pt_2f^3)上段完整岩体的反映。

高阻异常带Y2隐伏较深，垂向向下延伸且未封闭，异常形态为长条棒槌状，整体向东北倾斜，倾角约 85° ，延伸长约1400 m，宽约为600 m，电阻率数值范围为 $1\,600\,\Omega\cdot m$ 以上，同样推断为电性参数呈现为中、高阻的中元古界里伍群(Pt_2f^3)上段完整岩体的反映。

②高阻红色异常带Y3，异常形态为团状，直径近420 m，Y3电阻率数值范围为 $1\,600\,\Omega\cdot m$ 以上，推断为完整的奥陶系下统江浪岩组(Oj)厚层块状纯石英岩的反映，与上伏志留系地层(S_1m)呈平行不整合接触。

(3) 低阻异常分析

AMT主测线，划分出3条主要低阻异常带M1、M2和M3，推断为低阻地层岩性或构造破碎

带的反映。

①低阻异常带M1，异常形态近似为长条形，整体呈现为水平走向，异常宽约300 m，长约1000 m，电阻率数值范围为 $200\,\Omega\cdot m$ 以下。该区域靠近地表，地质信息显示为多个地层交接触，低阻异常带M1的出现，首先推断是低阻岩性的志留系下统米黑沟组(S_1m)炭质硅质板岩背景反映，其次推断由于穹隆构造作用，层间存在滑脱蚀变带引起构造破碎，以上均能强化地表的感应电磁响应。图6(1)反映的下统坝央地组一段(C_1b^1)和志留系下统米黑沟组(S_1m)存在不整合接触，断层 F_1 内夹杂石英脉，两岩层间的裂隙普遍见褐铁矿化和黄铁矿化。图6(2)反映的是志留系下统米黑沟组(S_1m)二云石英片岩中的层间滑脱蚀变带，断层 F_2 贯穿地层夹杂石英脉，层间见高岭土化、绿泥石化、褐铁矿化和黄铁矿化，属于典型的断层破碎带。

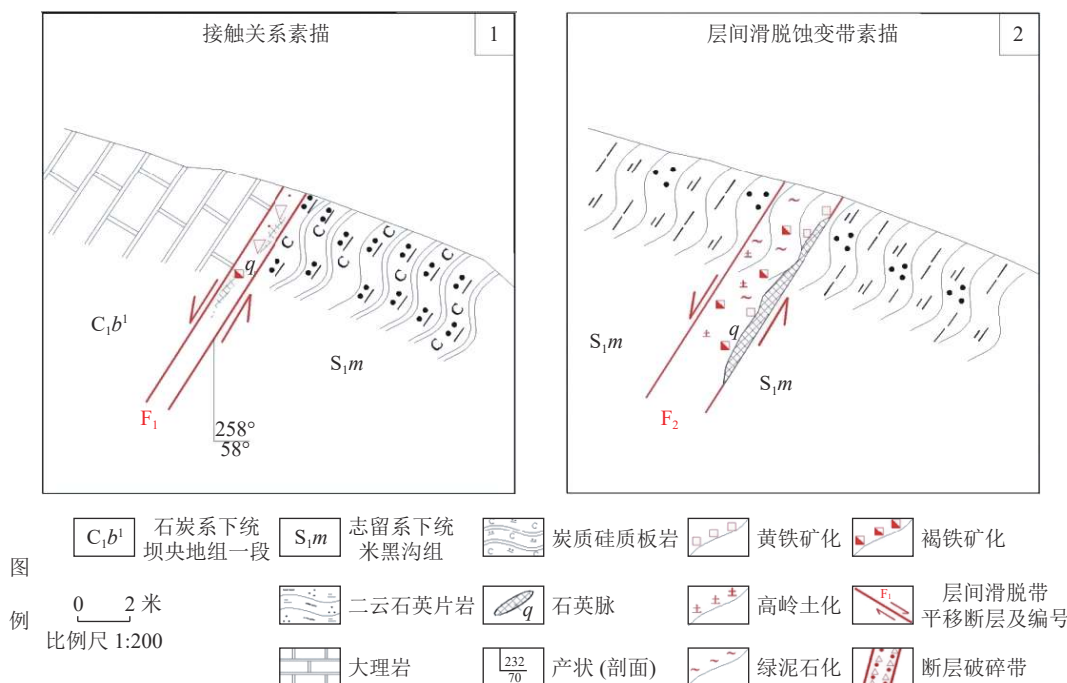


图6 踏卡穹隆地层接触关系及层间滑脱蚀变带

Fig.6 Stratigraphic contact relationship and inter layer gliding altered belt of the Taka Dome

