深穿透勘查集成技术在高原寒冷区找矿预测中的应用

——以甘肃南部碌曲地区忠曲金矿为例

黄学强[1],罗先熔[1],王光洪[2],卢安宁[1],刘秀娟[1],黄蔚阁[1]
HUANG Xue-qiang[1], LUO Xian-rong[1], WANG Guang-hong[2],
LU An-ning[1], LIU Xiu-juan[1], HUANG Wei-ge[1]

1. 广西地质工程中心重点实验室/桂林理工大学隐伏矿床预测研究所, 广西 桂林 541004;
2. 四川省冶金地质勘查局 605 大队,四川 彭山 620860
1. *Main Laboratory of Geology Engineering Center of Guangxi/Institute of Concealed Mine Prospecting, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;*
2. *The 605 Battalion of Metallurgical and Geological Exploration Bureau of Sichuan Province, Pengshan 620860, Sichuan, China*

摘要:应用深穿透集成技术,在常规勘查方法难以奏效的高原寒冷区开展了隐伏金矿预测研究。选定的技术手段是可控源大地地磁法、地球电化学法与吸附相态 Hg 法组合。通过对已知区的示范研究,验证了该方法组合的有效性,并总结了适合高原寒冷景观条件下的综合找矿模式。利用建立的综合找矿模式,在忠曲矿区外围开展了预测隐伏金矿的工作,圈定了综合找矿靶区 8 处。

关键词:高原寒冷区;深穿透技术;隐伏金矿;找矿预测;甘南忠曲地区
中图分类号:P618.51; P622^{+}.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2552(2012)01-0112-08

Huang X Q, Luo X R, Wang G H, Lu A N, Liu X J, Huang W G. Deep penetration technology in search for hidden gold deposits in plateau cold areas:a case study of the Zhongqu gold deposit in Luqu area, southern Gansu Province. ***Geological Bulletin of China,*** **2012,31(1):112-119**

Abstract: In this paper,the integrated technology of deep penetration to forecast hidden gold ore deposits in the plateau cold area, where the conventional prospecting methods seem inefficient. This coalescence technology includes Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric (SCAMT), geoelectric chemical extraction method (CHIM) and the method of measuring the adsorbed mercury in the surface soil. Through the feasible research on the existing ore by such technological combination, the authors found that it was effective in detecting the hidden ore deposits, and hence the prospecting model for this special region was established. With this integrated method, the authors delineated eight exploration targets in the periphery of the Zhongqu orefield.

Key words: plateau cold area; deep penetration; hidden gold deposit; prospecting; Zhongqu area, southern Gansu Province

忠曲金矿区位于甘南藏族自治州碌曲县境内,系青藏高原东部边缘带,海拔在 3000~4000m 之间,地形为中高山,年均气温 1°,为侵蚀构造的高原山地景观,属半湿润高寒草原区。区内风化作用以化学风化为主, 元素表生地球化学活性不强,Au 等元素含量普遍偏低[1]。在异常衬度不明显的地段,部分由

收稿日期:2011-05-18;**修订日期**:2011-12-19
资助项目:国家深部探测计划项目《盆地地电化学测量技术》(编号:2011105960709M04)
作者简介:黄学强(1987-)男,在读硕士,从事深穿透勘查地球化学集成技术研究。E-mail:huangxueqianghappy@126.com
通讯作者:罗先熔(1953-),男,教授,博士生导师,从事勘查地球化学研究。E-mail: lxr811@yahoo.com.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

金矿体引起的弱异常容易被忽略。区内基岩被覆盖率在 70%以上,露头较少,勘查工作难度较大。因此,在该地区开展进一步的找矿工作有必要选择一套先进、高效的探矿技术手段。

1　地质背景

1.1　矿区地质概况

西秦岭成矿区大地构造位置处于古亚洲、特提斯-喜马拉雅和滨太平洋三大构造域交汇部位,可划分成 3 个成矿带:北秦岭成矿带、中秦岭成矿带、南秦岭成矿带[2]。忠曲金矿床位于南秦岭成矿区内更次一级成矿带——西倾山金成矿带内,受到区内 NWW 向的玛沁-略阳区域性深大断裂的控制,矿床(点)主要沿 F_1~F_5 断裂带分布(图 1)。

区内第四系广泛分布,出露地层为二叠系、三叠系,矿区外围发育石炭系、侏罗系、白垩系。其中,中三叠统的碳酸盐岩建造为主要容金建造,尤其是中三叠统白云岩、灰质白云岩和灰岩组合的碳酸盐岩建造(图 2)。

矿区内忠曲褶皱束是大水弧形构造西翼中段的主体褶皱,呈东西向展布,东西长 40km,宽大于 12km,由 2 个次级背斜和向斜褶皱相间平行排列组成。断裂构造发育,玛曲-略阳近 EW 向逆冲断裂是控制西倾山金矿带的主断裂;NW 向断裂往往形成数十米宽的挤压破碎带,是矿区主要的导矿构造;近 NS 向、NW 向、NE 向张扭、剪切走滑断裂及派生裂隙、节理等在矿区发育,多被闪长岩脉、方解石脉等充填,是区内主要的容矿构造。

