第 89 卷　第 6 期
2015年6月 1085～1098
地 质 学 报　ACTA GEOLOGICA SINICA
Vol. 89 No. 6 2015
June 1085～1098

哀牢山南段长安金矿地质特征及找矿方法研究

李华[1)]，王永华[1)]，张星培[2)]，艾斯卡尔[1)]，周一敏[1)]

1)中国地质调查局成都地质调查中心，成都，610081；2)云南地矿资源股份有限公司，昆明，650215

内容提要：长安金矿位于哀牢山成矿带南段，是该成矿带上新近发现的又一大型金矿床。该区为哀牢山地体边缘地壳增生带，主要由深变质岩系组成，区内构造断裂发育，对岩浆活动和成矿作用有显著影响。本文总结了长安金矿的地质特征，并以该区的控矿断裂 F6 为主要研究目标，以地层岩性电性特征作为约束条件，分别展开了磁法、激电、瞬变电磁和大地电磁等综合物探手段的试验研究。研究结果表明，磁法对于该矿找矿效果不明显，瞬变电磁和大地电磁测深反演的电阻率低阻体，准确界定了控矿断裂 F6 的位置、倾向、断距以及深部延伸情况，通过激电异常可大致判断矿体的位置。所以在长安金矿区下一步的深部隐伏矿勘查中，结合瞬变电磁、激电、大地电磁等地球物理方法，辅以土壤化探异常进行约束，可以达到快速有效找矿之目的。

关键词：哀牢山；长安金矿；EH-4；深部构造；瞬变电磁；激电

2004 年国土资源大调查项目《云南金平—绿春金铜矿评价报告》中提到金平县铜厂乡发现 9 个原生金矿床，统称为长安金矿❶。长安金矿在大地构造上属于哀牢山成矿带南段（习惯上把元江—墨江公路以北称为哀牢山成矿带北段，以南称为哀牢山成矿带南段），作为该成矿带上继老王寨金矿、墨江金矿、大坪金矿后的又一新发现的大型金矿床，很快成为地质科研人员研究的热点，并在某些方面作出了一些卓有成效的研究。在物质来源方面，应汉龙等（2006）通过对区内岩浆岩及金矿石中黄铁矿硫铅同位素的研究，认为其成矿物质来源于上地壳沉积围岩；和中华等（2008）通过对比分析矿石、地层、岩浆岩中成矿元素的含量，认为细晶正长岩、辉绿岩、煌斑岩是与长安金矿关系最为密切的岩浆岩，为长安金矿提供了成矿物质来源；在成矿时代方面，黄勇等（2007）根据 V5、V3 矿体中伊利石粘土的 K-Ar 测年结果，认为长安金矿存在两期矿化，73.47～82.57Ma 为第一期矿化，还存在一期与岩浆作用有关的矿化；在岩浆岩成岩与金成矿作用之间的关系方面，刘邦（2009）通过对矿石和围岩进行的含金量、主量、微量、稀土（REE）、铂族元素（PGE）分析，认为金成矿与煌斑岩侵位同时发生在新生代，成矿作用与地幔活动关系密切，与煌斑岩、正长岩成岩有关的岩浆可能为地幔岩的部分熔融形成，为金成矿提供热动力；郭春影等（2009）对长安金矿不同类型矿石、岩浆岩和白云岩地层稀土元素地球化学对比研究后认为，矿区内石英正长斑岩、正长斑岩、正长岩和中基性煌斑岩、辉绿岩可能为同源岩浆演化的产物，矿化作用可能与煌斑岩和辉绿岩的岩浆活动有关，可能至少存在两期不同成矿流体的叠加成矿作用；张静等人对矿区岩浆岩的岩石学特征研究认为，矿区内的岩浆岩可能为同源岩浆演化产物，但煌斑岩、辉绿岩与矿化关系更为密切。在成矿流体方面，张静等（2010）研究认为成矿流体由岩浆水和地层变质水混合而成；李士辉等（2011）研究认为成矿流体是多来源，矿区内岩浆活动带来的岩浆热液以及海相碳酸盐地层在变质过程分泌的变质热液共同参与了成矿作用。

综上所述我们不难发现，前人的研究方向主要集中在成岩和成矿学，壳幔相互作用、地幔流体与金的成矿作用，矿源层和成矿流体地球化学，岩浆岩的成岩与金的成矿作用之间的关系，深部构造活动与成矿作用等方面，探讨了长安金矿的深部成矿作用以及其与哀牢山成矿带其它金矿床的统一成矿机制，初步建立了长安金矿的成矿模式，但是在找矿方法方面的研究却甚少，因为传统意义上寻找金矿均

注：本文为中国地质调查局项目（编号 12120113094800）资助成果。
收稿日期：2014-01-14；改回日期：2014-07-03；责任编辑：黄敏。
作者简介：李华，男，1979 年生。硕士，工程师，主要从事固体金属矿勘查及找矿方法的应用与研究。通讯地址：610081，成都市一环路北三段 2 号成都地质调查中心勘查技术室；Email：23841719@qq.com。

是以地球化学为主要手段，而忽视了物探技术的重要作用。对于长安金矿这种严格受构造断裂控矿的金矿床，通过物探手段来查明控矿断裂的深部空间分布形态，确定赋矿空间的具体位置，对于找矿工作来说具有重要意义。所以本文着重以研究适合该区的找矿方法为主，期望加强该区找矿方法研究的薄弱环节，为长安金矿的深部及外围找矿提供方法技术指导。前人的勘查及研究表明长安金矿属于典型的韧性剪切带型金矿，成矿物质来源深部，区内矿体严格受断裂构造控制，在该区控矿断裂深部寻找隐伏矿潜力巨大，而物探手段是寻找深部隐伏矿的重要手段。笔者在总结前人研究成果、认真分析研究区域地质背景及矿床地质特征的基础上，选择长安金矿 V5 矿体的控矿断裂 F6 为研究对象，展开方法试验研究，旨在提出一套适合该区的找矿方法组合，达到准确界定 F6 的位置、倾向、断距、深部延伸以及矿体在平面的大概分布之目的，为矿区下一步的外围找矿及深部隐伏矿勘查提供技术参考。

1 区域地质背景

在大地构造上，哀牢山成矿带位于印支板块与扬子板块之间的结合部位——哀牢山断裂带（又称哀牢山-红河断裂带）和金沙江缝合带的南段。宏观上呈 NW—SE 走向，北东、南西两侧分别以红河断裂和九甲-安定断裂为界，从西藏东南部一直延续至南海地区，全长大约 1000km。带内发育三条主要断裂，从北东至南西依次为红河、哀牢山和九甲－安定三条近 NW—SE 向断裂组成，三条断裂向北在弥渡附近合并为一，向南展开经金平延入缅甸和越南，整体形态具有向 NW 端收敛，向 SE 端散开的帚状构造特征（图 1），这主要与哀牢山构造带曾发生大规模推覆作用以及受区域抬升速率的影响有关（郭晓东等，2008）。构造带北段抬升速率较大，剥蚀较深，接近推覆体根部的收敛部位，显得比较窄；南段抬升速率相对较小，剥蚀相对较浅，推覆体保存完整，显得比较宽，决定了哀牢山成矿带具有向 SE 侧伏的特点（郭晓东等，2008）。其中红河断裂陡立倾向东北，哀牢山断裂带两侧 Moho 深度突变，东北侧深，西南侧浅，且该断裂带两侧地壳结构存在差异，为地体或板块之间的古缝合带，是岩石圈内部结构横向差异性的边界断裂（徐鸣洁等，2005）。作为东南亚地区主要的断裂带之一，普遍认为其对东南亚地区第三纪构造演化有重要影响，是研究青藏高原东南部大地动力学过程的重要场所，该断裂带在第三纪的左旋走滑距离被认为在 500～1000 km 之间（Tapponnier et al.，1982，1986，1990；Leloup et al.，1993，1995）。

长安金矿位于哀牢山南段，哀牢山推覆构造带金平推覆体的中南部，属哀牢山金矿带的一部分。哀牢山推覆构造带从东到西有三条巨大的冲断带，由南西向北东分别称为前缘（边界）冲断带、中央冲断带、后缘冲断带，即九甲-安定、哀牢山、红河冲断带。这三条区域性的冲断带将哀牢山推覆构造带从南西向北东又分为四个带（图 1 所示）。金平推覆体呈楔形夹于绿春褶皱束和哀牢山断块之间，分别以藤条河断裂和哀牢山断裂接壤，区内发育的甘河断裂、三家断裂、金河断裂及大坪-金平断裂构造分别对所控制区块的岩浆活动和成矿作用产生显著影响。原生金矿带处于甘河断裂与三家断裂夹持的三角形断块的中南缘，并跨越于甘河断裂与藤条河大断裂夹持的条形断块内，受甘河断裂的影响，矿体分布于甘河断裂的破碎带内及其两侧的蚀变基性岩内（和中华等，2008），矿带北西向延伸长几十公里，沿途有懂棕河金矿、长安金矿、银厂坡金矿、长安冲金矿、亚拉坡金矿及马鹿塘金矿等，并与白马寨铜镍矿系列和铜厂—长安冲铜钼矿系列相伴产出，与大坪金铜铅银矿带和勐拉铜矿带间隔并列，形成金平断块多金属成矿集中区。

