甘肃金川铜镍矿床Ⅰ矿区深部边部地质-地电化学-地球物理多元信息成矿预测

李天虎[1], 罗先熔[2], 彭桥梁[1], 王 伟[1],罗小平[1],宋忠宝[1],文雪琴[3]
LI Tian-hu[1], LUO Xian-rong[2], PENG Qiao-liang[1], WANG Wei[1],
LUO Xiao-ping[1], SONG Zhong-bao[1], WEN Xue-qin[3]

1. 中国地质调查局西安地质调查中心,陕西 西安 710054;
2. 桂林理工大学,广西 桂林 541004;
3. 太原理工大学地球科学系, 山西 太原 030024
1. *Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey,Xi'an,710054, Shaanxi, China;*
2. *Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China*;
3. *Department of Geoscience, Tayuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China*

摘要:在综合研究分析金川铜镍矿区前人资料的基础上,经现场地质调查、收集地质资料,总结了矿区的成矿规律,有针对性地在Ⅰ矿区的北东侧开展了地质-地球电化学-地球物理多元信息的深部边部成矿预测。根据地电化学数据的统计结果,对矿区元素共生组合和成矿作用、成矿期次等地球化学特征进行了探讨,以此确定了地电化学综合异常;在掌握矿区岩石、矿石物性特征的情况下,通过地球物理勘探推测在Ⅰ号矿体与 F1 断裂之间存在一隐伏的超基性岩体。最终对矿区进行地质-地电化学-地球物理特征的综合分析,圈定了测区的找矿远景区。

关键词:金川铜镍矿;地球电化学; 多元信息 ;成矿预测
中图分类号:P618.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2552(2012)07-1192-09

Li T H, Luo X R, Peng Q L, Wang W, Luo X P, Song I B, Wen X Q. Geological-geoelectrochemical-geophysical multifactor information ore prognosis in the depth and on the edge of No. I mining area of the Jinchuan copper-nickel sulfide ore deposit, Gansu Province. ***Geological Bulletin of China,*** **2012,31(7):1192-1200**

Abstract: Based on an analysis of available data, the authors made field geological investigation, collected geological data and summed up the metallogenic regularity in Jinchuan copper-nickel sulfide ore deposit. Multifactor information geological-geoelectrochemical-geophysical ore-prospecting work was carried out on the northeast side of No. Ⅰ mining area. According to statistics of geoelectrochemical data, the authors investigated the biogeochemical characteristics of the mining area in such aspects as element association, mineralization and metallogenic stages, and then delineated the geoelectrochemical comprehensive anomaly. With the understanding of physical characters of rocks and ores, the authors inferred that there exist a concealed ultrabasic rock mass between No. Ⅰ mining area and F1 fault based on geophysical prospecting. On the basis of a geological-geoelectrochemical-geophysical integrated analysis, the promising targets were delineated in the study area.

Key words: Jinchuan copper-nickel sulfide ore deposit; geoelectrochemistry; multifactor information; metallogenic prognosis

收稿日期:2011-09-19;**修订日期**:2012-01-29
资助项目:国际科技合作项目《矿产资源多元信息勘查技术开发及综合示范研究》(编号:2007DFA20910)和山西省自然科学基金项目《黄土覆盖区金属矿含矿信息迁移机理研究》(编号:2009021007-1)
作者简介:李天虎(1982-),男,在读硕士,助理工程师,从事矿产调查工作。E-mail:litianhu2005@163.com

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

1　区域地质背景

金川铜镍矿床大地构造位置位于华北地台阿拉善地块西南缘的龙首山隆起中，矿床南邻活动强烈的祁连板块,北接相对稳定的阿拉善地块。本区区域构造发育[1],主要断层有 F_1、F_8、F_{17}、F_{23}、F_{16}、F_{16-1}等(图 1)。区内出露地层为前长城纪龙首山群,其下部为白家嘴子组，系一套经历高角闪岩相部分重熔的变质岩石,由黑云母斜长片麻岩、斜长角闪岩和大理岩组成,其上部为由片岩、片麻岩和大理岩组成的塔马子沟组成。区内岩浆岩发育,镁铁质—超镁铁质岩体(金川岩体)沿龙首山隆起断续分布于该隆起中东段,形成于元古宙,并侵入到白家嘴子组进而成矿。

