

doi: 10.12029/gc20200207001

张伟,曾昭光,周军,季国松,徐学贵,刘光磊,陆建宝. 2023. 宽频大地电磁法寻找“界面型”隐伏金矿床:以黔西南戈塘地区深部找矿为例[J]. 中国地质, 50(2): 359–375.

Zhang Wei, Zeng Zhaoguang, Zhou Jun, Ji Guosong, Xu Xuegui, Liu Guanglei, Lu Jianbao. 2023. Broadband magnetotelluric (BMT) detecting blind gold deposits with interface-type: A case of deep prospecting in the Getang area, southwestern Guizhou[J]. Geology in China, 50(2): 359–375(in Chinese with English abstract).

宽频大地电磁法寻找“界面型”隐伏金矿床:以黔西南戈塘地区深部找矿为例

张伟^{1,2}, 曾昭光³, 周军², 季国松⁴, 徐学贵⁵, 刘光磊⁵, 陆建宝³

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610082; 2. 电子科技大学资源与环境学院, 四川 成都 611731; 3. 贵州省地质矿产勘查开发局 117 地质大队, 贵州 贵阳 550018; 4. 贵州省地质矿产勘查开发局 102 地质大队, 贵州 遵义 563003; 5. 四川省核工业地质局 282 大队, 四川 德阳 618099)

提要:【研究目的】随着黔西南戈塘地区豹子洞等浅表红土型金矿开采资源的逐渐枯竭,寻找深部接替资源的任务已经十分迫切。从区域成矿规律、物化探异常、典型矿床特征等成矿预测要素出发,戈塘地区海马谷控矿断层北西侧下盘深部二叠纪茅口组、龙潭组之间的碳酸盐岩与碎屑岩 Si/Ca 界面上具有较大地寻找“层控型”金矿床的找矿前景。【研究方法】引入了宽频大地电磁法查明了海马谷断裂西南段 0~2 km 深部的电性结构特征,从电阻率反演断面图中的低阻带异常特征推断海马谷断裂具有多期活动特征,早期(中二叠世前)表现为张性正断层性质,倾向北东;后期(早三叠世后)表现为压性逆断层性质,倾向南东,倾角 70°~80°。从电阻率反演断面图中的高低阻等值线梯度带推断茅口组与龙潭组存在古岩溶地貌特征,在深部存在相对“隆起”和“凹陷”变化。【研究结果】综合本区典型矿床的成矿模式、找矿标志和区域物化探异常特征,认为处于“空白”状态的海马谷断裂北西盘深部值得部署探索性钻探工程,揭示其深部的资源潜力。【结论】浅深结合的勘查技术方法(组合元素化探异常+宽频大地电磁探测技术)能够为靶区优选提供证据支撑,邻近海马谷断裂的 P₂/P₃、Si/Ca 界面相对“隆起”位置是开展钻探验证工作的有利位置。

关键词:卡林型金矿;深部找矿方法;“界面型”隐伏矿床;宽频大地电磁法;戈塘穹窿;矿产勘查工程;黔西南

创新点:使用宽频电磁法获取了本区 0~2 km 深部的岩石地层电性结构特征,解决了制约本区“界面型”金矿深部找矿方向的海马谷深大断层深部产状以及断层北西盘 P₂/P₃ 不整合沉积地层的埋深问题。

中图分类号: P611.1; P622.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)02-0359-17

Broadband magnetotelluric (BMT) detecting blind gold deposits with interface-type: A case of deep prospecting in the Getang area, southwestern Guizhou

ZHANG Wei^{1,2}, ZENG Zhaoguang³, ZHOU Jun², JI Guosong⁴,
XU Xuegui⁵, LIU Guanglei⁵, LU Jianbao³

收稿日期: 2020-02-07; 改回日期: 2020-07-03

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20230238、DD20190033、DD20160082)和国家自然科学基金项目(41804144、42230311)联合资助。

作者简介: 张伟,男,1983年生,正高级工程师,在职博士后,主要从事金属矿产地球物理勘探与软件开发;E-mail: dr.zhangwei@qq.com。

通讯作者: 周军,男,1981年生,助理研究员,主要从事地球电磁探测方法与应用研究;E-mail: 20947936@qq.com。

(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610082, Sichuan, China; 2. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China; 3. No.117 Geological Team, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Guiyang 550018, Guizhou, China; 4. No.102 Geological Team, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Zunyi 563003, Guizhou, China; 5. No.282 Team of Sichuan Nuclear Geology, Deyang 618099, Sichuan, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] Accomplished by the gradual depletion of mineral resources of shallow laterite-type gold deposits, e.g., Baozidong in Getang area, it is essential to detect deep alternative resources. Based on the metallogenic prediction factors such as regional metallogeny, geophysical and geochemical anomalies, and typical deposit characteristics, the Si/Ca interface between carbonatite in Permian Maokou Formation (P_2m) and clastic of Longtan Formation (P_3l) at the footwall of the Haimagu ore controlling fault show an ideal prospect for interface-type gold deposits. **[Methods]** The broadband magnetotelluric (BMT) method was introduced to imagine the electrical structure of 0–2 km depth in the southwest section of the Haimagu fault. The low resistivity zones revealing by the BMT inversion imply the Haimagu fault with multi-stage activity. In the early stage (before the Middle Permian), Haimagu fault is a tensile normal fault dipping to the northeast, and is a compressive reverse fault in the late stage (after the Early Triassic), dipping to the southeast with angle of 70° – 80° . According to the gradient zone of high and low resistivity zone, it is inferred that the interface between Maokou Formation and Longtan Formation features paleo-karst landform with relative uplift and depression in the deep. **[Results]** As for the metallogenic model, e.g., prospecting criteria and regional geophysical and geochemical anomalies of the typical deposits in this area, it is considered that the northwest of Haimagu fault with little exploration is worth drilling the deep resource potential. **[Conclusions]** The combination technology of shallow and deep exploration (element geochemical anomaly and broadband magnetotelluric detection technology) can optimize to determine target areas. The relative uplifts of P_2/P_3 and Si/Ca interface adjacent to the Haimagu fault are favorable for drilling verification.

Key words: Carlin-type gold deposit; deep prospecting method; interface-type; blind gold deposits; broadband magnetotelluric (BMT); Getang dome; mineral exploration; southwest Guizhou

Highlights: The broadband electromagnetic method is introduced to obtain the electrical structure with 0–2 km depth in Getang area, resolving strike-dip of Haigugou fault and unconformity between P_2 and P_3 sedimentary strata, and also controlling the exploration direction of blind gold deposit with interface-type.

About the first author: ZHANG Wei, male, born in 1983, professor of engineer, on-the-job postdoctor, mainly engaged in metal mineral geophysical exploration and software development; E-mail: dr.zhangwei@qq.com.

About the corresponding author: ZHOU Jun, male, born in 1981, assistant researcher, mainly engaged in research on methods and applications of electromagnetic exploration of the Earth; E-mail: 20947936@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20230238, No.DD20190033, No.DD20160082) and the National Natural Science Foundation of China (No.41804144, No.42230311).

1 引 言

戈塘矿集区位于黔西南州安龙县境内,大地构造位置处于扬子陆块区上扬子陆块二级构造单元之南盘江—右江裂陷盆地,区域上位于戈塘穹窿南东倾伏端,是滇黔桂金成矿带中赋存于台地相龙头山赋金层序(王研耕等,1994)中的卡林型金矿(王成辉等,2012)。自1987年该区发现戈塘金矿以来,已有多个地勘单位在该区开展过金矿勘查工作,找矿区域主要集中在海马谷断裂的南东盘,目标是产

于龙潭组与茅口组之界面角砾岩中的似层状原生硫化物矿体(董磊等,2011)以及后期经氧化、搬运、堆积而形成的“红土型”矿床(岑安元,2016;童远刚等,2016)。本区达到大型规模的戈塘金矿自1988年开采以来,已有近30年的历史,保有资源量逐渐萎缩,部分金矿已被采空,急需寻找新的接替资源。

近年来,沿海马谷陡倾角断层的邻近位置上相继新发现了乔地坡、白石坡、万人洞等金矿床^①,为本区接续资源的勘探工作提供了新方向,多位学者(毛彬吉等,2017;曾昭光等,2018)对本区前人未

重视的海马谷控矿断层北西侧下盘(戈塘穹窿北西端)的深部找矿远景进行了分析,认为其深部中二叠统茅口组(P₂m)与上二叠统龙潭组(P₃l)地层之间的碳酸盐岩与碎屑岩Si/Ca界面上同样具有与上盘出露地表位置P₂/P₃、Si/Ca成矿部位“同期、同源、同性质”的成矿作用和地质条件,值得开展新一轮探索工作。但由于海马谷断裂下盘P₂/P₃有利赋矿界面埋深的陡增,其勘探成本和风险也大大增加,因此急需一套行之有效的勘查技术方法对其深部沉积

产状、隐伏构造以及成矿空间等关键地质信息的准确揭示提供技术支撑,厘定其成矿模式下的深部成矿作用标志,进而为深部钻探工程的科学部署提供客观的证据支撑(叶天竺和薛建玲,2007)。