岩浆活动相对较弱,主要以晚印支期—燕山期陆相中酸性岩浆侵入和火山喷发为主,出露花岗闪长斑岩、花岗闪长岩,与该区盖层、冲断造山作用有关。这些岩浆岩为矿体形成提供了热源与成矿元素,是找矿的重要标志。

1.2　矿床地质特征

矿区内主要发育破碎带型金矿,受北东—北东东向断裂控制,北西向、南北向断裂为成矿期后断裂,切割深度浅,通常未穿切已成的金矿体。其次为卡林型和花岗闪长岩型金矿。矿体形态为条带状、脉状、透镜状,沿走向、倾向均具膨大缩小的现象,且具波状弯曲的形态。矿石矿物主要有赤铁矿、自然金、黄铁矿、银金矿、辰砂、辉锑矿、毒砂、雄(雌)黄、自然银、磁铁矿、自然铅等,并以稀疏浸染状构造、细脉—网脉状构造、角砾状构造为主。常见围岩蚀变类型有硅化、赤铁矿化、方解石化、褐铁矿化、黄铁矿化等,

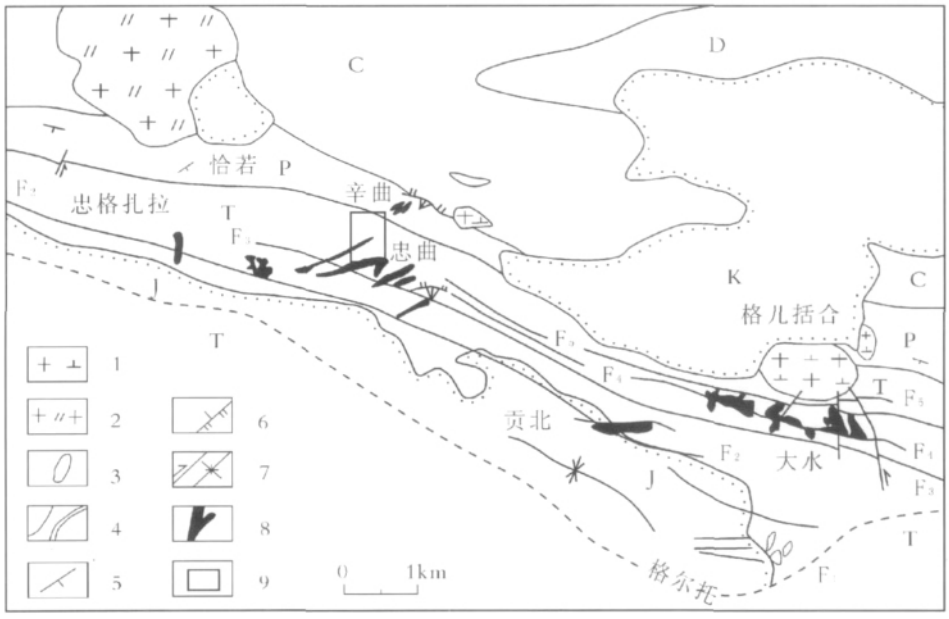

图 1　西倾山金成矿带(大水-忠曲矿段)地质简图

Fig. 1　Geological map of the Dashui-Zhongqu ore block of the Xiqingshan gold metallogenic belt

1—花岗闪长斑岩;2—花岗闪长岩脉;3—方解石脉;4—地质界线;5—地层产状;6—断层;7—向斜;8—矿脉;9—研究区;D—泥盆系;P—二叠系;C—石炭系;T—三叠系;J—侏罗系;K—白垩系;F_1~F_5—断裂

