

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.283>



辽东白云金矿区深部地质结构的瞬变电磁法探测

武军杰^{1,2},智庆全^{1,2*},邓晓红^{1,2},王兴春^{1,2},杨毅^{1,2},张杰^{1,2},代鹏^{1,2}

1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北廊坊 065000

2. 自然资源部电磁探测重点实验室,河北廊坊 065000

摘要:白云金矿床位于华北克拉通东北部辽东青城子矿集区,具有深部找矿潜力。为寻找白云金矿区深部及外围矿体,应用大功率瞬变电磁系统开展了白云矿区含矿地层和控矿构造的勘查。野外数据采集采用中心回线和大回线2种装置。大发射磁矩($7.2 \times 10^6 A \cdot m^2$)和低发射基频(5 Hz)保证了高数据质量和长的有效观测时间,从而加大探测深度。研究区地层主要为大石桥组三段和盖县组。大石桥组三段总体电阻率较低,主要由透辉透闪片岩和含石墨大理岩引起。盖县组主要成分为片岩和变粒岩,属中高电阻率。研究结果表明瞬变电磁法可以有效探测大石桥组三段和盖县组的分布以及其中发育的褶皱和断裂。3条瞬变电磁测线反演结果表明,白云金矿西部受到较大挤压,形成明显的推覆构造,而白云矿床东部褶皱平缓,挤压相对较弱。

关键词:瞬变电磁法;地质构造;白云金矿;深部探测;地球物理。

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2020)11-4027-11

收稿日期: 2020-07-26

Exploration of Deep Geological Structure of Baiyun Gold Deposit in Eastern Liaoning Province with TEM

Wu Junjie^{1,2}, Zhi Qingquan^{1,2*}, Deng Xiaohong^{1,2}, Wang Xingchun^{1,2}, Yang Yi^{1,2}, Zhang Jie^{1,2}, Dai Peng^{1,2}

1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China

2. Key Laboratory of Geophysical Electromagnetic Probing Technologies, Ministry of Natural Resources, Langfang 065000, China

Abstract: The Baiyun gold deposit in the Liaodong Province, NE, North China craton (NCC), is a large-scale gold deposit with great potential for deep exploration. In order to find deep and peripheral ore in the Baiyun gold deposit, transient electromagnetic (TEM) method was applied to the exploration of strata and structures. Both fixed-loop and central-loop configurations were used in field data acquisition with a high-power transmitting system to ensure high data quality and long observation time. The local strata are mainly the third member of Dashiqiao Formation and Gaixian Formation. The third member of Dashiqiao Formation is of low resistivity in general, which is mainly caused by diopside diorite schist and graphite bearing marble. The main components of Gaixian Formation are schist and granulite, which are of middle to high resistivity. The results show that TEM method can detect the distribution of Gaixian Formation, Dashiqiao Formation, and the folds and faults within these formations. The inversion results of three TEM lines show that the western part of the Baiyun deposit has been greatly compressed, forming obvious nappe structure, while the eastern part of the Baiyun deposit is gentler in fold and weaker in compression. Exploration results show that TEM methods are useful geophysical tools in the study of ore bearing strata and ore control structures in Baiyun gold deposit area.

Key words: TEM; geological structure; Baiyun gold deposit; deep exploration; geophysics.

基金项目:国家重点研发项目(No.2018YFC060803);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Nos.AS2020Y01,AS2020P01)。

作者简介:武军杰(1979—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事电磁方法技术研究。ORCID: 0000-0002-8669-7069. E-mail: wjj498211@126.com

*通讯作者:智庆全,ORCID:0000-0002-9941-7177. E-mail: zhiqingquan@gmail.com

引用格式:武军杰,智庆全,邓晓红,等,2020.辽东白云金矿区深部地质结构的瞬变电磁法探测.地球科学,45(11):4027—4037.

0 引言

辽宁金矿区位于华北克拉通北缘东段(图 1),成矿条件良好(Wu *et al.*, 2005; 侯增谦等, 2015; 朱日祥等, 2015). 该地区发现了许多金矿床,如白云、小佟家堡子、猫岭和五龙等(Liu *et al.*, 2019; Zeng *et al.*, 2019; 张朋等, 2019). 白云金矿床位于青城子矿田北部,是最重要的大型金矿床之一. 虽然众多学者对白云矿床的成矿流体、成矿时间和地质特征进行了深入研究,但在成矿规律和成因方面仍存在争议(刘国平和艾永富, 2000; Duan *et al.*, 2017; 郝立波等, 2017; 王玉往等, 2017; Li *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2019; Zeng *et al.*, 2019; 刘杰勋等, 2020).

该区也开展过一些地球物理探测方面的研究,其中 MT 和 AMT 调查主要集中在矿田的大构造格架上(Zhao *et al.*, 2019), 少量 CSAMT 和 IP 项目用于浅层目标探测(孙国强等, 2009; 张志辉和刘福兴, 2015), 区域重磁数据主要用于区域范围内圈定和分析由花岗岩和断层引起的异常(刘志远和徐学纯, 2007). 以上研究对于矿区尺度研究深部找矿还不够,有必要进行更高分辨率的测量,以探测目标矿体.

瞬变电磁法(TEM)是一种重要的地球物理找矿方法,已成功应用于矿区深部矿体的探测(殷长春等, 2016a; 底青云等, 2019; Xue *et al.*, 2020a, 2020b). 由于金矿体及伴生石英脉或黄铁矿的规模与围岩相比很小,很难直接探测到矿体(贺灏等, 2005),因此探测中以含矿地层和控矿构造作为瞬变电磁法勘探的主要目标(Xue *et al.*, 2014). 白云金矿区地质目标包括盖县组片岩、大石桥组大理岩、断裂、破碎带等. 这些地层和构造与该区域的成矿作用密切相关(刘国平和艾永富, 1999; Wei *et al.*, 2003; Duan *et al.*, 2014; 耿国建等, 2016; 张朋等, 2016; 李德东等, 2018; Zeng *et al.*, 2019). 已有物性资料显示,主要目标地质体之间存在着明显的电阻率差异,为瞬变电磁探测提供了良好的物性前提. 研究结果表明,瞬变电磁法能够区分盖县组和大石桥组,并能清楚地揭示某些断层.

本文初步总结了白云金矿床辽河群(盖县组、大石桥组三段)及部分断裂的地球物理特征,重点研究了含矿地层的控矿构造和深部形态. 研究结果给出了白云区深部金矿床的电性特征. 同时,本项研究也能为该地区地层和构造的演化研究提供依据.