2 地质成矿背景与深部找矿

2.1 区域沉积建造背景

戈塘地区出露地层以三叠系为主、二叠系次之,二叠系主要分布于戈塘穹窿核部位置(图1)。

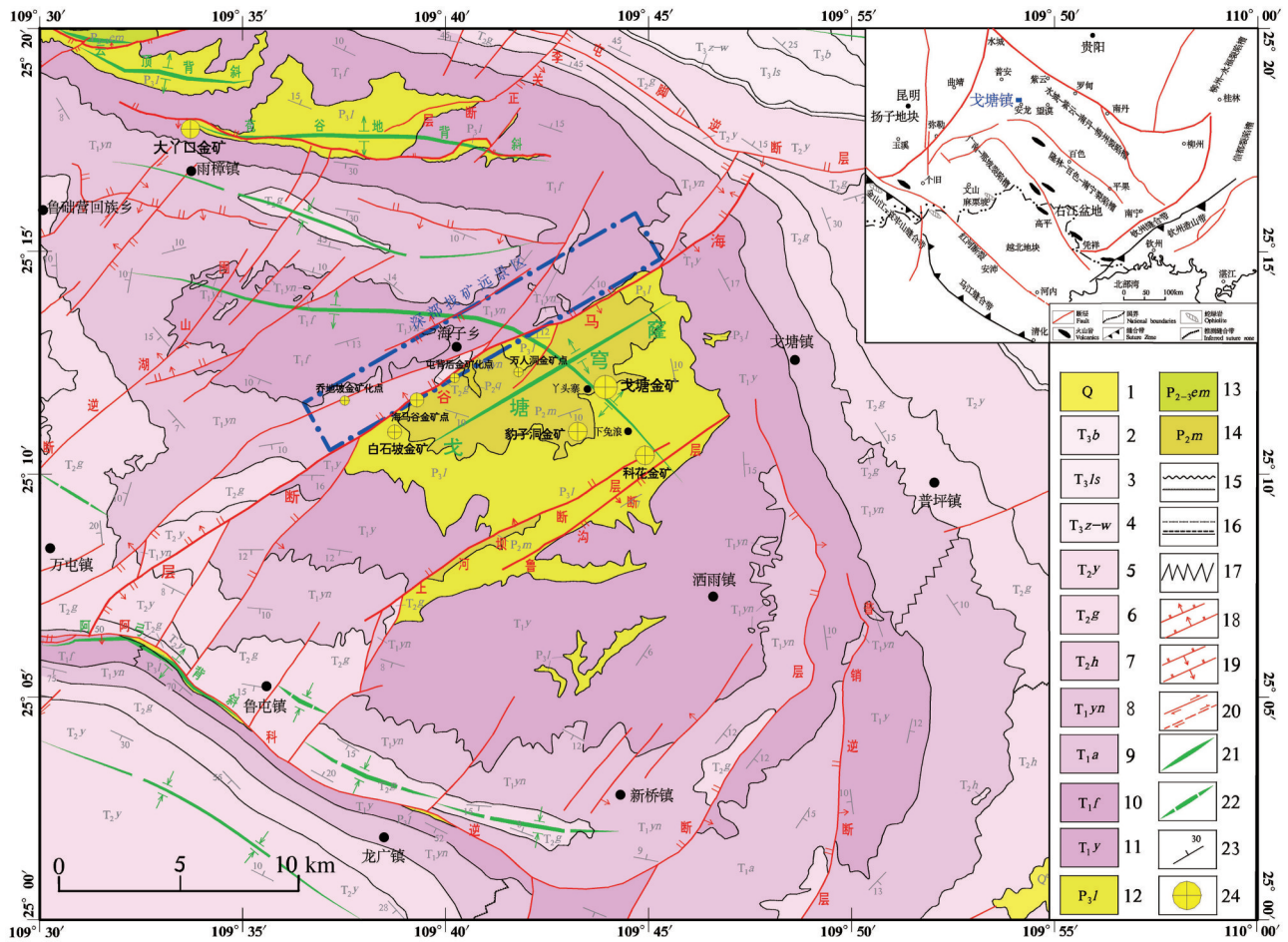


图1 戈塘地区建造构造及金矿点分布特征

1—第四系;2—上三叠统把南组;3—上三叠统赖石科组;4—上三叠统竹杆坡—瓦窑组;5—中三叠统杨柳井组;6—中三叠统关岭组;7—中三叠统花溪组;8—下三叠统永宁镇组;9—下三叠统安顺组;10—下三叠统飞仙关组;11—下三叠统夜郎组;12—上二叠统龙潭组;13—中—上二叠统峨眉山玄武岩;14—中二叠统茅口组;15—不整合接触;16—假整合接触;17—相变线;18—正断层;19—逆断层;20—平移断层;21—背斜轴线;22—向斜轴线;23—岩层产状;24—金矿床点

Fig.1 Structures and distribution characteristics of gold deposits in Getang area

1—Quaternary; 2—Banan Formation of Upper Triassic; 3—Laishike Formation of Upper Triassic; 4—Zhuganpo-Wayao Formation of Upper Triassic; 5—Yangliujing Formation of Middle Triassic; 6—Guanling Formation of Middle Triassic; 7—Huaxi Formation of Middle Triassic; 8—Yongningzhen Formation of Lower Triassic; 9—Anshun Formation of Lower Triassic; 10—Feixianguan Formation of Lower Triassic; 11—Yelang Formation of Lower Triassic; 12—Longtan Formation of Upper Permian; 13—Emeishan basalt of Middle to Upper Permian; 14—Maokou Formation of Middle Permian; 15—Unconformity contact; 16—Pseudo conformity contact; 17—Sedimentary phase change line; 18—Normal fault; 19—Reverse fault; 20—Translation fault; 21—Anticline axis; 22—Syncline axis; 23—Rock occurrence; 24—Gold deposit point

矿区中二叠系以开阔台地碳酸盐岩沉积为主,上二叠统为潮坪相含煤细碎屑岩沉积;下三叠统印度阶以浅海陆棚相为主,其后的奥伦尼克阶以开阔台地—局限台地相碳酸盐岩沉积为主,中三叠统以潮坪相碳酸盐岩沉积为主。出露地层从老至新为中二叠统茅口组、上二叠统龙潭组、下三叠统飞仙关组、永宁镇组以及中三叠统关岭组。茅口组为中厚层生物碎屑灰岩、硅化灰质角砾岩,龙潭组为硅化黏土岩、黏土质角砾岩、黄铁矿凝灰岩、炭质黏土岩夹煤层、泥质灰岩。飞仙关组为石英细砂岩、钙质细砂岩、粉砂岩、黏土岩夹粉砂岩夹薄层粉砂质黏土岩及钙质黏土岩。永宁镇组为白云岩、藻屑白云岩、角砾状白云岩组成,夹白云质灰岩、灰质白云岩。关岭组为灰色薄—中厚层泥晶灰岩、含泥质灰岩夹含泥质白云岩、泥晶白云岩、角砾白云岩。其中,龙潭组第一段(P_3l')岩性以薄层状粉砂岩、黏土岩及炭质黏土岩为主,黏土岩中普遍发育含细粒星散状黄铁矿角砾岩,厚42~86 m,下伏 P_2m 与 P_3l 组的不整合沉积界面被俗称为“SBT层”(刘建中等,2014),是矿区重要赋矿层位。

2.2 构造特征

海马谷断裂、戈塘穹隆构造、冲断—褶皱体系及其层间滑脱裂隙构造是戈塘矿集区的主要控矿要素(胡煜昭等,2011;吴松洋等,2014),沿区域海马谷断裂南东盘分布有戈塘、豹子洞、白石坡、科花、万人洞等多个金矿点(图1)。海马谷断裂为区域性深大断裂,呈北东向展布,其北西盘为三叠系,南东盘为二叠系,具左行走滑、逆冲推覆、多期活动等性质(图2),前人地震反射剖面揭示该断层早期受晚古生代裂陷作用表现为张性正断层特征(胡煜昭等,2012;陶平等,2015),倾向北东,后期受印支晚期冲断—褶皱活动表现为高角度的压扭性逆冲推覆特征,整体倾向南东,倾角约 80° 。

戈塘穹隆整体表现为北东向背斜与南东向背斜相互叠加的短轴背斜,后期被海马谷断裂改造。由于茅口组灰岩与龙潭组黏土质粉砂岩间存在明显的岩性、化学和能干性差异,上伏黏土质粉砂岩构成了理想的不渗透障(索书田和侯光久,1992),同时碳酸盐岩与碎屑岩间的Si/Ca界面也是有利于成矿流体中金元素交代析出的地球化学障(包志伟和赵振华,2000;李应栩等,2018),层间的能干性差

异体现在受区域性的挤压应力作用下,容易产生层间滑脱运动,并在龙潭组底部形成一系列的剪切褶皱及虚脱空间,为成矿流体的水平运移提供通道,在 P_2/P_3 界面富集似层状金矿体。

2.3 戈塘矿床特征

戈塘金矿是本区达到大型规模的典型矿床,累计查明金金属量29.884 t,矿床平均品位4.10 g/t,金矿体受茅口组凹凸不平古岩溶侵蚀面的溶沟、溶槽控制,呈似层状、不规则状及透镜状产于上二叠统龙潭组(P_3l)底部硅化角砾岩组成蚀变体(SBT)中(图3)。角砾成分除下伏茅口组灰岩外(多数已发生硅化),其余为还原环境中形成的并且含凝灰质的黏土岩,呈棱角砾状,充填胶结物主要为含硫化物的硅化、碳酸盐化角砾,角砾可拼连性强,主要沿古溶槽或古溶沟分布。溶槽中堆积的角砾岩可能是下伏茅口组灰岩在高压海浪作用下形成角砾,并被海浪搬运至溶沟、溶槽中所致。在成矿期构造应力作用下,成矿流体往构造减压扩容空间运移,并优先选择古岩溶构造与背斜构造耦合部位成矿(冉瑞德,2005),成矿热液交结成矿后,矿石形成硅化、黄铁铁化的角砾状、浸染状结构特征。

2.4 矿床成矿模式

前人对本区 P_2m/P_3l 界面型金矿床的成因、物质来源、流体性质、成矿模式等开展大量的研究工作,概括起来可分为2种不同的成矿机制,即沉积—改造成矿说和岩浆热液成矿说。沉积—改造成因认为矿源主要来自沉积地层,成矿热液从地层中萃取Au、As、Hg、Sb等元素,在构造有利部位或者有利的地层层位沉淀成矿(刘东升和耿文辉,1987;刘建明和刘家军,1997)。岩浆热液成因认为矿源和热源均来自地幔或地壳深部的岩浆活动,赋矿地层仅是有利赋矿部位,卡林型金矿是岩浆热液体系的远源产物(朱赖民等,1997;刘显凡等,1999,2003;夏勇等,2009)。近年来,一些新的同位素测试数据^①(王泽鹏等,2010;吴松洋等,2016)表明含金成矿流体具有幔源特征,成矿年龄为80~140 Ma(范军,2015),成矿与深部隐伏岩体存在关联(王亮等,2015)。

目前,本区逐渐一致的成矿模式认识(图4,王砚耕,1994)。自早泥盆世早期开始,随着古特提斯洋的扩张,北东—南西向为主的拉伸作用导致本区发生强烈裂陷,形成了由一系列同生断裂带构成裂

陷构造以及裂隙槽盆与台地相间排列的古地理格局,中二叠世东吴运动使可溶性碳酸盐岩抬升于海水之上,暴露于大气环境中形成古岩溶地貌,晚二叠世随着大面积峨眉山玄武岩喷发形成凝灰岩沉积(陶平等,2005),三叠纪初本区由裂隙背景向前陆盆地转化,印支期以升降运动为主(秦守荣等,2009),在古地理的浅水台地及边缘区形成碳酸盐岩沉积建造(以关岭组为代表),进入燕山期后转入板内造山阶段,区域上强烈的挤压背景形成了典型的侏罗山式褶皱、逆冲推覆构造、挤压性逆断层及其层间滑脱位移裂隙(戴传固等,2014),期间海马谷深大断层转换为由南东向北西挤压逆冲,切割并抬升戈塘穹窿,同时深部可能存在岩浆活动分异出富含 $CH_4-N_2-CO_2$ 和 Au^{2+} 、 Sb^{2+} 、 Hg^{2+} 、 As^{2+} 、 H_2O 的含金成矿热液沿海马谷深大断层形成的导矿通道向上运移,进入 P_2m 与 P_3l 或 $P_3\beta$ 间的不整合界面间(构造滑脱面、不渗透障、地球化学障)侧向运移,在Si/Ca界面附近的裂隙空间发生水/岩反应(交代)形成“界面型”SBT层金矿床(陶平等,2019)。