2 矿床地质特征

2.1 地层

矿区内出露的地层主要为奥陶系下统向阳组（O_1x）粉砂岩，志留系中上统康朗组（$S_{2-3}k$）白云岩及第四系（Q）。

奥陶系下统向阳组（O_1x）分为两个岩性段，向阳组一段（O_1x^1）主要为深灰色、灰黑色，薄－厚层状泥质板岩、粉砂质板岩组成。夹浅灰色透镜状变质粉砂岩、细砂岩，主要分布在长安采矿区以北，矿区内未见，厚度大于 376m。向阳组二段（O_1x^2）可进一步分为四层，第一层（O_1x^{2-1}）由浅灰色、灰褐色中－厚层状泥岩、粉砂岩、细砂岩及粗砂岩组成多个韵律旋回，地层总体走向近东西，倾向北，大面积出露于矿区北部和西部，底部含腕足类 *Xianorthis striata*，*Sinorthis typica*，厚度 405m；第二层（O_1x^{2-2}）为浅灰色、褐灰色中厚层状含砾长石石英粗砂岩、砾岩，夹浅灰色薄层状粉砂岩、细砂岩透镜，局部有金矿化，地层总体走向近东西，倾向北，厚度 261m；第三层（O_1x^{2-3}）为浅灰色、灰黄色中厚层状

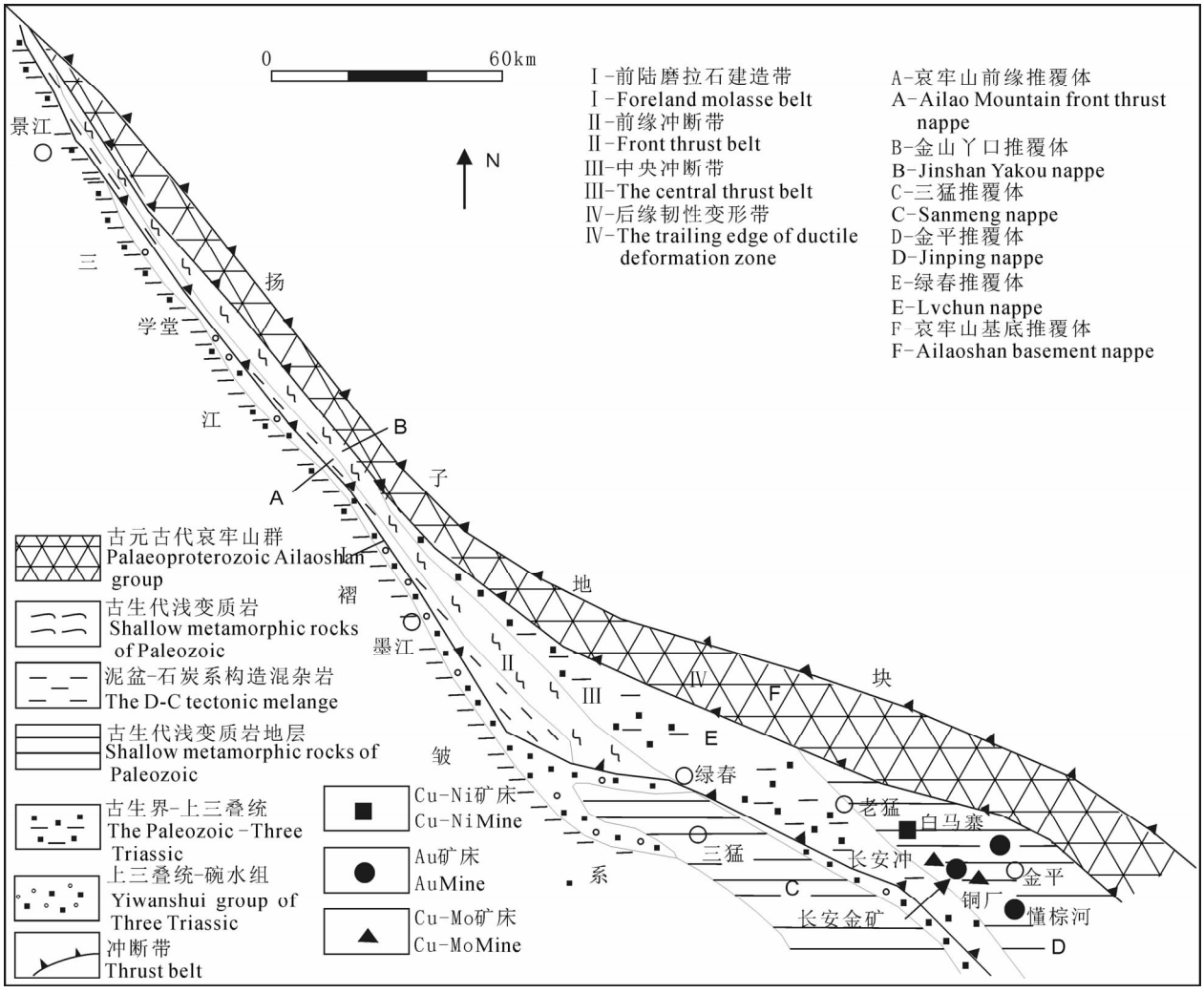

图 1　哀牢山推覆构造分带图(据李定谋等,1998;李士辉等,2011 修改)

Fig. 1　Zoning map for nappe structure of the Ailaoshan Region

(modified after Li Dingmou et al. ,1998 and Li Shihui et al. ,2011)

粉砂岩、细砂岩，顶、底部均为灰褐色厚层状砂砾岩，岩石多具硅化，黄铁矿化，在与西部康廊组白云岩接触接带东侧，形成水平厚 60～180m 不等蚀变碎裂岩，地层总体走向近东西，倾向北，在北部被 F_{10-1} 断层局部错开，为矿区主要含矿地层，厚度 141m；第四层(O_1x^{2-4})为浅灰色、灰白色厚层状长石石英粉砂岩、细砂岩，夹灰色薄层粉砂质泥岩透镜，局部具硅化、黄铁矿化，地层总体走向近东西，倾向北，为次要含矿地层，厚度 244m。

志留系中上统康朗组($S_{2-3}k$)主要为灰白色、浅灰色厚层状灰质白云岩、砂屑白云岩，夹薄层状白云质灰岩。局部有含金辉绿岩脉穿插，局部溶蚀洼地、溶槽面上具红土型金矿。地层总体走向北北西，倾向北东，厚度大于 961.19m，与东部向阳组接触带西侧形成水平厚 0～100m 不等的蚀变碎裂岩带，局部蚀变角砾岩含矿。

2.2　构造

矿区褶皱和断裂构造的复合作用是形成长安金矿的重要构造条件(图 2)。矿区位于猛谢倒转背斜的南东转折端，矿体赋存于近转折端的南西翼构造碎裂岩带中，呈现奥陶系下统在上，志留系中上统在下的倒转性单斜构造。背斜核部地层为 O_1x^2 碎屑岩，翼部地层为 $S_{2-3}k$ 白云岩，倒转背斜南西翼的地层倾向为 70°～100°，倾角为 25°～55°，而北东翼的地层倾向为 330°，倾角 20°～50°。北西走向的甘河断裂 F5 为区域内主要断裂，总体倾向南，地表局部倾向北，断裂破碎带由碎裂白云岩和断层泥组成，部分地段发育黄铁矿化和金矿化。甘河断裂以北，为倾向南东的单斜构造，由奥陶系下统碎屑岩、志留系中、上统白云岩、泥盆系碳酸盐岩夹细碎屑岩、石炭

系和二叠系碳酸盐岩和二叠系峨眉山玄武岩等组成；甘河断裂以南，为倾向南西的单斜构造，由志留系中、上统白云岩、泥盆系碳酸盐岩夹细碎屑岩、石炭系和二叠系碳酸盐岩和二叠系峨眉山玄武岩等组成(应汉龙等，2006)。在背斜转折端，北西向 F6 构造碎裂带沿 S_{2-3}/O_1 不整合界面产出，破碎裂隙发育，穿插有许多辉绿岩脉、煌斑岩脉及正长斑岩、细晶正长岩脉等。局部辉绿岩和煌斑岩脉边部具金矿化，部分达工业品位，甚至有较高品位出现。F6 构造碎裂带在 S_{2-3}/O_1 碎接触面两侧形成宽度大于 100m 的脆性破碎带，为金矿的形成提供了构造条件。

2001～2002 年地质详查认为 F6 断层主要沿 S_{2-3}/O^1 地层界面分布，两地层为不整合接触，总体倾角小于 50°；2010～2011 年云南黄金矿业集团对长安金矿的地质详查获得了新的认识❷，认为 F6 断层并非完全沿白云岩和砂岩的界面分布，该断层总体走向 340°，地表向北东东倾斜、倾角在地表和浅部为 20°～60°，中深部倾角变陡至 60°～90°(1600m 标高以下近于直立或反倾)，断层在走向及倾向上具有舒缓波状变化特征、呈“S”型变化，对矿区主矿体和银厂坡金矿的形成起着重要作用；在 2012 年地质详查工作中，认为 F6 断裂不是线状体，而是一个碎裂岩带，其间发育北西西向、北东东向，近南北向三组次一级裂隙，F6 碎裂岩带自西向东可分三个大的岩性带：①西侧是以白云质为主要成份的角砾岩、碎裂岩带，可进一步将其分为浅、中、深三层，浅层主要是弱蚀变构造角砾岩，见明显胶结物，中层以角砾岩为主，多见白云岩质碎裂岩角砾、局部有砂泥岩质碎裂岩角砾，呈团块状产出，层间少见岩脉侵入，钻孔揭露深部部分辉绿岩细脉达工业品位，近地表风化层中偶见氧化矿，成分复杂，可能为蚀变辉绿岩交代围岩风化富集而成矿，深层主要为白云岩质碎裂岩，层间多夹角砾岩，局部岩脉侵入，基本不含矿；②中间为糜棱岩带，在矿区也是 S_{2-3}/O^1 岩性分界线，糜棱带以东原岩成份主要为砂泥岩，以西原岩成份主要为白云岩，与白云质角砾岩带接触面多伴有细晶正长岩脉侵入；③东侧为泥砂岩质碎裂岩、碎粒岩带，主矿体主要产于泥砂岩碎裂岩、碎粒岩带下部靠近糜棱岩带，多呈大透镜状产出，上部矿化较弱，矿体多呈细小透镜状，脉状产出。

