

文章编号: 0258-7106 (2012) 02-0207-09

金川铜镍矿床的地球物理深部结构与成因模式*

姜 枚¹, 谭捍东², 钱 辉¹, 张立树¹, 李庆庆¹, 彭 淼², 王 伟¹

(1 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2 中国地质大学, 北京 100083)

摘 要 在甘肃省金川矿区利用磁法、可控源音频大地电磁法及地震 P 波层析方法进行了深部探测, 几种方法综合研究确定了到达 2 500 m 以上高阻高速体的岩浆源特征, 指出了岩浆上涌到达浅部向两侧扩展的近水平的透镜状分支, 作为可能的深部含矿超基性岩体与钻孔已见矿体位置相吻合, 为金川铜镍矿床的成因模式提供了地球物理依据。建议在进一步研究中应重视探测产状平缓、近水平的高速、低阻体。

关键词 地球物理 金川铜镍矿 地震层析 音频大地电磁 成因模型

中图分类号: P631; P618.42; P618.63

文献标志码: A

Geophysical deep structure and genetic model of Jinchuan copper-nickel deposit

JIANG Mei¹, TAN HanDong², QIAN Hui¹, ZHANG LiShu¹, LI QingQing¹,
PENG Miao² and WANG Wei¹

(1 Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

Deep exploration was carried out in Jinchuan mine of Gansu Province by using magnetic method, controlled-source audio-magneto-telluric method, and P wave seismic tomography. The comprehensive researches based on the above methods revealed the high resistivity and high velocity characteristics of the magma source to the depth of over 2 500 m, suggesting that the lava came to the shallow part and spread on both sides to form shallow nearly-horizontal lenticular branches. The fact that the possible consistency between the deep ore-bearing ultra-basic rock and the mineral deposit revealed by the drilling hole provides geophysical evidence for the metallogenic model of the Jinchuan copper-nickel mine. Future exploration should focus on investigating relatively gentle, nearly-horizontal, high-velocity, and low resistivity bodies.

Key words: geophysics Jinchuan copper-nickel mine, seismic tomography, CSAMT, metallogenic model

近年来,深部探测技术的研究与开发有较大进展,获得了大量的地壳深部物探、化探资料,但对其的地质解释似乎有些滞后,这一直是需要探索的新课题。依据若干已知矿区的深部找矿工作研究可以得出,要从矿区物探、化探资料中获取可信的深部地质找矿信息,必须具备 2 个前提:一是采用多种物化

探方法的综合手段,并且这些技术方法要适合于该矿种及其矿床类型的基本地质特征;二是要广泛收集该类型矿床已发表的各种地质模式,充分发挥地球物理资料在深部探测中的独特作用(钱辉等, 2011)。只有具备这 2 个前提,物探、化探资料的地质解释才能得到较好的效果。

* 该项目由深部探测技术与实验研究专项,大陆科学钻探选址与钻探实验项目(SinoProbe-05-07)和金川铜镍矿集团公司共同资助

第一作者简介 姜 枚,男,1937 生,研究员,长期从事深部和矿区地球物理探测研究。Email: mjmeij@gmail.com

收稿日期 2011-07-04;改回日期 2011-09-16。张绮玲编辑。

金川铜镍矿床处于华北地台南缘,龙首山隆起带南侧,中元古宙含硫化物超镁铁质深成岩中。岩体侵入于古元古界,呈扁豆状、透镜状展布,长 6 500 m,走向 NWW,倾向 SW。主要岩性为二辉橄榄岩、二辉岩、纯橄岩等,蛇纹石化较强。超镁铁质岩体中赋存着规模较大的 Cu-Ni 矿体,3 个主要 Cu-Ni 矿体共占侵入体总体积的 43%。矿石以网脉状硫化物矿为主,其次为浸染状和块状硫化物矿石。矿石矿物以磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿为主,矿石品位较富,并伴生有金、铂等。金川矿区,自上世纪五六十年代开始进行了地球物理探测,随后又不断补充地面和航空磁测、地面重力测量等工作,2010 年以来完成了可控源音频大地电磁法、相位激发极化法、三维地震层析方法以及部分二维反射地震探测等多种方法,这些方法从目前看是成熟与有效的。同时,金川矿区通过半个世纪的地质勘查与研究,对于金川矿床的形成机制与成矿模式的认识基本趋于一致。这些有利条件为金川矿区物探资料的地质推断及深部找矿提供了方便与依据。因此,本文将作者近年在该区实际探测资料与前人地质研究成果相结合,分析了金川铜镍矿区深部地球物理特征及其与矿床成因的相关问题,给出了新认识,并对金川矿区深部找矿进行探索,这对该类型矿区的进一步找矿也是有意义的。

1 几种主要方法的结果分析

1.1 航空和地面磁测

航空磁测给出了金川矿区区域磁场 ΔT 磁异常的背景资料,异常呈 NW60~70° 方向延伸,并与上世纪六七十年代完成的 ΔZ 地面磁测结果相吻合,清楚地反映了金川矿区含矿超基性岩体分布方向和分布范围。但磁异常并非完整地与岩体重合,原因是含矿超基性岩体中磁性矿物分布不均匀。磁性矿物分布是受超基性岩中的矿物成分特别是磁性矿物的生成温度、多期热液活动的作用,蛇纹石化及氧化作用等种种因素的影响。在金川矿区,主要磁性矿物是磁铁矿,其次是钛磁铁矿及弱磁性的磁黄铁矿, Cu-Ni 硫化物的磁性很低^{①②}(甘肃省地质矿产局第六地质队,1984; Schmidt et al., 1998; Clark, 1997)。