②低阻异常带M2，异常形态近似为长条椭圆形，整体向东北倾斜，倾角约为 45° ，延伸长度约900 m，异常上部较窄约350 m，电阻率数值范围为 $200\,\Omega\cdot m$ 以下。该区域为踏卡穹隆的核部，地表地质调查(图7)显示出露地层为中元古界里伍群岩群上段(Pt_2f^3)，岩性为二云母石英岩，穿插石英脉，为完整的岩体，未见断层或者破碎带的相关信息。完整的二云母石英岩岩体应显示为高

阻电性特征，但显示为低阻异常，按照穹隆构造形成机理(图5)，推断为由于穹隆顶部压扁破碎或者穹隆核部收缩坍塌，形成的隐伏构造破碎带断层 F_4 。

③低阻异常带M3，异常形态为团状，直径近400 m，电阻率数值范围为 $200\,\Omega\cdot m$ 以下。地表地质调查存在断层 F_5 ，推断该断层继续顺层向下延伸，并且地表采集到地层志留系下统米黑沟组

(S_7m) 的绿泥斜长片岩, 岩矿石电性显示为相对低阻高极化的特征, 强化和凸显了低阻异常带 M3 在数值上与奥陶系下统江浪岩组 (O_j) 完整白色厚层块状纯石英岩呈现的高阻异常带 Y3 的对比度和差异性。

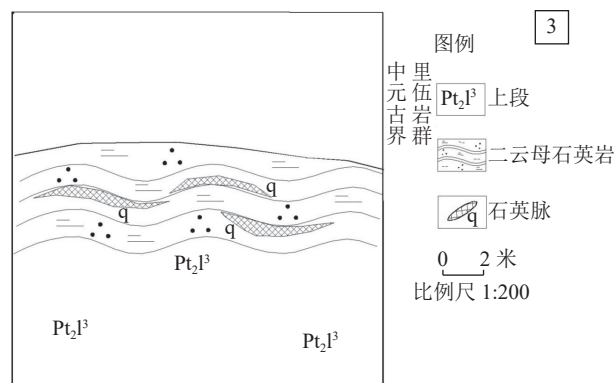


图 7 踏卡穹隆核部素描

Fig.7 Sketch at the core of the Taka Dome

5 结 论

(1) 踏卡穹隆内石炭系下统 (C_1b) 出露矿点的蚀变带矿化岩石与围岩的大理岩存在电阻率的差异, 差异较小; 不同年代的岩性存在明显的电性差异, 为开展地球物理勘查分析构造和地层奠定了物质和理论基础。

(2) 踏卡穹隆地下电性特征总体呈现: 穹隆两侧低、中阻, 核部高阻为主夹杂低阻, 整体电性特征与穹隆结构的演化时空规律相吻合; 地下电性剖面中出现 3 条主要低阻异常带 M1、M2 和 M3, 推断为低阻岩性、断层或构造破碎带的反映; 3 条主要高阻异常带 Y1、Y2 和 Y3, 推断为踏卡穹隆内完整的中、高阻特征的中元古界里伍群 (Pt_2l^3) 上段岩体反映。基于地球物理电性特征的勘查方法, 结合对穹隆地质体的形成和特点, 为探索踏卡穹隆中、深部地质空间结构, 提供了科学支撑。

参考文献:

- [1] 朱玉娣, 代堰铭, 王丽丽, 等. 松潘-甘孜造山带南缘二叠系变质玄武岩的成因与构造意义[J]. 地学前缘, 2017, 24(6): 98-109.
- [2] ZHU Y D, DAI Y P, WANG L L, et al. Petrogenesis and tectonic significance of the Permian metabasalts in the southern margin of the Songpan-Garze orogenic belt[J]. Earth Science Frontiers. 2017, 24(6): 98-109.
- [3] 刘晓佳, 许志琴. 松潘-甘孜造山带南部江浪穹隆中侏罗世花岗岩及构造意义[J]. 地质学报, 2021, 95(6):1754-1773.