金川铜镍硫化物矿床的容矿岩体大致以 10°交角不整合侵位于前长城系白家嘴子组中(图 1),岩体直接与片麻岩、大理岩、条带状混合岩接触,呈不规则的岩墙状产出。金川现存岩体长约 6500m,宽 20 多米到 500 多米,延深数百米,最深超过 1100m。岩体东西两端被第四系覆盖,中部出露地表，上部已经遭到剥蚀，岩体基岩面积约为 1.34km^2。岩体走向 NW50°,倾向 SW,倾角 50~80°。岩体由西向东分为 4 段,依次编号为Ⅲ、Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ四个矿区(图 1)。

大量观测资料表明，金川含矿岩体为一复式侵入体,至少分 4 期先后侵入成岩成矿[2]。

2　金川Ⅰ矿区矿床地质

岩体出露地表长 1500m,介于断层 F_8 与 F_{16-1} 之间,西部最大宽度达 320m,向东逐渐变窄,宽仅 20 余米,倾向延深大于 700m。岩体走向 NW50~60°,倾向 SW,倾角较陡,一般为 70~80°。

含矿超基性岩体侵位于前震旦系片麻岩、斜长角闪岩和大理岩中，这套变质岩既为含矿岩体的围岩,也是部分矿体的围岩。

矿区地层为一向 SW 倾斜的单斜构造，层间褶皱较发育,常形成一些紧闭的小型背斜和向斜,褶皱轴向多为北东向。矿区断层较发育,按其产状可分为以下 3 组(图 2):①NW 向逆断层,以 F_1、F_{16} 断层为代表,该组断层为矿区的主干断层,力学性质为压扭性，断层带平行密集展布，其间距由北向南逐渐加大;②NEE 向断层,以 F_8、F_{16-1} 为代表;③近 SN 向平推断层,以 F_{10} 为典型代表。

矿体的空间产出与构造关系十分密切，构造不仅控制着含矿岩体的空间展布，也控制着矿体的空间定位。深大断裂控制着含矿超基性岩体的空间

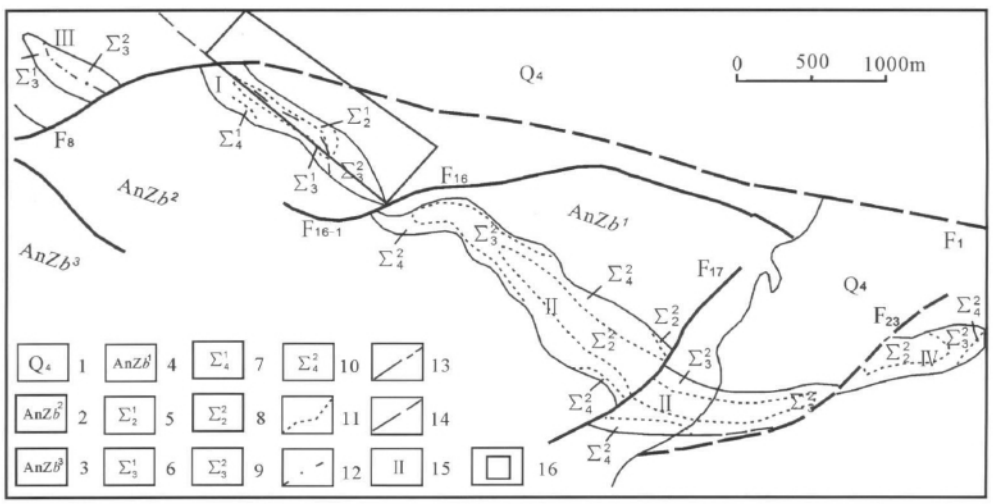

图 1　金川岩体地质略图[1]