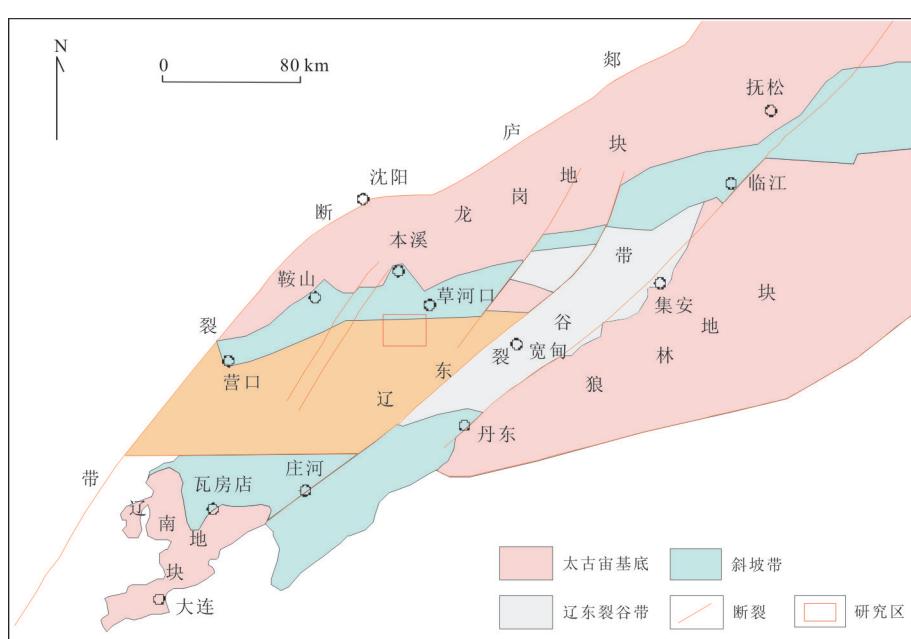


图 1 辽东地区构造图

Fig.1 Regional tectonic diagram in East Liaoning Province

据李德东(2019)

1 白云矿区地质概况

区内出露元古界辽河群上部,发育褶皱构造、推覆构造及北西、东西、南北向断裂构造。区内岩浆热液活动频繁,各种基性、中酸性岩脉广泛发育。金矿主要受白云推覆构造带控制,产于硅钾蚀变断裂带内。

白云金矿床地层由古元古代大石桥组三段、盖县组及第四系组成(图2)。大石桥组三段又可划分为上、中、下三部分。下部由中粒大理岩和白云岩大理岩组成,厚至极厚层,局部为角闪片岩。中部由一薄层含石墨中粒大理岩和硅质条带状大理岩组成。上部由厚层条纹透闪石片岩和硅质条带大理岩互层组成。盖县组是白云金矿区的主要含矿层,分为上、下两部分。下部为黑云母变粒岩、浅粒岩、透闪石变粒岩夹薄层细粒大理岩;上部主要为矽线石云母片岩,夹黑云母变粒岩、黑

云母片岩、浅粒岩、透闪石变粒岩。第四系地层主要分布于河谷及其两侧,由砾石、砂、粘土等现代冲、洪积层组成,某些地段存在砂金。

白云金矿区构造经历了一个复杂的地质过程,形成了一系列的褶皱和断层。矿区主体构造以近东西向为主,发育一系列的褶皱和韧—脆性推覆体。从北向南依次为白云山背斜、阳沟向斜、阳沟—石湖沟背斜、姚家沟—天桥沟—李家堡子倒转向斜、苏家堡子倒转背斜和顾家堡子倒转向斜(郝立波等,2017;杨凤超等,2017),背斜轴和向斜轴基本是东西向的。区内还有发育有北西、北东、南北向断裂。构造总体呈东西向展布,向南倾斜约30°。北西向断裂走向为290°~330°,倾向南西,倾角约为30°。近南北走向断层,倾角近垂直。这些断层大多被宽成分谱系脉岩充填,主要由石英斑岩、花岗斑岩、闪长玢岩、二长斑岩和煌斑岩组成。这些岩脉大多已矿化和蚀变(李德东等,2019)。

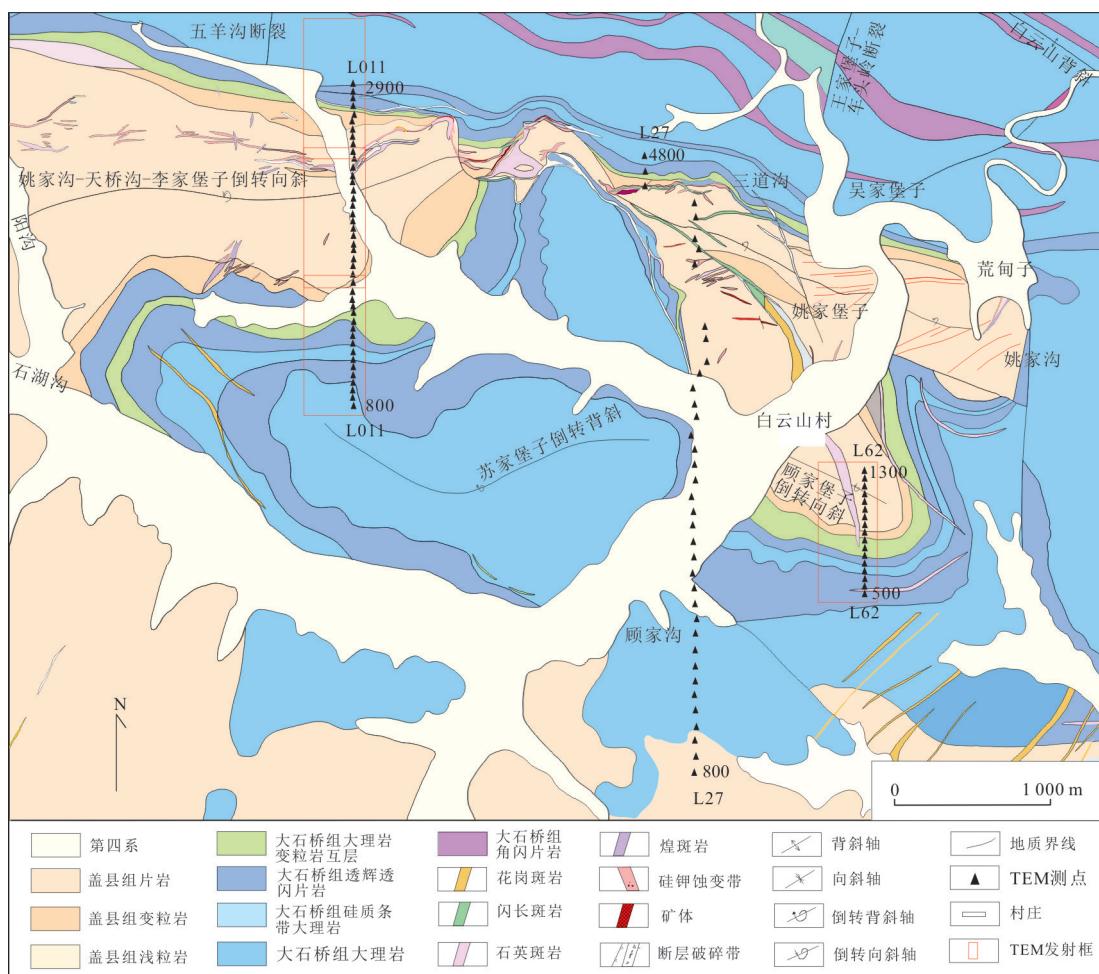


图2 白云金矿TEM测线布置
Fig.2 Geological map of the Baiyun gold deposit and TEM survey lines