2.5 制约深部找矿的关键地质问题

结合上述成矿模型,位于海马谷断裂下盘的

P_2m 与 P_3l 地层界面具有本区含金成矿热液富集成矿的岩性、构造、物理化学等条件,其深部具有较大的资源量勘探前景,前人地震勘探成果(图2)宏观显示出该断层的深部断距大于1000 m,加大了钻探工作的成本和风险,如何合理部署钻探工程需要精细有效的勘查技术手段提供证据支持,解决制约本区深部找矿的2个关键性地质问题。(1)海马谷断裂深部导矿通道的空间产状问题:海马谷深大断层是本区深源含矿热液运移的重要通道,该通道的邻近位置是形成富、厚金矿床的有利部位,但历史上多期次构造活动对其改造剧烈,需要查明其深部的构造样式特征;(2) P_2/P_3 古岩溶不整合赋矿层位的深部起伏特征问题: P_2m 茅口组与上伏 P_3l 龙潭组为岩溶不整合沉积,茅口组顶部的古岩溶地貌使得 P_2/P_3 地层界面存在剧烈的起伏变化(区内峰洼高差一般数十至一百余米,最大可达300 m),从深钻施工经济成本和岩溶构造成矿机理考虑,应优先选择古岩溶+背斜构造相对“隆起”部位。

3 浅表地球化学异常特征与成矿背景

Au-As-Sb-Hg组合异常是黔西南低温热液卡

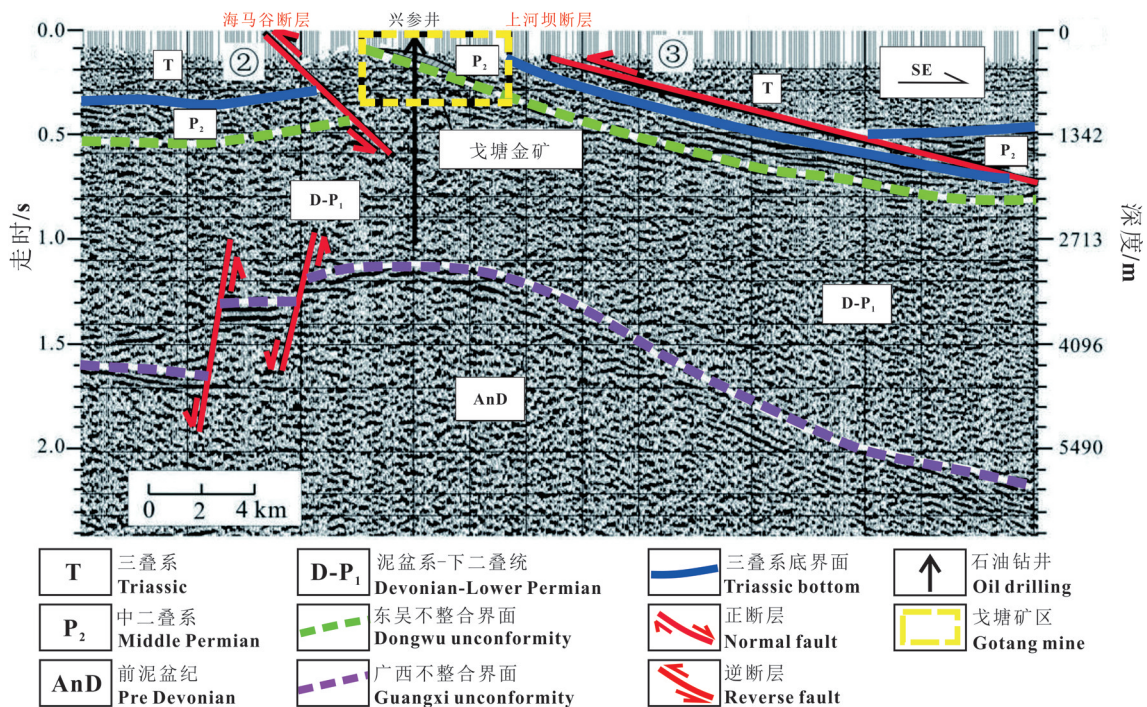


图2 研究区前人地震勘探成果(据胡煜昭等,2011修改)

Fig.2 Previous seismic exploration results in the study area (modified from Hu Yuzhao et al., 2011)

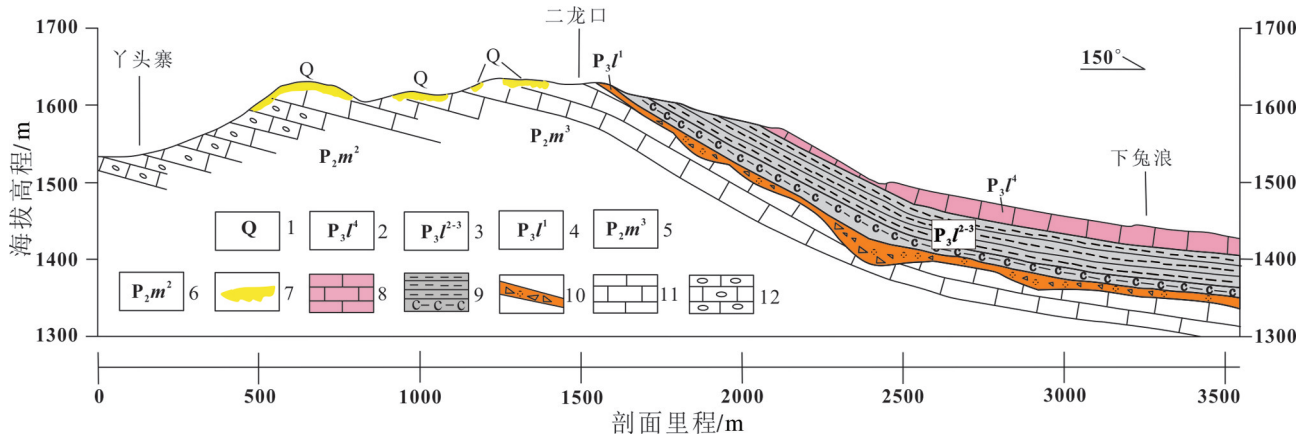


图3 戈塘金矿区丫头寨—下兔浪地质剖面图(据毛彬吉等,2017修改)

1—第四系;2—上二叠统龙潭组四段;3—上二叠统龙潭组二、三段;4—上二叠统龙潭组一段;5—中二叠统茅口组三段;6—中二叠统茅口组二段;7—红土型金矿体;8—硅化灰岩;9—煤系地层,底层为炭质黏土岩;10—角砾岩层,底部为高岭石;11—厚层块状生物屑灰岩;12—厚层块状斑豹状白云质灰岩

Fig.3 Yatouzhai-Xiatulang geological section of in Getang gold deposit (modified from Mao Binji et al., 2017)

1—Quaternary; 2—The 4th member of Longtan Formation of Upper Permian; 3—The 2nd and 3rd member of Longtan Formation of Upper Permian; 4—The 1st member of Longtan Formation of Upper Permian; 5—The 3rd member of Maokou Formation of Middle Permian; 6—The 2nd member of Maokou Formation of Middle Permian; 7—Lateritic gold ore body; 8—Silicified limestone; 9—Coal measure stratum, with carbonaceous clay rock as bottom layer; 10—Breccia layer with kaolinite at the bottom; 11—Thick layer massive bioclastic limestone; 12—Thick layer massive leopard dolomitic limestone

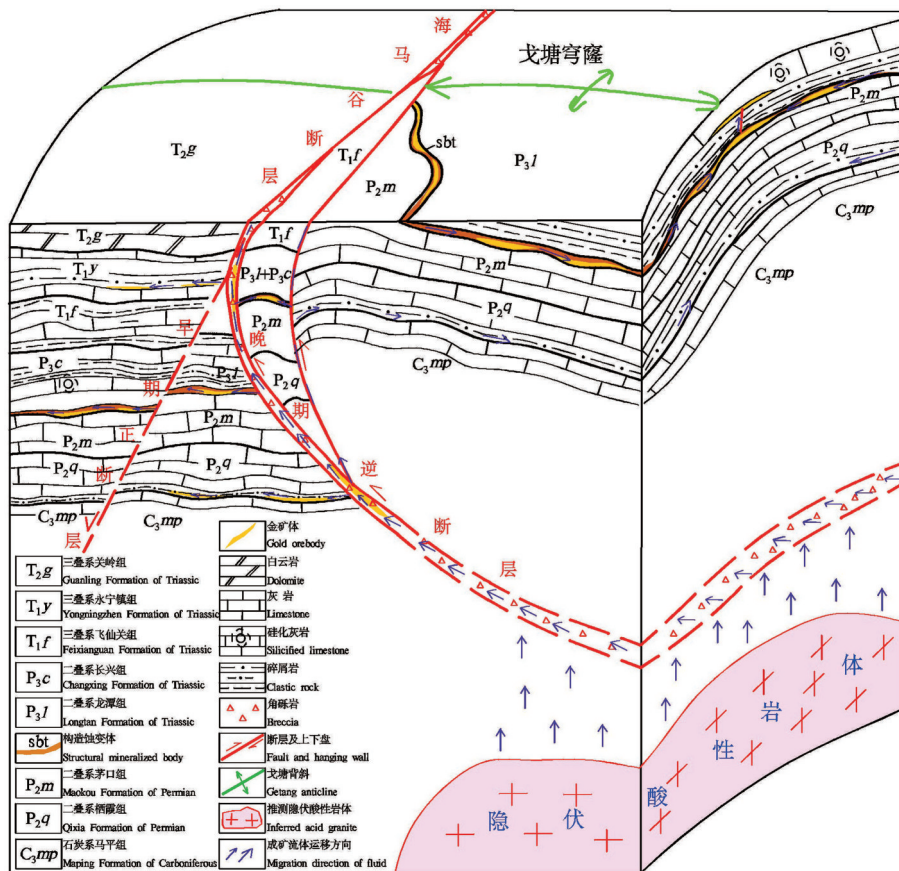


图4 戈塘地区成矿模式图(据贵州省地质矿产勘查开发局117地质大队,2018^①)

Fig.4 Metallogenic model map of Getang area (after No.117 Geological Team, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2018^①)