2.3 侵入岩

矿区广泛出露辉绿岩、正长斑岩、细晶正长岩、煌斑岩、橄榄辉长岩等岩浆岩。未蚀变的辉绿岩不含金，经后期热液浸染蚀变的辉绿岩部分含金，矿物成分为斜长石、单斜辉石、橄榄石、石英、白钛石、铬尖晶石、钛铁矿等。正长斑岩、细晶正长岩多呈岩株、岩枝、岩席产出，矿物成分为钾长石、微斜长石、

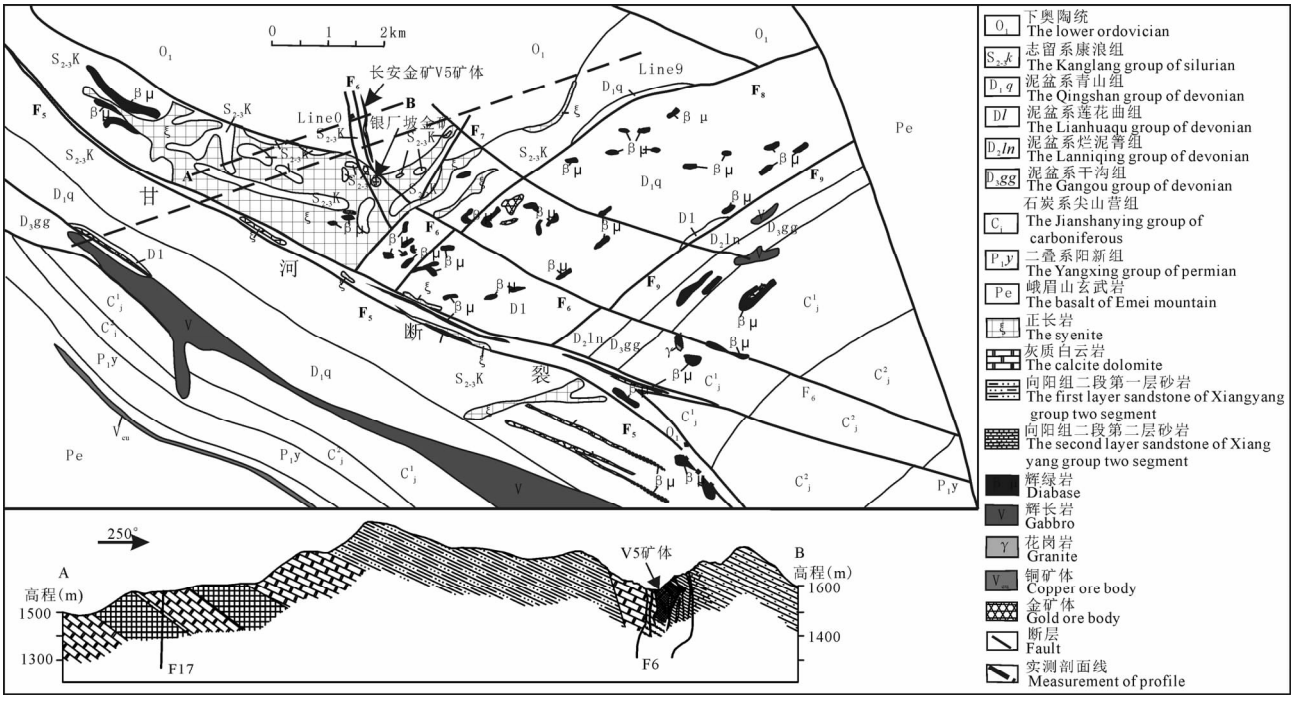

图 2 哀牢山南段长安金矿床地质简图(据和中华等，2008 修改)

Fig. 2 Geological sketch map of the Chang'an gold deposit in Southern Ailaoshan Metallogenic Belt (modified after He Zhonghua et al., 2008)

正长石、环带斜长石、黑云母、角闪石、少量石英组成，副矿物为磷灰石、榍石、独居石、锆石、磷钇矿等。煌斑岩有超基性煌斑岩、基性煌斑岩、碱性煌斑岩、云煌岩等，呈脉体产出，主要产于矿化带内，矿物成分为：橄榄石（5%～10%）、辉石（30%～40%）、紫苏辉石（5%）、角闪石（10%）、基性斜长石（25%～35%）、极少量黄铁矿、黄铜矿、钛铁矿、磁铁矿等。橄榄辉长岩产出于长安矿段深部，呈脉状或更深部有岩基，矿物成分为：橄榄石、辉石、紫苏辉石、角闪石、基性斜长石、极少量黄铁矿、黄铜矿、镍黄铁矿、钛铁矿等。

2.4　矿化特征

2.4.1　矿体特征

长安金矿体主要产于 F6 碎裂带中部靠东砂泥质碎裂岩、砂泥质碎粒岩中，主矿体长约 490m，水平厚度最大 80m，矿体产状（走向及倾向延伸）基本与中部糜棱岩带一致。发生金矿化岩石主要为 O_1x 地层砂泥质碎屑岩及少量白云质角砾岩，原岩成份主要有碳泥质粉砂岩、石英细砂岩、石英砾岩及少量白云岩等，岩石呈碎裂状，金矿化强度与岩石的破碎程度呈正相关关系，赋存金的矿物有石英、黄铁矿、毒砂、粘土矿物、白云石等。

F6 碎裂带近地表西部为 $S_{2-3}k$ 白云岩，东部全为 O_1x 碎屑岩，深部延伸到 $S_{2-3}k$ 白云岩中，碎裂岩带与围岩均为断层接触。碎裂岩带内沿走向和倾向存在着岩石相对完整的岩层透镜体和砾岩、白云岩透镜体，这些不稳定的透镜体严重地影响了金矿化的强度，造成矿质分布的不均衡性，出现无矿透镜体、贫矿透镜体和富矿透镜体。F6 碎裂岩带对长安金矿矿化带起着重要控制作用，矿化带的形成与 F6 碎裂岩带中次级断裂及岩浆活动有关。F6 碎裂岩带性质为压扭性断裂、其向北北西向走滑的同时又向深部下滑，把南部银厂坡一带水平厚 100～150m 灰质白云岩挤入奥陶系下统 O_1x 向阳组碎屑岩中，使脆韧性的 $S_{2-3}k$ 白云岩地层在 $S_{2-3}k$ 与 O_1 接触面靠 $S_{2-3}k$ 一侧形成 0～100m 宽不等的白云岩质碎裂岩带，同时引起东侧脆性的奥陶系下统 O_1 地层破碎，水平厚度达 40～170m。$S_{2-3}k$ 与 O_1 接触处出现糜棱岩，在 F6 碎裂带向北北西推移的同时，西盘地层下滑，带着东盘 O_1x 向阳组部份碎裂状碎屑岩下滑、以致出现深部 F6 碎裂岩带产状近于直立，主要含矿的东部的砂泥质碎裂岩与 F6 碎裂岩带产状一致、近于直立向下延伸、穿插于深部白云岩中。在含矿热液沿 F6 碎裂岩带中裂隙上移时，白云岩质碎裂岩带多呈角砾岩状产出，孔隙及钙质较多，不利于金矿的富集；O_1x 向阳组碎屑岩多呈碎裂岩状产出，且靠近西部白云质碎裂岩带，在金富集沉淀过程中萃取了少量钙质，形成了有利成矿环境，在糜棱岩带东部富集成金矿体。

V5 矿体为长安金矿的主矿体，主要产于 F6 碎裂岩中糜棱岩带东盘，矿体总体走向 340°，倾向 40°～75°，倾角 30°～90°。矿体呈脉状、大透镜状产出，倾角变化较大，上缓下陡，深部 1600m 标高以下近于直立，甚至反倾。矿体在总体较连续，有分支复合现象，局部出现夹石，有三条以上近东西向岩浆岩破坏，后期多组断层导致矿化较不均匀。矿石类型主要为泥砂岩质碎裂岩型金矿石。矿体富集地段严格受近东西向的断层 F_{10-1} 及 F_{10-2} 控制，长约 490m，倾向延伸最深约 500m；矿体单工程真厚度 0.48～74.68m、平均 17.66m，厚度变化系数 115.88%，为厚度变化较稳定的矿体；单工程金品位 1.20×10^{-6}～13.74×10^{-6}、平均 4.25×10^{-6}，品位变化系数 57.70%，为有用组分分布均匀的矿体。

2.4.2　矿石结构

矿区矿石结构主要为：变余细砂状结构、变余含粉砂泥质结构、显微鳞片变晶结构、自形—半自形晶结构、它形结构、镶嵌结构、包含结构、交代结构、反映边结构、假象结构等。

变余细砂结构：是主要结构，主要由 0.06～0.1mm 或 0.02～0.2mm 的石英、白云石等碎屑组成，碎屑呈棱角状，基底式胶结，胶结物为硅质、钙质、泥质及铁质，多重结晶为显晶质的石英及绢云母、白云石（方解石），使基底部分呈显微鳞片粒状变斑晶结构，原岩结构仍清晰呈现，但是普遍具硅化特征。