磁铁矿主要与蛇纹石化的程度和分布有关,而磁性矿物不可能均匀稳定的存在与分布。在地面磁测 ΔZ 平面图或航空磁测 ΔT 平面图上,往往会呈现出多条带状、狭条状,长短不一、正负相间的磁异常(见图 1、图 3 地质图中的磁测 ΔZ 等值线略图)。

可以明确地说,在金川矿区磁异常主要反映了蛇纹石化的磁铁矿超基性岩体的分布,因此,磁力测量可以用于追踪超基性岩体,在覆盖区已用于寻找延伸部位的隐伏超基性岩体,其作为普查阶段的手段是有效的,但不适用于直接探明深部 Cu-Ni 硫化物矿体的分布,在分析其他方法的深部资料时,应重视磁异常对划分浅部含矿岩体的作用。

1.2 可控源音频大地电磁法

近年,可控源音频大地电磁法在不同类型矿区的应用得到较快的发展。金川矿区 3 000 m 深度以上的视电阻率结构图像(图 1),提供了探讨地下岩体的新证据。除了浅部出露的超基性岩、大理岩及其他岩性局部显示高阻体特征外,本区主要的高阻体存在于深部,直到 2 500 m 以下深度,预示了在东部祁连山北缘与阿拉善地块西南缘的龙首山隆起边界深部,可能存在与更深部的岩浆源相连的上涌岩浆岩。除了浅部矿体外,已知主要含 Cu-Ni 硫化物的超基性岩体均位于深度约在 1 000~2 000 m 之间的高阻体上部的低阻体内。工作结果表明,低阻体不但与铜镍硫化物矿有关,而且与断裂带、破碎带及周围也许含水的沉积岩层有关,并且位于高阻体两侧,因而在各个剖面上,高阻体稳定地向深部延伸扩大(图 1),这种剖面显示的电阻率结构特点为解释矿床成因提供了依据。

应该指出的是,由于人工震源的近场效应,在剖面两端高阻体的形态可能存在畸变,因此,不能认为推断的岩浆源的形态与高阻体是一致的。

1.3 人工震源地震层析方法

层析成像是一种通过获取数据而得到地层速度模型的一种重要的物理方法。根据不同的研究目的和需要,它既可以利用天然地震也可以借助于人工震源来获得不同深度的地质体物性参数图像。目前初至波三维地震层析成像的 3 个主要实现技术为:地震波初至时刻拾取;射线追踪技术;层析反演技术。

① 金川铜镍研究设计院矿山分院,甘肃地勘局第二勘查院. 2007. 金川铜镍矿东延 M15 磁异常地面物探查证工作报告.

② 甘肃省地质矿产局第六地质队. 1981. 甘肃永昌白家咀铜镍矿矿区西端隐伏矿体评价及三矿区南侧磁异常验证报告.