矿区发育有各类基性至酸性脉岩, 主要金矿体为含金硅钾蚀变岩型。硅钾蚀变带基本赋存于近东西向推覆构造带中。金矿体呈脉状、透镜状, 具树枝状复合、尖灭再现的特征。

根据辽宁省有色地质局一〇八队接替资源勘查报告物性资料, 盖县组具有中高电阻率, 电阻率范围为 $2\,800\sim6\,000\,\Omega\cdot\text{m}$, 由于岩性不同, 大石桥组三段 3 个部分有明显差异。大理岩电阻率平均为 $3\,500\,\Omega\cdot\text{m}$, 透辉石闪长岩片岩和含石墨大理岩的平均电阻率分别为 $227\,\Omega\cdot\text{m}$ 和 $702\,\Omega\cdot\text{m}$ 。其余岩性单元中石英斑岩平均电阻率 $4\,300\,\Omega\cdot\text{m}$, 硅钾蚀变岩平均电阻率 $2\,300\,\Omega\cdot\text{m}$, 含金蚀变岩平均电阻率 $1\,800\,\Omega\cdot\text{m}$, 硅化带一般表现为中高阻, 一般电阻率值大于 $1\,000\,\Omega\cdot\text{m}$ 。区内石墨发育, 对岩石的电阻率有较大影响。

2 野外数据采集

为了探测与矿化有关的地质构造, TEM 测线沿垂直于走向的南北方向布置, 与地质勘探线一致(图 2)。本文中选择其中 3 条(L011、L27、L62)进行讨论。野外数据采集使用加拿大 Crone 公司的 4.8 kW 大功率 Digital PEM 系统。在野外实际数据采集过程中考虑到探测深度和数据采集效率, 使用了中心回线装置和大定源回线装置。L27 线穿过白云矿区, 使用了中心回线装置, 与地下结构耦合最好, 但是由于地形复杂采集效率低下; 而 L011 和 L62 线分别位于白云金矿的西部和东部, 探测目标是矿山的外围和深部, 因此使用了发射磁矩更大的大定源回线装置, 采集效率较高。野外采集参数见表 1, 时间道见表 2。在大回线装置条件

表 1 野外数据采集参数
Table 1 Parameters of field data collection

装置	中心回线	定源回线
测线	L27	L011/L62
点距	100 m	50 m
发射机	2.4 kW	4.8 kW
回线框尺寸	200 m × 200 m	400 m × 900 m
发射电流	15 A	20 A
时基	20 ms	50 ms
下降沿	500 μs	1 000 μs
接收探头类型	克龙感应探头	克龙感应探头
接收面积	$3\,850\,\text{m}^2$	$3\,850\,\text{m}^2$
叠加次数	256~512	256~512
接收信号	dBz/dt	dBz/dt
同步方式	无线电	石英钟

表 2 接收仪器的时间道

Table 2 Channel numbers and times

时间道	$t(\text{ms})$	时间道	$t(\text{ms})$	时间道	$t(\text{ms})$
1	0.054	13	0.530	25	5.148
2	0.064	14	0.640	26	6.220
3	0.078	15	0.774	27	7.514
4	0.094	16	0.936	28	9.078
5	0.114	17	1.132	29	10.968
6	0.138	18	1.368	30	13.200
7	0.168	19	1.654	31	15.960
8	0.204	20	2.000	32	19.335
9	0.246	21	2.416	33	23.355
10	0.298	22	2.920	34	28.215
11	0.362	23	3.528	35	34.080
12	0.438	24	4.262	36	41.165

下, 发射时基为 50 ms(基频为 5 Hz), 发射磁矩达到 $72 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^2$, 以期获得更多的深部信息。此外, 在数据采集中采取了多叠加次数和多重复观测次数的抗干扰措施, 获得了较好的原始数据质量, 提高了晚期道的可靠性。

3 结果及讨论

3.1 L011 线

图 3 为 L011 线的实测 TEM 剖面曲线。为了显示不同时间通道上异常体的特征, 将 36 个通道分为 3 组, 大致对应瞬变电磁响应的早期、中期和晚期。由图可见, 在第 1 组和第 2 组曲线中, 测线两端明显出现两个高值异常, 第 3 组曲线 2 600~2 900 段出现一个低值异常。一般高异常值为大石桥组大理岩的反映, 低值为盖县组片岩、变粒岩的反映。由地质图中对比并结合电性条件可知, 800~1 200 段和 2 600~2 900 段两个高值异常均为出露的透辉透闪片岩引起的。

图 4 显示了 L011 线部分典型的 TEM 衰减曲线。800 号点和 1000 号点的衰减曲线比早期道的其他测点响应值更大, 衰减较慢, 主要由该段低阻透辉透闪片岩引起。1300 号点和 2500 号点分别在中、晚期道出现符号反转现象。综合分析后把该符号反转现象解释为激发极化现象(Panantitov *et al.*, 2002; Spies, 2004; 殷长春等, 2016a, 2016b)。激发极化现象可能是大石桥组大理岩断裂带中黄铁矿化作用的结果。图 4 中 1600、2000 和 2400 号点代表了背景响应, 它们的衰减曲线非常相似, 仅在早期有细微的差别。