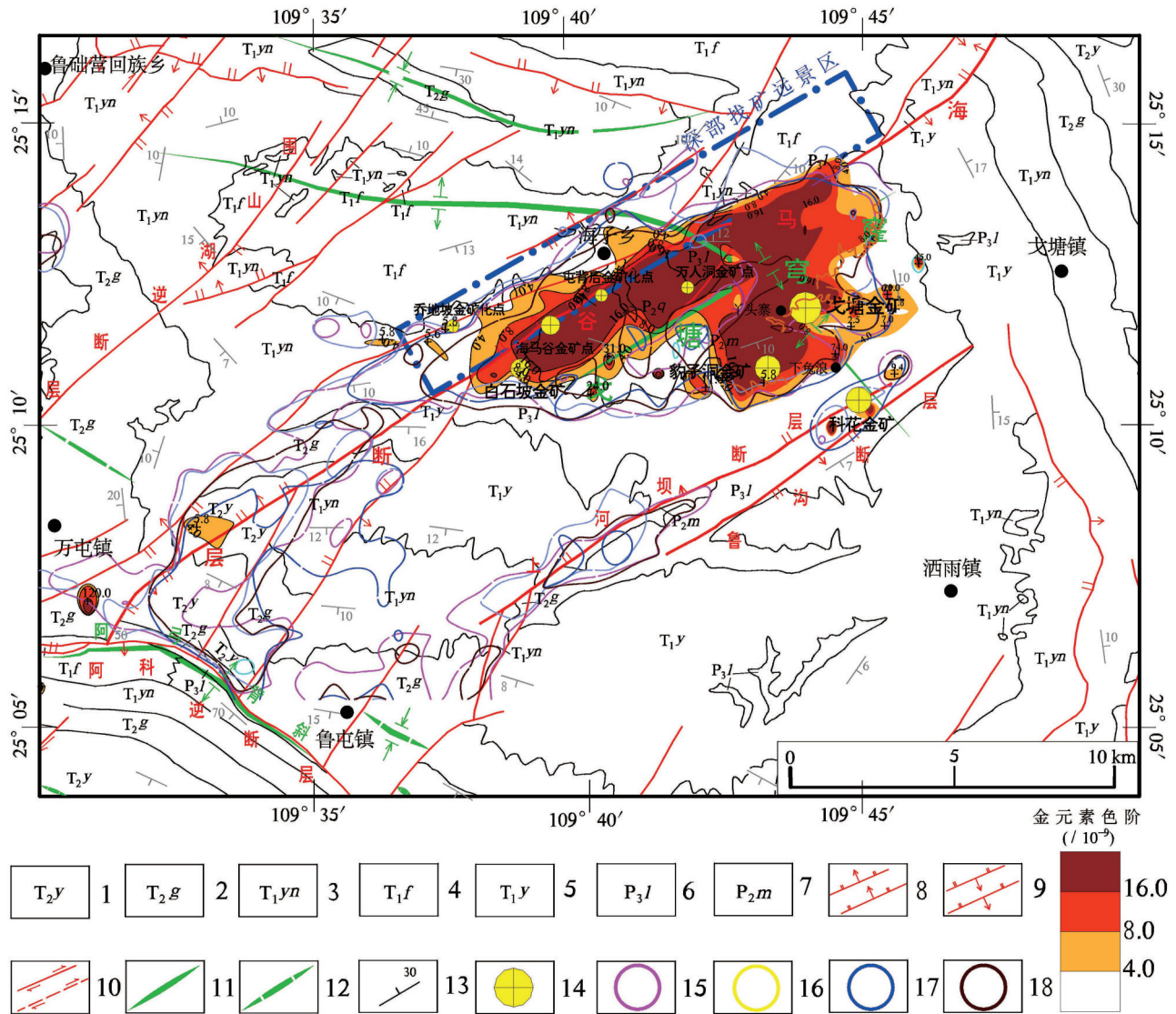


图5 戈塘地区1:5万土壤地球化学异常特征图(据贵州省地质矿产勘查开发局117地质大队,2018^①)

1—中三叠统杨柳井组;2—中三叠统关岭组;3—下三叠统永宁镇组;4—下三叠统飞仙关组;5—下三叠统夜郎组;6—上二叠统龙潭组;7—中二叠统茅口组;8—实、推测正断层;9—实、推测逆断层;10—实、推测平移断层;11—背斜轴;12—向斜轴;13—倾斜岩层产状;14—金矿床点;15—As元素异常(下限:120×10⁻⁶);16—Sb元素异常(下限:21×10⁻⁶);17—Hg元素异常(下限:0.5×10⁻⁶);18—W元素异常(下限:5.0×10⁻⁶)

Fig. 5 1:50000 scale soil geochemical anomalies in Getang area (after No.117 Geological Team, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2018^①)

1— Yangliujing Formation of Middle Triassic; 2— Guanling Formation of Middle Triassic; 3— Yongningzhen Formation of Lower Triassic; 4— Feixianguan Formation of Lower Triassic; 5— Yelang Formation of Lower Triassic; 6— Longtan Formation of Upper Permian; 7— Maokou Formation of Middle Permian; 8— Normal fault; 9— Reverse fault; 10— Translational fault; 11— Anticline axis; 12— Syncline axis; 13— Attitude of inclined strata; 14— Gold deposit; 15— As element anomaly (lower limit: 120×10⁻⁶); 16— Sb element anomaly (lower limit: 21×10⁻⁶); 17— Hg element anomaly (lower limit: 0.5×10⁻⁶); 18— W element anomaly (lower limit: 5.0×10⁻⁶)

林型金矿床的重要找矿标志,在构造、岩性组合等成矿地质条件有利区存在与成矿密切相关的化学元素叠加异常,揭示了区域上存在含矿热液活动、成矿元素迁移富集背景,指示其深部存在隐伏金矿

床的潜力。2016年,由中国地质调查局组织实施的“南盘江成矿区贞丰和富宁地区地质矿产调查”项目完成了黔西南地区万屯幅(G48E017013)和普坪幅(G48E017014)2个相邻1:5万图幅的土壤地球化

学测量工作,其中在戈塘地区的地球化学异常具有明显的异常幅值“高”、分布面积“大”、组合伴生元素“全”特征(图5),Au-As-Sb-Hg组合元素异常带整体沿海马谷断裂、上河坝断层呈北东方向展布,Au元素异常高值区域主要集中分布在海马谷断裂上盘的戈塘穹窿出露地表位置,推测与该位置浅表出露的豹子洞、戈塘等“红土型”金矿床关系密切,而As、Sb、Hg等前晕元素异常主要带沿海马谷断裂、上河坝断层呈北东向带状展布(陆建宝等,2015),上述化探元素的异常浓集背景特征间接反应出了戈塘地区具有较好的地质成矿作用背景,证明了海马谷断裂是戈塘金矿集区重要的区域性导、控矿构造,为深部含金热液的向上运移提供了通道空间,深部与之贯通的有利构造+岩性组合部位是深部金矿床富集成矿的有利空间。

4 深部地球物理结构特征与成矿预测

4.1 电阻率物性分层结构特征

存在明显的物性差异是开展地球物理工作的重要前提,本区出露的主要地层为茅口组(P_2m)、龙潭组(P_3l)、飞仙关组(T_{1f})、永宁镇组(T_{1yn})、关岭组(T_{2g})等,在野外工作中对上述地层的岩石露头进行了系统物性标本采集和测试(每个地层单元的物性标本数大于30块),其电阻率测试结果统计如表1所示。

表1 物性标本电性参数测定结果统计表

Table 1 Statistical table of electrical parameters of physical samples

地层名称	地层代号	岩(矿)石名称	电阻率/($\Omega \cdot m$)		
			最小值	最大值	平均值
关岭组	T_{2g}	中厚层泥晶灰岩	858.1	3640	1876.68
	T_{1yn}^4	块状泥晶白云岩	676.3	3890	1607.1
永宁镇组	T_{1yn}^3	中厚层状粉屑灰岩	1049.3	6261.7	2302.3
	T_{1yn}^2	中厚层泥灰岩	1402.8	2731.6	2561
	T_{1yn}^1	薄至中厚层泥晶灰岩	1052.3	5682	2501.9
飞仙关组	T_{1f}^6	中厚层状黏土质粉砂岩	54	504	194.8
	T_{1f}^5	中厚颗粒灰岩	1035.7	3786	2138.16
	T_{1f}^{2-2}	黏土质粉砂岩	33	285	111.16
龙潭组	P_3^f	泥质粉砂岩	26.3	311	153.13
	P_3^l	块状硅化灰岩	391	1485	658.61
	P_3^l	粉砂质黏土岩	11	290	111.64
茅口组	P_2m	块状灰岩	1187.76	10807	4620

按照低阻 $\leq 500 \Omega \cdot m$ 、500 $\Omega \cdot m$ <中阻 $\leq 1600 \Omega \cdot m$ 、1600 $\Omega \cdot m$ <中高阻 $\leq 2500 \Omega \cdot m$ 、高阻 $\geq 3000 \Omega \cdot m$ 的划分原则(图6),并结合该地区主要地层的沉积建造特征(沉积厚度、岩性间断等),从地表到深部垂向方向可分为7个相邻电阻率差异明显的地球物理结构层:

第1层:整体表现为中高阻电性层,该电性层对应 T_{2g} ,电性层的厚度为191~407 m;

第2层:整体表现为中阻电性层,该电性层对应 T_{1yn}^4 ,电性层的厚度为178~222 m;

第3层:整体表现为中高阻层,该电性层对应 T_{1yn}^1 — T_{1yn}^3 ,电性层的厚度约为535 m;

第4层:整体表现为低阻层,该电性层对应 T_{1f}^6 ,电性层的厚度约为103 m;

第5层:整体表现为中高阻层,该电性层对应 T_{1f}^5 ,电性层的厚度约为150 m;

第6层:整体表现为低阻层,该电性层对应 T_{1f}^{2-2} — P_3^l ,电性层的厚度为470~792 m。由于随着埋深的不断加深,电磁法的趋肤衰减效应的逐渐增强,对于薄层的分辨能力将越来越弱。因此,对于埋深在800~900 m的30 m厚的 P_3^f 硅化灰岩将无法在常规的大地电磁测深数据反演方法中单独分辨,故将 P_3^f — P_3^l 整体为低阻特征;