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

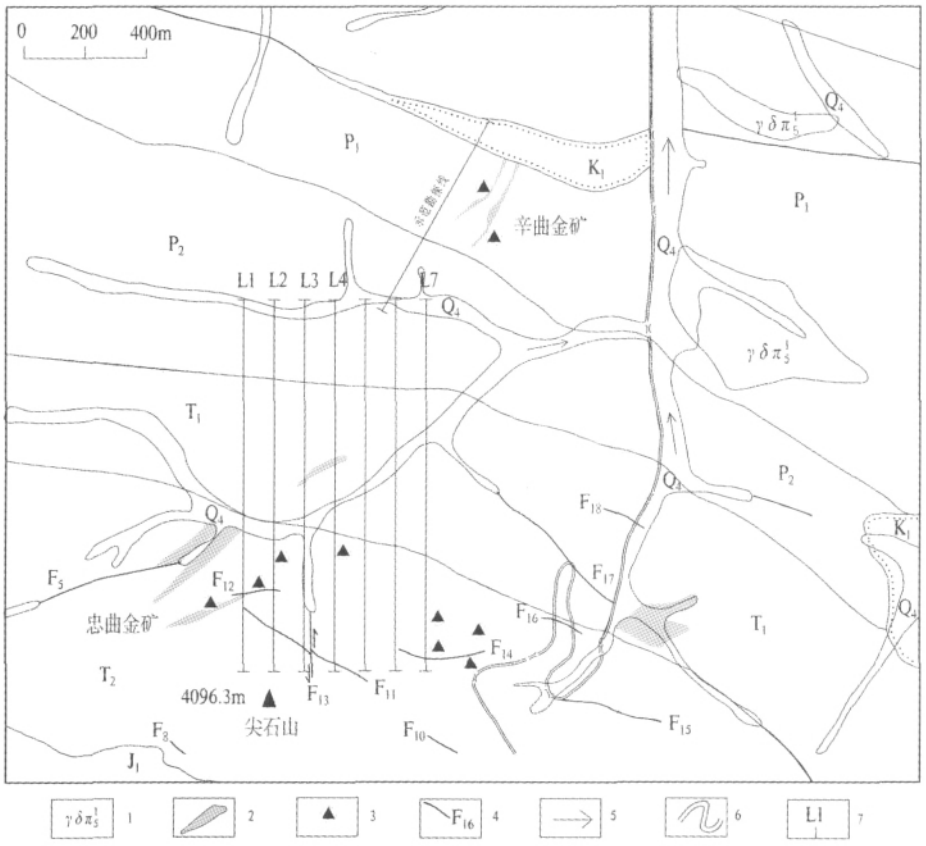

图 2 忠曲金矿区地质和测线布置图

Fig. 2 Geological map of the Zhongqu gold ore district and layout of prospecting lines

Q_4—第四系全新统;K_1—下白垩统;J_1—下侏罗统;T_2—中三叠统;T_1—下三叠统;P_2—上二叠统;P_1—下二叠统;
1—花岗闪长岩;2—方解石脉;3—金矿点;4—断裂;5—水流方向;6—公路;7—勘探线及编号

蚀变强度和矿化强度密切相关。

2 深穿透勘查集成技术

本次研究所使用的深穿透勘查集成技术是一套包含大地电磁测量、地球电化学、气体地球化学方法的多技术方法组合。

可控源大地地磁法(CSAMT):是在 MT(大地电磁法)和 AMT(音频大地电磁法)的基础上发展起来的,探测深度大、分辨能力较强,兼有测深和剖面研究的双重特点[3]。CSAMT 法采用人工可控场源,进行交变电磁场观测,信号强,抗高阻屏蔽作用强,可穿透高阻层,勘探深度可达 1~2km;横向分辨率高,可灵敏发现断层[4-5]。因此,该方法可测取不同深度地质体的电阻率,反演地质构造情况,从而增强矿体预测的效果。

地球电化学方法(CHIM):矿体矿物由于电极电位差异、氧化还原电位差异形成离子,并在地电场、地气、毛细管等作用下发生垂向迁移,在浅表形成离子晕。通过外加电场和离子接收器实现离子信息收集,测量元素特征含量进行隐伏矿床的预测。CHIM 技术在酸性(HNO_3 浓度为 15%)提取液环境下,采用小功率电源(9V)供电,用偶极提取技术,进行 48h 离子信息提取。该方法可以增强异常衬度、垂直定位矿体,这是地球电化学方法最为显著的特点[6-7]。

土壤吸附相态 Hg 测量法:含矿断裂上方的土壤中 $HgCl$、$HgCl_2$、Hg^0 总量要比非含矿断裂上的土壤多,并且土壤吸附相态 Hg 异常能够较好地反映深部的隐伏矿体,通过发现土壤吸附相态 Hg 异常进行隐伏矿床预测[8-9]。

3 已知区示范性研究

为了验证该勘查技术组合的应用效果,首先在

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　矿区各岩(矿)石电阻率实验数据

Table 1　Experimental data of resistivity of each kind of rock (ore) in the Zhongqu gold ore district

岩石类型	破碎带型金矿石	花岗闪长岩型金矿石	卡林型金矿石	近矿灰岩	远矿灰岩
电阻率/Ω·m	265	1250	3226	2510	51800

表 2　已知剖面 3 种方法所获异常的特征

Table 2　Characteristics of anomalies obtained by three methods along a certain profile

异常区段	异　常　特　征
Mx1	异常带(1300~1900Ω·m)深部对应 Au3 矿体，为破碎带型金矿体，电阻值为实验电阻值的 5~7 倍，反演“低阻体”约为破碎带的 7 倍，但对隐伏矿体埋深的反映显著
Mx2	3700m 高程处出现圈闭较好的低阻异常，地质情况有待进一步查证
Mx3	位于二叠系与白垩系不整合界面附近，与矿区北部 NWW 向断裂相吻合
Ⅰ电化学异常段	由 Ag2、Pb1、Pb2、Zn1、Cu1(污染点)异常组成，对应于山沟地形，地层为二叠系碳酸盐岩，地质情况有待进一步查证
Ⅱ电化学异常段	由 Au2、Ag3、Cu3、Pb4、Zn4 元素异常组成。其中，Au、Ag 元素异常完全重合，与 Au3 矿体头部垂向对应；Cu、Pb、Zn 元素异常完全重合，位于 Au、Ag 异常 NE 侧边部，对应于矿体的前缘晕；Au 异常出现典型的脉状矿体地电化学特征[10]
Ⅲ电化学异常段	由 Au3、Ag4、Cu5、Zn6、Pb(弱异常)元素异常组成。Au、Ag 元素重合性好，Cu、Pb 、Zn 位于 Au、Ag 异常 SW 侧边部，对应于二叠系碳酸盐岩与白垩系砂砾岩接触带
Hg1	位于 16~17 号点，为异常下限值的 4~6 倍，推测下方可能存在隐伏断裂 F_1'
Hg2	为单峰异常，峰值位于 23 号点，与已知断裂 F_1 地表出露位置相对应