数据处理采用拟二维反演解释方法(张杰等,

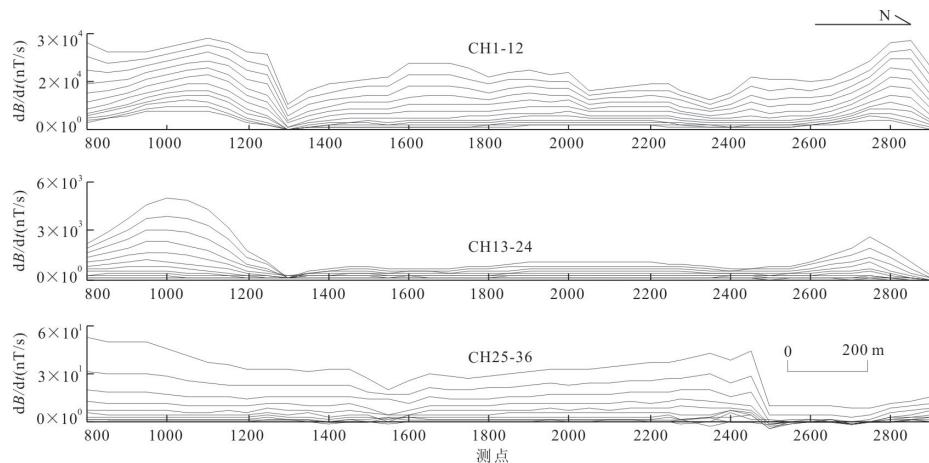


图3 L011线 TEM剖面曲线

Fig.3 TEM profile curves of L011

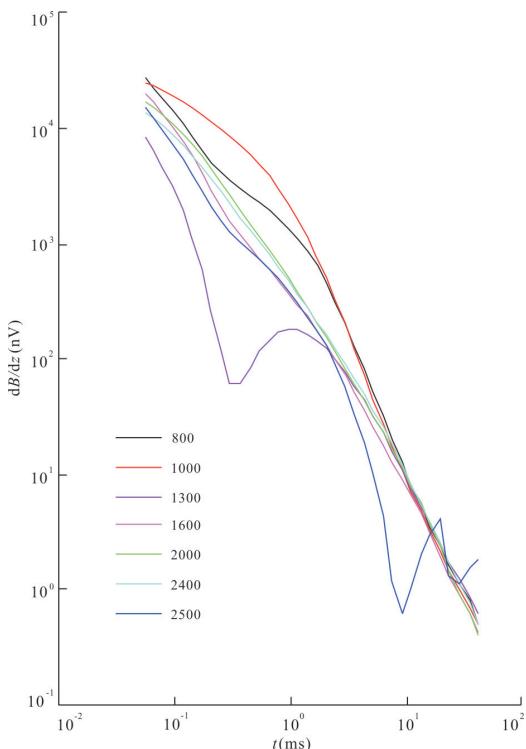


图4 L011线 TEM测点典型衰减曲线

Fig.4 Typical TEM decay curves of L011

2010;智庆全等,2015).该方法首先计算瞬变电磁响应的全域视电阻率,然后根据烟圈理论的涡流扩散速度求取视深度.将同一深度的地层划分为导电厚板,用正演数据拟合得到地电模型.拟二维反演方法考虑了相邻测点之间的横向变化,其计算结果相较于一维反演更加合理.

图5显示了L011线反演解释结果.在视电阻率断面上标出了层边界(黑线)和断层(红线).根据视电阻率划分了盖县组和大石桥组,

识别出3条断裂构造.当地矿业公司已在L011线施工了多个钻孔,并在zk011-5钻孔完成了视极化率测量(图5).钻孔和视极化率测井曲线提供了深度的岩性和电性约束.

图5中可以看出,在800~1200段下方出现低阻,深部向南陡倾,为出露地表的大石桥组三段上部的可能是透辉石闪长片岩在深部的反映.而在1200~2800段,上部高阻整体为盖县组反映,主要由矽线石—黑云母片岩、黑云母片岩、黑云母变粒岩引起.下覆低阻为大石桥组大理岩总体反映,其低电阻率特征主要由含石墨大理岩和断裂破碎带引起.视电阻率高低阻梯度带主要分布于深度300~450 m处(图5蓝色虚线范围),为断裂带、硅钾蚀变带的反映.2600~2800点下方深度约200~400 m深度出现的低阻仍为透辉透闪片岩引起,在2800点地表可见该地层露头.总体上L011线TEM视电阻率断面图反映出一个典型的推覆构造.推覆体沿主滑断裂F011-1向北移动,并在推覆过程中形成F011-2和F011-3断裂.而zk011-5测井曲线在1200 m深处出现极化率异常所对应的断裂带和煌斑岩脉似乎与推覆构造产生的F011-1断层有关.

反演结果显示,受南北向构造运动的影响,该地区形成了推覆构造(耿国建等,2016;李德东等,2018).由于上覆地层以片岩为主,岩性较软,下伏地层以脆性大理岩为主,因此在外压作用下,上覆片岩变形比大理岩更为明显.

3.2 L27线

图6为L27线实测瞬变电磁响应剖面曲线.1200点和3300点之间存在多个高值异常,其中2000~2600段异常幅值最大,早期至晚期均有反应.