LIU X J, XU Z Q. Tectonic significance of Middle Jurassic granites in the Jianglang dome, Southern Songpan-Ganzi orogen belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(6):1754-1773.

[3] 周家云, 谭洪旗, 龚大兴, 等. 川西江浪穹隆核部新火山花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素研究[J]. 矿物岩石, 2013, 33(4): 42-52.

ZHOU J Y, TAN H Q, GONG D X, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotopic composition of Xinhushan granite in the core of Jianglang Dome, Western Sichuan, China. [J]. Mineral Petrol, 2013, 33(4): 42-52.

[4] 陈道前. 四川里伍铜锌矿田控矿构造特征与找矿预测研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.

CHEN D Q. Research on the ore-controlling structures and prospecting of Liwu Cu-Zn orefield in Sichuan Province[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.

[5] 罗丽萍, 胡军亮, 谭洪旗, 等. 川西上基拱伟晶岩型铍矿绿柱石矿物化学特征[J]. 矿产综合利用, 2021(5): 113-119.

LUO L P, HU J L, TAN H Q, et al. Mineralogical characteristics of the pegmatite type beryl in Shangjigong, Western Sichuan Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5): 113-119.

[6] 谭洪旗, 朱志敏, 周雄, 等. 川西九龙地区两期伟晶岩型稀有金属成矿作用[J]. 矿产综合利用, 2022(1):15-24.

TAN H Q, ZHU Z M, ZHOU X, et al. Two periods rare metal mineralization of the pegmatite in Jiulong area, western Sichuan[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(1):15-24.

[7] 谭洪旗, 朱志敏, 周家云, 等. 松潘-甘孜地块南缘燕山早期矽卡岩型钨钼矿床——来自大牛场成岩成矿年代学及锆石 Hf 同位素证据[J]. 矿床地质, 2022, 41(1):53-68.

TAN H Q, ZHU Z M, ZHOU J Y, et al. Early Yanshanian skarn W-Mo deposit in the southern margin of Songpan-Ganze terrane: evidence from diagenetic and metallogenic chronology, zircon Hf isotopes in Daniuchang area[J]. Mineral Deposits, 2022, 41(1):53-68.

[8] 谭洪旗, 朱志敏, 罗林洪, 等. 川西洛莫地区燕山早期花岗岩对稀有金属成矿的制约[J]. 地质学报, 2023, 97(2):307-327.

TAN H Q, ZHU Z M, LUO L H, et al. Distribution of early Yanshanian granite and its constraints on the mineralization of rare metals in Luomo area, western Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(2):307-327.

[9] 肖晓, 汤井田, 周聪, 等. 庐枞矿集区大地电磁探测及电性结构初探[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 873-886.

XIAO X, TANG J T, ZHOU C, et al. Magnetotelluric sounding in the Lujiang-Zongyang ore-district and preliminary study of electrical structure[J]. Acta Geologica Sinica. 2011, 85(5): 873-886.

[10] 杨炳南, 周琦, 杜远生, 等. 音频大地电磁法对深部隐伏构造的识别与应用: 贵州省松桃县李家湾锰矿为例[J]. 地质科技情报, 2015, 34(6):26-32.

YANG B N, ZHOU Q, DU Y S, et al. Identification and

application of audio magnetotellurics to the deep buried structure: A case study of Lijiawan manganese deposit at Songtao County in Guizhou Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(6):26-32.

[11] 姚大为, 朱威, 王大勇, 等. 音频大地电磁法在武山外围深部勘查中的应用[J]. *物探与化探*, 2015, 39(1):100-103.

YAO D W, ZHU W, WANG D Y, et al. The effect of applying audio-frequency magnetotelluric method to the deep geological exploration: a case study of Wushan periphery in the Jiurui ore concentration area[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2015, 39(1):100-103.