辛曲金矿区采用深穿透勘查集成技术寻找金矿示范性研究。

CSAMT 法研究结果(表 2、图 3):CSAMT 法实验电参数见表 1，破碎带型金矿石和花岗闪长岩型金矿石电阻率明显低于近矿灰岩；卡林型金矿电阻率相对较高,但远低于远矿灰岩,电阻率差异仍然显著。CSAMT 法发现 3 个低阻异常段 Mx1、Mx2、Mx3,认为它们是由不同类型地质体引起的低阻体，Mx1 低阻体大致与 3 号金矿体(破碎带型金矿)相吻合,深部圈闭处反映了矿体的赋存深度。

CHIM 法研究结果(表 2、图 3):示范剖面 Au3 矿体上方出现了清晰的 Au、Ag、Cu、Pb、Zn 五种元素电化学异常信息，按成矿元素与指示元素异常空间分布关系,综合划分为 3 个地电提取综合异常段。

吸附相态 Hg 研究结果(表 2、图 3):在勘探线上发现 2 个明显的吸附相态 Hg 异常。

研究结果显示，电阻率剖面 Mx1 低阻体产出深度与金矿体赋存位置相对应；在破碎带型金矿体上方,出现了清晰的多元素电化学组合异常;在断裂上方也出现明显的吸附相态 Hg 异常。3 种方法都出现较好的示矿异常，在一定程度上反映了矿体埋深的情况。

由此可见,CSAMT 法、CHIM 法和土壤吸附相态 Hg 法相组合的深穿透勘查集成技术，能够在高原寒冷区快速预测隐伏金矿体，可以运用于外围区寻找相同或相似类型的金矿。

4　综合找矿模式

通过分析矿区的多元信息特征及其与已知金矿体赋存位置的空间关系，参考成矿带内典型矿床的成矿作用,总结找矿标志,建立综合找矿模式,为在外围区开展找矿预测工作提供依据。

4.1　成矿作用分析

西秦岭碰撞造山期，大水弧形构造顶部形成的张性断裂为成矿流体的形成提供了初始空间。与碱质中酸性岩浆岩有关的成矿热液携带深部的成矿物质沿张性裂隙上升至浅表，迅速向围岩微裂隙扩散,并与碳酸盐岩发生交代作用,成矿物质从流体中析出沉淀，使得围岩发生 Au 元素的初步富集,并在有利的容矿空间内形成金矿(化)体。后经喜马拉雅期挤压作用发生褶皱隆升，深部的热卤水通过玛曲–略阳深断裂向上迁移,并与大气降水

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

发生循环，形成混合型成矿流体，叠加改造早期的矿体或使初始矿源层内的 Au 元素发生活化迁移、进一步发生富集。

4.2 找矿标志

(1)地质标志：①地层为三叠系厚层不纯碳酸盐岩；②构造为 NWW—NW 向区域断裂构造带，次级 NWW—NW 向断裂，伴(派)生的近 SN 向、NE 向、NNW—NW 向断裂破碎带及其交叉复合处；③岩浆岩为浅成—超浅成偏碱性闪长岩、花岗闪长斑岩等小岩体或岩株、岩脉；④赤铁矿化、硅化、碳酸盐化蚀变与矿化关系最为密切。

(2)地球物理指标：以 2000Ω·m 作为低阻体上限，低阻体圈闭相对较好，能够反映深部金矿体、隐伏岩体、矿化断裂等低阻体，低阻体在垂向上与高阻体的过渡带大致能够反映低阻体的赋存深度。