第7层:整体表现为高阻层,该电性层对应 P_2m — P_2q ,电性层的厚度>500 m。

4.2 宽频大地电磁探测技术

邻区的相关电法勘探成果表明(侯林等,2015),音频大地电磁探测方法(AMT)能够有效识别地下隐伏构造以及中二叠统茅口组与上二叠统龙潭组间的 P_2/P_3 岩溶不整合界面,间接查明隐伏的“界面型”金矿床的有利赋存空间。但该区因居民地、电烤烟、矿业开采等因素普遍存在高压电力线干扰,加之地表普遍出露高电阻率背景的碳酸盐岩(T_{1yn} 和 T_{2g})使得以往AMT和CSAMT在实际工作中难于在天然电磁场“死频带”(10~1 HZ)范围采集到可靠的数据,在本区无法达到2 km的有效探测深度。为此,野外工作引入了新一代宽频大地电磁探测技术(BMT),其核心是加拿大凤凰公司最新研制的MTC-150宽频磁探头,其频带范围为10400~0.0001 HZ,同时兼具了AMT浅表分辨率高和MT有效探测深度大的优点。为保证低频段的数据采

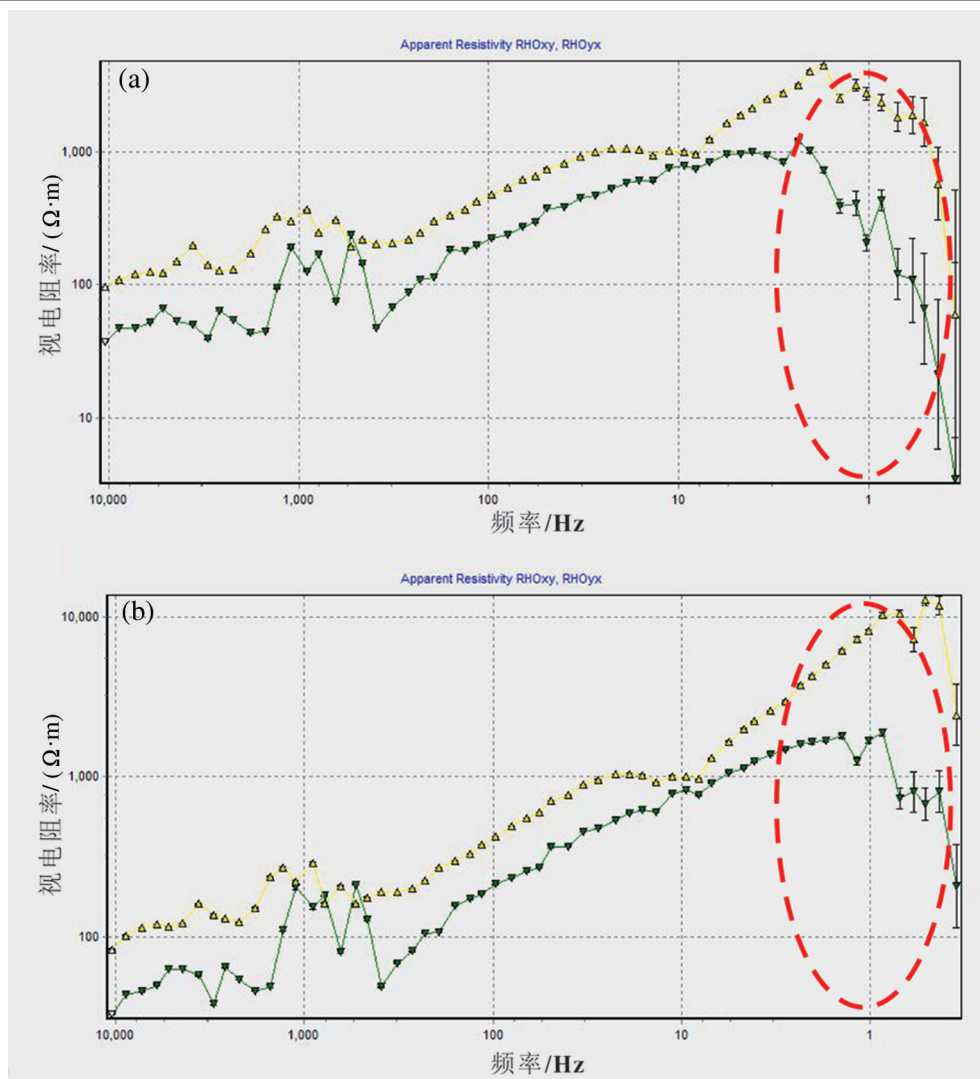


图7 AMT与BMT法的野外数据观测对比试验结果

a—音频大地电磁(AMT)的实测数据;b—宽频大地电磁(BMT)的实测数据

Fig.7 Comparison test results between AMT and BMT

a—Measured data of Audio frequency Magnetotelluric(AMT); b—Measured data of Broadband Magnetotelluric(BMT)

剖面的异常响应特征,可形成关于戈塘地区深部地质结构的如下认识:

(1)海马谷断裂位置表现为一致的“八”字低电阻率带异常特征,推断海马谷断裂至少存在2期性质不同、规模较大的区域性地质构造作用,早期构造表现为正断层特征,倾向北西,倾角较缓,约为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$,推测其成因是由于早期被动大陆边缘裂陷导致 P_2m 存在沿北西走向的下陷。晚期构造表现为逆断层性质,倾向南东,倾角较陡,为 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$,推测其成因是晚期受燕山期推覆造山作用形成陡倾角的逆冲推覆断层。最终导致海马谷断裂上下盘南

的 P_2/P_3 界面的存在约900~1100 m高差。

(2)与深部 P_2/P_3 古岩溶界面相对应的高低电阻率等值线梯度带表现为一致的“不连续凹凸起伏”变化,推断其表现出的局部“凸起”和“凹陷”是茅口组地层古岩溶地貌特征的响应。推测其成因是由于在中晚二叠世(P_2-P_3)沉积时期,同时也是峨眉山玄武岩喷发时期,本区至少存在1次区域性的抬升运动,使得 P_2m 暴露到水平面之上,接受风化剥蚀从而形成古喀斯特地貌特征,之后进入海侵沉积阶段,与上伏 P_3l 形成不整合接触关系。

(3)沿北东 50° 方向,4条电阻率剖面上在相同

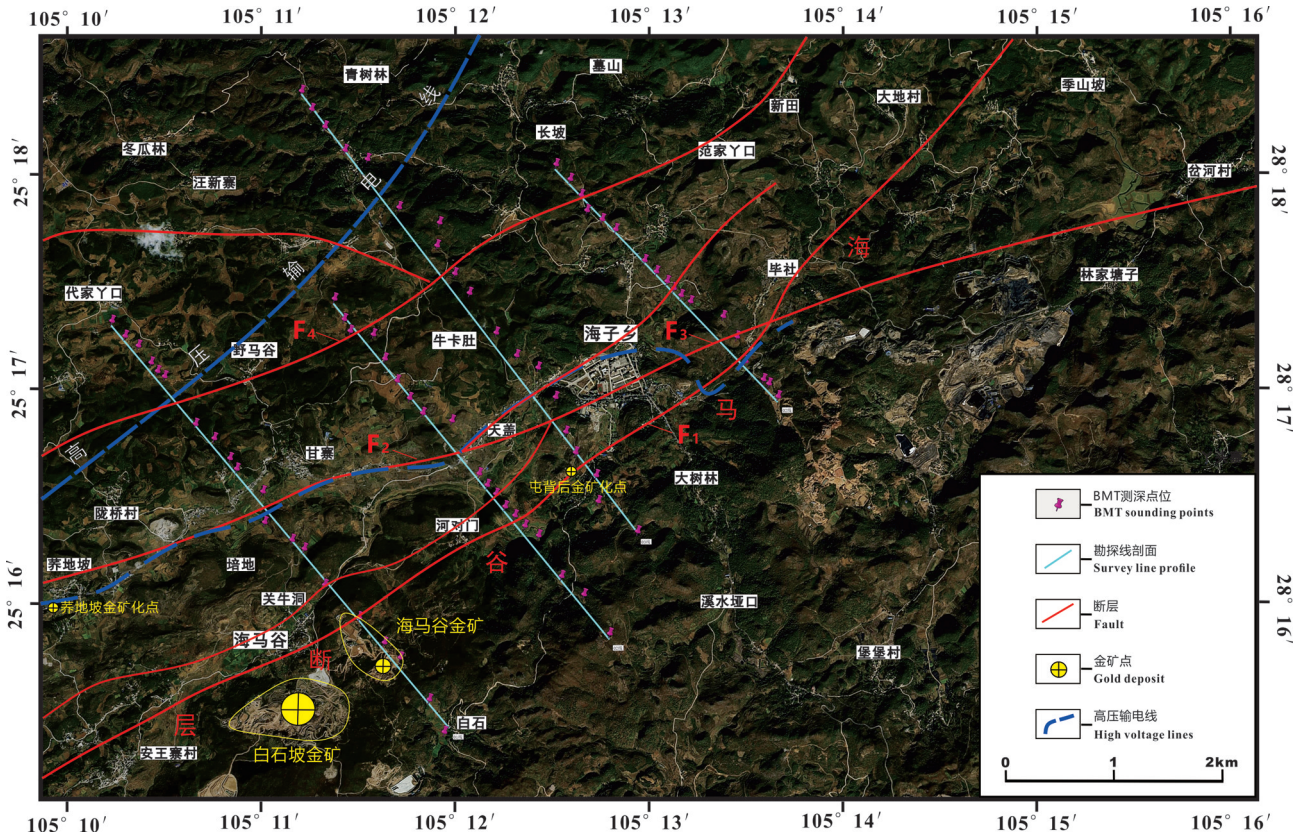


图8 工作区地质背景与电法勘探线剖面位置图

Fig.8 Geological background of working area and location map of BMT prospecting profile