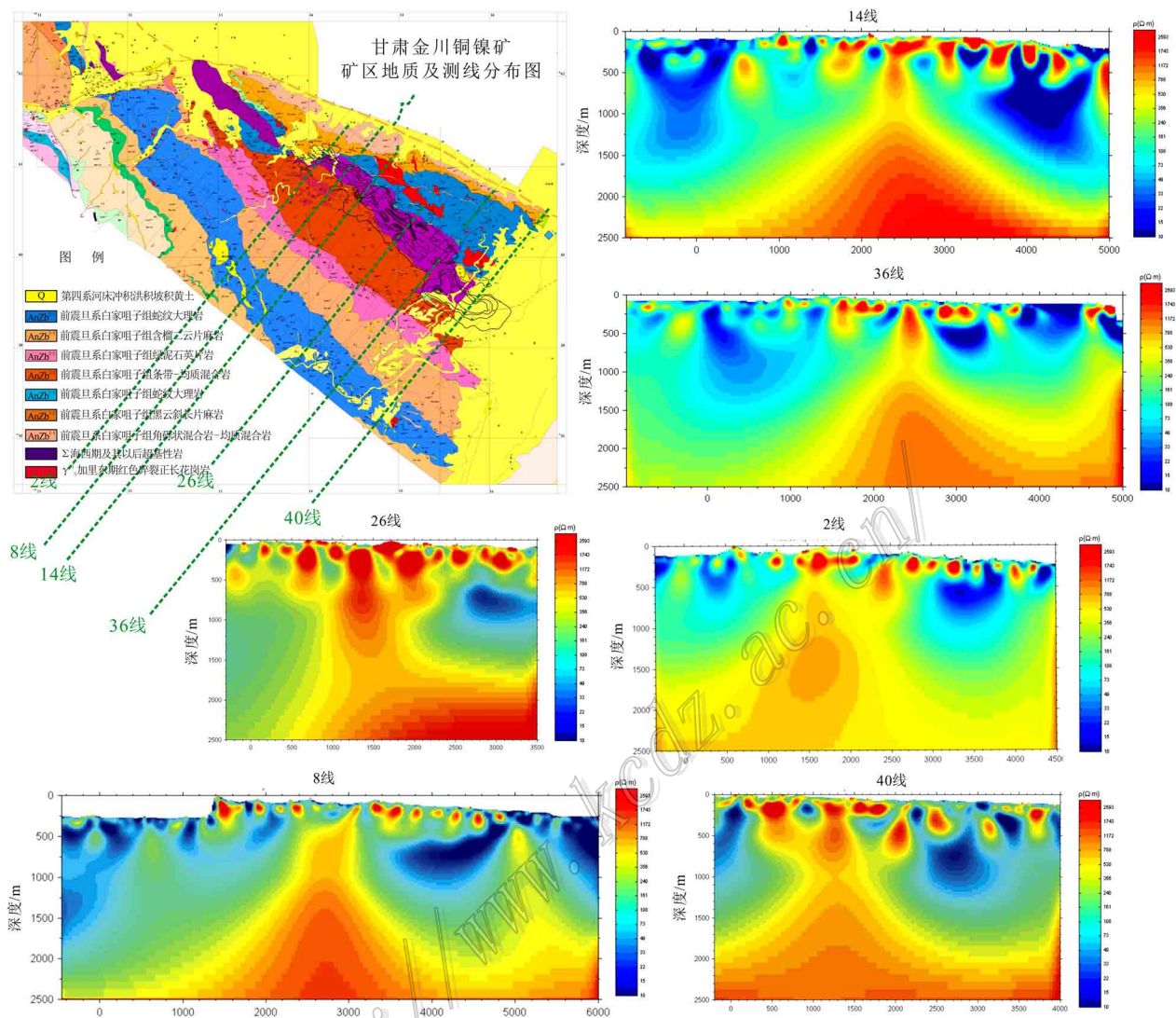


图 1 金川矿区可控源音频大地电磁法剖面位置及相应剖面的视电阻率图像
(地质图资料来源甘肃省地质矿产局第六地质队, 1984 及①, 由长安大学闫海卿等, 2010 改编)

Fig. 1 Location of controlled-source audio-magneto-telluric profile in the Jinchuan mine and apparent resistivity images of corresponding profile (geological map after No.6 Geological Party of Gansu Geological and Resources Bureau and①, modified by Yan et al., 2010)

众所周知, 在金属矿区和构造复杂地区因为常规反射地震受平层假设限制, 而难以取得实际效果, 而层析成像则有明显的优势, 它既不受水平层假设的限制, 对频率的要求也较低, 只要能清晰识别出给定波组的起跳点即可。反射地震需要反复校正共中心点 CDP 道集, 对于复杂速度结构地区不可能消除动校正的三次方项, 从而使叠加剖面的反射层位弥

散。另外, 地震层析对观测系统要求不严, 只需要每个模型块体划分有足够的射线穿过, 且方位角分布均匀即可, 而反射地震是按照反射面元进行设计的, 不同炮检组合的中心点最好都落在共中心点(CDP)附近, 因此, 对于复杂速度结构地区和复杂地形地区很难实现, 不得不采用大面元, 从而抵消了反射地震高精度的部分特点。

① 甘肃省地质矿产局第六地质队. 1984. 甘肃金昌白家咀子铜镍矿 MV 号磁异常补充检查地质报告.

同时,层析成像的多尺度特性可以在不同构造跨度范围的要求下进行不同震相,不同节点划分,不同初始模型的方法试验与已知构造模型的关系可以建立更加紧密的联系。主要的金属矿区深部探测,特别是可开发的2~3 km深度的探测是目前金属矿区进一步开发的瓶颈。高精度人工震源层析成像方法可以作为一种新方法对这个领域进行拓展,是大有希望的方法(张恒磊等,2011)。

金川矿区的反射地震探测受复杂地形以及老矿区占据深1 000 m以上范围内的众多地下巷道、采空区的影响,使探测的效果很不理想。改用地震层析探测,虽然工程量大,野外施工困难,却仍然获得了相对可靠的深部速度分布特征。结合视电阻率分布特征,有助于我们解释深部构造和矿床成因的相应特征。只是限于矿区周边地区的城市、道路等无法施工地段太多,使可放炮范围缩小,本次工作探测深

度暂时仅限于1 600 m的深度。

图2给出了在金川铜镍矿区进行人工震源地震层析检波点(观测点)和震源炮点实际分布位置图,反演分两步进行,按一维初始模型对台站附近的炮点到时进行反演,然后以此三维模型为基础,对所有炮的走时进行反演,这样可以保证近炮点数据的权重加大,远炮点走时的贡献主要反映在深部(2~3 km深度)。最终参加反演的炮数为1 023炮,走时数据756 834个。

矿区内6条主要地震层析剖面示于图3中,给出了上地壳深度1 600 m范围内的P波层析的速度图像。在剖面中,高速体呈水平的透镜体居于剖面中央,并向两侧延伸,然后其两侧为低速体。已知矿体多位于高速体范围内,其视电阻率为低阻体。高速体内部速度分布不均匀,常有数个近水平的高、低速层相间出现呈分层结构,而低速体内部速度变化又