变余含粉砂泥质结构：由泥质及部分 0.02～0.05mm 的石英碎屑组成，泥质多重结晶为显晶质的石英和绢云母。

显微鳞片粒状变晶结构：由石英细砂岩及含粉砂泥质岩组成，泥质和胶结物多重结晶为显晶质的石英和绢云母，构成显微鳞片粒状变晶结构。

自形—半自形晶结构：黄铁矿、毒砂呈自形或半自形晶粒分布于脉石矿物中。

它形晶结构：黄铁矿及黄铜矿、闪锌矿、方铅矿呈不规则的它形粒状分布于脉石矿物中。

镶嵌结构：自然金呈独立状态嵌布于石英、黄铁矿、毒砂等矿物的内裂隙或胶结物碎屑间隙中，粒度一般大于 5μm，为主要结构。

包含结构:较细粒自然金包裹于石英中,粒度一般小于1μm,其自然金只有有电子探针等手段下才能探出。

交代结构:黄铁矿被褐铁矿交代,形成交代假象、交代残余、交代蚕食等典型的交代结构。

反映边结构:黄铜矿周边被氧化析出褐铁矿,形成反映边结构。

假象结构:氧化次生变化生成的褐铁矿呈现黄铁矿的晶体形象。

2.4.3 矿石构造

主要为碎裂状构造、角砾状构造、浸染状构造、细脉状构造、团块状构造。

碎裂状构造:含矿粉砂岩呈碎裂流动破碎结构,炭质、泥质塑性物质沿碎裂间隙不规则穿插,碎裂中分布有浸染状、细脉状金属硫化物。为主要构造。

角砾状构造:矿石中含有大小不一的石英岩、白云岩角砾,角砾呈浑圆状、棱角状、角砾边缘及碎屑物中含金属硫化物,为次要构造。

浸染状构造:黄铁矿呈针尖粒状、星点粒状,毒砂呈细针状、毫丝状以星散和稠密或均匀和不均匀浸染嵌布于脉石矿物中。

细脉状构造:黄铁矿集合体组成细脉形式不规则穿插于脉石矿物中或黄铁矿以粗细不等的粒状集合体形式分布于石英细脉和白云石细脉内,而两脉体则穿插于脉石矿物中。

团块状构造:黄铁矿以集合体集中的形式,组成团块状分布于脉石矿物中。

2.4.4 矿石矿物成分

(1)矿物成份及含量

经镜下观察,结合人工重砂和X—衍射分析,矿物可划分为五类—自然元素、金属硫化物、氧化物、硅酸盐、碳酸盐等类型,共26种矿物存在。矿石矿物主要为黄铁矿、毒砂、褐铁矿。少量黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、赤铁矿、铜蓝、辰砂、自然金、自然银、银金矿等。脉石矿物主要为石英、长石、白云石、绢云母等,次为方解石、白云母、伊利水云母、蒙脱石、高岭石、炭等,少量绿泥石、黝帘石、沸石、葡萄石等。

(2)矿物嵌布特征

自然金:含量5.5($\times10^{-6}$),金黄色,粒状、枝状、片状,粒径最大70μm,一般1～5μm、5～20μm,最小<1μm。

自然银:含量3.76($\times10^{-6}$),仅在光片中见到一粒,粒径10μm。反射色白色,均质,反射率高。

炭:见于浅变质的含粉砂泥质岩中,浸染状分布。

黄铁矿:含量4.41%,为主要金属硫化物。呈自形—半自形、它形晶,见立方体、五角十二面体,粒度一般为0.03～0.40mm,最大1mm,最小0.001mm,与金关系密切,常见黄铁矿与金连生,或半包裹自然金。早期形成的黄铁矿包裹于长石中的仍呈完好的自形—半自形晶,嵌布于粘土矿物及其蚀变矿物中的除少数仍保留完好的自形—半自形晶外,大部分皆因后期的成矿热液交代溶蚀而呈浑圆粒状、它形粒状、弧岛状、破布状。黄铁矿呈稀疏浸染或稠密浸染于脉石矿物中。

毒砂:含量1.99%,是次要的金属硫化物,多与黄铁矿一起浸染分布,部分产于石英脉中,较少包裹于石英。自形晶粒状,粒径一般0.01～0.2mm,最大0.4mm,最小0.002mm。

褐铁矿:为主要的金属氧化物,多为黄铁矿的次生氧化产物,具黄铁矿假象。有胶状、乳滴状、肾状、结核状、鲕状褐铁矿。褐铁矿多呈浸染状分布,部分细脉状的为含铁、镁质矿物沿其解理缝次生变化而成,微细粒褐铁矿为不规则粒状集合体分布于粘土矿物中,少数褐铁矿绕黄铜矿边缘次生变化而成。

其它的黄铜矿、闪锌矿、方铅矿在矿石中均呈它形粒状浸染于脉石矿物,与黄铁矿关系密切,呈简单连晶连生或伴生。黄铜矿有的氧化为铜兰。赤铁矿呈针状、片状产出,与褐铁矿伴生。

石英:是主要的脉石矿物。有三种存在形式:一是碎屑形式,粒径0.02～0.2mm,与金关系最为密切,自然金常嵌布于碎屑间;二是细脉形式,穿插于岩石裂隙,粒径一般0.01～0.4mm,与金关系较密切,自然金嵌布于石英脉中;三是硅质胶结物重结晶形式,显微粒状,粒径小于0.005mm,也见自然金星点状分布于其中。

绢云母:是矿石中主要的脉石矿物。为岩石中次生矿物,显微鳞片,粒径0.005mm。广泛分布于石英碎屑间。

白云石、方解石:是次要的脉石矿物。呈碎屑状,粒径一般0.04～0.15mm;脉状一般0.05～0.4mm;胶结物状白云石粒径0.005mm。

长石:主要为正长石和斜长石,呈板状、不规则状,表面及周边风化、蚀变为高岭石、绢云母、碳酸盐、黝帘石、沸石、葡萄石。有的为蚀变残晶,可见云母、石英交代长石。长石与石英、粘土矿物等紧密伴生。

粘土矿物:包含伊利水云母、高岭石(土)、蒙脱

石等。分布于长石、石英碳酸盐等的颗粒间，粒径小于 0.005mm，伊利水云母多呈鳞片状集合体，高岭石为长石、云母风化及蚀变的产物，呈土状、蠕虫状。蒙脱石多结晶极细，呈蠕虫状。它们与长石、石英、碳酸盐、黄铁矿等密切伴生，为金银矿物的主要附着矿物。

2.5　围岩蚀变

通过坑道和钻孔工程中观察，结合岩矿鉴定结果，与金矿化有关的蚀变种类较多，主要有碳酸盐化、硅化、绢云母化、石英细脉化、黄铁矿化、毒砂化，局部尚有黄铜矿化、方铅矿化、闪锌矿化等。

碳酸盐矿物主要为白云石，次为方解石。呈粒状、细脉状、不规则网脉状产出于破碎裂隙带中，接近 $S_{2-3}k/O_1x$ 界面的粉砂岩质碎裂中碳酸盐化较为强烈，一些白云石脉内含黄铁矿，并发现有金粒存在。

F6 碎裂岩带普遍具较强硅化蚀变。近地表经风化后较难观察，深部钻孔揭露岩矿芯较为明显，主要表现为石英颗粒重结晶和霏细状硅质结晶，常伴有黄铁矿、毒砂，少量方铅矿、闪锌矿、黄铜矿，一些石英内裂隙中和石英碎屑颗粒间含颗粒金（粒度 5～40μm）。硅化的另一种形式是以石英细脉分布于矿化破碎带内，特别是接近 S_{2-3}/O_1 界面的碎裂岩带中较为普遍，呈不规则网脉状、细脉状（厚 1～5mm），局部有团块状，常与白云石细脉伴生。石英脉体中含少量黄铁矿，并含颗粒金（粒度 20～40μm）。另外，在背斜转折端，出现由正长斑岩高温热烘烤形成的浑圆形强硅化体，呈微粒隐晶质致密结构，霏细状结构，为霏细状硅质结晶，局部可见立方体和五角十二面体黄铁矿，含金品位小于 0.50×10^{-6}。

绢云母化多分布于矿化蚀变带内，含碳泥质粉砂岩中绢云母肉眼难以观察，镜下呈微细鳞片状，含量最高达 40%。

黄（褐）铁矿化是最为主要的矿化蚀变，广泛出现于破碎带内，并与岩石的破碎程度密切相关。黄铁矿呈浅亮黄色，主要为针尖状颗粒均匀浸染，有自形立方体、五角十二面体，它形粒状、团块状、细脉状，具多期形成特征。颜色偏黄且呈浸染状及细脉状的黄铁矿与金矿化关系密切。

毒砂呈淡黄亮银灰色，自形条形针状、毫丝状不均匀浸染，常与黄铁矿伴生，两者的内裂隙中含有颗粒金（粒度 5～20μm）。

3　方法试验及结果分析

如前所述，长安金矿的 V5 矿体是目前所知道的该区最大矿体，而 V5 矿体严格受控于区内的 F6 断层破碎带内，该区地质情况最详细，钻孔资料丰富，钻孔资料显示该区海拔 1640m 以下为主体硫化矿，但下延情况不明。前人的研究成果也从多个角度表明，作为哀牢山金矿带上新近发现的大型金矿床，长安金矿区极有可能存在深部隐伏矿（郭晓东等，2008；郭春影等，2009；刘邦，2009）。在充分分析该区地质特征的基础上，本次研究以 F6 断层破碎带为主要研究对象，选择穿过并垂直 V5 号矿体的 0、9 线作为方法试验剖面进行研究（图 2），以期能准确界定控矿断裂 F6 的位置、倾向、断距、深部的延伸情况以及矿体的赋存空间，对该区深部隐伏矿的勘查以及外围找矿具有重要的指导意义。

