2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2468-2478
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

胡建华,任柄璋,王刚,等. 2026. 木吉村斑岩型铜矿的电性结构模型和成矿背景. 地球物理学进展,41(5):2468-2478,doi:10.6038/pg2026KK0050.

HU JianHua, REN BingZhang, WANG Gang, *et al*. 2026. Electrical structure model and metallogenic background of the Mujicun porphyry copper deposit. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2468-2478, doi:10.6038/pg2026KK0050.

木吉村斑岩型铜矿的电性结构模型和成矿背景

Electrical structure model and metallogenic background of the Mujicun porphyry copper deposit

胡建华[1],任柄璋[1],王刚[2,3*],刘欢[1],安洪冰[1],张月[1],张冲[1],续刚[1],刘熊[1]

HU JianHua[1], REN BingZhang[1], WANG Gang[2,3*], LIU Huan[1], AN HongBing[1], ZHANG Yue[1], ZHANG Chong[1], XU Gang[1], LIU Xiong[1]

1. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心,天津 300301
2. 深部探测与成像全国重点实验室,中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,天津 300300
3. 自然资源部地球物理电磁法探测技术重点实验室,天津 300300

1. *Langfang Integrated Natural Resources Survey Center*, *China Geological Survey*, *Tianjin* 300301, *China*
2. *State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging*, *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration*, *CAGS*, *Tianjin* 300300, *China*
3. *Key Laboratory of Geophysical Electromagnetic Probing Technologies of Ministry of Natural Resources*, *Tianjin* 300300, *China*

摘 要 为厘清太行山北段木吉村斑岩铜矿的深部电性结构,并探讨其与成矿系统"源—运—储"过程的耦合关系,进而深化对华北克拉通内部斑岩型铜矿深部背景的认识,本研究基于穿越木吉村矿集区的 13 个大地电磁测深数据,采用非线性共轭梯度算法开展二维反演,构建了研究区深度约 40 km 的电性结构模型.该模型清晰地揭示了两组延伸至中下地壳的高导电通道,以及控制这些电性特征的北北东向断裂系统,二者被解释为深部含矿流体的运移通道.同时,模型还识别出一个位于约 25 km 深度的成矿源区或岩浆房残留体.上述电性结构精细刻画了成矿系统的空间架构,表明该"通道—储库"耦合系统受控于太行山深断裂带在晚中生代伸展背景下的再活化及其伴随的岩浆侵位,是华北克拉通破坏过程中壳幔相互作用与成矿作用的典型实例.

关键词 木吉村;斑岩型铜矿;成矿系统;电性结构;太行山

Abstract To clarify the deep electrical structure of the Mujicun porphyry copper deposit in the northern Taihang Mountains, explore its coupling with the "source-transport-storage" processes of the mineralization system, and further advance the understanding of the deep background of porphyry copper deposits within the North China Craton, this study carried out two-dimensional inversion using the nonlinear conjugate gradient algorithm, based on 13 Magnetotelluric (MT) stations traversing the Mujicun ore concentration area. An electrical model down to a depth of approximately 40 km was constructed. The model clearly reveals two sets of high-conductivity channels extending into the middle-lower crust, along with a NNE-trending fault system that controls these electrical features; both are interpreted as conduits for deep ore-bearing fluids. Additionally, the model identifies a mineralization source zone or a remnant magma chamber at a depth of about 25 km. The obtained electrical structure finely delineates the spatial architecture of the mineralization system, indicating that this "channel-reservoir" coupling system was governed by the reactivation of the Taihangshan deep fault zone under a Late Mesozoic extensional setting, accompanied by magma emplacement. It thus stands as a

收稿日期 2026-02-27; **修回日期** 2026-08-26. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 华北-东北大地电磁子网一期(2024ZD1000203-06)、深部精密探测装备与精细成像技术研发能力建设(AS2025P02)和中国地质调查局地质调查项目(DD20250102801)联合资助.

第一作者简介 胡建华,男,1993 年生,主要从事大地电磁法及其应用研究. E-mail:hhhjh1993472@163.com

***通讯作者** 王刚,男,1990 年生,博士,高级工程师,主要从事大地电磁法及其应用研究. E-mail:jiaowulou214@163.com

中图分类号　P631
文献标识码　A
doi:10.6038/pg2026KK0050
CSTR:32085.14.pg2026KK0050

typical example of crust-mantle interaction and mineralization during the destruction of the North China Craton.

Keywords　Mujicun; Porphyry copper deposit; Mineralization system; Electrical structure; Taihang mountain

0　引　言

斑岩铜矿是全球铜、钼金属最重要的来源,其多形成于汇聚板块边缘的岛弧或陆缘弧环境,然而,近年来在古老克拉通内部(如华北克拉通)发现的斑岩矿床,对经典的成矿理论提出了新的挑战(侯增谦等,2020),成为当前成矿学研究的前沿. 位于太行山构造带北段的木吉村斑岩铜矿(约 142 Ma)和大湾斑岩钼矿(约 144 Ma),是华北克拉通内部典型的斑岩型矿床(高永丰等,2011;黄典豪等,1996;马国玺等,2010). 矿床主要受北北东向断裂控制(图 1),发育典型的斑岩型蚀变分带. 目前,关于木吉村铜钼矿床的岩浆与成矿物质来源还存在争议,部分研究认为该矿床的岩浆与成矿物质源于古老下地壳部分熔融与幔源组分的共同作用(Dong *et al*., 2013; 曲凯等,2014);而其他研究则认为,岩浆来自富集地幔的部分熔融,并在上升过程中经历了地壳同化混杂与分离结晶作用(Gao *et al*., 2013; 申志超,2015). 然而,对于连接深部岩浆源区与浅部矿体的输运通道网络、流体的规模性聚集位置以及整个成矿系统的"根"部特征,仍缺乏直接的深部地球物理约束. 大地电磁测深(MT)方法对地下介质的导电性差异极为敏感,是揭示地壳尺度岩浆系统、流体通道的有效手段(王刚和方慧,2023; 王辉等,2013; 魏文博,2002; Wei *et al*., 2010). 在全球多个成矿带的中下地壳普遍存在显著的高导异常(小于几百欧姆·米),其被解释为富挥发分、富碱的部分熔融体或流体,以及成矿金属的深部源区(Adetunji *et al*., 2023; Heinson *et al*., 2018; Lü *et al*., 2021),这些"电性足迹"为从深部视角理解成矿系统提供了关键线索. 本研究基于穿越木吉村矿集区的 13 个 MT 数据(图 1),通过二维反演构建了高分辨率的电性结构模型. 旨在:(1)精细刻画矿集区从浅表至中下地壳的电性结构特征;(2)识别与成矿相关的高导电异常体,界定成矿物质"源、运、储"的关键电性标志;(3)结合区域地球动力学背景,探讨木吉村斑岩铜矿的深部成矿机制,为区域找矿勘查提供深部依据.