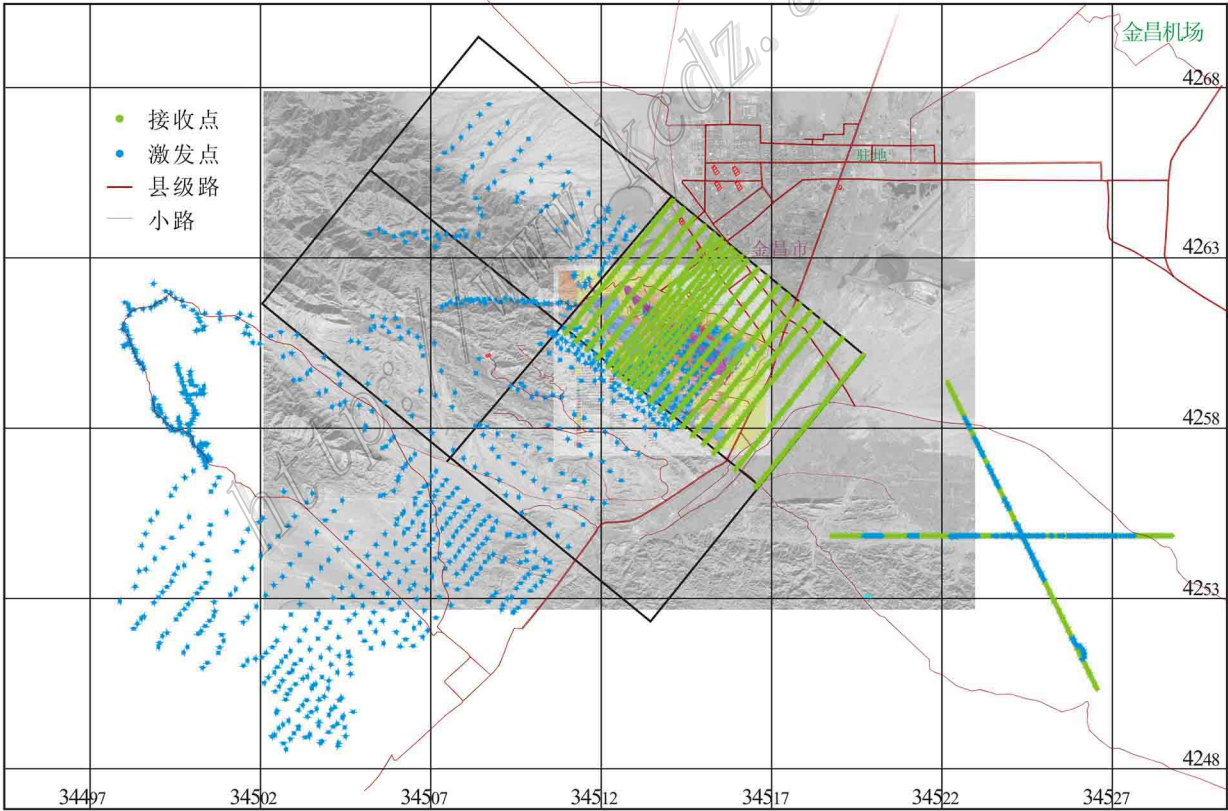


图2 金川矿区人工震源地震层析观测与震源位置图

蓝色点为炮点,绿色点为检波点,图中矩形框为最终成图范围,框内地质图为矿区范围

Fig. 2 Topographic map of artificial source seismic tomographic observations and hypocenter position in the Jinchuan mine
Blue dot indicates shot point, green dot indicates detection point, rectangle represents the range of final mapping, geological map in rectangle shows the range of mining areas