Fig. 1　Geological sketch map of Jinchuan rock mass

1—第四系全新统;2—前长城系白家嘴子组中段;3—前长城系白家嘴子组上段;4—前长城系白家嘴子组下段;5—第一期含二辉橄榄岩;6—第一期二辉橄榄岩;7—第一期橄榄二辉岩;8—第二期含二辉橄榄岩;9—第二期二辉橄榄岩;10—第二期橄榄二辉岩;11—侵入体岩相界限;12—侵入期次界限;13—地质实测、推测界限;14—实测、推测断层界限;15 —矿区编号;16—工作区范围

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

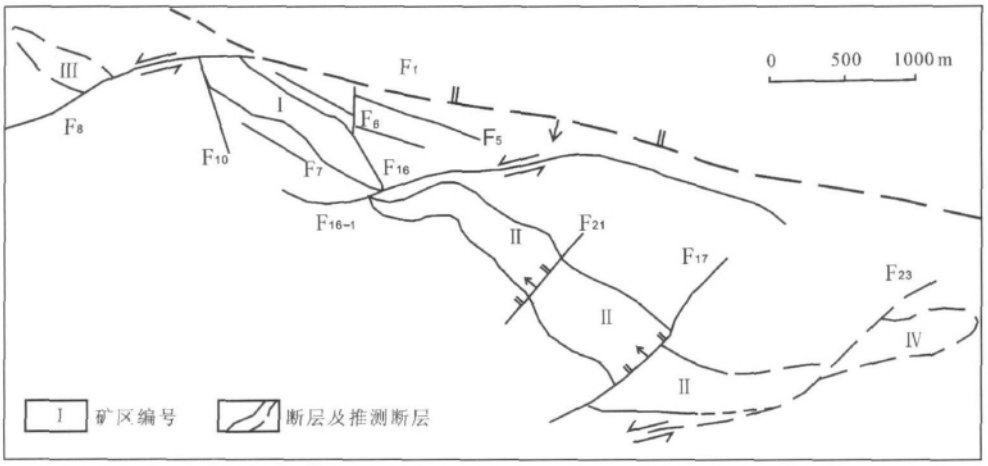

图 2 金川矿区断层图[9]

Fig. 2 Fault map of the Jinchuan ore district

分布与延伸;超基性岩体上的 NE 向横跨褶皱是层状矿体加厚、构造变质热液叠加的有利部位,因而有利于厚大的富矿体的形成;与超基性岩体斜交的 EW 向断裂具多次活动的特点,使含矿岩体多次破碎,并在部分地段将岩体拖曳旋转成柱状,后期构造-变质热液携带成矿物质在断裂带或破碎地段聚集成矿。

区域内岩浆活动频繁,以加里东期最为强烈,吕梁期、海西期次之,燕山期微弱。与含矿有关的超基性岩主要形成于吕梁期。

3 地电化学法找矿

以电化学迁移为原理的地球化学测量找矿法就叫地电化学勘查法[4-5],其形成原理如图 3 所示[6]。本工作区采用的地电化学方法为地电提取法和土壤离子电导率法。

地电提取法利用人工电场的作用,使地下岩石中的离子动态平衡被破坏,促使离子向离子收集器中迁移。根据收集器收集到的样品(泡塑)中成矿离子的含量来判断深部是否有隐伏矿体存在。

电化学溶解作用使矿体和疏松沉积层中阴阳离子按一定规律迁移和分布,使岩石和土壤中原有的物化参数(土壤导电性和土壤中各种离子含量)发生变化,如各种阴阳离子浓度增大,介质离子电导率也随之增高,而土壤离子电导率能较好地反映出土壤中所有可溶性离子的总浓度,也是一个