1　地质及地球物理背景

1.1　区域地质构造背景

华北克拉通(NCC)是地球上最古老的克拉通之一(图 1),其演化过程包括前寒武纪克拉通化至中新生代破坏等不同阶段(Zhai and Santosh, 2011; Zhao *et al*., 2005; Zhao and Zhai, 2013). 华北克拉通可分为太古宙-古元古代的东部与西部陆块,以及古元古代华北中部造山带(Santosh, 2010; Zhao *et al*., 2005). 东西陆块沿该造山带约 1.85 Ga 或 1.95 Ga 拼合,标志着华北克拉通的最终形成(Tang and Santosh, 2018; Zhao *et al*., 2005),此后直至中生代的广泛岩浆活动破坏其结构之前长期保持稳定(Wu *et al*., 2019). 研究区位于北太行山的华北克拉通中部(图 1),区域构造受北北东向乌龙沟断裂和紫荆关断裂控制. 该区发育大量与铜-钼-铁多金属矿化相关的侏罗纪-白垩纪岩浆岩(Dong *et al*., 2013; Gao *et al*., 2013; Xue *et al*., 2021),中生代侵入体以岩基和岩株形式沿断裂分布,其中王安镇杂岩体规模最大(Xue *et al*., 2021),主要由花岗闪长岩、二长花岗岩及斑状花岗岩组成. 木吉村斑岩铜钼矿床位于王安镇杂岩体西南缘与乌龙沟断裂之间. 位于该区太行山一带的涞源杂岩体含多类岩浆岩,并且涞源花岗岩类的成因仍存争议:一种观点认为其源于增厚基性下地壳的部分熔融,另一种则主张为幔源玄武质岩浆与地壳硅质熔体的混合;与之相关的木吉村铜钼矿的物质来源亦未统一,部分研究认为来自古老下地壳熔融与幔源组分的共同贡献(Dong *et al*., 2013; 曲凯等,2014),另有研究强调富集地幔部分熔融后经历地壳同化与分离结晶(Gao *et al*., 2013; 申志超,2015).

1.2　区域地球物理背景

地球物理方法在刻画成矿系统的源区、运移通道和保存痕迹等方面具有独特的优势(Heinson *et al*., 2018; Lü *et al*., 2021),然而下地壳的深度阻碍了我们对成矿过程的理解. 大地电磁测深方法对反映地下的电性结构非常有效,特别是对与成矿过程

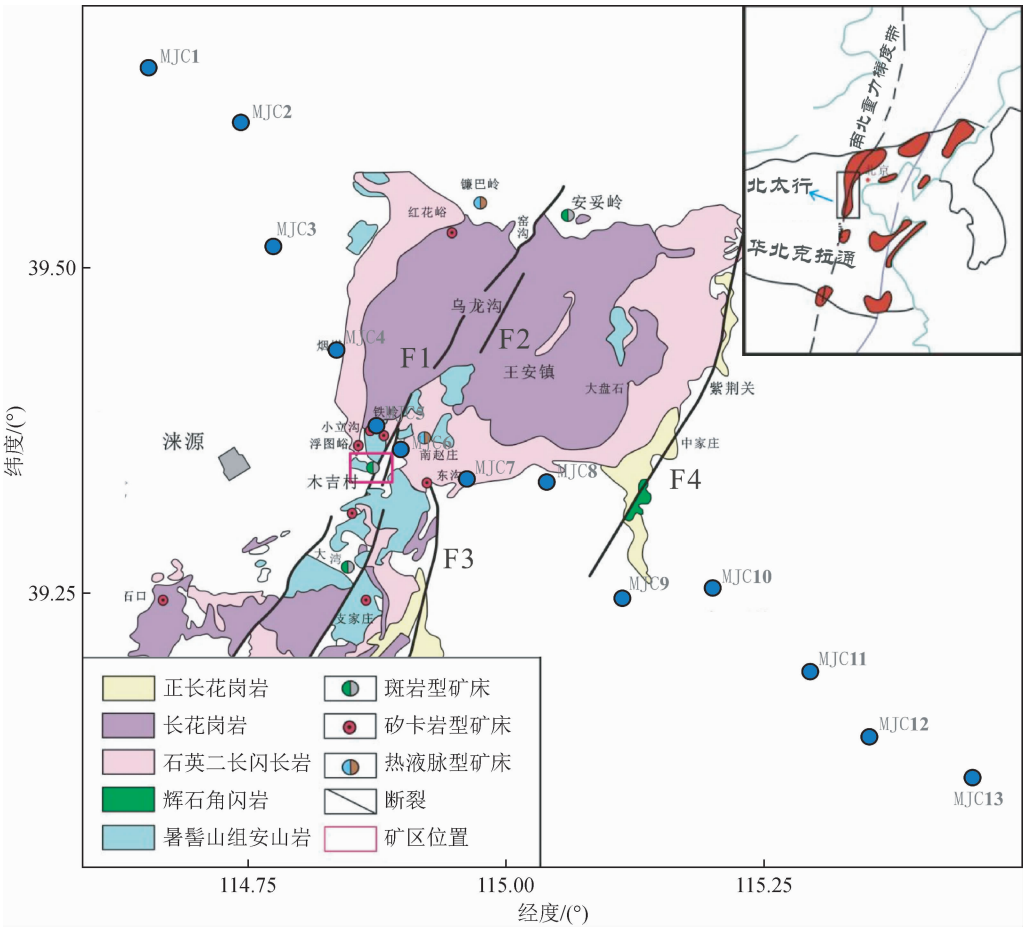


图 1 地质构造图及大地电磁测深点分布(图改自曲凯等,2014)

F1-乌龙沟断裂, F2-王安镇断裂, F3-东沟断裂, F4-紫荆关断裂.

Fig. 1 Geological map and MT sites distribution (Modified from Qu *et al.*, 2014)

F1-Wulonggou Fault, F2-Wanganzhen Fault, F3-Donggou Fault, F4-Zijingguan Fault.