[12] 李冉, 汤吉, 董泽义, 等. 云南南部地区深部电性结构特征研究[J]. *地球物理学报*, 57(4): 1111-1122.

LI R, TANG J, DONG Z Y, et al. Deep electrical conductivity structure of the southern area in Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(4): 1111-1122.

[13] 王桥, 杨剑, 夏时斌, 等. 四川盆地新区新层系页岩气的音频大地电磁探测—以川西南乐山地区须家河组为例[J]. *地质学报*, 2022, 96(2):699-711.

WANG Q, YANG J, XIA S B, et al. Audio magnetotelluric detection of shale gas in the new horizon of the new area of Sichuan basin: a case study of the Xujiache Formation in the Leshan area, southwest Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(2):699-711.

[14] 周月, 官大维, 延海涛, 等. 基于先验信息约束的重磁电联合三维交互反演技术实践——以彭山穹隆构造为例[J]. *物探与化探*, 2021, 45(2):308-315.

ZHOU Y, GUAN D W, YAN H T, et al. 3D gravity magnetic and electrical inversion modeling based on prior information: a case study of the dome structure in Pengshan area, Jiangxi Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(2):308-315.

[15] 何帅, 杨炳南, 李核良, 等. 音频大地电磁法对渝东南Ⅳ级地堑构造的识别及意义[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(1):270-276.

HE S, YANG B N, LI H L, et al. Identification of IV graben tectonics of Southeast Chongqing by AMT method and its significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(1):270-276.

[16] 杨剑, 王绪本, 王永华, 等. 电、磁综合方法在云南北衙铁金矿勘查中的应用[J]. *中国地质*, 2014, 41(2):602-610.

YANG J, WANG X B, WANG Y H, et al. The application of integrated geophysical methods of magnetic survey and AMT to the exploration of the Beiya gold deposit[J]. *Geology In China*, 2014, 41(2):602-610.

[17] 战启宁, 李鹏, 鹿琪, 等. 东北地区松辽盆地和大三江盆地群基底构造电性特征[J]. *世界地质*, 2021, 40(3):703-710.

ZHAN Q N, LI P, LU Q, et al. Electrical characteristics of basement structures of Songliao Basin and Dasanjiang Basin Group in Northeast China[J]. *Global Geology*, 2021, 40(3):703-710.

[18] 刘畅往, 何梅兴, 杜炳锐. 东北漠河盆地北部电性特征及其地质意义[J]. *物探与化探*, 2017, 41(6):1195-1203.

LIU C W, HE M X, DU B R. Electrical property of Mohe Basin in Northeast China and its geological significance[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(6):1195-1203.

[19] 曹创华, 徐定芳, 康方平, 等. 湖南省岳家桥典型岩溶发育区电性特征及构造格架研究[J]. *中国地质调查*, 2018, 5(6):68-74.

CAO C H, XU D F, KANG F P, et al. Electrical characteristics and tectonic framework of typical karst zone in Yuejiaqiao area of Hunan Province[J]. *Geological survey of China*, 2018, 5(6):68-74.

[20] 刘营, 徐义贤, 张胜业, 等. 华南地区岩石圈电性特征及其地球动力学意义[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(12):4234-4244.

LIU Y, XU Y X, ZHANG S Y, et al. Lithospheric electrical characteristics in South China and its geodynamic implication[J]. *Chinese J. Geophys*, 2013, 56(12):4234-4244.

[21] 赵英凯. 基于地球物理电性特征的阿拉格忒赫特阿尔铜矿成矿规律研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2009.

ZHAO Y K. The study of the metallogenic law about copper deposit at Alagtaiher Al based on the electrical characteristics in geophysics [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2009.

[22] 张惠华, 冯孝良, 唐高林, 等. 四川省九龙县中咀铜矿构造与成矿关系研究[J]. *高校地质学报*, 2013, 19(1):95-108.

ZHANG H H, FENG X L, TANG G L, et al. Structure types and mineralization in the Zhongzui copper deposit, Jiulong County, Sichuan Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013, 19(1):95-108.