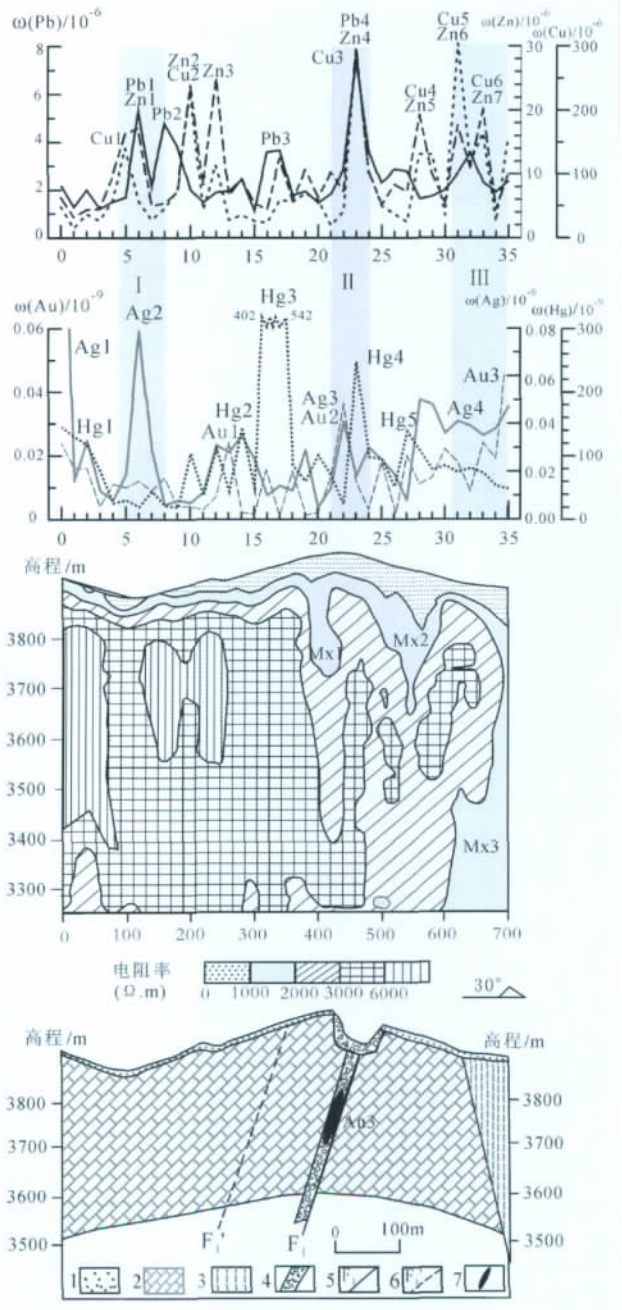

图 3 已知区综合异常剖面

Fig. 3 Comprehensive anomaly profile of known area

1—残坡积物；2—白垩系；3—下二叠统；4—破碎带；5—断裂；6—推测断裂；7—金矿体；异常段说明见表 2

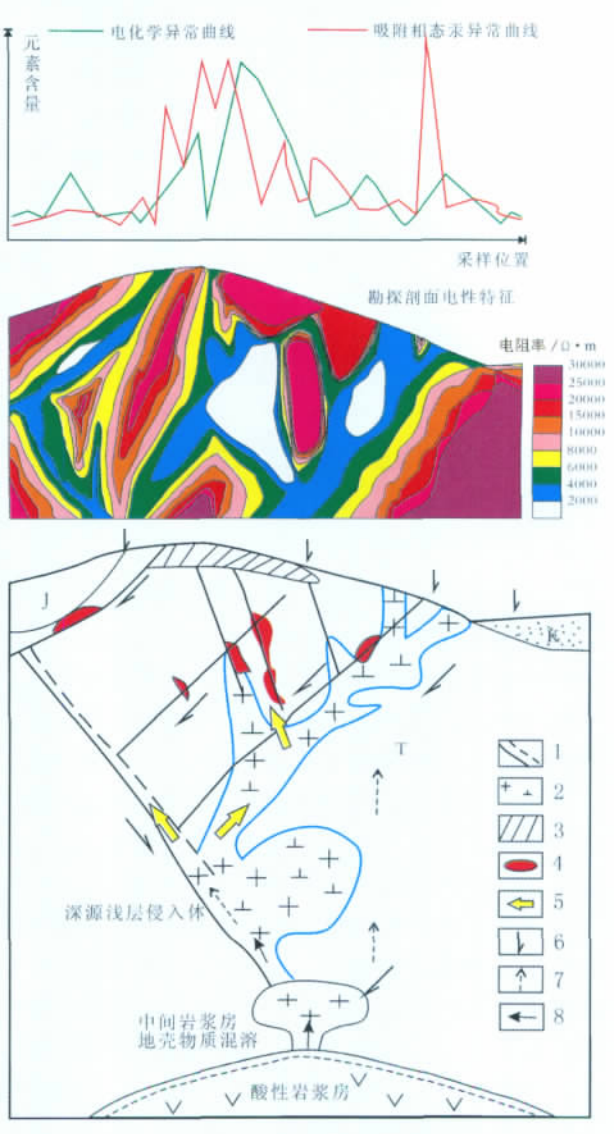

图 4 忠曲金矿区理想找矿模式(据参考文献[11])

Fig. 4 Ideal ore-prospecting model for the Zhongqu gold ore district

K—白垩系；J—侏罗系；T—三叠系；1—断裂；2—中酸性岩体；3—方解石脉；4—金矿体；5—含矿热流体；6—地表水迁移方向；7—热流体迁移方向；8—Au 迁移方向