相关的高导电异常体(Wei *et al.*, 2010). 例如,澳大利亚的一项大地电磁结果(Heinson *et al.*, 2018)成功揭示了 Olympic Dam IOCG(1590 Ma)的成矿富集场所和流体运移通道等与成矿系统相关的信息. 加拿大太古宙红湖绿岩带金矿(2712 Ma)开展的一项大地电磁研究(Adetunji *et al.*, 2023),对地壳深部含矿流体源区和流体运移通道进行了成像,成功将浅部矿床与地壳深部源区联系起来. 尽管成矿时代久远,但是通过大地电磁测深方法得到的电性结构模型仍能够清晰地刻画成矿系统的源区、通道等关键要素. 对于中国大陆东部的非弧环境斑岩铜矿,不同学者开展的大地电磁测深工作也在成矿系统刻画和成矿机制研究等方面取得了一定进展(Lü *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023; 何梅兴等, 2023). 关于华北克拉通北部的木吉村斑岩铜矿,前期的 SINOPROBE 项目大地电磁网三维反演结果表明,木吉村斑岩铜矿位于代表深大断裂的电性梯度带附近(Shi *et al.*, 2022),然而 SINOPROBE 项目大地电磁网的点距较大,不足以准确刻画成矿系统各要素之间的关系. 除了 SINOPROBE 项目大地电磁网的结果,木吉村斑岩铜矿附近还有 2 条大地电磁测深剖面结果(魏文博等,2008),如中国地质大学(北京)于 2001—2005 年完成的 HB MT01 和 HB MT02 剖面,其平均点距约 10 ~ 15 km,但是该 2 条剖面的均未穿过木吉村. 因此,以往的大地电磁测深工作尚缺乏针对性和系统性,特别是地壳电性结构和深部地壳物质特征. 因此,本项目拟在华北克拉通的木吉村斑岩铜矿,在关键地区加密大地电磁测深数据,结合已有数据进行壳内电性结构研究,并与江西德兴、长江中下游斑岩铜矿的成矿模型进行对比,为中国大陆东部非弧环境斑岩型铜矿的成矿机制提供新认识.

2　数据采集和处理、分析

本次研究沿北西-南东向布设了一条长约 100 km 的 MT 剖面,穿过已知主矿体及主要构造(图 1),剖面共包含 13 个宽频大地电磁测深数据.采集的所有测点的平均点距小于 10 km,在矿集区附近小于 5 km,数据采集时间不少于 18 h.将原始时间序列经过快速傅氏变换从时间域转化为频率域,对参与统计平均的功率谱进行挑选,删除受干扰严重的功率谱.经过 Robust 估计等求取阻抗张量元素,最后通过理论公式由阻抗张量元素求取地下介质的视电阻率和阻抗相位.此外,我们也对矿集区附近存在干扰的测点进行了远参考处理.本次研究中,大部分测点的最大周期能够达到 3000 S,可以对深部的电性结构进行可靠约束(图 2).

在数据反演之前需要对数据进行区域电性主轴分析,据此将阻抗张量旋转到区域电性主轴的方向上.本文采用共轭阻抗张量分解方法(蔡军涛和陈小斌,2010;陈小斌和郭春玲,2017)来分析不同频段的电性主轴方位.剖面的电性主轴统计结果表明(图 3),地下的电性主轴方位角总体上呈现为北北东向,只有 1~100 Hz 频段的统计结果与其他频段存在差别.高频段的差异可能反映了浅部局部构造或非均匀体的影响,统一旋转后会模糊这些浅表异常的真实响应,从而在反演结果中引入一定的畸变.但是,鉴于本研究的核心目标是北东走向的深部构造,低频段(深部)的方向一致性通常更高,所以选取总体统计结果的北东 25 度为该剖面的电性主轴方位角.

3　数据反演和结果

结合区域构造走向以及剖面的电性主轴统计结果(图 3),该剖面范围内的地下结构总体上应为二维的,且本文主要关注北东走向的构造,所以将阻抗数据旋转到电性主轴方位上后,对数据进行二维反演(WinGLink 软件).参与反演的频点范围是 0.01~3000 S.在反演初始模型设定上,本文采用均匀半空间模型,初始电阻值为 100 Ω·m.网格剖分策略如下:模型的横向网格剖分,在核心区域每个测点之间至少有一个网格,在点距较大的测点之间则多设置 1~2 个网格;核心区域以外,网格间距按 1.2 倍的比例逐级向外递增,以充分满足边界条件;深度方向上,浅层采用较密网格(层厚 25 m),随深度增加按等比例逐步增大层厚,直至最大深度达到探测极限.最终反演模型的总网格数为横向 63 个(含外围扩展区),纵向 108 个.

通常,TE 模式数据对地下电性结构二维程度要求较为严格,而 TM 模式数据比较适合反演与区域构造走向平行的三维结构,并且不容易受到三维畸变效应的影响(张乐天等,2012).为了确定不同模式数据对反演结果的影响,我们通过设置不同的视电阻率和相位误差级数来控制 TE 模式与 TM 模式

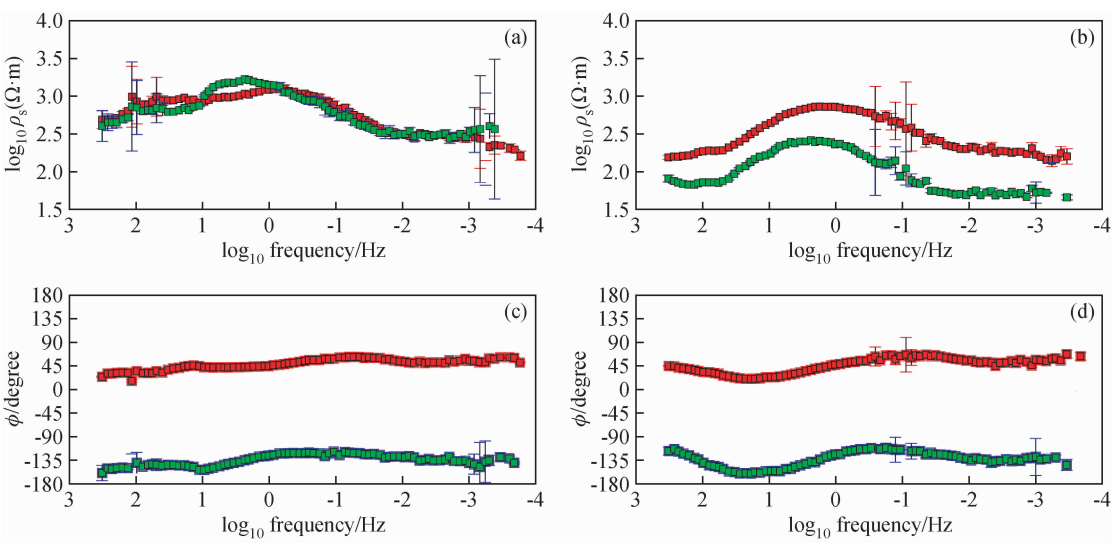


图 2　典型的视电阻率和相位曲线

左图为 MJC3,右图为 MJC9,测点位置见图 1.

Fig. 2　Typical apparent resistivity and phase curves

Left panel denotes MJC3, right panel denote MJC9, location marked in Fig. 1.