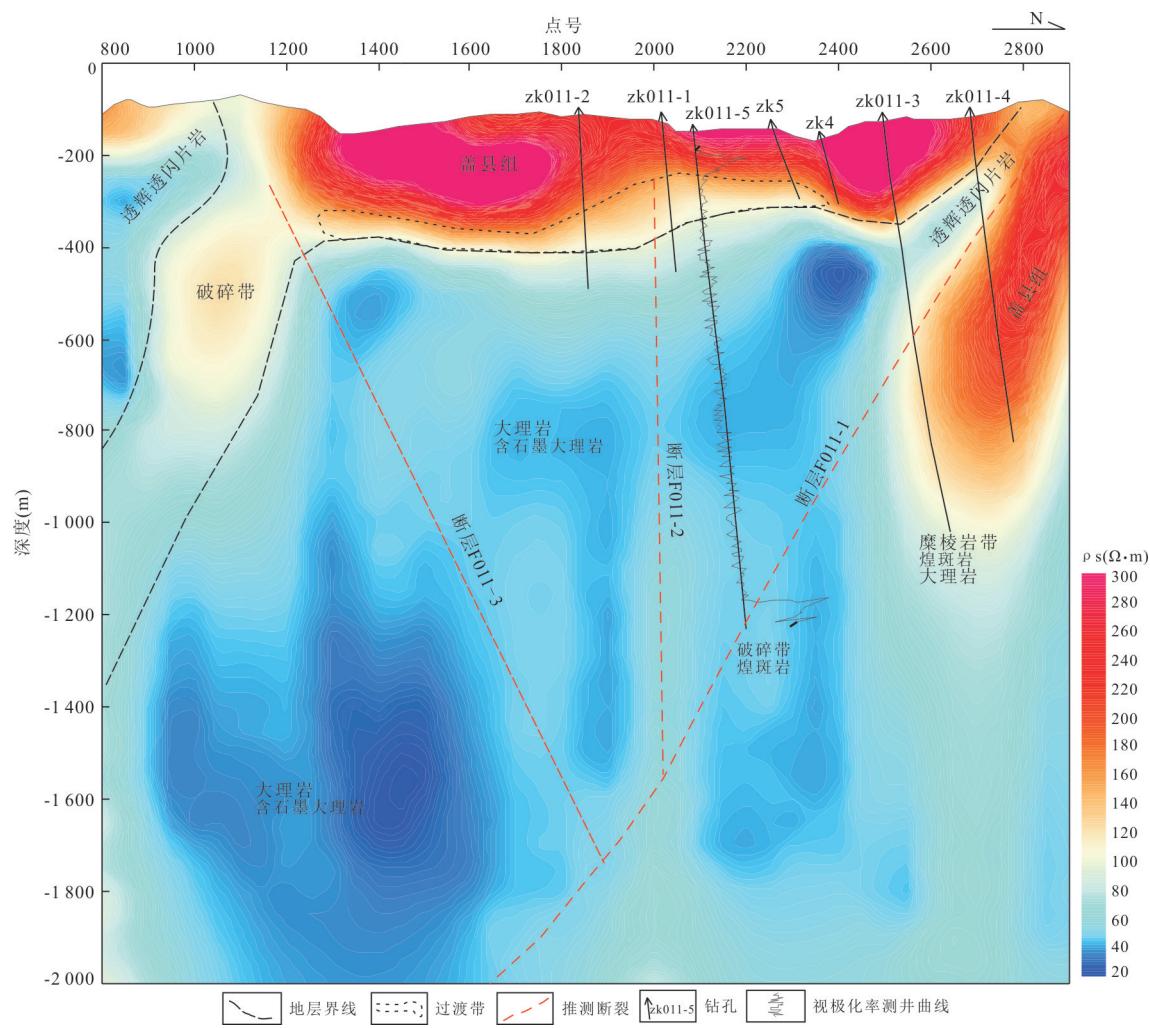


图 5 L011 线 TEM 反演解释结果

Fig.5 TEM inversion and interpretation results of L011

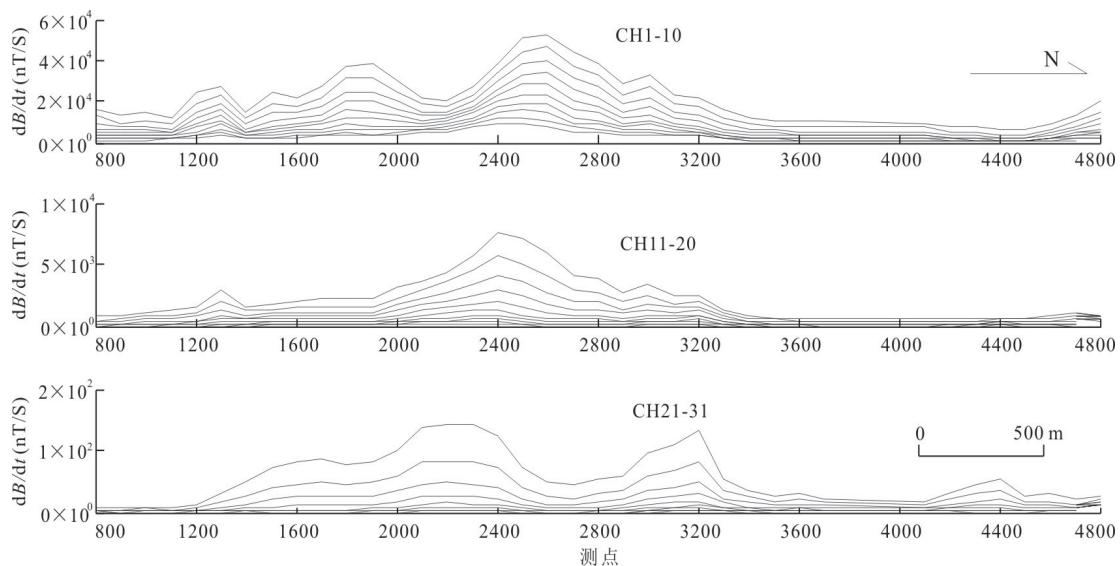


图 6 L27 线 TEM 剖面曲线

Fig. 6 TEM plot curves of L27

在3000~3200段,晚期道曲线异常比早、中期道更为突出。其他异常如1200~1300段和1600~2000段的峰值,仅出现在早期,主要反映浅部低阻体。大范围的TEM异常一般是由大石桥组透辉透闪片岩和含石墨大理岩引起的。

图7为L27线典型测点的瞬变电磁衰减曲线。1500、2300、3200点位于TEM异常区,其曲线的显著特点是早期和中期衰减缓慢。1000、3600、4100、4600点地表均为盖县组片岩,其曲线在早期衰减快,在中、晚期衰减缓慢。

图8为L27线反演解释结果。图中所示的4个钻孔用于约束地层界面。盖县组表现为中高视电阻率。反演结果中识别出深和浅两个盖县组,上部盖县组分布于3200点和4600点之间。深部盖县组黑云母变粒岩为钻孔zk27-3所揭露,并在800~1000点出露地表。深浅两个盖县组推测为原背斜的两翼,背斜受挤压向南发生倒转,原背斜南翼深埋地下,北翼倾覆于地表,由于地表剥蚀的原因目前仅在3600~4600段向斜核部还有存留,原北翼其余部分已遭剥蚀。大石桥组三段整体电阻率较低,主要由透辉透闪片岩、含石墨大理岩和内部断裂带引起。大石桥组三段在地表出露于1100~1800点之间,1900~3300点之间地表被第四系覆盖,为本次TEM探测浅部盲区,未能在图中反映,但是从图8中可以看出,该段第四系下伏地层为大石桥组大理岩。另外,1600~3200段深部出现高阻异常,推测为岩体。

3.3 L62号线

图9为L62线实测TEM剖面曲线。从第2组曲

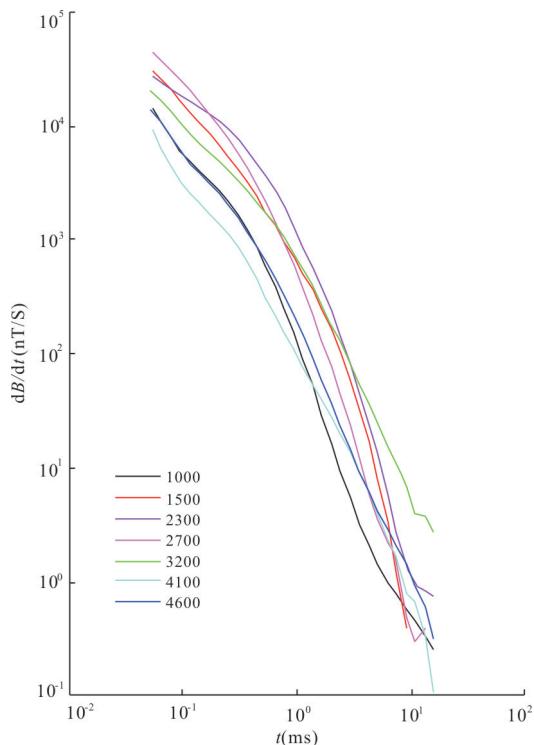


图7 L27线TEM测点典型衰减曲线

Fig.7 Typical TEM decay curves of L27

线(CH13-24)可以看出,测线北段的响应整体高于南段,剖面曲线的其他部分没有明显异常。图10显示了L62线不同测点的衰减曲线。可以看出,所列测点衰减曲线大体相似,仅在早期道(CH1-15)观察到细微差异,主要为浅部岩性不均匀引起的。

图11为L62的反演解释结果。图中主要显示了盖县组与大石桥组的地层界线以及2条断层。该测线上前期施工的5个钻孔(位置见图11)为综合解释提供了岩性信息和深度约束。500~900点地表岩性