由于该区属于高山植被覆盖区，地质情况复杂多样，断裂构造极其发育，断裂在地表迹象不明显，且考虑到地球物理方法本身探测目标具有不确定性和多解性，单靠一种方法手段很难直接达到研究目的，所以我们分别进行了地面高精度磁测、激电、瞬变电磁、大地电磁等多方法的试验研究，各方法取长补短，同时结合钻孔资料进行相互约束、互相验证。

3.1　电性结构分析

此前该区从未做过大比例尺的物探工作，直到 2010 年云南黄金集团才在该区做了一些方法试验研究工作，缺少可供参考的地球物理资料。所以本次研究工作测定了矿区内的各类岩（矿）石（以钻孔岩心为主）的电性参数，其结果见表 1 和图 3 所示，从图表中得出如下规律：①矿区的岩（矿）石电阻率主要受岩性及岩石破碎程度影响，白云岩、灰岩、辉绿岩、为高电阻率地质体，其平均电阻率大于 4500Ω·m；砂岩、煌斑岩、正长岩为中等电阻率地质体，其平均电阻率约 1500Ω·m；硫化矿、断层泥、构造角砾岩、含炭质砂岩为低电阻率地质体，其平均电阻率约 300～700Ω·m；无论何种岩（矿）石随破碎程度的增强，电阻率降低，破碎带中的碳质、泥质等充填物的增加，电阻率也随之降低。②矿区的岩（矿）石极化率主要受岩石金属硫化物矿化程度及含碳量影响，硫化金矿由于黄铁矿化较强，是该区的极化率最高的地质体，其平均极化率达 13.5%；在该矿区有不同程度的黄铁矿化或含碳质的砂岩，其极化率也较高，平均值为 5%～8%；在岩石中随金属硫化物矿物及炭质的增加，极化率增高。其它围岩均表现

为低极化率地质体，平均值小于 2.6%。

表 1 哀牢山南段长安金矿区岩(矿)石物性参数

Table 1 The electric parameters of Chang'an gold deposit rock(ore) in Southern Ailaoshan Metallogenic Belt

岩(矿)石名称	极化率 F (%)		电阻率 ρ (Ω·m)	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值
硫化矿	5.69～29.06	13.5	15.79～1605.07	727.68
白云质灰岩	0.34～5.94	2.22	299.22～12542.88	7859.7
灰质白云岩	0.11～6.10	2.03	1148.64～12157.58	7593.27
正长岩	0.23～3.81	1.16	176.62～2312.49	1014.96
风化正长岩	0.10～3.46	1.24	199.70～2503.46	589.95
断层泥	0.58～3.54	1.61	36.45～768.69	288.31
粉砂岩质碎裂岩	0.60～5.66	2.17	390.64～6379.49	2417.86
含碳粉砂岩质碎裂岩	4.18～15.28	8.30	106.55～1351.64	738.99
硅化粉砂岩质碎裂岩	2.16～8.61	5.35	1030.78～3776.53	2184.55
煌斑岩	0.46～2.45	1.24	506.88～4615.57	2695.18
构造角砾岩	0.30～9.95	2.64	77.20～3164.70	749.85
氧化辉绿岩	0.37～2.45	1.02	1174.26～10770.80	6798.81
辉绿岩	0.20～6.90	2.35	605.34～8788.44	4426.43

综上所述，长安金矿区深部的硫化(金)矿为中低电阻率，高极化率的地质体，与围岩具有显著的电性差异，具备地球物理勘探前提；断层泥为特低电阻率地质体，是间接找矿的标志；灰岩、白云岩与砂岩的电阻率有 2～3 倍差异。结合地质认真综合研究，该区用电阻率和极化率参数，可大致划分断层带、硫化金矿体、灰岩、砂岩界线。

3.2 地面高精度磁测

地面高精度磁测因为仪器轻便、操作简单、外界影响小、成本低等优点已经成为所有物探方法中应用最广泛的一种方法(管志宁，2005)，它通过观测和分析不同地质体的磁场特征及磁性差异，可以研究断裂构造及其空间分布形态，从而指导找矿工作。本次磁测的目的是大致确定 F6 断层的平面位置以及出露岩体的边界形态，从而进一步确定 V5 矿体可能赋存的位置。

在磁场平稳的矿部驻地附近建立一个日变观测站及仪器校正点，日变观测始于出工前，终于收工

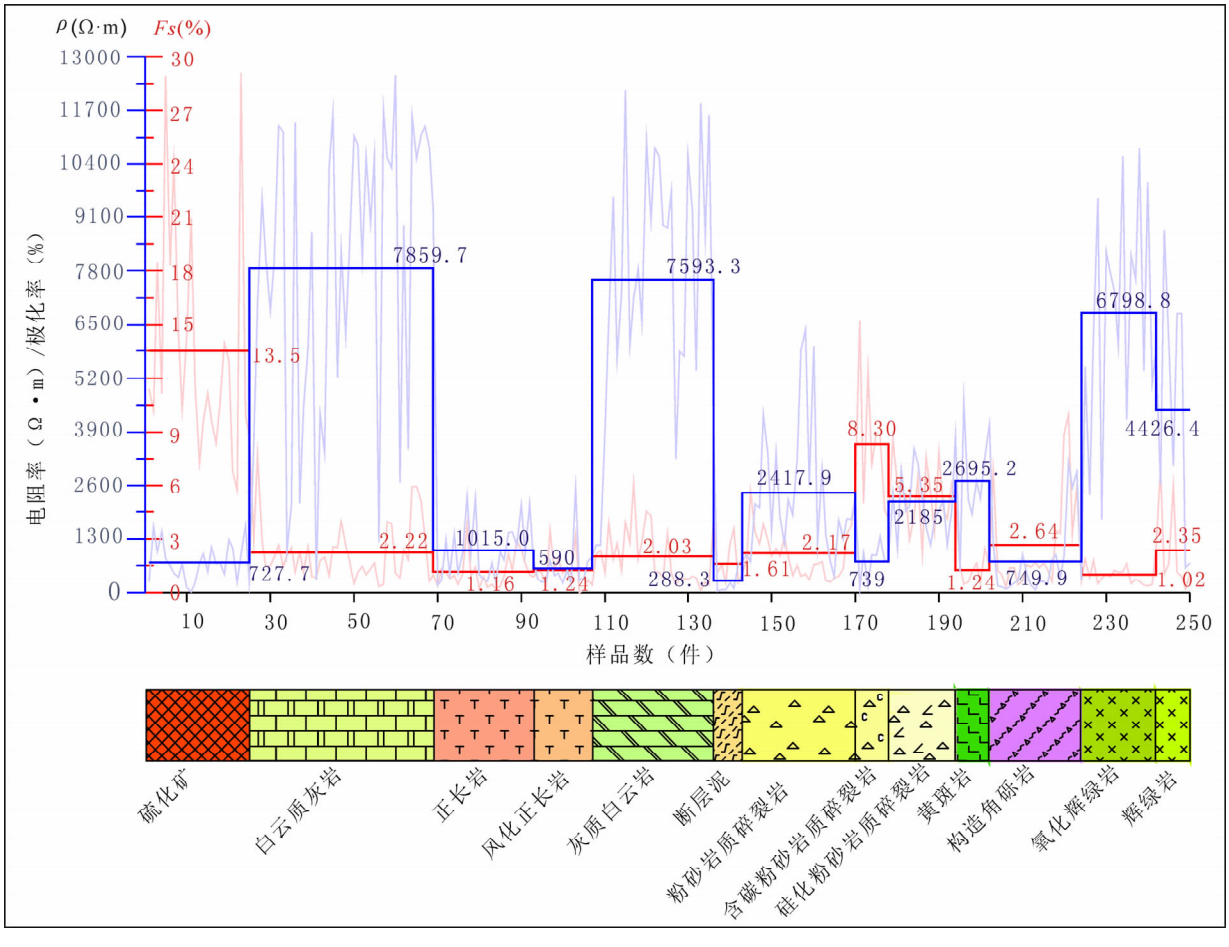

图 3 哀牢山南段长安金矿区各类岩(矿)石的电性参数对比曲线图

Fig. 3 The graph comparing electric parameters of Chang'an gold deposit rocks(ore) in Southern Ailaoshan Metallogenic Belt

后。用 GSM-19T 质子磁力仪观测地磁场总强度 T 值。磁异常(ΔT)除正常的日变改正外，同时进行纬度改正、高度改正。当日工作结束后，对日变数据进行圆滑，利用圆滑后的日变数据对测点数据进行日变改正。然后利用电子表格，按照公式 $\Delta T = T_{测} - T_0 + \delta T_{日} + \delta T_{总}$ 计算测点的磁场总量异常，式中，ΔT 为磁场总量异常；$T_{测}$ 为测点处观测磁场值；T_0 为基点(日变站)磁场值；$\delta T_{日}$ 为测点日变改正值；$\delta T_{总}$ 为总基点改正值。

图 4 是 0 线上磁测、激电、瞬变电磁及地质的综合成果剖面图。从图 4a 可见，虽在矿体上方出现正负交替的磁异常(ΔT)，但均属单点跳跃，推测是矿山开采的机械设备干扰，没有出现明显的有意义异常，很难对该区找矿工作提供有用信息，无法达到预期的目的，其他几条测线的磁测效果也不理想，所以地面高精度磁测在该区对于找矿指示作用不明显。