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(3)地球电化学指标:地电提取以 Au 异常为直接找矿标志,Ag、Cu、Pb、Zn 元素异常为找矿的间接标志。以 Au 异常为中心,重叠或套合有 Ag、Cu、Pb、Zn 异常且异常之间连续性较好的地段,为找矿的有利部位。

(4)吸附相态 Hg 异常标志:在剖面上表现为狭窄的单峰高强度异常,平面上表现为线性或串珠状异常,通常是由断裂所引起的;若在剖面上连续多点呈现出较高强度的宽幅异常,则为多条断裂或者由热液矿体引起的。

4.3　找矿模式

综合成矿作用、找矿标志,结合忠曲矿区的地质特征和示范研究结果,构建了忠曲矿区深穿透勘查集成技术理想找矿模型(图 4)。

5　外围区找矿预测

示范研究表明,CSAMT 法、CHIM 法和吸附相态 Hg 测量法技术组合在高原寒冷区寻找隐伏矿体具有一定的三维定位效果。依据忠曲金矿区的理想找矿模型,综合矿区的地质、矿床地质资料,在矿区外围开展了隐伏金矿预测工作(剖面布置见图 2)。

5.1　综合异常区圈定

为了更直观地研究各种方法异常的空间分布形态,本文采用 3D Mine 矿山软件建立忠曲金矿区综

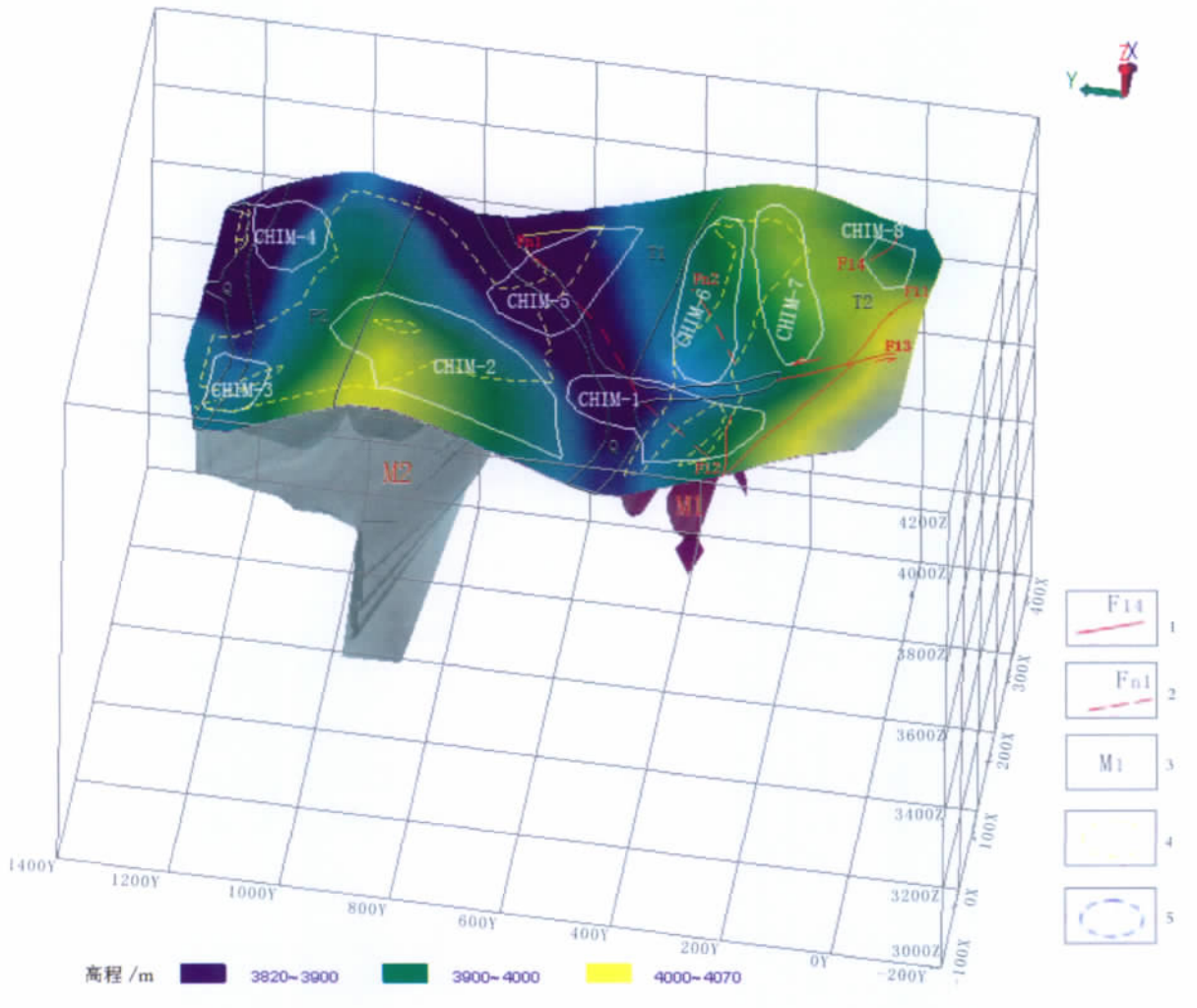

图 5　忠曲金矿区综合异常

Fig. 5　Comprehensive anomalies in the Zhongqu gold ore district

Q—第四系;T_2—中三叠统;T_1—下三叠统;P_2—上二叠统;1—断裂;2—由吸附相态 Hg 异常推测的断裂;3—低阻体及编号(≤2000Ω·m);4—低阻体地表交线;5—地电化学综合异常区(图中为白色线条)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