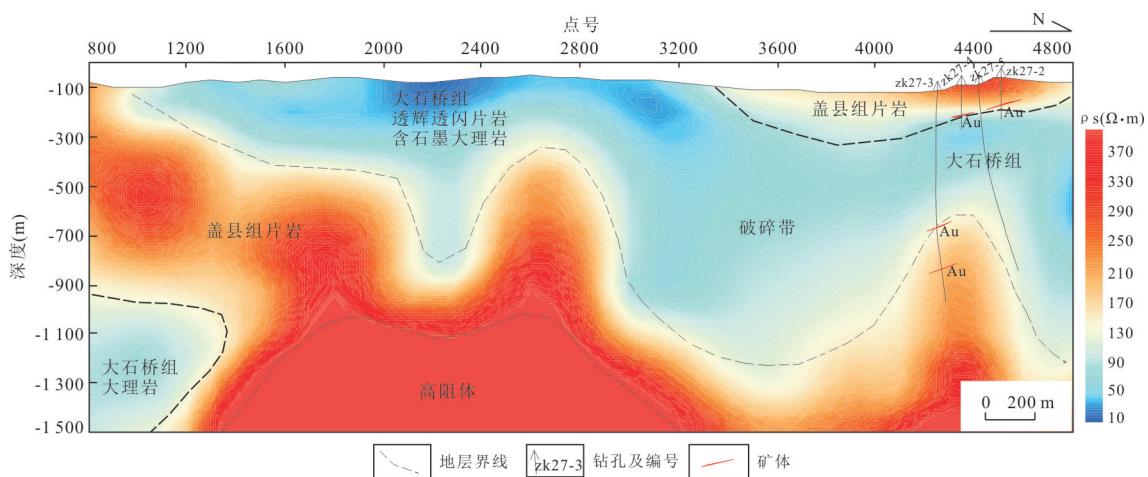


图8 TEM L27线反演解释结果

Fig.8 TEM inversion and interpretation results of L27

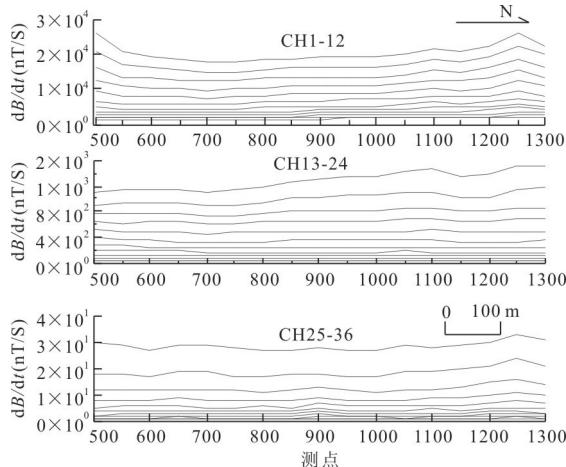


图 9 L62 线 TEM 剖面曲线

Fig.9 TEM plot curves of L62

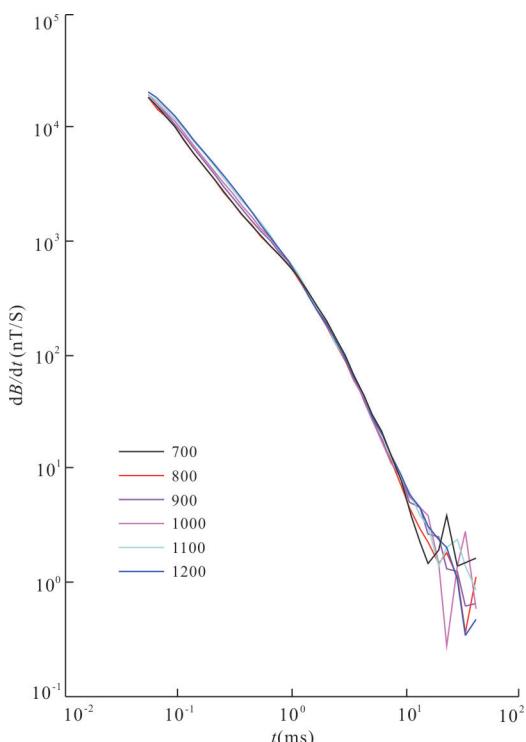


图 10 L62 线 TEM 测点典型衰减曲线

Fig.10 Typical TEM decay curves of L62

主要由硅质条带状大理岩、条带状透辉石闪长岩片岩、大理岩与变粒岩互层组成(见图 2),这些岩性具有高阻特征. TEM 反演结果中 500~1300 剖面以下 100~400 m 深度的中高电阻率主要由盖县组片岩引起. 盖县组下方低电阻率解释为大石桥组及断裂带的综合反映. 盖县组在 600、1100 点出现明显褶皱,与其相关的两条断层在视电阻率图上较为明显.

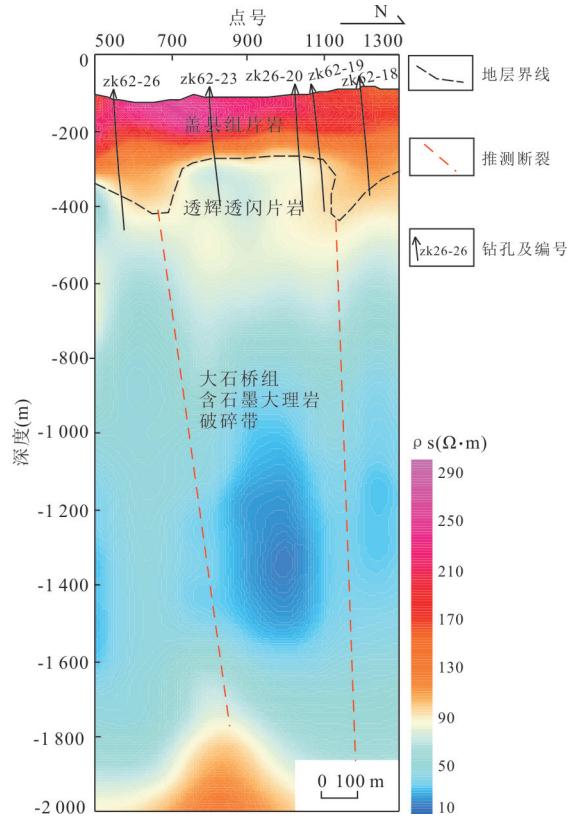


图 11 TEM L62 线反演解释结果

Fig.11 TEM inversion and interpretation results of L62

4 结论

(1) 盖县组与大石桥组三段具有明显的电性差异,因此在 TEM 反演结果上可以清楚地识别出这两套地层,以及相关的褶皱和断层. 因此,TEM 方法可为白云金矿含矿地层及控矿构造的研究提供地球物理依据.

(2) L011、L27、L62 线间距分别约 2 km 和 1 km. 三条测线的地电结构相似,均反映了挤压环境. L011 的推覆构造、L27 的反转背斜和 L62 线的层间褶皱都表明了白云金矿区复杂的构造环境.