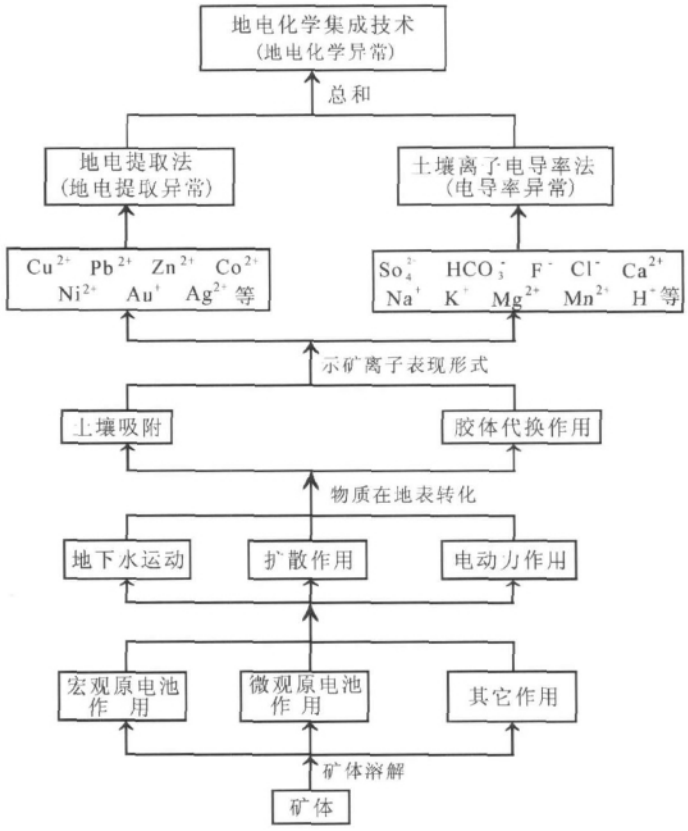

图 3 地电化学技术形成原理

Fig. 3 Principle of the geoelectrochemical technology

示矿信息较强的物理化学综合指标。

3.1 地电化学异常特征

本次工作区位于Ⅰ矿区 NE 侧,共布置 13 条地电化学测线(图 4—图 6),测网密度为 100m×20m。对

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

表 1　地电化学背景值和各浓度带值

Table 1　Geoelectrochemical background value and values of various concentration zones

元 素	Cu/10^{-6}	Ni/10^{-6}	Co/10^{-6}	Ag/10^{-6}	Pb/10^{-6}	Zn/10^{-6}	Ti/10^{-6}	V/10^{-6}	Mn/10^{-6}	土壤离子电导率 /μs·cm^{-1}
背景值	4	1.25	0.008	0.006	2.4	4	8	20	3.5	130
异常下限	15	2.5	0.025	0.02	4.5	19	17	24	14	200
外浓度带	15	2.5	0.025	0.02	4.5	19	17	24	14	200
中浓度带	30	5	0.05	0.04	9	38	34	36	28	300
内浓度带	60	10	0.1	0.08	18	76	68	48	56	400