合异常三维模型,快速定位预测隐伏矿体。

(1)CSAMT 异常

所圈定 M1、M2 低阻体分别位于找矿预测区北侧和南侧,低阻体间发育有 F_{n1} 断裂,这 2 个低阻体的形成与 F_{n1} 断裂的张扭部位或者次级断裂具有一定的联系。M1 低阻体长轴方向为 EW 向,位于中三叠统内,与中三叠统倾向相反,呈现出一定程度的"穿插"关系。NE 向断裂 F_{n1}、F_{n2} 穿过低阻体,并穿切 NWW 走向展布的三叠系碳酸盐岩地层。低阻体西侧出现分支现象,位于 F_{n1}、F_{12} 及 F_{13} 断裂交会部位北侧边部,推测低阻体可能是断裂束总体向北倾斜的结果。M2 低阻体规模较大,水平方向上呈浑圆状,在三维立体空间上呈漏斗状,自地表向深部呈现突变式收缩的特点,低阻体深部圈闭情况不明,推测深部可能有隐伏花岗闪长岩体侵入(图5)。

(2)CHIM 异常

将主成矿元素(Au)及指示元素(Au、Ag、Cu、Pb、Z)地球电化学异常进行叠加,依据预测区内各元素的分布特征、异常叠加和套合程度,共划分为 8 个地电化学异常带,依次编号为 CHIM-1~CHIM-8(图5)。

(3)吸附相态 Hg 异常

测区内发现 6 个土壤吸附相态 Hg 异常,其中以Hg2、Hg5、Hg6 异常强度较大,异常分带性完整,异常趋势明显。异常主体呈北东—北东东向延伸,局部为近东西向延伸,推测其为隐伏断裂引起的,即 F_{n1} 和 F_{n2} 断裂引起的(图 5)。

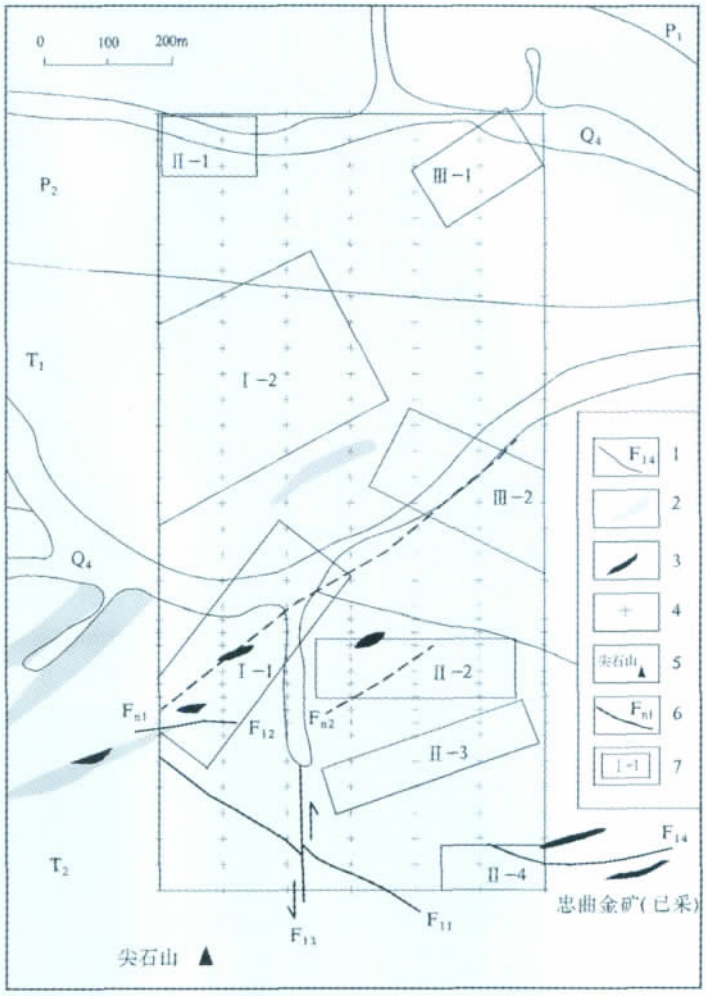

图 6 忠曲金矿区找矿预测靶区图

Fig. 6 Map of exploration targets in the Zhongqu gold ore district

Q_4—第四系;T_2—中三叠统;T_1—下三叠统;P_2—上二叠统;P_1—下二叠统;1—断裂;2—方解石脉;3—金矿脉;4—采样位置;5—尖石山主峰;6—推测断裂;7—异常靶区及编号