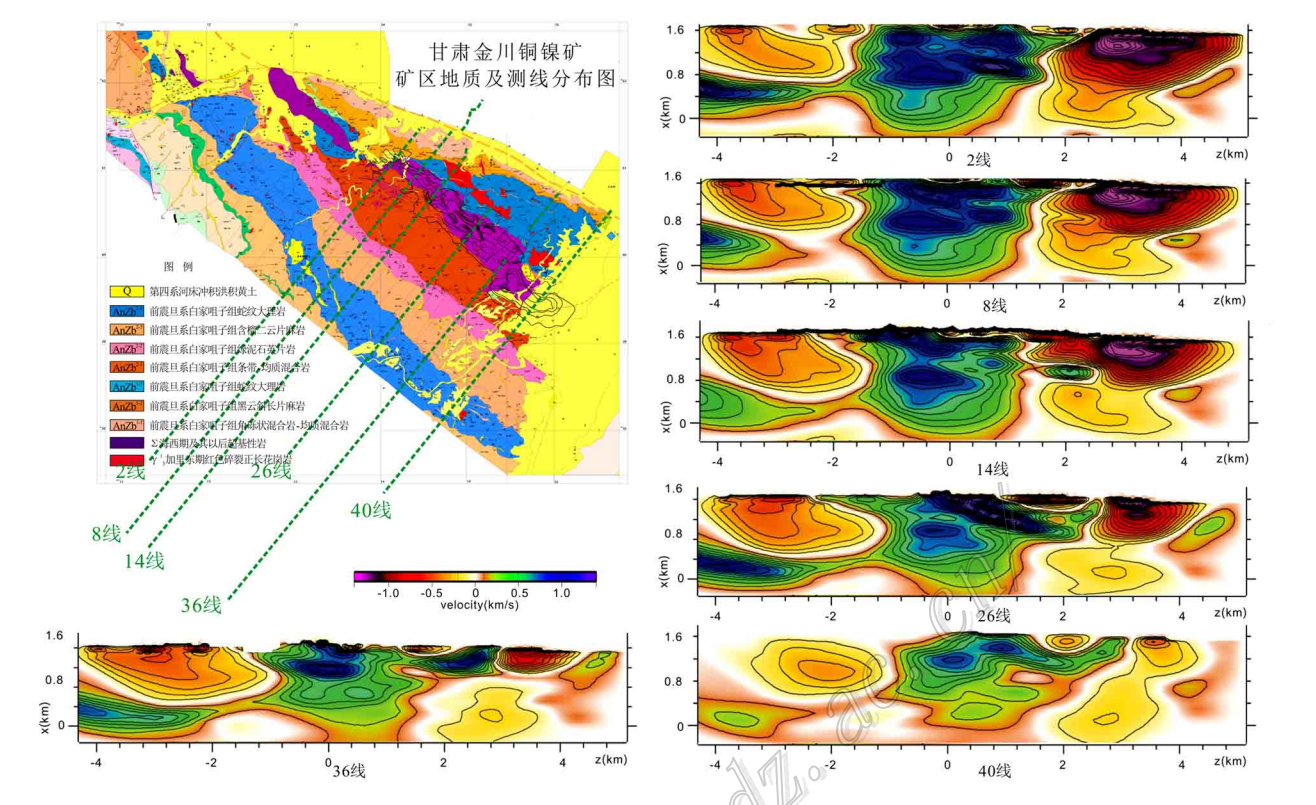


图 3 金川矿区地震层析垂直剖面位置与相应剖面速度图像(地质图说明如图 1 所示)

Fig. 3 Location of vertical seismic tomography profile in the Jinchuan mine and corresponding velocity profile image (Geological map illustration as for Fig.1)

由中心向四周逐渐增高。反映二者以及高速体内部物质成分分布与结构的差异。这为金川成矿的解释提供了有力线索。

2 讨 论

2.1 金川矿床形成机制的地质模式

金川矿床已经过数十年勘查与开发工作,并且已对它进行了大量研究。目前大多数人认为该矿床是由地幔岩浆经多级上侵后,在上地壳岩浆房中发生熔离作用,并且在重力作用下富含硫化物的熔体相对集中于下部,而硅酸盐岩浆相对集中于上部,两者之间处于过渡状态,形成类似于分层的结构;在构造或其他地质作用下,岩浆房的镁铁质岩浆和硫化物熔体将沿着构造通道依次侵位,形成了由无矿岩体至浸染状矿石—稠密浸染状矿石—致密块状矿石的序列。这种生成模式中,岩浆房的岩浆熔离作用所形成的分层结构是前提,而构造通道是条件(图 4)。这为该区物探深部资料的地质解释奠定了基础(李献华等,2004;汤中立,1990; 1991; 1995; 1996;

汤中立等,2006;杨合群,1991)。

2.2 剖面对应性

从图(图 1、3)上看,金川矿区从 2 行至 48 行的地质剖面与可控源音频大地电磁法电阻率、地震层析剖面具有明显对应性。如金川矿区 14 行(剖面方向为 NE 向)在可控源音频大地电磁法电阻率剖面中,相当于 1 000~2 500 m 深度有一个上部小、下部大、向上凸出的高阻体,两侧为几乎对称的凹入的低阻带,其在地表对应的是前寒武纪变质岩系,而金川镁铁质岩体及铜镍矿体即处于北侧凹入的低阻带中;通过地震层析剖面处理可以明显看到,在相当凸出的高阻体部位,深度大约在 1 000 m 左右,有一透镜状高速体,高速体两侧为相对的低速体,在高速体和低速体之间有一些错断,向南倾。若是将金川已知矿体投影在地震层析剖面图上,其位置即位于具有分层结构的大透镜状高速体北侧、南倾错断带附近;它介于高速体与低速体之间。这种综合剖面结构特征在 10 行、12 行、28 行以及 32 行、36 行均可见到,并且完全可以类比。地质情况与不同方法物探剖面显示的结果对应性,一方面说明了矿区含矿地

质构造与矿体产出具有一定的规律性与稳定性,另一方面反映了这些物探方法对该区地质体探测的有效性和相似性,这种关系说明了地质与地球物理所反映的一致性并具有深刻内涵。

2.3 高阻高速体分析

根据矿区岩石和矿石标本的物性测定,表明它们的密度与电阻率差异较大,其中镁铁质岩石和各类矿体的密度最大,变化于 $2.97 \sim 3.03 \text{ g/cm}^3$,其次是各类花岗岩岩石和变质岩,密度变化于 $2.54 \sim 2.71 \text{ g/cm}^3$,再次是各类砂岩、页岩和砾岩,密度变化于 $2.48 \sim 2.57 \text{ g/cm}^3$;平均电阻率以富含 Cu-Ni 硫化物的矿石最低,变化于 $5 \sim 150 \Omega\text{m}$,其次为砾岩、泥岩和各类片麻岩,变化于 $250 \sim 1\,000 \Omega\text{m}$,再次是各类花岗岩和大理岩,变化于 $1\,000 \sim 3\,000 \Omega\text{m}$,最高电阻率是未蚀变或风化的超镁铁质岩石,通常变化于 $3\,000 \sim 5\,000 \Omega\text{m}$ 。从岩石与矿石物性数据概况可以看出,金川矿区物性变化的规律是明显的。镁铁质岩石是处于高密度与高电阻率范畴中。在可控源音频大地电磁电阻率剖面上凸出的高阻体与地震层析剖面上具有分层结构的透镜状高速体,两者大致对应,虽然分布范围有一点差异,然而它们所反映的地质体应该是同一地质体。而金川矿区物性特征表明,既是高电阻率又是高密度的地质体,看来只能是岩浆岩体。因此,有理由认为剖面上高电阻率‘凸出’和高速的‘透镜状’是由从深部上侵的以超镁铁质岩为主体的岩浆岩引起的。同时,从高阻与高速体产出深度、规模、内部分层结构,以及与外部低阻体呈隔断状态看,说明它是受构造控制,使它在空间上有一定形态与延伸,层析图上的高速“透镜体”的水平延伸却超出了高视电阻率的范围,伸至富含金属硫化物的矿体附近。这可能是深部水平构造所致,进而深刻地反映了金川矿区深部构造与岩浆上侵活动的特征。