其进行了 Cu、Ni、Co、Ag、Pb、Zn、Ti、V、Mn 九种元素的地电提取找矿研究和土壤离子电导率找矿研究。

将所得数据经过概率格纸法求出其背景值和异常下限(表 1),并以此做出不同元素异常图,主要成矿元素 Cu、Ni、Co 异常如图 4—图 6 所示。

从图 4—图 6 中可以看出:主成矿元素 Cu 异常反应较好，在超基性岩的 NE 侧有 2 条与已知岩体平行产出且三带齐全的带状异常(Cu-3、Cu-12),应为已知超基性岩体所引起的。在 8~18 线上有 Cu-4、Cu-5、Cu-6、Cu-7、Cu-8 带状异常平行于超基性岩体产出，除 Cu-6 外其余异常三级浓度带齐全,且 Cu-5 异常规模较大,走向长度约为 550m,最大异常宽度约为 100m,存在 3 个浓集中心,异常最高值出现在 12 号线上,异常值为 150.4×10^{-6}。另外在 26、32 线的北侧有 2 个三级浓度带齐全的异常出现，其中 32 线 8 号点的异常值达 625.8×10^{-6},异常衬度为 156。主成矿元素 Ni 存在一形似钳子状的异常(Ni-2),其两边平行于超基性岩体产出,其中一边与 Ni-6 紧邻超基性岩体，应与超基性岩体有关，另一边靠近 F1 在 14 线上存在 1 个三带齐全的浓集中心。此外在 26 线上存在 3 个异常,其中 1 个三带齐全。30~32 线的北侧存在 1 个两带齐全的异常；伴生元素 Co-5、Co-14 平行于岩体产出,应与岩体有关。在 10~18 线的北侧存在 1 个平行于岩体的带状异常,规模较大,存在 1 个浓集中心,三带齐全。在 16~18 线的南侧存在 1 个三带齐全的异常带。在 26、30、32 线的北侧存在外中带齐全的浓集中心。

表 2　金川矿区岩石、矿石物性参数

Table 2　Physical parameters of rocks and ores from the mining area

岩石矿石名称	$k/4\pi\times10^{-6}$SI		$Jr/10^{-3}$A·m^{-1}		$\sigma/10^{3}$kg·m^{-3}		ρ/Ω·m		η/%	
	范 围	常见值	范 围	常见值	范 围	常见值	范 围	常见值	范 围	常见值
二辉橄榄岩	400~46700	3900	100~15400	900	2.51~2.89	2.72	85~6670	320	0.72~82.3	26
含辉石橄榄岩	800~44000	4300	100~8900	900	2.2~2.92	2.67	240~1100	400	0.83~69.4	10
橄榄辉石岩	1200~45600	3800	100~11400	800					1.44~69	10.5
橄榄岩	1100~12400	2300	10~8200	600	2.53~2.87	2.72	60~500	300	1.71~85.5	25.7
混合岩	0~5100	600	0~1400	200			30~400	200	1.17~5.91	3.4
花岗岩	0~2800	0	0~700	0			240~1160	700	0.75~3.87	2.0
大理岩	1~2400	0	0~1300	0	2.27~2.9	2.6	440~620	500	0.37~4.28	1.1
斜长角闪岩	0~11900	200	0~4000	200					0.81~6.3	2.1
黑云母片麻岩	0	0	0	0					2.53~15.6	4.6
片麻状花岗岩	0~800	400	0~300	100	2.5~2.58	2.5	100~900	3600	2.19~4.75	2.9
透闪石蛇纹石片岩		5700		1100	2.27~2.87	2.59			1.91~54.6	16.2
辉绿岩		2300		400					2.14~2.26	2.2
星点状矿石	1500~6600	4300	200~1800	800	2.5~3.1	2.73	10~120	62	12.6~16.5	25.7
斑状矿石	2500~7400	6100	200~1700	500			50~250	90	37.5~87.6	55.7
海绵状矿石	4600~9500	6600	1600~2200	1900	2.72~3.58	2.92	0~50	20		
细脉状矿石					2.56~2.89	2.77				

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

3.1.1 地电提取元素异常的多元统计和元素组合异常的特征

相关关系指现象之间客观存在的、不完全确定的依存关系。相关系数则是表述变量之间相关关系密切程度的指标，可以更直观地说明变量之间相关的密切程度。

因子分析以多变量之间的相关关系为基础，据此将变量加以组合，构成最少个数的独立的新变量——因子，从而表达变量的总变异，达到简化变量、揭示其变异原因的目的。每一个因子在地质上均可以代表变量之间的一种基本结合关系，往往指示出某种地质上的共生组合和成因联系。用因子代替原始变量，不仅原始变量的相关信息损失无几，而且更能反映地质现象的内在联系[7]。