(3) 目前白云矿区钻孔程度较高,但在周边和深部勘查的控制程度还不够. 瞬变电磁法能有效地揭示研究区深部与外围的联系与变化,能够为分析已知矿体的延伸和新矿体的发现提供依据.

致谢:感谢审稿人的宝贵意见!

References

- Di, Q.Y., Zhu, R.X., Xue, G.Q., et al., 2019. New Development of the Electromagnetic (EM) Methods for Deep Exploration. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(6): 2128–2138 (in Chinese with English abstract).

- Duan, X. X., Zeng, Q. D., Wang, Y. B., et al., 2017. Genesis of the Pb-Zn Deposits of the Qingchengzi Ore Field, Eastern Liaoning, China: Constraints from Carbonate LA-ICP-MS Trace Element Analysis and C-O-S-Pb Isotopes. *Ore Geology Reviews*, 89: 752–771. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.012>
- Duan, X. X., Zeng, Q. D., Yang, J. H., et al., 2014. Geochronology, Geochemistry and Hf Isotope of Late Triassic Magmatic Rocks of Qingchengzi District in Liaodong Peninsula, Northeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 91: 107–124. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.05.009>
- Geng, G.J., Ma, B.J., Cong, Y., et al., 2016. Discussion on the Thrust Nappe Structure Deformation of Qingchengzi and Gold Ore-Controlling, Liaoning Province. *Gold Science and Technology*, 24(4): 26–31 (in Chinese with English abstract).
- Hao, L. B., Zhao, X., Zhao, Y. Y., 2017. Stable Isotope Characteristics and Ore Genesis of the Baiyun Gold Deposit, Liaoning Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(2): 442–451 (in Chinese with English abstract).
- He, H., Meng, Q.M., Man, Y.L., et al., 2005. The Application of Airborne Geophysical (Electric, Magnetic) Integrated Survey to Gold Exploration in Jiaodong Area. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 29(5): 397–400 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Zheng, Y. C., Geng, Y. S., 2015. Metallic Refertilization of Lithosphere along Cratonic Edges and Its Control on Au, Mo and REE Ore Systems. *Mineral Deposits*, 34(4): 641–674 (in Chinese with English abstract).
- Li, D.D., Wang, Y.W., Zhang, Z.C., et al., 2018. Revelation of Ore-Forming Elements Depletion on the Mineralization in the Periphery of Baiyun Gold District, Liaoning. *Gold*, 39(12): 5–11 (in Chinese with English abstract).
- Li, D.D., Wang, Y.W., Zhang, Z.C., et al., 2019. Characteristics of Metallotectonics and Ore-Forming Structural Plane in Baiyun Gold Deposit, Liaoning. *Journal of Geomechanics*, 25(S1):10–20 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Cai, W. Y., Li, B., et al., 2019. Paleoproterozoic SEDEX-Type Stratiform Mineralization Overprinted by Mesozoic Vein-Type Mineralization in the Qingchengzi Pb-Zn Deposit, Northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 184: 104009. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104009>
- Liu, G. P., Ai, Y. F., 1999. A Discussion on Some Major Problems of the Baiyun Gold Deposit, Eastern Liaoning. *Mineral Deposits*, 18(3): 219–225 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G.P., Ai, Y.F., 2000. Studies on the Mineralization Age of Baiyun Gold Deposit in Liaoning. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 627–632 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Liu, F. X., Li, S. H., et al., 2019. Formation of the Baiyun Gold Deposit, Liaodong Gold Province, NE China: Constraints from Zircon U-Pb Age, Fluid Inclusion, and C-H-O-Pb-He Isotopes. *Ore Geology Reviews*, 104: 686–706. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.006>
- Liu, J.X., Li, S.C., Zhu, K., et al., 2020. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Setting of the Guanmenshan Pluton in Benxi, Eastern Liaoning Province. *Earth Science*, 45(3): 869–879 (in Chinese with English abstract).
- Liu, K. H., Liu, F. X., Su, J. F., et al., 2012. Geological Features and Genesis of Huangdianzi Gold Deposit in Fengcheng City, Liaoning Province. *Jilin Geology*, 31(1): 35–40 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. Y., Xu, X. C., 2007. Synthetic Information Models and Analyses of Prospecting Perspective of the Qingchengzi Polymetal Metallogenic Mine in Eastern Liaoning Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(3): 437–443 (in Chinese with English abstract).
- Panaitov, G., Bick, M., Zhang, Y., et al., 2002. Peculiarities of Squid Magnetometer Application in TEM. *Geophysics*, 67(3): 739–745. <https://doi.org/10.1190/1.1484516>
- Spies, B. R., 2004. Discussion on “Peculiarities of SQUID Magnetometer Application in TEM”. *Geophysics*, 69(2): 624–625. <https://doi.org/10.1190/1.1736824>
- Sun, G. Q., Wang, S. J., Sun, H. Y., et al., 2009. Controlled Source Audio Magnetotelluric Survey in the Liaodong Linjiapu Lead-Zinc Mine Prospecting on the Application. *Gansu Metallurgy*, 31(1): 46–47, 106 (in Chinese with English abstract).
- Sun, G. T., Zeng, Q. D., Li, T. Y., et al., 2019. Ore Genesis of the Baiyun Gold Deposit in Liaoning Province, NE China: Constraints from Fluid Inclusions and Zircon U-Pb Ages. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(9): 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4459-0>
- Wang, Y. W., Xie, H. J., Li, D. D., et al., 2017. Prospecting Prediction of Ore Concentration Area Exemplified by Qingchengzi Pb-Zn-Au-Ag Ore Concentration Area,