2.4 速度分层初探

在地震层析剖面上高速体具有明显的水平分层特点,这种现象在以往矿区中不多见,却是笔者所关注的。速度分层实际上是密度分层,而在地质体中,特别是超镁铁质岩岩体中密度分层完全是由其分异作用引起的,从而使不同密度的轻、重矿物分层产出。然而这种分异作用不是在任何情况下均可发生。大量室内、外资料表明,岩浆分异作用只有在相对稳定的环境下才能实现。而这种分异作用恰是金

属矿物富集及其成矿最有利的过程。如果说高阻与高速体是深部超镁铁质岩浆的反映,那么可以认为这个上侵的岩浆很可能曾处于一个相对稳定环境并经历了岩浆分异过程,从而使它有可能形成含矿母岩浆。

2.5 高阻体的地质属性推断

由可控源音频大地电磁法提供新电阻率图像中,地表的多种岩性的露头均表现为局部的高阻体;而深部的高阻体,与地震层析给出的高速体的分布大致相同,可能属于与成矿有关的超镁铁质岩的反映,其范围从浅部到深部 $2\,500 \text{ m}$ 以内。毫无疑问,其与更深部的岩浆源相连。已有的岩浆硫化物矿床的形成机制认为(汤中立,1990;汤中立等,1992):母岩浆侵入现存空间之前,在深部岩浆房内或深部通道的相对稳定环境中发生了熔离作用和部分结晶作用,使母岩浆分离为不含矿岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆、矿浆几部分,然后对现存空间一次或多次上侵贯入成矿(图4)。在上侵过程中,不含矿岩浆大部分都侵入到不同的空间形成岩群或岩带,剩余的岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆可以多次贯入同一空间成岩、成矿(汤中立,1990;1995;汤中立等,1992;2006)。所以,不含母岩浆的体积,比含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆的体积要大得多。显然,这种与成矿密切相关的母岩浆源在空间上应处于最高部位。由此笔者认为,金川矿区电阻率剖面与层析剖面上高阻高速体在地质属性上可能是深部岩浆源上侵至最高一级的‘岩浆房’的反映。

2.6 岩浆活动通道及‘小岩体成大矿’新据

在图1和图3中清楚地显示了低阻带于向上凸出的高阻带二侧。在上述剖面北段,相当于现今金川矿区位置,在浅部有局部零星分布的小规模高阻体或低阻体,并明显受较陡的近EW走向断裂控制,分别与地表岩体或矿体相对应。但是深部地球物理资料又反映出另一种情况,特别是在层析剖面上,如图3第14线,在具有分层结构透镜状高速体北侧,在深度 $1\,000 \text{ m}$ 左右处水平延伸出一个高速体小分支,长约 1 km ,厚度不大。从金川矿区物性与高速体空间形态看,它似乎是受近水平断裂控制而充填其中的超镁铁质岩枝,无疑地它是深部水平断裂构造活动的反映。对此有2个问题很值得我们探讨:一是构造性质,在金川矿区地表或浅部这组断裂没有显示,而在矿区内所见的均为倾斜断裂,有的倾角还较陡。

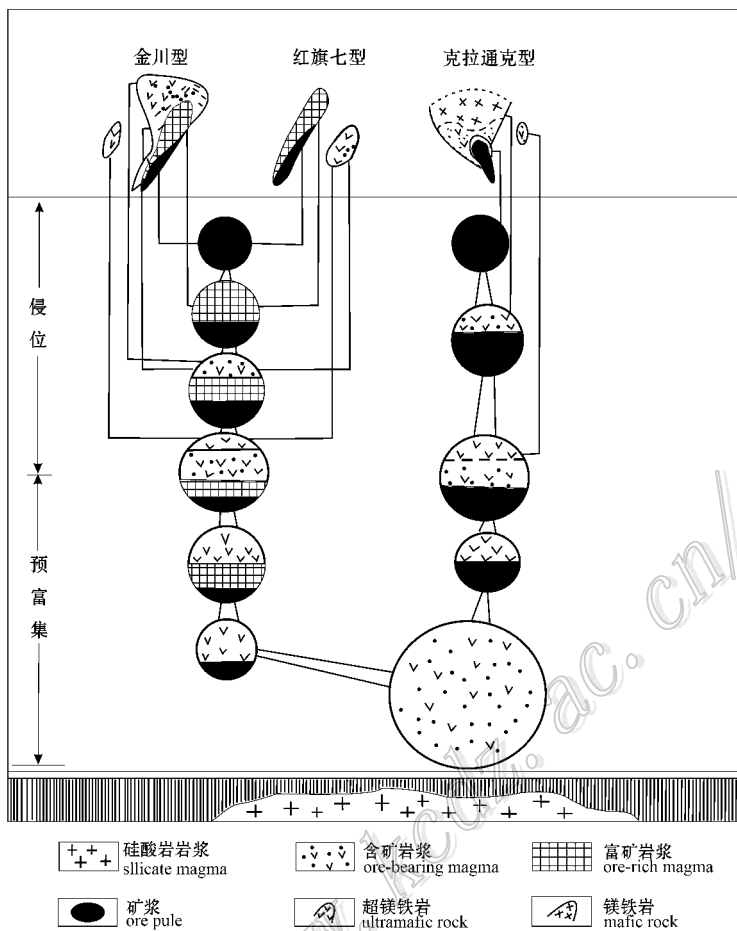


图 4 组合成矿模式示意图(据汤中立等,2006)