通过相关性分析可知：Cu、Ni、Co，Co、Ni、Ti、Mn，Ag、Pb、Zn 的相关性较好。

在因子分析中，前 4 个因子的累计方差贡献值达到 87.672%，基本能比较全面地反映所有的地质信息，因此选取前 4 个因子对地电提取异常进行分析。根据因子得分值，4 个主因子代表了不同的元素组合，F_1 因子代表 Co、Mn、Ti，F_2 因子代表 Ag、Pb、Zn，F_3 因子代表 Cu、Ni，F_4 因子代表 V。

根据因子分析的结果，做出 Cu-Ni 元素组合异常图、Co-Mn-Ti 元素组合异常图和 Ag-Pb-Zn 元素组合异常图（图 7—图 9）。

从图 7—图 9 中可以看出：Cu-Ni 元素组合异常基本平行于超基性岩体产出，紧邻超基性岩体产出 1 条平行于岩体的 Cu-Ni 组合异常带，应为已知岩体所引起的。在 12~18 线的中下部和 14~18 线的北侧有规模较大的 Cu-Ni 组合异常带出现。另外在 26、32 线的北侧也有较好的 Cu-Ni 组合异常出现，推测应为隐伏岩体所引起的 Co-Mn-Ti 元素组合异常的分布特征与 Cu-Ni 元素组合异常基本一致。Ag-Pb-Zn 元素组合异