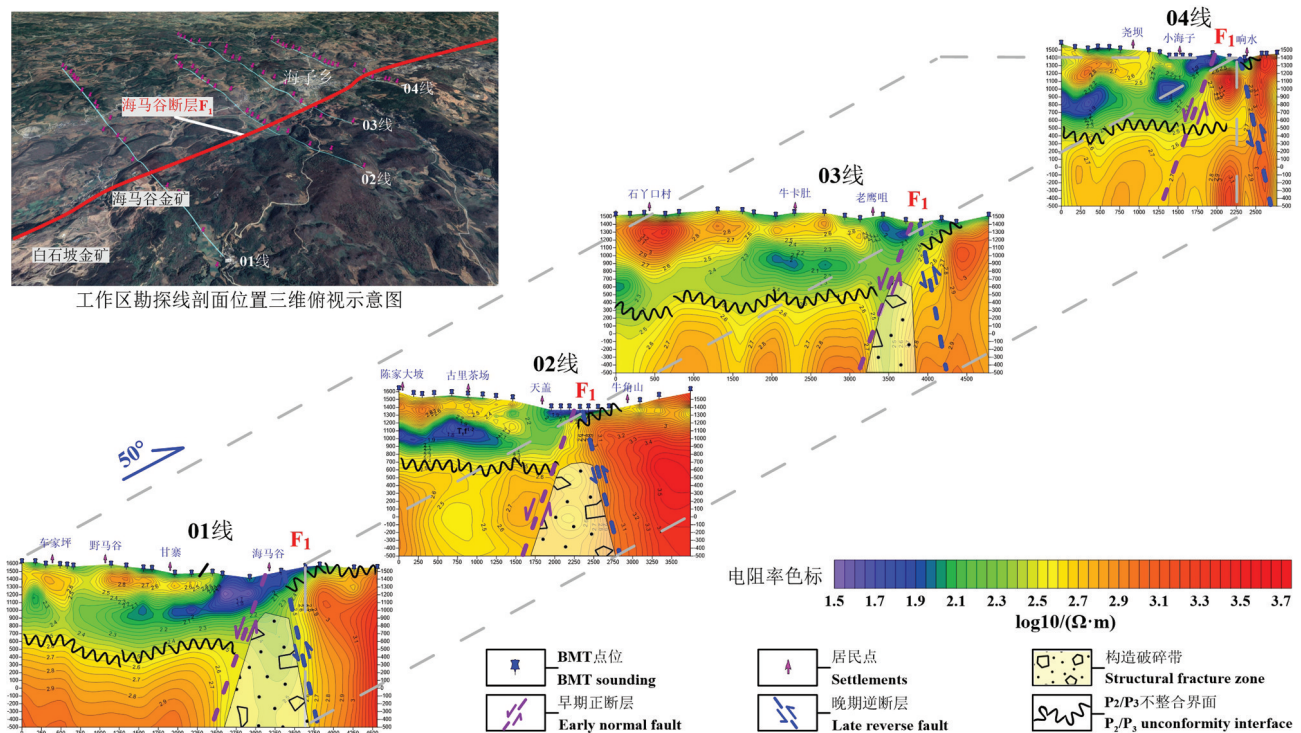


图9 宽频大地电磁电阻率二维反演联合剖面与整体电性结构特征图

Fig.9 Joint profile and overall electrical structure characteristics of BMT resistivity 2D inversion results

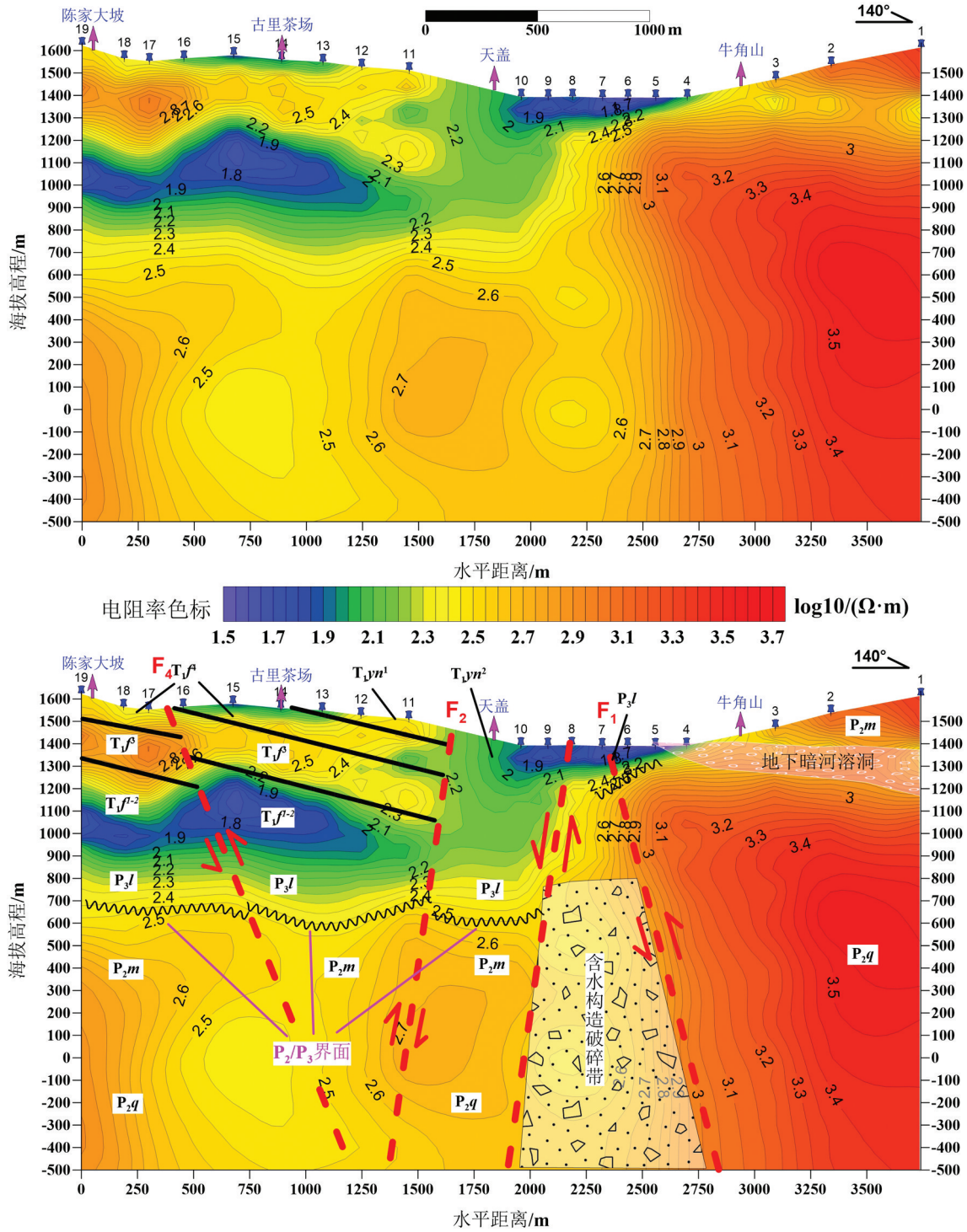


图 10 02 线勘探线剖面电阻率反演断面及其地质推断解释图
 Fig.10 Line 02 line resistivity inversion section and its geological interpretation map

位置具有较一致的上下弯曲趋势,推断是北东走向的褶皱背向斜特征,推测其成因是后期(燕山运动)北西方向区域性构造应力作用。

4.3.2 电性结构精细解译

以 02 线剖面的电阻率反演结果为例剖析本区地下深部的电性结构精细分层特征(图 10)。从宏

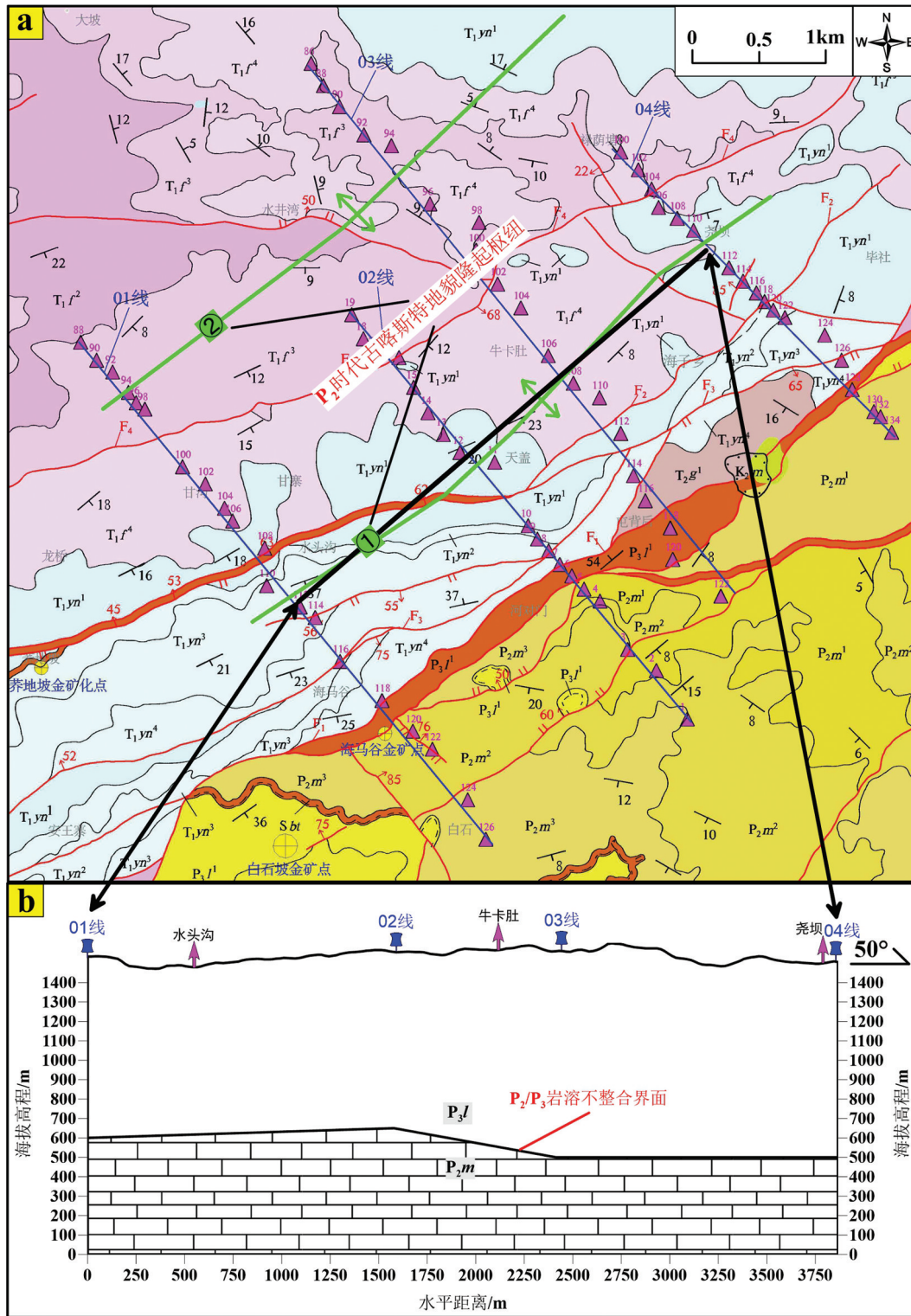


图 11 深部 P₂/P₃ 不整合界面空间起伏特征综合推断图

a—P₂ 古喀斯特地貌隆起枢纽平面展布图; b—① 线枢纽剖面的纵向切片图

Fig.11 Comprehensive inference diagram of spatial fluctuation characteristics of deep P₂/P₃ unconformity interface

a—P₂ layout map of uplift hub of paleo-karst landform; b—Longitudinal slice of line No.① uplift profile