- Eastern Liaoning Province. *Mineral Deposits*, 36(1): 1–24 (in Chinese with English abstract).
- Wei, J. H., Liu, C. Q., Tang, H. F., 2003. Rb-Sr and U-Pb Isotopic Systematics of Pyrite and Granite in Liaodong Gold Province, North China: Implication for the Age and Genesis of a Gold Deposit. *Geochemical Journal*, 37(5): 567–577. <https://doi.org/10.2343/geochemj.37.567>
- Wu, F., Lin, J., Wilde, S., et al., 2005. Nature and Significance of the Early Cretaceous Giant Igneous Event in Eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1/2): 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.019>
- Xue, G. Q., Gelius, L. J., Sakyi, P. A., et al., 2014. Discovery of a Hidden BIF Deposit in Anhui Province, China by Integrated Geological and Geophysical Investigations. *Ore Geology Reviews*, 63: 470–477. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.007>
- Xue, G. Q., Zhang, L. B., Hou, D. Y., et al., 2020a. Integrated Geological and Geophysical Investigations for the Discovery of Deeply Buried Gold-Polymetallic Deposits in China. *Geological Journal*, 55(3): 1771–1780. <https://doi.org/10.1002/gj.3574>
- Xue, G. Q., Zhang, L. B., Zhou, N. N., et al., 2020b. Developments Measurements of TEM Sounding in China. *Geological Journal*, 55(3): 1636–1643. <https://doi.org/10.1002/gj.3544>
- Yang, F.C., Song, Y.H., Chai, P., et al., 2017. Characteristics of Ore-Forming Fluid and Provenance of Ore-Forming Material of Baiyun Gold Deposit in Liaoning. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 37(1): 30–39 (in Chinese with English abstract).
- Yin, C.C., Miao, J.J., Liu, Y.H., et al., 2016a. The Effect of Induced Polarization on Time-Domain Airborne EM Diffusion. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(12): 4710–4719 (in Chinese with English abstract).
- Yin, C.C., Ren, X.Y., Liu, Y. H., et al., 2016b. Exploration Capability of Airborne TEM Systems for Typical Targets in the Subsurface. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(9): 3370–3379 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Q. D., Chen, R. Y., et al., 2019. The Metallogenetic Characteristics and Exploring Ore Potential of the Gold Deposits in Eastern Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 35(7): 1939–1963. <https://doi.org/10.18654/1000-0569/2019.07.01>
- Zhang, J., Lü, G. Y., Guo, B. L., et al., 2010. The High Temperature Superconductivity TEM Transient Mag-
- netic Field PSEUDO-2D Inversion and Its Application Effect. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 34(2): 205–208, 213 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Li, B., Li, J., et al., 2016. Re-Os Isotopic Dating and Its Geological Implication of Gold Bearing Pyrite from the Baiyun Gold Deposit in Liaodong Rift. *Geotectonica et Metallogenesis*, 40(4): 731–738 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Zhao, Y., Kou, L.L., et al., 2019. Zircon U-Pb Ages, Hf Isotopes and Geological Significance of Mesozoic Granites in Dandong Area, Liaodong Peninsula. *Earth Science*, 44(10): 3297–3313 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. H., Liu, F. X., 2015. Discussion on the Significance of the Newly Discovered Mineralization Alteration Zone in the Baiyun Gold Deposit, Fengcheng City, Liaoning Province. *Acta Geologica Sinica*, 89(Suppl. 1): 251–253 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W.J., Sha, D.M., Huan, H.F., et al., 2019. Preliminary Structure Framework and Concealed Intrusive Rocks in the Qingchengzi Ore Field in Northeast China Disclosed by Large-Scale Two-Dimensional Audio-Magnetotelluric Sounding. The Society of Exploration Geophysicist and the Chinese Geophysical Society GEM 2019, Xi'an.
- Zhi, Q.Q., Wu, J.J., Deng, X.H., et al., 2015. The One-Dimension Inversion of Underground Transient Electromagnetic Data. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 37(5): 566–570 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R.X., Fan, H.R., Li, J.W., et al., 2015. Decratonic Gold Deposits. *Scientia Sinica Terra*, 45(8): 1153–1168 (in Chinese).

附中文参考文献

- 底青云,朱日祥,薛国强,等,2019.我国深地资源电磁探测新技术研究进展.地球物理学报,62(6):2128–2138.
- 耿国建,马宝军,丛颖,等,2016.辽宁青城子逆冲推覆构造变形与金矿控矿作用探讨.黄金科学技术,24(4):26–31.
- 郝立波,赵昕,赵玉岩,2017.辽宁白云金矿床稳定同位素地球化学特征及矿床成因.吉林大学学报(地球科学版),47(2):442–451.
- 贺颖,孟庆敏,满延龙,等,2005.航空物探(电、磁)综合测量与胶东金矿普查.物探与化探,29(5):397–400.
- 侯增谦,郑远川,耿元生,2015.克拉通边缘岩石圈金属再富集与金—钼—稀土元素成矿作用.矿床地质,34(4):641–674.
- 李德东,王玉往,张志超,等,2018.辽宁白云金矿区外围成矿

- 元素亏损对成矿作用的启示. 黄金, 39(12):5—11.
- 李德东, 王玉往, 张志超, 等, 2019. 辽宁白云金矿床成矿构造与成矿结构面特征浅析. 地质力学学报, 25(S1):10—20.
- 刘国平, 艾永富, 1999. 辽宁白云金矿床某些基本问题探讨. 矿床地质, 18(3):3—5.
- 刘国平, 艾永富, 2000. 辽宁白云金矿床成矿时代探讨. 岩石学报, 16(4):627—632.
- 刘杰勋, 李世超, 朱凯, 等, 2020. 辽东本溪关门山岩体的年代学、地球化学及构造背景. 地球科学, 45(3):869—879.
- 刘开慧, 刘福兴, 苏建飞, 等, 2012. 辽宁凤城荒甸子金矿床地质特征及成因探讨. 吉林地质, 31(1):35—40.
- 刘志远, 徐学纯, 2007. 辽东青城子金很多金属成矿区综合信息找矿模型及找矿远景分析. 吉林大学学报(地球科学版), 47(3):437—443.
- 孙国强, 王绍金, 孙洪云, 等, 2009. 可控源音频大地电磁测量在辽东林家堡子铅锌矿找矿上的应用. 甘肃冶金, 31(1):46—47, 106.
- 王玉往, 解洪晶, 李德东, 等, 2017. 矿集区找矿预测研究——以辽东青城子铅锌—金—银矿集区为例. 矿床地质, 36(1):1—24.
- 杨凤超, 宋运红, 柴鹏, 等, 2017. 辽宁白云金矿床成矿流体特征、成矿物质来源及成因研究. 矿物岩石, 37(1):30—39.
- 殷长春, 缪佳佳, 刘云鹤, 等, 2016a. 时间域航空电磁法激电效应对电磁扩散的影响. 地球物理学报, 59(12):4710—4719.
- 殷长春, 任秀艳, 刘云鹤, 等, 2016b. 航空瞬变电磁法对地下典型目标体的探测能力研究. 地球物理学报, 58(9):3370—3379.
- 张杰, 吕国印, 郭布领, 等, 2010. 高温超导 TEM 瞬变磁场拟二维反演及应用效果. 物探与化探, 34(2): 205—208, 213.
- 张朋, 李斌, 李杰, 等, 2016. 辽东裂谷白云金矿载金黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义. 大地构造与成矿学, 40(4):731—738.
- 张朋, 赵岩, 寇林林, 等, 2019. 辽东半岛丹东地区中生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义. 地球科学, 44(10):3297—3313.
- 张志辉, 刘福兴, 2015. 辽宁凤城市白云金矿新发现矿化蚀变带意义探讨. 地质学报, 89(S1):251—253.
- 智庆全, 武军杰, 邓晓红, 等, 2015. 地下瞬变电磁法一维反演. 物探化探计算技术, 37(5):566—570.
- 朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 等, 2015. 克拉通破坏型金矿床. 中国科学: 地球科学, 45(8):1153—1168.