3.3　激电剖面测量

激电法是目前唯一能直接发现浸染状金属硫化物矿体的最有效方法之一，可分为时间域激电法和频率域激电法。当供电电极向地下供电，并保持供电电流不变时，测量电极之间的电位差随时间增长会趋于某一饱和值，断电后，在测量电极之间仍然存在着随时间减小的电位差，并逐步衰减趋近于零，这种现象称为“激发极化效应”。金属矿石、石墨等电子导体，地下水等离子导体，具有各不相同的激发极化性质和特点，观察它们的激发极化效应便能达到勘查这些目标并且区分它们的目的。

根据矿区的地质特征，该区主矿体为硫化矿，其中黄铁矿为主要的载金矿物之一，物性测试结果也显示硫化矿与围岩具有明显的激电差异，结合矿区的地形交通条件以及矿体的埋深位置，选择了时间域激电法进行激电测量试验，采用传统的激电中梯装置，MDE6700 型发电机作为电源，WDFK-2 型智能发射机供电，2.5mm^2 多芯铜线作供电及测量导线，供电电极使用 1.2m 长的铁电极组，每组电极 10～15 根，电极垂直测线方向布置，电极间距离大于 1m，双极性脉冲方式供电，占空比 1∶1，供电周期 16s。供电电极距 AB＝1500m。WDJS-1 型数字直流激电仪观测，第一采样宽度 40 ms，断电延时 100 ms，迭加次数选用 1 次。测量段基本上在供电极距的 0.8 区间内；每组供电观测三条测线(主测线及两条旁测线)。在作激化率测量的同时，计算辅助参数电阻率值，电阻率按下式计算：

$$\rho_S = K \times \triangle V_1 / I$$

$$K = 2\pi/(1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN)$$

其中：K 为装置系数，I 为供电电流，$\triangle V_1$ 为一次场电位。

从激电剖面图(图 4a 所示)可见，在 V5 矿体上方出现明显的极化率(Fs)异常，极值达 25%，视电阻率(ρ_S)从西到东逐步降低，陡梯度带反映了含矿断层，矿体则表现为中低阻，说明该矿区岩石与金矿石中含有一定量的金属硫化物矿物，极化率(Fs)、电阻率(ρ_S)具有一定差异，用激电中梯配合其他物探方法寻找金矿具有良好物性前提❸。

3.4　瞬变电磁测量

瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Methods)，又叫时间域电磁法(Time-Domain Electro-magnetic Methods)，简称 TEM 或 TDEM。它是近年来国内外发展得较快、地质效果较好的一种电磁勘探方法。它是利用一不接地回线发射一次磁场，在一次磁场的间歇期间利用不同回线接收二次感应磁场，该二次磁场是由地下良导体受激励引起的涡流所产生的非稳磁场。其地球物理基础是地下半空间岩(矿)石电阻率的差异，根据电阻率的分布规律，结合地质推断出地质构造及可能含矿的地质体，本区各种岩性的电性结构显示，断层泥与围岩具有明显的电阻率差异，具备瞬变电磁的勘探前提。

瞬变电磁测量使用了加拿大 Geonics 公司生产的 PROTEM57 瞬变电磁仪，属电磁法类仪器中具世界先进水平的仪器，可以了解地下不同深度的电阻率的变化情况。采用中心回线装置，供电导线为 4mm^2 多芯铜线，在同点位分别用 25Hz 和 6.25Hz 频率供电，供电电流 8～9A，供电电压 24V，供电回线边长为 100 m×100m，接收线圈为高频 1D 线圈。观测二次电位垂直分量，每点重复观测 3 次，记录观测点线号，供电电流、电压、频率、增益、积分时间、断电延时、记录号及地质情况等。

在 0 线上截取经过 F6 断层的一段测线进行瞬变电磁测量试验，采用 25Hz 和 6.26Hz 两种不同的供电频率分别进行测量，最终反演的电阻率断面图如图 4b 和图 4c 所示。从 25Hz 和 6.25Hz 工作频率相比较可见：由于受断电延时及测点下方电阻率变化的影响，瞬变电磁法浅部均存在盲区，25Hz 工作频率的工作盲区约为 30m，探测有效深度 230～600m，6.25Hz 工作频率的工作盲区约为 100m，探测深度 310～800m，说明 6.25Hz 工作频率在低阻屏蔽的地电条件下，其穿透能力大于 25Hz 工作频率，但浅部盲区较大，遵循已知到未知原则，为了更

好地探索矿体与视电阻率之间的关系，由于矿体外围的地质情况不清，面积性工作可采用25Hz频率。

无论是25Hz还是6.25Hz，在距离200m至550m之间段内出现视电阻率小于160Ω.m的中低阻带，在其北东和南西侧均出现高阻区，而在含矿断层F6带上出现视电阻率小于16Ω.m的特低电阻率异常带，瞬变(TEM)电阻率断面清晰地反映了容矿空间F6断裂破碎带的展布形态，说明在长安金矿及其外围，用瞬变电磁查找埋深400～800m以内断裂空间分布形态是有效的，可以为探矿工程的布置提供强有力的物探依据，达到间接指导找矿的目的❸。

3.5 大地电磁测深

大地电磁测量采用由美国EMI公司和Geometrics公司联合推出的新一代电磁仪EH-4电磁成像系统，能观测到离地表几米至3000m内的地质断面的电性变化信息，近年来在地下水研究、环境监测、矿产与地热勘察，以及工程地质调查等方面得到了应用(王志强等，2007；申萍等，2007；沈远超等，2008；傅文杰等，2008；易清平等，2010)。本次研究笔者展开了10km的大地电磁测量工作，点距一般为50m，部分地区由于地形及电线的影响，为了提高测量质量，部分点距在40～80m之间变化。在测区内分别进行5m、10m、20m、30m电极距观测，根据效果及效率关系，选择20m的电极距观测。采用高频磁探头，采集的频段宽度为10Hz到100kHz。场源主要为天然电磁场，只有在天然场信号很弱或者根本没有信号的频点上，才使用人工场源，用以改进数据质量，提高数据信噪比。标准人工场源发射天线频率从800Hz到64kHz之间，从发射天线的频率范围可以看出，采用人工场源发射仅是加强浅部的数据信号，本次研究根据测点的实际的情况，仅对信号较弱的测点进行了人工场源的发射。

EH-4数据主要采用IMEGEM软件进行处理。对原始数据预处理后，进行FFT变换，获得电场和磁场虚、实分量和相位数据，进行一维BOSTICK反演，将频率变换为深度；在一维反演的基础上，用国外二维成像软件进行快速自动二维反演，并根据地质地球物理条件进行修正反演结果(Sasaki，2004；Smirnov，2003；Volpi et al.，2003)，最终获得电阻率断面图(李华等，2012，2013)。

本次EH-4测量试验有两个目的，一是在瞬变电磁测量成果的基础上，进一步加大探测深度，摸清控矿断层F6往深部延伸的空间形态，二是了解F6断层在平面上的展布以及矿体外围的地质情况，扩大测量范围。为此，分别布设了两条平行测线0线和9线，测线方位角为250°，线距500m，0线长约3km，9线长约7km，测线具体位置如图2所示。图5分别展示了0线和9线的EH-4大地电磁反演电阻率断面图，以及在研究矿区地质资料基础上推测的地质推断图。结合地质推断图和矿区的地质简略图以及0线和9线的平面位置(图2)进行对比分析可知，矿区北东部地质情况较为复杂，断层构造发育，且出露各类岩浆岩，说明本区构造活动强烈，EH-4测深数据点在该区跳动也比较剧烈；矿区西南部岩石相对较完整，主要以志留系中上统康郎组灰质白云岩为主，EH-4测深数据点在该区分布非常均匀且很密集。

从EH-4电阻率断面图及地质推断图上可以看出，0线和9线对F6断层均有较好的反映，在地质图上标识F6断层位置处的下方均表现为明显的低阻异常区(图5c、5d中的Ⅰ区)，结合本区的电性参数特征，推断这个低阻异常区即为F6断层造成的破碎带，从断面图中可以大致判断：F6断层总体倾向北东，倾角较陡，中部近于直立；断距在20～600m之间，向下延伸至海拔约－800m处，距地表深度约2000m左右，V5矿体主要赋存于破碎带中部靠近东边的砂泥质碎裂岩、砂泥质碎粒岩中，以上推断均与地表及钻探工程揭示的结果相吻合，浅部的推断结果与瞬变电磁的推断结果也对应良好，说明了本次试验的数据质量是可靠的。从整体上看，电阻率断面图上还发现了多处低阻地质体(图5c、5d中的Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ区)，根据本区地质特征以及各类岩石的电性参数，我们推断了F17、F18、F19、F20、F21等5条断层，这些低阻地质体即为以上5条断层引起的破碎带所致，它们大多数也延伸至距地表1500m深处，且倾角较陡，断距在50～700m之间，整体形态与F6非常相似，其中F17断层在两条剖面上也均有明显的反映(图5c、5d中的Ⅱ区)，通过两条测线在平面图上控制的断层位置判断，该断层属于北西向断裂，近似与F6平行，现场踏勘测量时还发现了数处民间采坑道，据此推断这些断层与F6断层很可能是同一时期相同地质事件造成的断层，具有很大的找矿前景。