观电性结构上分析,以7号测点位置为界,在海拔600 m以上浅部地层的左右两侧可分电性差异明显的块体,右侧表现为连片的高阻块体,推断为二叠纪茅口组碳酸岩地层;左侧可再分为上下2个差异明显的块体,上部整体表现为中高电阻率块体,推断为 T_1f 的厚层灰岩,下部整体表现为低电阻率块体,推断为 $T_1f^2-P_3l$ 的碎屑岩。

从局部电性结构上分析,6~8号测点深部位置(海拔-500~800 m)的条带状低阻应为多期次活动的海马谷断裂破碎带含水的响应(F1),其条带状低阻体及其等值线梯度带总体倾向南东,倾角陡立,为 $70^\circ\sim 80^\circ$,断层性质为逆断层。牛角山4号测点位置的局部低电阻率异常为地下暗河溶洞的响应。在16~17号测深点位置,其对应的 T_1f 高电阻率层存在明显的横向不连续,从高阻体中局部低阻体的变化趋势推断F4断层倾向南东,性质为逆断层。8号测点左边海拔400~600 m处的低、高电阻率梯度带推断为海马谷断裂下盘 P_2/P_3 不整合界面的响应,该界面向北存在逐渐加深的趋势,电阻率梯度带具有明显不连续特征,存在局部的“凹凸”弯曲,与 P_2 时期形成的古岩溶古喀斯特地貌有关,在剖面11号和15号测深位置存在一个相对“隆起点”,其埋深在海拔700 m左右,距离地表约900 m,推断为背斜构造的响应。

4.4 深部有利找矿靶区预测

综合01~04线电阻率反演断面中深部 P_2/P_3 不整合界面相对“隆起点”的平面横向空间位置(图9),沿着北东 50° 区域构造方向存在较一致的“类褶皱枢纽”(图11a中绿色实线①和②所示),其中由01线112号→02线11号→03线08号→04线110号测点组成1条相对隆起的脊线,由01线96号→03线94号测点组成另1条相对隆起的脊线,推断脊线位置为 P_2 时代茅口组沉积时的古背斜核部或古喀斯特地貌山峰。

按照前文所述区域成矿模式,①号脊线位置的 P_2/P_3 有利赋矿界面距离地表更浅、在空间位置上更靠近区域性海马谷断裂导矿通道,是本区开展“第二空间”深部找矿的有利找矿靶区。位于海马谷断裂北西盘、处于深部隐伏状态的 P_2/P_3 有利赋矿界面是古岩溶不整合接触关系,在平面空间上可能存在巨大的不连续性,即使沿着构造方向, P_2/P_3 界面的

埋深依然存在较大的起伏变化,以①号脊线的纵向切片为例(图11b),可推断出01和02线之间的 P_2/P_3 界面具有缓慢抬升的趋势;在02线至03线之间可能存在斜坡地形,坡度大概 $10^\circ\sim 15^\circ$,使得在相距800 m的水平距离上产生了约100~150 m的下降;在03至04线之间的 P_2/P_3 界面埋深相对平缓,无太大起伏变化。从经济角度出发,邻近导矿通道的 P_2/P_3 界面局部隆起点是今后部署深部钻探验证工程的优选位置。

5 结 论

(1)海马谷断裂是戈塘地区重要的控矿构造,对于其性质、规模、产状等关键信息的揭示是厘定该地区深部找矿方向的重要基础。浅表沿海马谷断裂分布的Au-As-Sb-Hg组合元素异常客观表明该断裂是本区重要的导、控矿构造。深部岩石地层的电性结构特征客观反映出海马谷断裂具有多期次活动历史,发生在燕山主成矿期的逆冲断层倾向南东,倾角为 $70^\circ\sim 80^\circ$ 。结合本区的成矿模式、金矿(化)点分布规律、找矿标志以及区域物探异常特征,海马谷断裂北西盘深部 P_2/P_3 有利赋矿界面具有寻找本区接替金矿资源的前景,值得部署探索性钻探工程对其深部的资源潜力进行揭示。

(2)本文所述深浅尺度相结合的勘查技术组合方法(浅表尺度的组合元素化探异常+深部尺度的宽频大地电磁测深法)能够为本区深部有利找矿靶区的优选提供客观的证据支撑,值得在本地区推广应用。

(3)本文所圈定的邻近戈塘穹窿出露、位于海马谷断裂北西盘的深部找矿远景区约 35 km^2 (图1中蓝色虚线矩形框所示),但本文仅对海马谷断裂西南段的局部区域进行了分析研究,难免存在“以偏概全、管中窥豹”的局限,前人学者认为海马谷断裂经多期次构造活动改造,总体应为枢纽断层性质,但目前相关认识仅限于地表地质测量和露头观察,无客观能够反映深部断距变化的证据支撑,建议下一步在海马谷断裂的中段和北东段适应部署勘探工作,全面揭示本区的构造活动期次及其改造变化特征,厘清深部 P_2/P_3 有利赋矿界面的三维空间起伏形态,为戈塘地区下一阶段“第二空间”的找矿工作提供全面、可靠的基础数据。

致谢:感谢中国地质调查局成都地质调查中心王桥对本文英文摘要的润色提升建议。对感谢贵州省地质矿产勘查开发局117地质大队向通、熊伟等同仁为本文的研究思路提供了宝贵建议和启发。感谢本文三位审稿专家和期刊编辑对文章的修改提出了诸多宝贵的意见,在此一并表示真诚谢意!

注释

①贵州省地质矿产勘查开发局117地质大队. 2018. 贵州省安龙鲁沟——白石坡地区矿产地质调查成果报告[R]. 1-302.

②中国地质调查局成都地质调查中心. 2016. 贵州贞丰金-铀多金属成矿区控矿因素与找矿方法研究成果报告[R]. 1-292.

References

- Bao Zhiwei, Zhao Zhenhua. 2000. Role of organic matter in the carlin-type gold mineralization[J]. Geological Science and Technology Information, 19(2): 45-50 (in Chinese with English abstract).
- Cen Anyuan. 2016. Prospecting potential of the laterite-type gold deposit in Leopard-Cave exploration area, Anlong County[J]. Resource Information and Engineering, 31(2): 45-46 (in Chinese).
- Dai Chuangu, Zheng Qiqian, Chen Jianshu, Zhang Hui, Dai Yaran. 2014. Geological background study of metallogenic in Haixi-Yanshan tectonic cycle in Guizhou[J]. Guizhou Geology, 31(2): 82-88 (in Chinese with English abstract).
- Dong Lei, Huang Jianguo, Li Wenjie. 2011. Geological characteristics and origin of Getang gold deposits in Guizhou[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 26(3): 41-44 (in Chinese with English abstract).
- Fan Jun. 2015. Study on Geochemistry and Metallogenic Mechanism of the Getang Large-scale Gold Ore Deposit, Guizhou Province, China[D]. Kunming: Kunming university of science and technology, 1-169 (in Chinese with English abstract).
- Hou Lin, Peng Juan, Zhang Jinrang, Zhu Sibao, Wu Songyang, Wang Jiajun. 2015. Ore-control factors and geophysical method tests in second round prospecting for gold deposits: A case study of Nibao gold deposit in Pu'an County, Guizhou Province[J]. Mineral Deposits, 34(5): 895-912 (in Chinese with English abstract).
- Hu Yuzhao, Wang Jinjin, Han Runsheng, Yi Chengli. 2011. Role of Late Indosinian thrust-folding in ore forming process of Carlin-type gold deposits, central southwestern Guizhou: Seismic evidence[J]. Mineral Deposits, 30(5): 815-827 (in Chinese with English abstract).
- Hu Yuzhao, Zhang Guiquan, Wang Jinjin, Han Runsheng, Zhou Zhuozhu. 2012. Seismic evidence of thrust-fold in Carlin-type gold deposit, central southwestern Guizhou and its significance[J]. Earth Science Frontiers, 19(4): 63-71 (in Chinese with English abstract).
- Li Yingxu, Li Guangming, Dong Lei, Dai Zuowen, Zhang Linkui, Huang Yong, Qing Chengshi. 2018. Preliminary study on the Si/Ca boundary type and Its mineralization-controlling function in Mazhala primary gold deposit, Tibet, China[J]. Journal of Hebei GEO University, 41(1): 34-44 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dongsheng, Geng Wenhui. 1987. China's Carlin-type gold deposits: Their geological genesis and exploration guides features[J]. Geology and Prospecting, 23(12): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianming, Liu Jiajun. 1997. Basin fluid genetic model of sediment hosted micro-disseminated gold deposits in the gold-triangle area between Guizhou, Guangxi and Yunnan[J]. Acta Mineralogica Sinica, 17(4): 448-456 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianzhong, Xia Yong, Tao Yan, Yang Chengfu, Wang Zepeng, Tan Qiping, Fu Shaohong, Chen Rui, Wu Wenming. 2014. The relation between SBT and gold-antimony deposit metallogenesis and prospecting in Southwest Guizhou[J]. Guizhou Geology, 31(4): 267-271 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xianfan, Su Wenchao, Zhu Laimin. 1999. An approach on mechanism of juvenile fluid mineralization for carlin-type gold deposits in Yunnan-Guizhou-Guangxi[J]. Geology and Prospecting, 35(1): 14-19 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xianfan, Wu Dechao, Liu Yuanhui, Luo Xiaohuan, Tao Ping, Yang Zhengxi, Wang Xuehua. 2003. Discussion on the internal unified metallogenic mechanism of different types of gold deposits in different layers in the low temperature mineralization domain of Southwest Guizhou[J]. Depositional and Tethys Geology, 23(3): 93-101 (in Chinese with English abstract).
- Lu Jianbao, Zhang Zhonghua, Liu Hao. 2015. Soil geochemical characteristics and gold prospecting direction in Haizi Area, Southwest Guizhou[J]. Resource Information and Engineering, 30(5): 1-2 (in Chinese with English abstract).
- Mao Binji, Ran Ruide, Kuang Shunda, He Xinghua, Yang Chong. 2017. Metallogenic variation and prospecting potential evaluation of Getang gold ore field in southwest Guizhou[J]. Mineral Resources and Geology, 31(6): 1099-1105 (in Chinese with English abstract).
- Qin Shourong, Zhang Mingfa, Gong Mei, Kuang Zhong. 2009. Indosinian movement in Guizhou[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 29(2): 100-103 (in Chinese with English abstract).
- Ran Ruide. 2005. Characteristic and metallogenic mechanism of the gold deposits with Karst structure as holding ore space in the southwest of Guizhou—Taking the Getang gold deposit in Anlong as an example[J]. Guizhou Geology, 22(1): 14-21 (in Chinese with English abstract).
- Suo Shutian, Hou Guangjiu. 1992. Impermeable barrier and Carlin type gold deposits[J]. Geological Information, 4: 15 (in Chinese).
- Tao Ping, Chen Qifei, Gao Junbo, Fan Yumei, Liao Zhumin. 2015.