Fig. 4 Combinational metallogenic model (after Tang et al. , 2006)

这二组断裂究竟是什么性质的断裂构造？有人说是追踪的张性与压扭性二组断裂，也有人认为是属于铲状断裂性质，目前从深部地球物理资料还很难做出判断，无法对上述某种看法给予肯定与支持。但是这组近水平的断裂在金川矿区深部确实是存在的，另一是它们在成岩成矿中的作用，在层析剖面深 1 000 m 左右处，水平延伸高速体小分支南端与具有分层结构的透镜状高速体相连，北端向北延伸至低速带，按其长度也超出了视电阻率剖面中高阻带范围，接近金川矿区低阻的含金属硫化物的矿体(图中绿色示意体)。深部这种地球物理特征给我们留下了解释的空间，正如本文 2.3 节所论述的，与向上凸出高阻体相对应的具有分层结构的高速体是上侵岩浆体，它们来自更深部的岩浆房，那么水平断裂则是沟通了岩浆中分异的产物，使其有序地向外分流，并提供了其活动的通道与赋存的空间，而这个逼近矿体的高速体小分支只能被解释为岩浆分溢出来而充

填在断裂中的小含矿岩体(枝)。显然，水平断裂在成岩成矿中起到了重要作用。金川矿区深部地球物理资料不但揭示了深部存在水平断裂，同时也从地球物理特征方面支持了金川矿区成矿模式的设想。在此还要补充一句，人们经常讲金川矿区是‘小岩体成大矿’的范例，若从上述地球物理资料及其解释看，金川小岩体实质上是指与深部岩浆源有联系的含矿岩体，若没有水平断裂将深部岩浆源与地表或浅部的小岩体联通在一起，小岩体本身很难形成大矿。

2.7 成矿模式的地球物理证据

依据地球物理资料佐证了地质研究关于本区矿床生成的模式，也同时给出了具体的深部地球物理特征。由此，在地质研究的基础上，依据在本区进行的地震层析和可控源音频大地电磁法的结果，可以为金川铜镍矿床的成矿模式提供具体的地球物理依据，图 5 给出了金川铜镍矿床 2 500 m 深度以上范围的深部成矿模式的基本形态和深部的具体特征。

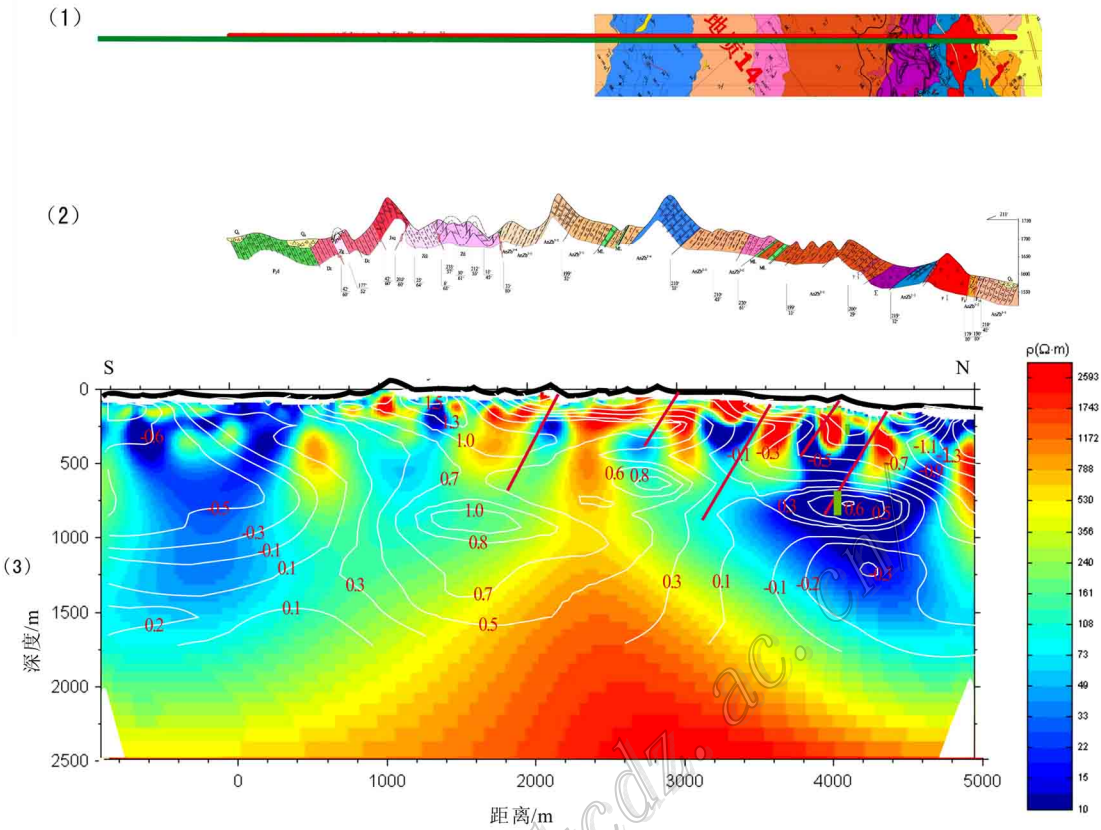


图 5 金川铜镍矿区 14 行综合剖面及成矿模式图

(1). 地质条带及地面磁测 ΔZ 图(资料来源甘肃省地质矿产局第六地质队,1984 及①); (2). 地质剖面图, 箭头位置为地表含矿超基性岩体, 红线为断裂带(长安大学闫海卿,2010); (3). P 波层析速度与视电阻率综合剖面图背景为视电阻率图, 白色等值线为 P 波层析速度图, 剖面北段绿色直条给出了深度 800~1 000 m 范围内已知 Cu-Ni 矿体示意图