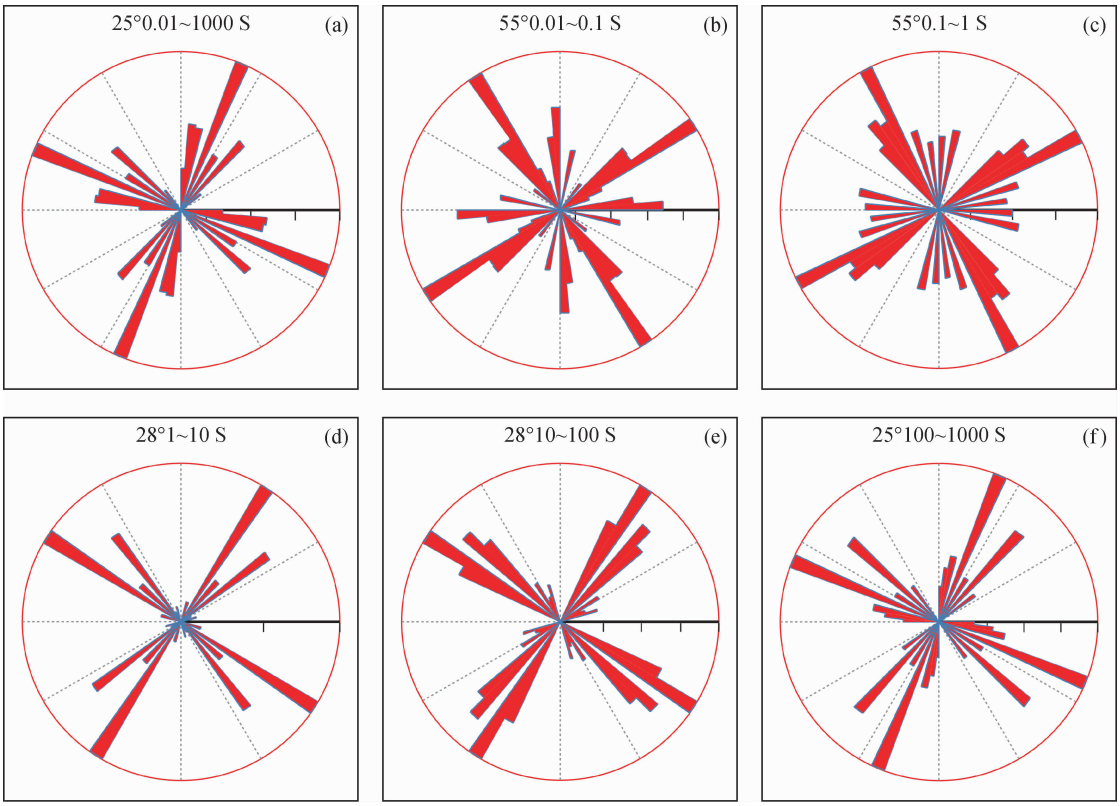


图 3 MT 剖面电性主轴统计结果

Fig. 3 The electrical strike for MT profiles

数据在反演过程中所占的密度. 对于木吉村 MT 剖面不同模式数据参与的反演结果(图 4),单独使用 TM 模式数据的时候,主要的电性结构特征较为清晰(图 4a). 随着 TE 模式数据的加入(图 4b—d),F1、F2 和 F4 断裂的轮廓更加清晰,因此 TE + TM 模式能最大程度反映地下信息,电性结构模型较为合理. 另外,从各测点的拟合差对比来看(图 5),相比于仅采用 TM 模式数据进行反演,当采用 TE + TM 模式后,整体拟合差有所增大,但这一变化是可以接受的,因为参与反演的数据总量显著增加,目标函数需同时拟合更多数据,自然会导致整体拟合差上升. 在核心研究区域,即 F1、F2 和 F4 三条主要断裂带附近,RMS 拟合差的变化幅度较小,这反映出反演模型在该区域的稳定性与可靠性. TE + TM 模式反演提供了更丰富的地下信息,能够有效压制多解性. 除了数据模式的选择,反演过程中的其他参数也会对反演结果产生影响,本工作还对正则化因子 τ 进行了对比试验(图 6,分别试验了 1,3,5,7,10). 通过对比反演效果(图 6)和拟合差情况(图 7),选择 τ 值为 5 的反演结果作为最终的模型.

4 讨 论

4.1 主要电性结构特征

木吉村 MT 剖面的结果(图 8)显示,整个地壳普遍表现为高电阻率特征(>10000 Ω·m),这表明,大规模的流体活动和蚀变作用主要局限于地壳内特定构造空间. 木吉村剖面的中部区域,在深度 25 km 附近存在一个形态不规则、电导率显著升高的异常体 C. 该异常体核心电阻率约为 300 Ω·m,与周围的高阻围岩形成鲜明对比. 其空间位置与地表已知铜钼矿体在剖面上的投影高度重合. 从模型中的高导电异常体 C 向上,延伸出两条明显的高导电通道 C1 和 C2,它们以相对较窄的“颈状”形态向上延伸. 电性模型中的陡立电阻率梯度带是推断断裂构造的重要标志,剖面中可识别出两组清晰的梯度带:一组为木吉村和大湾铜矿附近的断裂 F1/F2,另一组为东部的断裂 F4. 这两组断裂都表现为贯穿浅层至高阻基底的深大电性边界,其位置与区域上重要的控岩控矿断裂吻合. 相对来说,高导电异常体 C 在西侧的断裂 F1/F2 下表现出更明显的向上延伸的形态.