- Rifting and metallogenic series in Late Paleozoic in western Guizhou[J]. *Mineral Deposits*, 34(6): 1155–1171 (in Chinese with English abstract).
- Tao Ping, Chen Qifei, Qi Liansu. 2019. Regional metallogenic regularity and metallogenic model of gold deposits in Southwest Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 36(2): 110–119 (in Chinese with English abstract).
- Tao Ping, Du Fangying, Du Changqian, Ma Rong. 2005. Ore-controlling factors of gold deposits in volcanic tuff in the southwestern Guizhou province[J]. *Geology and Prospecting*, 41(2): 12–16 (in Chinese with English abstract).
- Tong Yuangang, Liu Hao, Lu Jianbao. 2016. Analysis on ore-forming regularity and prospecting of laterite-type gold deposits in Leopard-Hole, Anlong, Guizhou [J]. *Western Exploration Engineering*, 28(9): 165–167, 171 (in Chinese).
- Wang Chenghui, Wang Denghong, Huang Fan, Xu Jue, Chen Zhenghui, Ying Lijuan, Liu Shanbao. 2012. The major gold concentration areas in China and their resource potentials[J]. *Geology in China*, 39(5): 1125–1142 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liang, Long Chaolin, Liu Yi. 2015. Discussion on concealed rock Mass delineation and gold source in Southwestern Guizhou[J]. *Geoscience*, 29(3): 702–712 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yangeng. 1994. On regional metallogenic model for carlin-type gold deposits in Southwest Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 11(1): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yangeng, Suo Shutian, Zhang Mingfa. 1994. *Tectonics and Carlin-type Gold Deposits in Southwestern Guizhou*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–115 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zepeng, Xia Yong, Song Xieyan, You Bin, Zheng Xinhua, Wang Xiaoyong. 2010. Deep sources of ore-forming materials in The Karin type gold deposits in southwestern Guizhou: Evidence from isotopes and rare earth elements[J]. *Geology of Ore Deposits*, 29(Suppl): 519–520 (in Chinese with English abstract).
- Wu Songyang, Ding Jun, Chen Ming, Hou Lin, Zhang Jinrang. 2014. Decollement structures and its relationship with mineralization in Getang gold deposit in Guizhou Province[J]. *Metal Mine*, 457(7): 106–109 (in Chinese with English abstract).
- Wu Songyang, Hou Lin, Ding Jun, Wu Wei, Qin Kai, Zhang Jinrang, Zhu Sibao. 2016. Ore-controlling structure types and characteristics of ore-forming fluid of the Carlin-type gold ore field in southwestern Guizhou, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2407–2424 (in Chinese with English abstract).
- Xia Yong, Zhang Yu, Su Wenchao, Tao Yan, Zhang Xingchun, Liu Jianzhong, Deng Yiming. 2009. Metallogenic model and prognosis of the Shidyindong super large stratabound Carlin-type gold deposit, Southwestern Guizhou Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1473–1482 (in Chinese with English abstract).
- Ye Tianzhu, Xue Jianling. 2007. Geological study in search of metallic ore deposits at depth[J]. *Geology in China*, 34(5): 855–869 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhaoguang, Yang Enlin, Ji Guosong, Xiang Tong. 2018. Characteristics and metallogenic mode of gold deposit in Haimagu area of Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 31(4): 261–266 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jun. 2016. Research on Inversion Method of Magnetotelluric Static-shifted Data[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–111 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Laimin, Jin Jingfu, He Mingyou, Liu Xianfan, Hu Ruizhong. 1997. On the possibility of the participation of juvenile fluids in the gold deposit formation in southwestern Guizhou[J]. *Geological Review*, 43(6): 586–592 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 包志伟, 赵振华. 2000. 有机质在卡林型金矿成矿过程中的作用[J]. *地质科技情报*, 19(2): 45–50.
- 岑安元. 2016. 安龙县豹子洞红土型金矿勘查区找矿潜力[J]. *资源信息与工程*, 31(2): 45–46.
- 戴传固, 郑启铃, 陈建书, 张慧, 代雅然. 2014. 贵州海西—燕山构造旋回期成矿地质背景研究[J]. *贵州地质*, 31(2): 82–88.
- 董磊, 黄建国, 李文杰. 2011. 贵州戈塘金矿床地质特征及成因研究[J]. *西南科技大学学报*, 26(3): 41–44.
- 范军. 2015. 黔西南戈塘大型金矿床地质地球化学及成因研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 1–169.
- 侯林, 彭惠娟, 张锦让, 朱思豹, 吴松洋, 王家俊. 2015. 金矿床二次找矿的控矿因素研究与物探找矿方法试验——以贵州普安泥堡金矿床为例[J]. *矿床地质*, 34(5): 89–912.
- 胡煜昭, 王津津, 韩润生, 衣成利. 2011. 印支晚期冲断褶皱活动在黔西南中部卡林型金矿成矿中的作用——以地震勘探资料为例[J]. *矿床地质*, 30(5): 815–827.
- 胡煜昭, 张桂权, 王津津, 韩润生, 周卓铸. 2012. 黔西南中部卡林型金矿床冲断—褶皱构造的地震勘探证据及意义[J]. *地学前缘*, 19(4): 63–71.
- 李应棚, 李光明, 董磊, 代作文, 张林奎, 黄勇, 卿成实. 2018. 西藏措美县马扎拉岩金矿 Si/Ca 界面类型及控矿作用初探[J]. *河北地质大学学报*, 41(1): 34–44.
- 刘东升, 耿文辉. 1987. 我国卡林型金矿的地质特征、成因及找矿方向[J]. *地质与勘探*, 23(12): 1–12.
- 刘建明, 刘家军. 1997. 滇黔桂金三角区微细浸染型金矿床的盆地流体成因模式[J]. *矿物学报*, 17(4): 448–456.
- 刘建中, 夏勇, 陶琰, 杨成富, 王泽鹏, 谭亲平, 付绍洪, 陈睿, 吴文明. 2014. 贵州西南部 SBT 与金锦矿成矿找矿[J]. *贵州地质*, 31(4): 267–271.
- 刘显凡, 苏文超, 朱赖民. 1999. 滇黔桂微细粒浸染型金矿深源流体成矿机理探讨[J]. *地质与勘探*, 35(1): 14–19.
- 刘显凡, 吴德超, 刘远辉, 罗孝恒, 陶平, 阳正熙, 王雪华. 2003. 黔西

- 南低温成矿域中不同层位不同类型金矿的内在统一成矿机制探讨[J]. 沉积与特提斯地质, 23(3): 93-101.
- 陆建宝, 张钟华, 刘浩. 2015. 黔西南海子地区土壤地球化学特征及金矿找矿方向探讨[J]. 资源信息与工程, 30(5): 1-2.
- 毛彬吉, 冉瑞德, 况顺达, 何兴华, 杨冲. 2017. 黔西南戈塘金矿田成矿后变化及找矿潜力评价[J]. 矿产与地质, 31(6): 1099-1105.
- 秦守荣, 张明发, 龚梅, 况忠. 2009. 贵州的印支运动[J]. 沉积与特提斯地质, 29(2): 100-103.
- 冉瑞德. 2005. 黔西南岩溶构造容矿金矿床特征及成矿机理—以安龙戈塘金矿床为例[J]. 贵州地质, 22(1): 14-21.
- 索书田, 候光久. 1992. 不渗透障与卡林型金矿[J]. 地质科技情报, 4: 15.
- 陶平, 陈启飞, 高军波, 范玉梅, 廖铸敏. 2015. 贵州西部晚古生代裂隙作用及其成矿系列[J]. 矿床地质, 34(6): 1155-1171.
- 陶平, 陈启飞, 祁连素. 2019. 黔西南金矿区域成矿规律及成矿模式[J]. 贵州地质, 36(2): 110-119.
- 陶平, 杜芳应, 杜昌乾, 马荣. 2005. 黔西南凝灰岩中金矿控矿因素概述[J]. 地质与勘探, 41(2): 12-16.
- 童远刚, 刘浩, 陆建宝. 2016. 贵州安龙豹子洞红土型金矿成矿规律及找矿前景分析[J]. 西部探矿工程, 28(9): 165-167, 171.
- 王成辉, 王登红, 黄凡, 徐珏, 陈郑辉, 应立娟, 刘善宝. 2012. 中国金矿集区及其资源潜力探讨[J]. 中国地质, 39(5): 1125-1142.
- 王亮, 龙超林, 刘义. 2015. 黔西南隐伏岩体圈定与金矿物源探讨[J]. 现代地质, 29(3): 702-712.
- 王砚耕. 1994. 试论黔西南卡林型金矿区域成矿模式[J]. 贵州地质, 11(1): 1-7.
- 王研耕, 索书田, 张明发. 1994. 黔西南构造与卡林型金矿[M]. 北京: 北京地质出版社, 1-115.
- 王泽鹏, 夏勇, 宋谢炎, 游彬, 郑新华, 汪小勇. 2010. 黔西南卡林型金矿成矿物质深部来源:来自同位素和稀土元素证据[J]. 矿床地质, 29(增刊): 519-520.
- 吴松洋, 丁俊, 陈明, 侯林, 张锦让. 2014. 贵州戈塘金矿滑脱构造及其与成矿的关系[J]. 金属矿山, 457(7): 106-109.
- 吴松洋, 侯林, 丁俊, 吴伟, 秦凯, 张锦让, 朱斯豹. 2016. 黔西南卡林型金矿田控矿构造类型及成矿流体特征[J]. 岩石学报, 32(8): 2407-2424.
- 夏勇, 张瑜, 苏文超, 陶琰, 张兴春, 刘建中, 邓一明. 2009. 黔西南水银洞层控超大型卡林型金矿床成矿模式及成矿预测研究[J]. 地质学报, 83(10): 1473-1482.
- 叶天竺, 薛建玲. 2007. 金属矿床深部找矿中的地质研究[J]. 中国地质, 34(5): 855-869.
- 曾昭光, 杨恩林, 季国松, 向通. 2018. 贵州海马谷地区金矿矿床特征及成矿模式[J]. 贵州地质, 31(4): 261-266.
- 周军. 2016. 大地电磁测深静态位移数据的反演方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1-111.
- 朱赖民, 金景福, 何明友, 刘显凡, 胡瑞忠. 1997. 论深源流体参与黔西南金矿床成矿的可能性[J]. 地质论评, 43(6): 586-592.