Fig. 5 Composite profile along 14th exploration line and metallogenic model of the Jinchuan mine

(1). Geological band and ground magnetic ΔZ map; (2) Geological profile, arrows indicate location of ore-bearing ultramafic body at the surface, red lines indicate fault zone (after Yan, Chang'an University, 2010); (3). P-wave tomography velocity and apparent resistivity comprehensive profile, in which resistivity serves as the background, white contours indicate the P-wave tomography velocity, straight green bars along the northern section indicate the known Cu-Ni ore bodies in the depth of 800~1 000 m

2.8 补充说明

金川矿区位于华北地台南缘,与成矿有关的中元古代超镁铁质岩体产于古元古界中,并且岩体规模小,分布断续,从地表岩体与矿体分布情况看,与深部的完整大块高速高阻体似乎不对称。有人怀疑二者是否为同源岩浆的产物,地表岩体与矿体可能是推覆而来,与浅部岩体和矿体不存在渊源关系。这仍有赖于矿区近期深部钻探结果的证明。目前,在地表岩体、矿体中均无推覆构造遗迹,相反地,从物探剖面上看到了地表与深部异常是相连的。

至于深部高阻体的范围,并不意味着此推断岩

体的准确规模和形态,更不是均一成分的,而且,目前已知本区成矿时间在新元古代(汤中立等,1992;杨合群,1991),在此漫长时期里,不可能不受构造运动的影响,不同时间的岩浆和热液活动不同,但来源可能是来自更深部的岩浆源,这也有待于其他资料的印证。

3 结 论

(1) 通过可控源音频大地电磁电阻率剖面 and 地震层析速度剖面进一步验证了金川成矿模式,并为

① 甘肃省地质矿产局第六地质队. 1984. 甘肃金昌白家咀子铜镍矿 MV 号磁异常补充检查地质报告.

其提供了地球物理的依据。

(2) 由深部上涌的含矿岩浆,在 800~1 000 m 深度上向北扩散,与此处低电阻率的异常重合,这正是值得注意的高速、低阻体范围。目前已知存在产状较陡的矿体,也许在岩浆侵入沿陡断裂成矿之前,还有呈水平状产出的矿体,值得去探测。

(3) 深部高阻、高速度体上部具有分层结构的“大透镜体”显示了岩浆体的分异特征,而且,与含矿岩浆一起均来自深部的岩浆源。超镁铁质岩体及其铜镍矿基本上分布在该断裂带附近。依据这种关系,应利用业已完成的剖面进行深部找矿,并可向东继续开展工作,以期获得新成果。

志 谢 2009~2010 年在金川矿区进行的地震层析、音频大地电磁测深的过程中得到了金川铜镍矿集团公司领导和各方负责的大力支持,同时得到项目负责杨经绥研究员、汤中立院士、许志琴院士、长安大学闫海卿教授等多方指导和帮助,在此向他们表示衷心感谢。另外,该项野外施工由华北石油局第四物探大队和西南石油局第二物探大队承担,在此向刘正军总工、杨继友总工及其团队表示真诚的谢意。

参考文献/References

甘肃省地质矿产局第六地质队. 1984. 白家咀子硫化铜镍矿床地质

[M]. 北京:地质出版社.

李献华, 苏 犁, 宋 彪, 等. 2004. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 科学通报, 49(4):401-402.

钱 辉, 姜 枚, 等. 2011. 天山-准格尔地区地震层析成像与地壳结构[J]. 地震学报, 33(3):1-15.

汤中立. 1990. 金川硫化铜镍矿床成矿模式[J]. 现代地质, 4(4):55-64.

汤中立. 1991. 金川含铂硫化铜镍矿床成矿模式[J]. 甘肃地质, (2):104-124.

汤中立, 杨杰东, 徐士进, 陶仙聪, 李文渊. 1992. 金川含矿超铁镁岩的 Sm-Nd 定年[J]. 科学通报, 37(10):918-920.

汤中立. 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京:地质出版社. 157-160.

汤中立. 1996. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制[J]. 地质学报, 70(3):237-243.

汤中立, 钱壮志, 等. 2006. 中国铜镍铂岩浆硫化物矿床与成矿预测[M]. 北京:地质出版社.

杨合群. 1991. 论金川硫化铜镍矿床成因[J]. 中国地质科学院院报, 22:117-135.

张恒磊, 刘天佑, 朱朝吉, 等. 2011. 高精度磁测找矿结果-以青海尔林格矿区为例[J]. 物探与化探, 35(1):12-16.

Clark D A. 1997. Magnetic petrophysics and magnetic petrophysics aids to geological interpretation of magnetic surveys[J]. Journal of Australian Geology and Geophysics, 17(2):83-103.

Schmidt P W and Clark D A. 1998. The calculation of magnetic components and moments from TMI: A case study from the Tuckers igneous complex, Queensland[J]. Exploration Geophysics, 29(4):609-614.