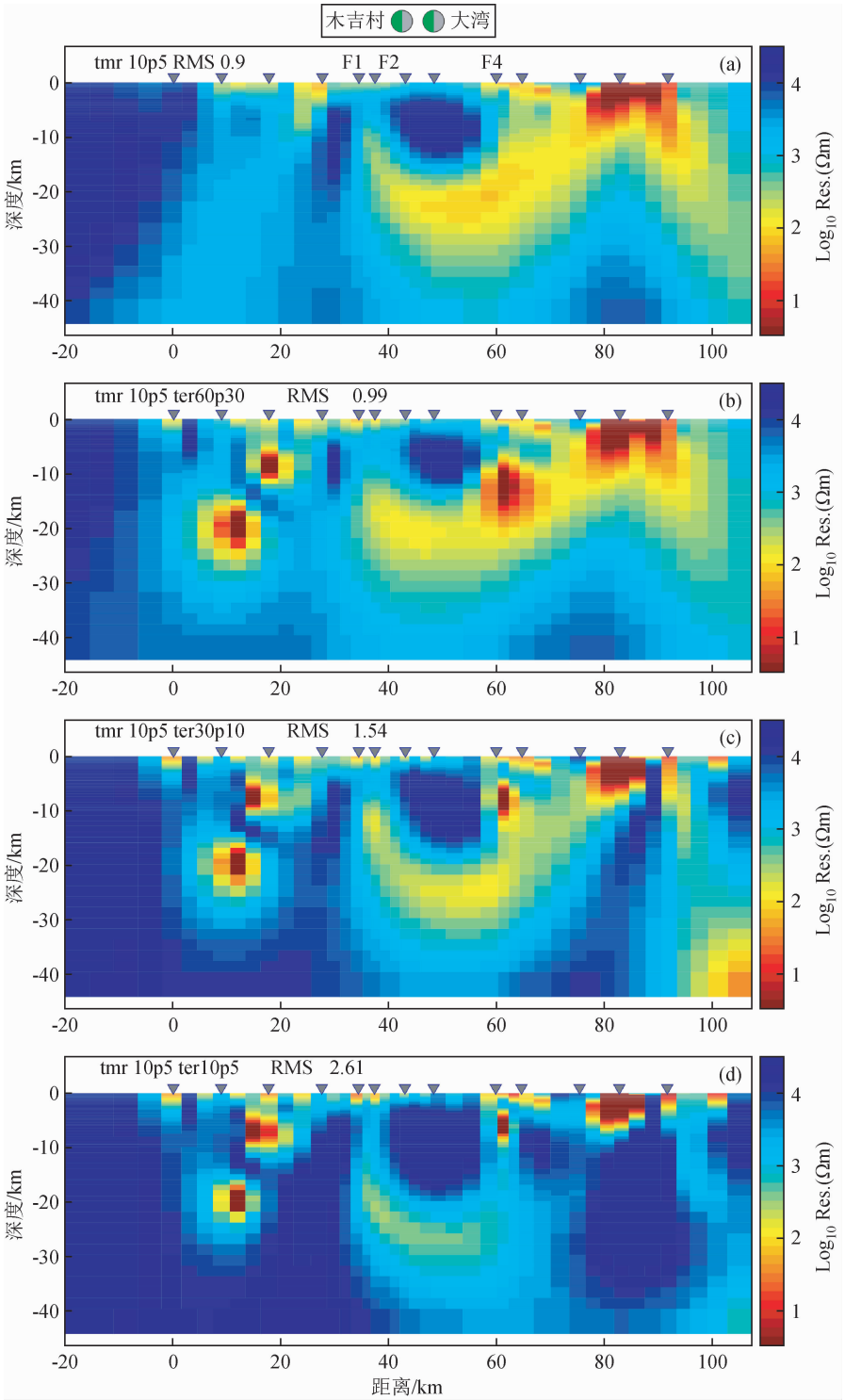


图 4　木吉村 MT 剖面二维反演不同模式数据的试验对比图

ter, p: TE 模式视电阻率和相位误差; tmr, p: TM 模式视电阻率和相位误差; 各组反演用的正则化因子 tau 值均为 5.

Fig. 4　The inversion results with different TM/TE parameters for MT profile

ter, p: error floors of apparent resistivity and phase for the TE mode data; tmr, p: error floors of apparent resistivity and phase for the TM mode data; the regularization parameter tau is 5.

整体上,木吉村电性结构模型充分体现了“源-运-储”三要素的耦合,清晰地刻画了成矿流体从深部源区、沿断裂通道向上运移、在构造-岩性界面富集的过程,揭示了该区成矿系统的结构框架.

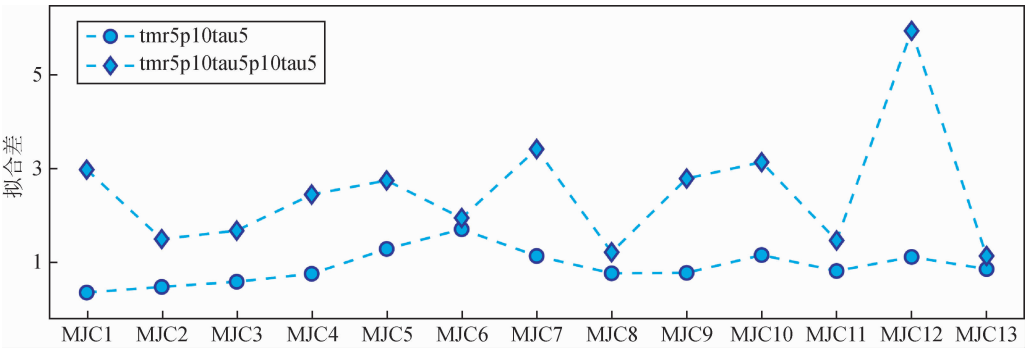


图 5 tmr10p5 与 tmr10p5ter10p5 两组反演结果各测点拟合差对比图

Fig. 5 The RMS distribution of the inversion results of tmr10p5 and tmr10p5ter10p5

4.2 中地壳高导体

关于中地壳高导体 C 的成因机制,岩石的高电导率特征从地壳浅部至岩石圈深部的范围内存在不同成因,且在不同构造单元中也有所差异. 中下地壳的高导电机制可能与岩石的矿物组成、温度及含水量有关(Wang *et al*., 2023). 此外,在富碳沉积物分布区或石墨出露的构造缝合带附近,颗粒边界相互连通的石墨薄膜在特定的温压和还原条件下也可形成高导电异常(Yang, 2011). 硫化物虽电导率较高,但在地壳物质中含量很低(约 0.7wt%),且通常呈分散状分布,难以形成大范围连通的高导电异常. 木吉村斑岩铜矿位于华北克拉通北缘太行山构造带,形成于中生代燕山期(约 140 ~ 120 Ma),该区在晚中生代经历了显著的岩石圈减薄与克拉通破坏,伴随强烈的岩浆活动与伸展作用,石墨或硫化物难以在大范围内形成连通体系. 中地壳岩石处于角闪岩相,可能在温压升高时发生脱水或相变,进而形成局部高导电异常. 若考虑温度升高的因素,如软流圈热物质上涌,此类深部构造活动应引发更大范围的部分熔融,而非仅形成局部高导体 C. 因此,该高导体更可能源于局部的物质演化过程.

实际上,高导体 C 很可能记录了局部物质经历岩浆-流体演化的遗留痕迹. 在含矿岩浆系统演化过程中,部分熔融体、残余熔体、富挥发分流体以及后期热液蚀变产物的叠加与改造,可在中地壳尺度形成具有一定连通性的高导电异常. 成矿期岩浆-热液活动在岩体和围岩中留下了丰富的“电性足迹”,这些足迹主要包括金属硫化物、石墨以及含盐流体,它们沿裂隙和孔隙分布,形成了良好的导电网络. 尽管经历了约 140 Ma 的长期构造演化,但这些高导矿物相和蚀变矿物具有较高的化学稳定性,不易被彻底破坏;加之深部流体的持续作用可能部分修复导电结构. 因此,电性足迹如同成矿事件的“化石”记录,至今仍能清晰地反映深部的源区遗迹. 这种异常不仅反映熔体或流体的存在,更体现了从深部岩浆分异、流体出溶到浅部成矿作用的完整过程,是成矿物质“源—运—储”体系深部源区活动的重要地球物理表现. 此前大多数地球物理研究表明,深部成矿源区多与高导电异常或低速异常相关,但我们发现中国大陆非弧环境斑岩铜矿的深部地壳并不总是呈现特别高导电的特征,例如冈底斯斑岩铜矿带东段和德兴斑岩铜矿(Wang *et al*., 2023, 2024).