4 讨论

从上述试验成果来看，地面高精度磁测在本区效果不明显，虽然岩石本身具有磁性差异，且理论上

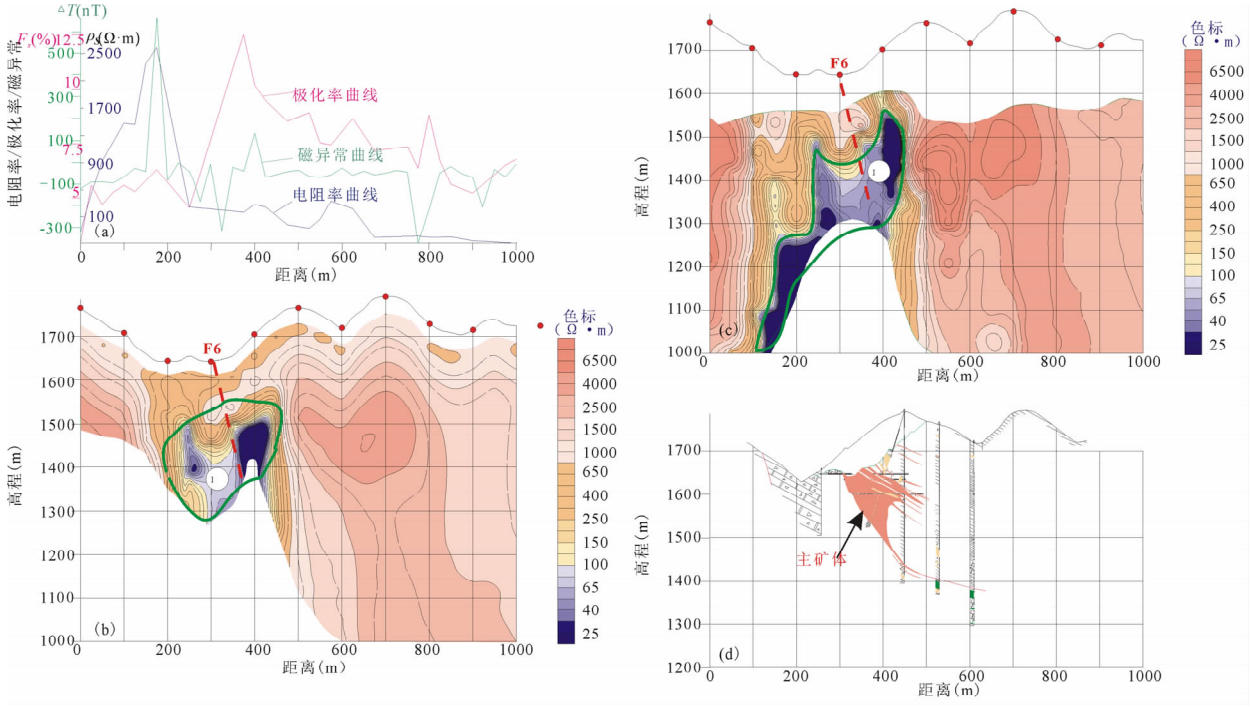

图 4　哀牢山南段长安金矿 0 线综合剖面图

Fig. 4　The comprehensive profiles of Chang'an gold deposit line 0 in Southern Ailaoshan Metallogenic Belt

(a)—激电、磁测综合曲线图;(b)—瞬变电磁(25Hz)电阻率断面图;(c)—瞬变电磁(6.25Hz)电阻率断面图;(d)—地质剖面图

(a)—The diagrams of ground magnetic survey and IP;(b)—the resistivity section diagram of transient electromagnetic(25Hz);(c)—The resistivity section diagram of transient electromagnetic(6.25Hz);(d)—the geological cross-section diagram

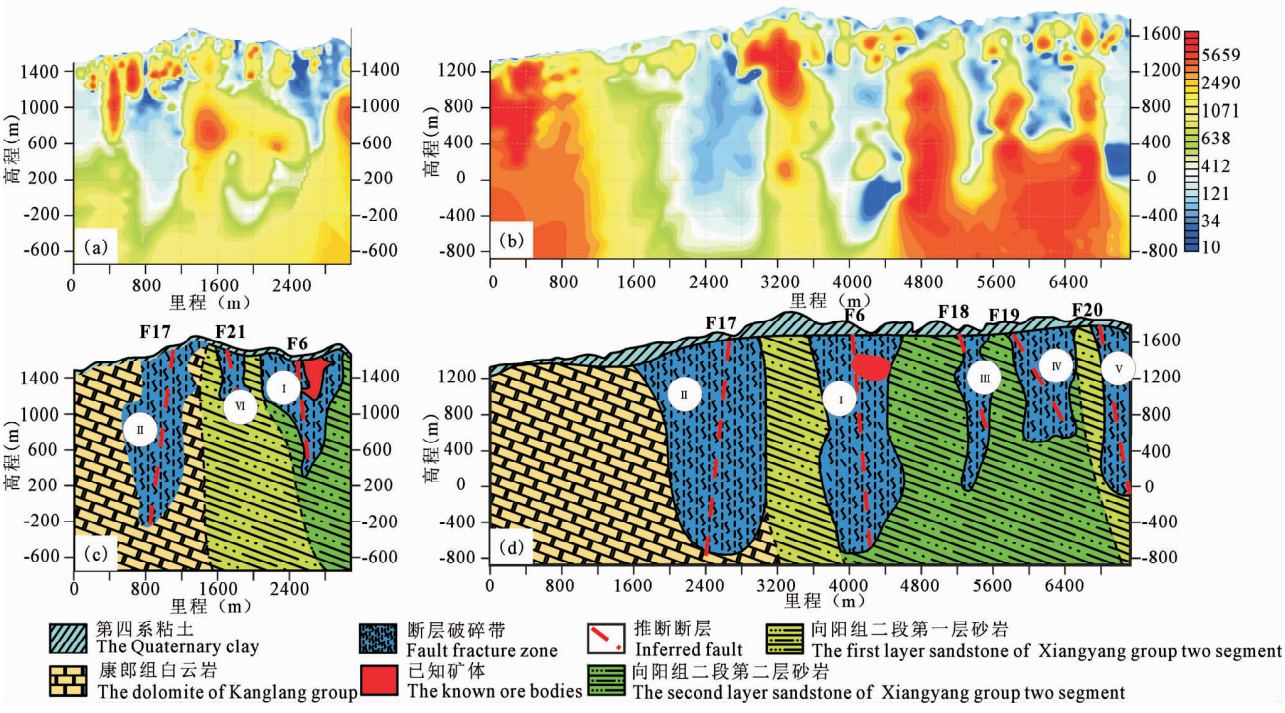

图 5　哀牢山南段长安金矿 0 线、9 线 EH4 电阻率断面及解释推断图

Fig. 5　The resistivity sections of EH4 and inferred geological sections of chang'an gold deposit line 0 and line 9 in Southern Ailaoshan Metallogenic Belt

(a)—长安金矿 0 线电阻率断面图;(b)—长安金矿 9 线电阻率断面图;(c)—长安金矿 0 线地质推断图;(d)—长安金矿 9 线地质推断图

(a)—The resistivity section diagram of line 0; (b)—the resistivity section diagram of line 9;

(c)—inferred geological map of line 0; (d)—inferred geological map of line 9

构造活动会造成磁力线的扭曲变形或突变，但是前人的研究表明，长安金矿属于热液蚀变型金矿，其经过多期的岩浆热液叠加活动而形成，热液活动可以使赋矿岩石的磁性减弱甚至退磁。另外，区内出露的正长岩、辉绿岩、煌斑岩等中基性岩具有弱—中等磁性，但当风化后磁性减弱，灰岩无磁性，砂岩无或有微磁性[4]。推断以上因素是造成地面高精度磁测效果不明显的主要原因。磁测剖面中的跳动的微弱磁异常是否正长岩、辉绿岩发育所致？有待进一步研究。

虽然此次试验激电异常与矿体位置对应良好，从长安矿区岩(矿)石电性特征分析，含炭质粉砂岩、硅化粉砂岩均能产生明显的激电异常，具有与硫化金矿相似的电性特征，二者能产生相似的异常，是区内开展激电工作的最大地质干扰层。综合矿区的钻孔资料，深入研究后发现含炭质粉砂岩、硅化粉砂岩与硫化矿的分布之间无明显的规律可寻，但据现场考察，矿区的碳质砂岩是由 F6 破碎系统内的一些小的构造边部引起的构造碳化产生的，与金矿共生，对硫化金矿体的激电异常是起到了加强的作用，而不是干扰的作用。然而，激电中梯的勘探深度较浅，首先反映的是近地表的电场分布形态，浅地表的第四系及人工堆积物对测量成果影响较大，在应用过程中应实地观察地表地质情况，结合土壤化探异常进行综合分析，才能合理应用显示出其价值。

本次的磁法、激电、瞬变电磁试验工作是由云南黄金矿业集团有限公司 2010 年完成[3]，并在对矿区地质、瞬变(TEM)、激电(IP)、磁测资料综合研究的基础上提出该矿区砂泥岩与灰岩的接触界面与含金矿破碎带不重合，含金矿破碎带近地表向北东倾，中部近于直立，深部微向西倾的观点，后经 ZK006、ZK007 钻孔验证了该观点，彻底改变了长安金矿区的勘探思路和找矿模式，并于 2010 及 2011 年找矿工作中取得重要进展。据 2012 年的钻孔资料[2]，部分专家认为距地表 600m 深部(海拔约 1350m)F6 断层破碎带已经基本圈闭，找矿已经圈边。但此次 EH-4 大地电磁试验成果显示 F6 断层破碎带一直延伸到距地表约 2000m 处，与前人研究的长安金矿物质来源于深部，矿区深部可能存在隐伏金矿体的观点相吻合(郭晓东等，2008)，所以笔者认为，在相同地质背景条件下，长安金矿 V5 矿体埋深 600m 以下完全存在第二找矿空间的可能，值得进一步打深钻验证，这一观点也得到了相关地质专家的认可。