5.2 综合找矿靶区划分和评价

根据上述综合异常的特征,结合地质情况将预测区按找矿潜力大小依次划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类找矿靶区(图 6)。

(1)Ⅰ类找矿靶区

Ⅰ-1 靶区:CHIM 异常以 CHIM-1 为主,成矿元素 Au 异常强度高,与 Ag、Cu、Pb、Zn 套合较好。综合异常与 M1 低阻体及其高—低阻突变带吻合程度高,且低阻体圈闭情况较好,同时伴随规模较大的土壤吸附相态 Hg 高浓度异常,加之地层岩性和构造对成矿有利,找矿潜力最大。

Ⅰ-2 靶区:以 CHIM-2 综合异常带为主体,对应有规模大且延伸较大的低阻体 M2,NE 向断裂穿过地层,此外深部可能有(弱)矿化中酸性岩脉侵位,找矿潜力较大。

(2)Ⅱ类找矿靶区

Ⅱ-1 靶区:以 CHIM-3 综合异常带为主,分布较集中,但规模较小且位于冲沟环境,部分元素异常未圈闭,并伴随有吸附相态 Hg 异常出现,与 M2 低阻体北侧的较低阻体(≤1400Ω·m)和综合异常完全重合,具有一定的找矿潜力。

Ⅱ-2~Ⅱ-4 靶区:以 3 个 CHIM 异常为主体,

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

尤其是 Au 异常呈 NEE 向近平行展布,与矿区雁列式矿体排布类似,并伴随有 2~3 种指示元素重合或套合,部分与吸附相态 Hg 异常套和。与低阻体 M1 或低—高阻体突变带吻合,均位于中三叠统镁质碳酸盐岩地层内。认为具有一定的找矿潜力。

(3)Ⅲ类找矿靶区

Ⅲ-1 靶区:区内 CHIM 各元素重合性较高,与低阻体 M2 相对应,但规模相对较小,Au 元素弱异常,而且受有机质干扰可能性较大,找矿前景不大。

Ⅲ-2 靶区:靶区具有一定规模的指示元素异常组合,元素之间重合性高,Au 异常呈零星分散状分布于综合异常的边部,与低阻体或突变带具有一定程度的重合,所处地层为成矿有利地层,为找矿可疑地段。

6 结　语

(1)示范研究表明,以 CSAMT 法、CHIM 法和吸附相态 Hg 测量法组合的深穿透勘查集成技术,能够在高原寒冷地区快速定位预测隐伏矿体。笔者认为该集成技术是一套成功高效的隐伏矿体定位组合,值得在外围区探寻类似矿体中运用。

(2)忠曲矿区综合找矿模式可总结为:金矿通常位于地电化学异常正投影下方、电阻率高低突变带偏低阻体一侧。配套吸附相态 Hg 测量推测隐伏断裂的产出位置,综合评价更可靠。

(3)经靶区划分评价认为,Ⅰ类找矿靶区属于最优找矿地段,可优先投入浅部工程进行验证;Ⅱ类找矿靶区也具有一定的找矿潜力,值得进一步研究。

参考文献

[1]娇杨,滕家欣,冯治汉.甘肃地球化学景观特征及区域地球化学方法技术评价[J].西北地质,2003,36(3):111-114.

[2]苏建平,张翔.甘肃金矿成矿规律和成矿区带的划分[J].黄金地质,2003,9(3):1-8.

[3]于昌明.CSAMT 方法在寻找隐伏金矿中的应用[J].地球物理学报,1998,41(1):133-138.

[4]石昆法, 张庚利,李英贤,等. CSAMT 法在山东蓬家夼地区层间滑动角砾型金矿成矿预测中的应用[J].地质与勘探, 2001,37(1):86-90.

[5]黄力军,张威,刘瑞德.可控源音频大地电磁测深法寻找隐伏金属矿的作用[J].物探化探计算技术,2007,29(增刊):55-59.

[6]罗先熔,康明,欧阳菲,等.地电化学成晕机制、方法技术及找矿研究[M].北京:地质出版社,2007:46-70.

[7]Alekseev S G, Dukhanin A S, Veshev S A,et al.Some aspects of practical use of geoelectrochemical methods of exploration for deep-seated mineralization[J]. Journal of Geochemic Exploration, 1996, 56:79-86.

[8]胡振清.土壤中的吸附态汞、全汞及其找矿意义[J].地质与勘探,1984,(6):67-71.

[9]栾继琛,赵友方.壤中吸附相态汞测量方法及其找矿效果[J].地质与勘探,1984,(1):48-56.

[10]罗先熔,王桂琴,杜建波,等.锑矿地电化学异常特征、成晕机制及找矿预测[J].地质与勘探,2002,38(2):59-64.

[11]李真善,谢建强,李文军,等.玛曲县格尔柯金矿床控矿地质条件及其矿床成因探讨[J].甘肃地质学报,2002,11(1):50-58.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net