冈底斯和德兴斑岩铜矿都发育在蛇绿混杂岩带附近以及存在张性断裂的地方,例如冈底斯东段主要的大型斑岩铜矿就位于雅鲁藏布缝合带和南北向地堑构造附近;德兴斑岩铜矿则位于赣东北蛇绿混杂岩带附近,赣东北断裂本身可能承担了大陆碰撞后期拉张作用的角色. 这两个地区在地质历史上都先后经历了大洋俯冲、陆陆碰撞过程,不同的是德兴斑岩铜矿形成于中生代晚期(约 170 Ma),其地质历史要比冈底斯斑岩铜矿(约 15 Ma)在时间上漫长很多,与本研究的木吉村斑岩铜矿成矿年代(约 142 Ma)接近. 与以往电性模型相比,在未受裂谷带影响的冈底斯斑岩铜矿带下方,在 40 ~ 70 km 深度范围内的平均电阻率约为 71.4 Ω·m(Wang *et al*., 2024). 对于德兴斑岩铜矿,德兴斑岩铜矿带下方地壳物质在 34 ~ 43 km 深度范围内的平均电阻率约为 500 Ω·m(Wang *et al*., 2023). 因此,木吉村斑岩铜矿源区的电阻率 300 Ω·m 这个数值作为含矿源区是合理的.

4.3 电性结构模型与成矿系统的关联

本研究的电性结构模型为木吉村斑岩铜矿的“构造-流体-成矿”过程提供了可视化框架(图 8).

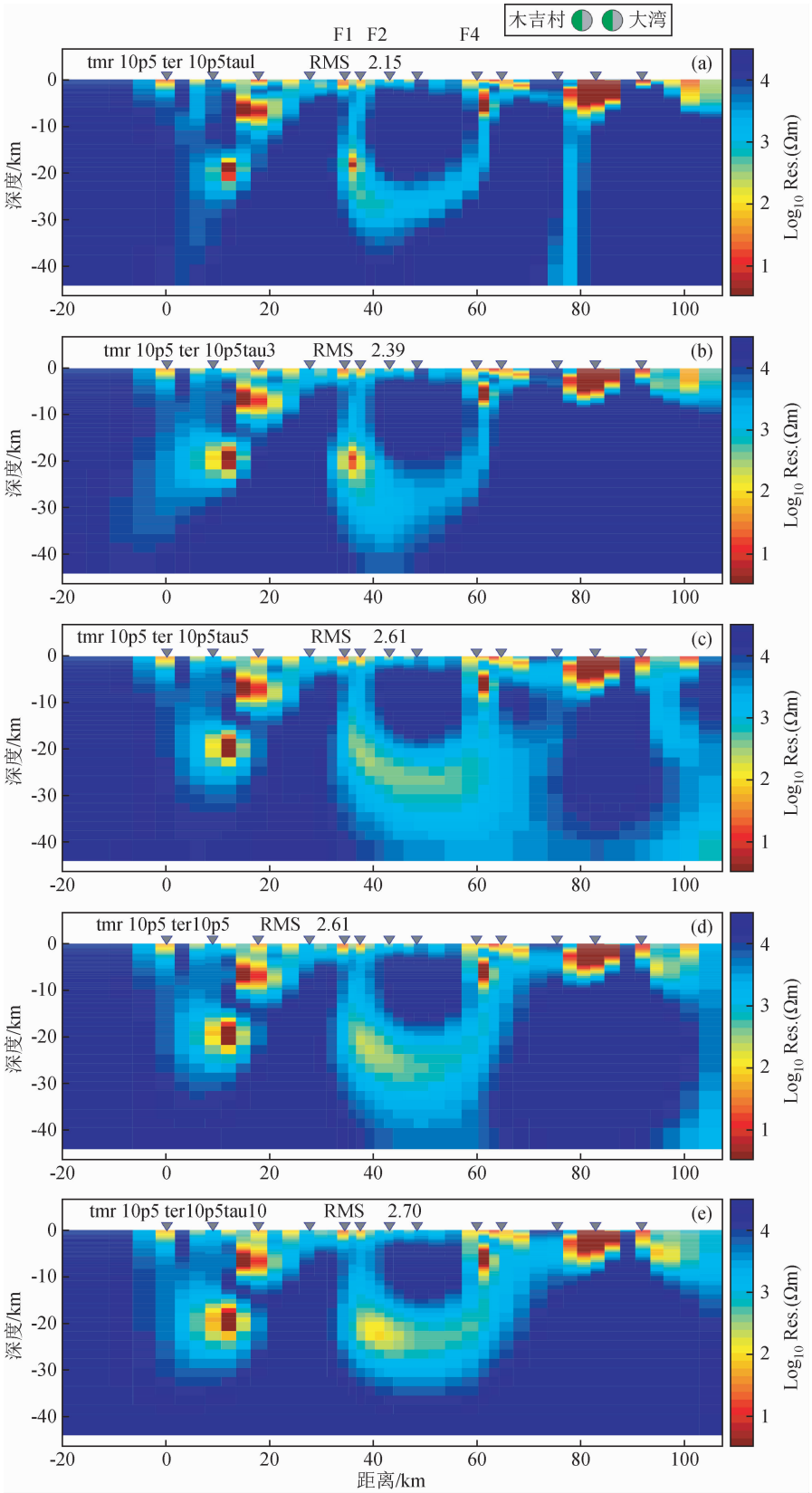


图 6　木吉村 MT 剖面二维反演不同 tau 值试验对比图

ter，p：TE 模式视电阻率和相位误差；tmr，p：TM 模式视电阻率和相位误差；tau：正则化因子.

Fig. 6　The inversion results with different tau values for MT profile

ter，p：error floors of apparent resistivity and phase for the TE mode data；tmr，p：error floors of apparent resistivity and phase for the TM mode data；tau：regularization parameter.