本次的研究成果也可为长安金矿往南 400m 处的银厂坡金矿(图 2)隐伏主体矿的勘查提供参考。云南黄金矿业集团有限公司通过 2010 及 2011 年地质勘查认为 F6 断层并非完全沿白云岩和砂岩的界面分布，此断层具有上缓下陡的特征，对长安金矿的主矿体和银厂坡金矿的形成起着重要作用。目前银厂坡金矿只在浅部找到了氧化矿(红土型金矿)，并已基本开采完，然深部一直没有发现硫化矿。其浅部的氧化矿从哪里来？深部是否还存在硫化主体矿？找矿潜力到底有多大？这些问题一直以来都存在比较大的争议。而笔者于 2013 年野外考察时，在银厂坡矿段也发现了与 F6 断层性质相同的具压扭性质的断层破碎带，且在平面上的延伸长度大于 200m，结合本次大地电磁的研究成果，地质专家推断银厂坡金矿与长安金矿 V5 矿体很可能是同属走向近南北的 F6 破碎带上的金矿体，如果推断成立，那么意味着银厂坡深部肯定存在原生金矿体，具有非常大的找矿潜力。

5 结论

地面高精度磁测对该区矿体及断层的反映不明显，对区内出露的岩体磁异常也不明显，该方法在长安金矿地区找矿指示作用不大；通过大功率激电法取得的激电异常与矿体在平面位置上对应良好，如果深入研究各种地球物理参数特征，充分结合矿区地质及岩(矿)石的电性特征可以大致确定有用异常、划分含金破碎带的界限。激电试验所采取的技术参数符合该矿区实际，能较客观地反映金矿体，在该矿区激电(IP)方法是寻找金矿体的有效方法之一；瞬变电磁法则可较好地揭示矿区 F6 断层破碎带在浅部 400～800m 左右向下延伸情况，但是对于深部特别是在断层位置信号无法穿透下去；EH-4 大地电磁法的探测深度比瞬变电磁法要大，能完整地反映了 F6 断层破碎带向下延伸的情况，最深处距地表约为 2000m，但浅部的分辨率要比瞬变电磁相对低一些。

所以笔者认为，在长安金矿下一步的深部及边部找矿过程中，包括银厂坡金矿的深部主体矿勘查，在综合研究地质背景的基础上，使用瞬变电磁法和 EH-4 大地电磁测深法结合探测控矿断裂的空间分布形态，大致确定容矿空间的位置是行之有效的，特别是对于第四系覆盖层加厚、断层地表特征不明显的情况，该方法组合效果更显著。在大致确定赋矿空间的前提下，可通过激电法进一步确定矿体在平面以及深部的展布形态，其结果可以用于指导钻孔

的布设。

对于 2013 年大地电磁法(EH-4)新发现的另外几条破碎带(图 5 中的Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ区)，这些破碎带无论是形态、延伸或是走向与 F6 断层破碎带的特征基本一致，很可能是同一时期、同一级次的构造运动所引起，具有很大的找矿前景，值得进一步开展工作进行验证。特别是图 5 中的 II 区，该区之后野外做了两条剖面的激电工作，在该区中部偏西一侧，出现了明显的低阻高极化异常，且周边有很多民间采坑，很可能存在矿体，应予以高度重视；同时图 5 中的 IV 区，与矿上之前根据 1∶1 万的 Au 化探异常推断的一条北西向断裂位置相吻合，也值得进一步开展详查工作。

致谢：感谢云南黄金矿业集团有限公司提供的内部勘查资料成果以及笔者在野外工作过程中给予的配合与支持；同时也感谢云南黄金矿业集团有限公司周云满教授级高工、和中华教授级高工等人在昆明交流时对矿区地质方面的有益指导；最后感谢审稿老师提出的宝贵建议。

注　释

❶ 云南金平—绿春金铜矿评价报告.

❷ 长安金 2012 年生产勘查报告.

❸ 长安金矿 2010 年物探勘查报告.

❹ 云南省金平县铜厂金矿区详查地质报告.

参　考　文　献

傅文杰，刘伟，史永东. 2008. EH-4 电导率成像系统在探测构造深部延伸中的应用. 甘肃冶金，30(1)：22～24.

管志宁. 2005. 地磁场与磁力勘探. 北京：地质出版社，257～263.

郭春影，高帮飞，刘学飞，张瑞忠. 2009. 云南金平长安金矿床稀土元素特征及其地质意义. 黄金，30(1)：7～11.

郭晓东，邹依林，张勇. 2008. 哀牢山成矿带南段金成矿规律及找矿方向探讨. 地质与资源，17(4)：264～272.

和中华，王勇，莫宣学，曾普胜，喻学惠，刘和林. 2008. 云南金平长安金矿成矿物质来源—来自矿石及地层、岩浆岩的成矿元素含量证据. 东华理工大学学报(自然科学版)，31(3)：207～212.

刘邦. 2009. 云南哀牢山金矿带长安金矿床地球化学特征及其成矿机制. 广州：中山大学硕士学位论文，1～108.

李定谋，曹志敏，覃功炯，何叔欣，李保华，温春齐，徐则民. 1998. 哀牢山蛇绿混杂岩带金矿床. 北京：地质出版社，1～137.

李士辉，张静，邓军，王欢，刘江涛，赵凯. 2011. 哀牢山南段长安金矿床成矿流体特征及成因类型探讨. 岩石学报，27(12)：3777～3786.

李华，王永华，艾斯卡尔，吾守艾力，李富，周一敏. 2012. 西南山区矿调中的地球物理综合找矿技术研究. 物探与化探，36(4)：523～528.

李华，艾斯卡尔，吾守艾力，李富，焦彦杰，王桥，周一敏. 2013. 渝东南地区隐伏铝土矿物探勘查技术试验研究. 地质学报，87(3)：384～392.

沈远超，申萍，刘铁兵. 2008. EH-4 在危机矿山隐伏金矿体定位预测中的应用研究. 地球物理学进展，23(1)：559～567.

申萍，沈远超，刘铁兵. 2007. EH-4 连续电导率成像仪在隐伏矿体定位预测中的应用研究. 矿产地质，26 (1)：70～78.

王志强，朱向泰，李瑞. 2007. EH-4 电导率成像系统在矿产勘查中的应用. 地质找矿论丛，22(4)：306～309.

王勇，莫宣学，曾普胜. 2007. 长安金矿地质特征及成矿模式. 矿物学报，27(增刊)：169～170.

徐鸣洁，王良书，刘建华. 2005. 利用接收函数研究哀牢山—红河断裂带地壳上地幔特征. 中国科学 D 辑：地球科学，35(8)：729～737.

易清平，杨庆华，狄家亮. 2010. EH4 电导率成像系统在桃山铀矿田中的应用研究. 上海地质，31：271～274.

应汉龙，刘和林，杨许中. 2006. 云南金平铜厂金矿床地质特征和成矿物质来源. 地质与资源，15(4)：265～271.

张静，邓军，李士辉，燕旎，杨立强，马楠，王庆飞，龚庆杰. 2010. 哀牢山南段长安金矿床岩浆岩的岩石学特征及其与成矿关系探讨. 岩石学报，26(6)：1740～1750.

Leloup P H, Harrison T M, Ryerson F J. 1993. Structural, petrological and thermal evolution of a 'Tertiary ductile strike-slip shear zone, Diancang Shan, Yunnan. J Geophys Res, 98 (B4): 6715～6743.

Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P. 1995. The Aailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. Tectonophysics, 251(4): 3～10.

Smirnov M Y. 2003. Magnetotelluric data processing with a robust statistical procedure having a high breakdown point. Geophys J Int, 152: 1～7.

Sasaki Y. 2004. Three-dimensional inversion of static-shifted magnetotelluric data. Earth. Planets and Space, 56: 239～248.

Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. Geology, 7: 611～616.

Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia, In: Rmasey J, Croward M, Ries A, eds. Collision Tectonics. Geol Soc London Spec Pub, 19: 115～157.

Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indo-china and south China. Nature. 343(6257): 431～437.

Volpi G, Manzella A, Fiordelisi A. 2003. Investigation of geothermal structures by magnetotellurics (MT): an example from the Amiata area, Italy. Geothermics, 32: 131～145.

Geological Characteristics and Prospecting Methods of the Chang'an Gold Deposit in Southern Ailaoshan Metallogenic Belt

LI Hua[1)], WANG Yonghua[1)], ZHANG Xingpei[2)], ARSKA[1)], ZHOU Yimin[1)]

1) *Chengdu Center of China Geological Survey*, *Chengdu*, 610081;

2) *Yunnan Geology and Mineral Resourcescompany*, *Kunming*, 650215

Abstract

As another large gold deposit discovered recently, the Chang'an gold deposit is located in the southern section of ailaoshan belt . The area is the edge of the crust Ailaoshan terrane accretion zone , mainly composed of metamorphic rocks. There are many faults in the region, and they has a significant impact on the magmatism and mineralization . Based on a lot of literature and the exploration report , the geological characteristics of Chang'an gold deposit has been summarized in this paper. We took F6 fracture of the area as the main research goal, with lithology electrical characteristics as constraints . A lot of methods in this study contain magnetic survey, IP, TEM and EH-4. The results show that magnetic survey isn't suitable to the Chang'an gold deposit, but the resistivity inversion sections of TEM and EH-4 methods can reflect clearly the location, orientation, fracture width of F6 and so on. And we can determine the position of the orebody by IP anomalies. So combined with TEM, EH-4, IP and soil geochemical methods in the next work, it will be very helpful for prospecting deep concealed ore.

Key words: Ailaoshan; Chang'an gold deposit; EH-4; deep structure TEM method; IP method