[23] 刘俊来, 陈小宇, 张健, 等. 大陆地壳活动带片麻岩穹隆构造与分层流变[J]. *地质学报*, 2022, 96(9):3158-3181.

LIU J L, CHEN X Y, ZHANG J, et al. Gneiss domes and stratified middle to lower crustal flow in continental mobile belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(9):3158-3181.

[24] 王继斌, 颜丹平, 邱亮, 等. 南盘江盆地赖子山穹隆构造样式及沙箱模拟研究[J]. *地学前缘*, 2018, 25(1):47-64.

WANG J B, YAN D P, QIU L, et al. Structural style and sandbox modelling of the Laizishan Dome in the Nanpanjiang Basin, South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(1):47-64.

[25] 谭洪旗. 松潘-甘孜地块南缘穹隆体物质组成、变形-变质特征及成矿响应[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.

TAN H Q. The composition, deformation-metamorphic characteristics and metallogenic response of the dome geological bodies on L2the South Margin of Songpan-Garze Block[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.

[26] Whitney D L, Teyssier C, Vanderhaeghe O V. Gneiss domes and crustal flow[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 2004, 380:1-20.

Structural Research of Taka Dome Based on Geophysical Electrical Characteristics

YAO Wen¹, CAO Renliang¹, TAN Hongqi², ZHANG Hongchao¹, YAN Bo¹

(1.Sichuan Institute Geological Survey and Research, Sichuan Institute of Metal Geological Survey, Chengdu 611730, Sichuan, China; 2.Sichuan Geology and Minerals (Group) Co., Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: This is an article in the field of earth sciences. Taka dome and Jianglang dome are located in the southern margin of Songpan-Ganzi block, and their geological characteristics indicate similar composition and metamorphic-deformation characteristics. Liwu, Heiniudong and Zhongsui deposits have been found in Jianglang Dome, while no similar deposits have been found in the same horizon of Taka Dome. To investigate the medium-deep part structure characteristics and mineralization of the Taka Dome, the geophysical electrical parameters and audio magnetotelluric sounding profiles of different strata of different ages were measured to obtain the electrical characteristics of the middle and deep subsurface. The results show that the overall characteristics of the dome are low and medium resistance on both sides, and high resistance in the core is mainly mixed with low resistance. The overall electrical characteristics are consistent with the spatiotemporal law of the dome structure. There are three main low-resistivity anomaly zones in the deep electrical profile, which are inferred to reflect the low-resistivity lithology, fault or structural fracture zone. The three main high-resistivity anomaly belts are inferred to be reflected by the upper member of the Mesoproterozoic Liwu Group (Pt_2l^3) with complete medium-high resistivity characteristics in the Taka dome. The above understanding provides geophysical evidence for exploring the medium-deep geological spatial structure of the Taka Dome.

Keywords: Earth sciences; Taka dome; Medium-deep part structure characteristics; Geophysics; Audio magnetotelluric; Electrical characteristic

////////////////////////////////////
(上接第 31 页)

the accumulative amount of copper metal has been identified as 29210.71 tons. There are two types of copper deposits: epigenetic medium-low temperature hydrothermal deposit and placer deposit. The mineralization process is magmatism, sedimentation, ore-bearing fluid process (non-magmatic-non-metamorphic process). Copper deposits are mainly distributed in Weining Beishan area, Xiangshan area, South West Huashan area and the southern area of Liupan Mountain. The metallogenic ages are Caledonian, Varissian, Indosinian and Yanshanian, mainly Caledonian and Yanshanian. According to the study on the metallogenic geological law of the existing deposits, the magmatic hydrothermal type and continental sedimentary type are taken as the key prediction types. According to the material composition of the ore-forming series, five ore-forming series related to copper are determined, and the ore-forming genealogy of copper ore is summarized. The research on metallogenic regularity of copper ore is improved. It provides a theoretical basis for the potential evaluation and prediction of copper resources in Ningxia.

Keywords: Earth sciences; Copper mine; Prediction type; Metallogenic regularity; Metallogenic series; Metallogenic lineage