从深到浅,深部异常体 C 作为高导电的局部异常,是成矿物质与流体的源区;向上延伸的高导带 C1/C2 构成流体运移的通道系统,受控于 F1/F2 等深大断裂;而浅部高阻围岩与构造梯度带界面则作为有利的沉淀储集空间,控制了铜钼矿体的空间定位.晚中生代华北克拉通处于陆内伸展背景,源自深部的木吉村含矿流体在中下地壳经历岩浆补给与分异(Xue *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2024),中地壳高导电异常 C 可能就是这一过程的遗迹.高导体 C1 和 C2 为富含挥发分的岩浆热液提供了上升通道,富挥发分的熔/流体具有较高的电导率,且能有效携带和迁移铜、钼等金属元素.含矿流体在构造压力驱动下,优先沿太行山深断裂(F1/F2)等先存深大断裂向上运移.电性模型中的深部高导带(C1/C2)及与之相关的次级断裂,可能共同构成了一个立体的运移通道网络.本研究得到的电性结构模型具有明确的找矿指示意义.首先,电性通道 C1 表明在断裂 F1/F2 附近的其他潜伏断裂,可能还存在有利靶区.其次,木吉村外围地区,通道 C2 和断裂 F4 也可能是主要的导矿构造,其延伸方向,特别是在不同方向断裂的交汇部位,是成矿的关键位置,需要在这些断裂附近进一步开展的地球物理观测.

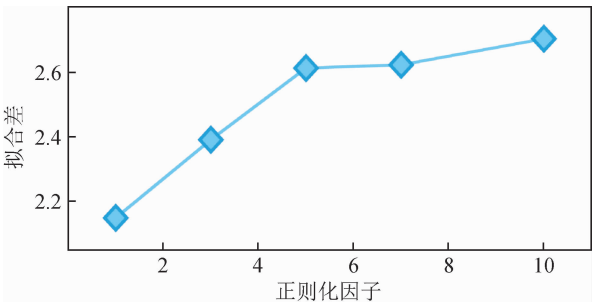


图 7 正则化因子 τ 反演试验对比

Fig. 7 Inversion experiments on the regularization factor τ

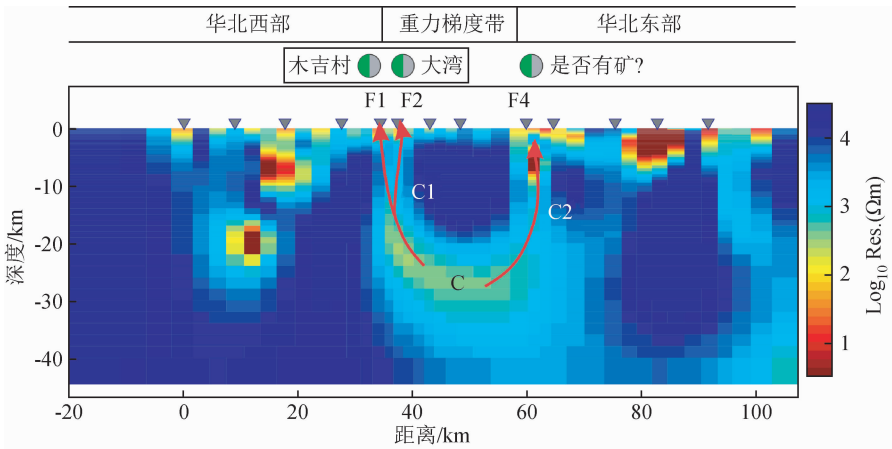


图 8 木吉村斑岩铜矿成矿系统电性结构模型

Fig. 8 Electrical model of the ore-forming system in the Mujicun porphyry copper deposit

5 结 论

本次研究依托一条长达 100 km 的高分辨率 MT 剖面(核心区测点间距 <5 km),对木吉村斑岩铜矿周边区域进行了精细探测,显著提升了对深部电性结构的识别能力.数据首次清晰揭示了在 25 km 深度处存在孤立高电导源区,并识别出其向上分叉的导电通道,完整刻画了斑岩成矿系统“源-运-储”的立体架构.研究表明,木吉村斑岩铜矿的形成是晚中生代华北克拉通伸展背景下,深部含矿熔/流体沿活化的太行山深大断裂及其次级构造网络向上迁移,并在浅部有利构造部位聚集成矿的结果.此外,模型中其他电性梯度带亦显示出良好的找矿潜力,进一步开展以密集 MT 阵列观测为主的综合地球物理探测,将为理解克拉通内部斑岩矿床的深部成矿过程提供更多地球物理依据.

致 谢 感谢所有野外工作人员的辛勤付出.

References

Adetunji A Q, Launay G, Ferguson I J, *et al*. 2023. Crustal conductivity footprint of the orogenic gold district in the Red Lake greenstone belt, western Superior craton, Canada. Geology, 51(4): 377-382.

Cai J T, Chen X B. 2010. Refined techniques for data processing and

two-dimensional inversion in magnetotelluric Ⅱ: Which data polarization mode should be used in 2D inversion. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 53(11): 2703-2714, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.018.

Chen X B, Guo C L. 2017. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric (V): Detecting the linear structures of the Earth by impedance tensor imaging. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 60(2): 766-777, doi: 10.6038/cjg20170227.

Dong G C, Santosh M, Li S R, *et al*. 2013. Mesozoic magmatism and metallogenesis associated with the destruction of the North China Craton: evidence from U-Pb geochronology and stable isotope geochemistry of the Mujicun porphyry Cu-Mo deposit. Ore Geology Reviews, 53: 434-445.

Gao Y F, Wei R H, Hou Z Q, *et al*. 2011. Mujicun porphyry copper mineralization: response to Mesozoic thinning of lithosphere in North China Craton. Mineral Deposits (in Chinese), 30(5): 890-902.

Gao Y F, Santosh M, Wei R H, *et al*. 2013. Origin of high Sr/Y magmas from the northern Taihang Mountains: implications for Mesozoic porphyry copper mineralization in the North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 78: 143-159.

He M X, Fang H, Xu Y J, *et al*. 2023. Deep electrical structure and lithosphere delamination mechanism in the lower reaches of Yangtze River. Geological Review (in Chinese), 69(S1): 81-83.

Heinson G, Didana Y, Soeffky P, *et al*. 2018. The crustal geophysical signature of a world-class magmatic mineral system. Scientific Reports, 8(1): 10608, doi: 10.1038/s41598-018-29016-2.

Hou Z Q, Yang Z M, Wang R, *et al*. 2020. Further discussion on porphyry Cu-Mo-Au deposit formation in Chinese. Earth Science Frontiers (in Chinese), 27(2): 20-44.

Huang D H, Du A D, Wu C Y, *et al*. 1996. Metallochronology of molybdenum (copper) deposits in the North China Platform: Re Os age of molybdenite and its geological significance. Mineral Deposits (in Chinese), 15(4): 365-373.

Lü Q T, Meng G X, Zhang K, *et al*. 2021. The lithospheric architecture of the Lower Yangtze Metallogenic Belt, East China: Insights into an extensive Fe-Cu mineral system. Ore Geology Reviews, 132: 103989, doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.103989.

Ma G X, Chen Z K, Chen L J, *et al*. 2010. Geological characteristics of Mujicun copper (molybdenum) deposit. Mineral Deposits (in Chinese), 29(6): 1101-1111.

Qu K, Dong G C, Li S R, *et al*. 2014. Lithogeochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of Mujicun porphyry Cu-Mo deposit in Taihang Mountains and their significances. Geoscience (in Chinese), 28(3): 449-460.

Santosh M. 2010. Assembling North China Craton within the Columbia supercontinent: the role of double-sided subduction. Precambrian Research, 178(1-4): 149-167.

Shen Z C. 2015. Petrogenesis and metallogeny for the Mujicun porphyry copper deposits [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing).

Shi Y, Xu Y X, Yang B, *et al*. 2022. Lithospheric conductors shed light on the non-uniform destruction of North China Craton. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127(3): e2021JB022587, doi: 10.1029/2021JB022587.

Tang L, Santosh M. 2018. Neoarchean-Paleoproterozoic terrane assembly and Wilson cycle in the North China Craton: an overview from the central segment of the Trans-North China Orogen. Earth-Science Reviews, 182: 1-27.

Wang G, Fang H. 2023. Electrical structure and seismic implication of Motuo fault zone in Bodong-Xirang area. Progress in Geophysics (in Chinese), 38(6): 2430-2439, doi: 10.6038/pg2023HH0262.

Wang G, Fang H, Qiu G G, *et al*. 2023. Three-dimensional magnetotelluric imaging of the Eastern Qinhang Belt between the Yangtze Block and Cathaysia Block: Implications for lithospheric architecture and associated metallogenesis. Ore Geology Reviews, 158: 105490.

Wang G, Fang H, Lei Q, *et al*. 2024. Magnetotelluric imaging of the Central Himalayan crust away from rift zones. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 25(3): e2023GC011132, doi: 10.1029/2023GC011132.

Wang H, Ye G F, Wei W B, *et al*. 2013. High-precision acquisition technology of telluric field on magnetotellurics. Progress in Geophysics (in Chinese), 28(3): 1199-1207, doi: 10.6038/pg20130311.

Wei W B. 2002. New advance and prospect of magnetotelluric sounding (MT) in China. Progress in Geophysics (in Chinese), 17(2): 245-254, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2002.02.009.

Wei W B, Ye G F, Jin S, *et al*. 2008. Geoelectric structure of lithosphere beneath eastern North China: features of a thinned lithosphere from magnetotelluric soundings. Earth Science Frontiers (in Chinese), 15(4): 204-216.

Wei W B, Jin S, Ye G F, *et al*. 2010. Conductivity structure and rheological property of lithosphere in Southern Xizang inferred from super-broadband magnetotelluric sounding. Science China Earth Sciences, 53(2): 189-202.

Wu F Y, Yang J H, Xu Y G, *et al*. 2019. Destruction of the North China craton in the Mesozoic. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 47(1): 173-195.

Xue F, Santosh M, Kim S W, *et al*. 2021. Thermo-mechanical destruction of Archean cratonic roots: Insights from the Mesozoic Laiyuan granitoid complex, North China Craton. Lithos, 400-401: 106394, doi: 10.1016/j.lithos.2021.106394.

Yang F, Mao J W, Ren W D, *et al*. 2024. In situ U-Pb dating and trace elements of magmatic rutile from Mujicun Cu-Mo deposit, North China Craton: Insights into porphyry mineralization. China Geology, 7(4): 730-746.

Yang X Z. 2011. Origin of high electrical conductivity in the lower continental crust: a review. Surveys in Geophysics, 32(6): 875-903.

Zhai M G, Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: a synoptic overview. Gondwana Research, 20(1): 6-25.

Zhang L T, Jin S, Wei W B, *et al*. 2012. Electrical structure of crust and upper mantle beneath the eastern margin of the Qinghai-Xizang Plateau and the Sichuan basin. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55(12): 4126-4137, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.025.

Zhao G C, Sun M, Wilde S A, *et al*. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited. Precambrian Research, 136(2): 177-202.

Zhao G C, Zhai M G. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: review and tectonic implications. Gondwana Research, 23(4): 1207-1240.

附中文参考文献

蔡军涛, 陈小斌. 2010. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(二)——反演数据极化模式选择. 地球物理学报, 53(11): 2703-2714, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.018.

陈小斌, 郭春玲. 2017. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(五)——利用阻抗张量成像识别大地线性构造. 地球物理学报, 60(2): 766-777, doi: 10.6038/cjg20170227.

高永丰, 魏瑞华, 侯增谦, 等. 2011. 木吉村斑岩铜矿成矿作用: 华北克拉通中生代岩石圈减薄的响应. 矿床地质, 30(5): 890-902.

何梅兴, 方慧, 徐亚军, 等. 2023. 长江下游地区深部电性结构及岩石圈拆沉机制. 地质论评, 69(S1): 81-83.

侯增谦, 杨志明, 王瑞, 等. 2020. 再论中国大陆斑岩 Cu-Mo-Au 矿床成矿作用. 地学前缘, 27(2): 20-44.

黄典豪, 杜安道, 吴澄宇, 等. 1996. 华北地台钼(铜)矿床成矿年代

学研究——辉钼矿铼-锇年龄及其地质意义. 矿床地质, 15(4): 365-373.

马国玺, 陈志宽, 陈立景, 等. 2010. 木吉村铜(钼)矿床地质特征. 矿床地质, 29(6): 1101-1111.

曲凯, 董国臣, 李胜荣, 等. 2014. 太行山木吉村斑岩铜(钼)矿床岩石地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义. 现代地质, 28(3): 449-460.

申志超. 2015. 河北木吉村斑岩铜矿成岩与成矿机制研究[博士论文]. 北京: 中国地质大学(北京).

王刚, 方慧. 2023. 墨脱断裂带波东-西让段电性结构及其地震意义. 地球物理学进展, 38(6): 2430-2439, doi: 10.6038/pg2023HH0262.

王辉, 叶高峰, 魏文博, 等. 2013. 大地电磁测深中大地电场的高精度采集技术. 地球物理学进展, 28(3): 1199-1207, doi: 10.6038/pg20130311.

魏文博. 2002. 我国大地电磁测深新进展及瞻望. 地球物理学进展, 17(2): 245-254, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2002.02.009.

魏文博, 叶高峰, 金胜, 等. 2008. 华北地区东部岩石圈导电性结构研究——减薄的华北岩石圈特点. 地学前缘, 15(4): 204-216.

张乐天, 金胜, 魏文博, 等. 2012. 青藏高原东缘及四川盆地的壳幔导电性结构研究. 地球物理学报, 55(12): 4126-4137, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.025.