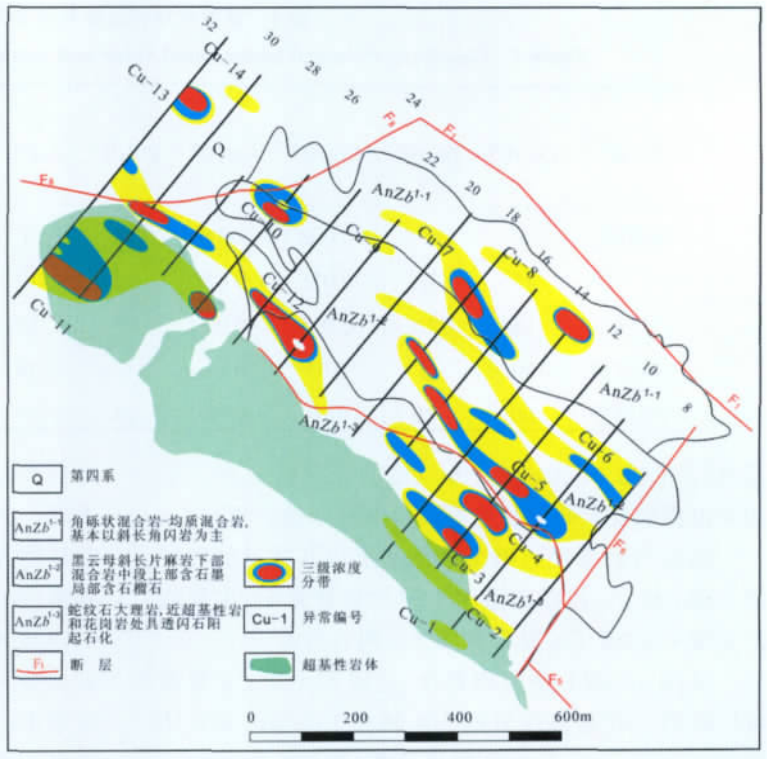

图 4 地电提取 Cu 异常

Fig. 4 Cu anomaly extracted by geoelectrochemical technology

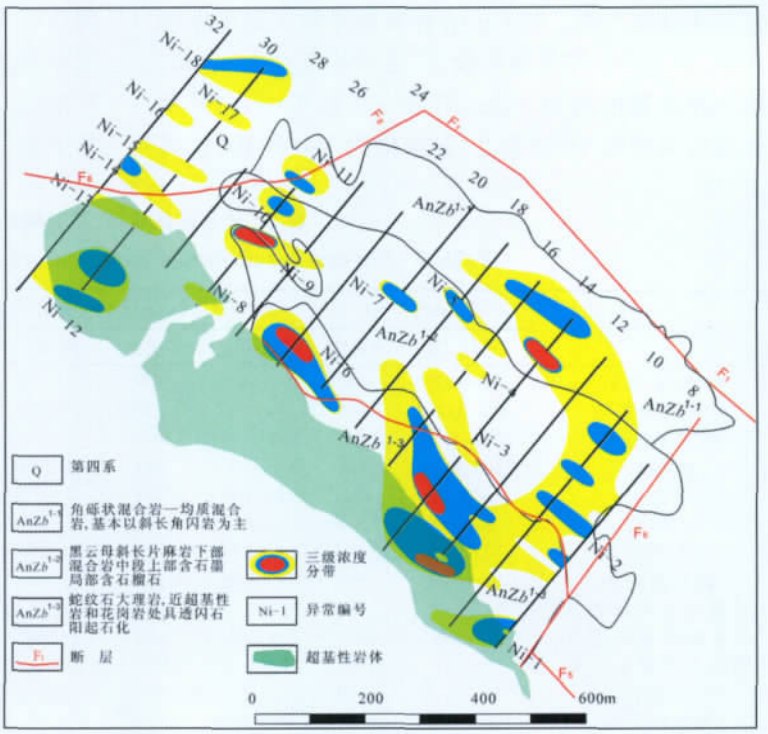

图 5 地电提取 Ni 异常

Fig. 5 Ni anomaly extracted by geoelectrochemical technology

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

常主要分布在 12~16 线上，另外在 26、32 线的北侧也出现了较好的 Ag-Pb-Zn 元素组合异常。

3.1.2　土壤离子电导率异常特征

经作图分析，在工作区共划分出 9 个土壤离子电导率异常(图 10)。土壤离子电导率异常具有以下几点特征：①从分布上看，土壤离子电导率异常主要分布在含矿超基性岩体、白家咀子组下段中岩性段($AnZb^{1-2}$,黑云斜长片麻岩)、白家咀子组下段下岩性段($AnZb^{1-1}$,角砾状混合岩-均质混合岩)地层中,在白家咀子组下段上岩性段($AnZb^{1-3}$,蛇纹大理岩)中也略有分布。②土壤离子电导率异常的分布与测区的断裂构造有很密切的联系，如:Con-7 号异常经过 F_8 且距 F_1 较近,Con-1、Con-2、Con-3、Con-5 号异常位于或邻近 F_{16}、F_6，Con-9 号异常位于 F_8 上。

3.2　对地电化学异常认识

集成地电提取法和土壤离子电导率法所得到的异常,并结合测区的地质情况,得到以下几点认识。

(1)在已知的含矿超基性岩体上均测出了很好的地电提取异常和土壤离子电导率异常，说明上述 2 种电化学方法在该区找矿是可行且有效的。

(2)测区内的异常严格受断裂构造的控制,且主要受 NW 向断裂的控制。

(3)从异常组合图中可以看出电提取 Cu、Ni、Co、Ti、Mn 异常的重合性较好,且浓集中心的吻合度也较好；虽然电提取异常与土壤离子电导率异常的重合性不及 Cu、Ni、Co、Ti、Mn 强,但在存在电提取异常的地段或其附近总会出现土壤离子电导率异常。这说明电提取异常与土壤离子电导率异常在某些地段存在位置上的偏移,可能与各元素的活动性、地表的地质环境有关。所以，在综合分析电化学异常时应该考虑到这种异常在水平位置上的偏移现象。

(4)综合电化学异常可以看出,电化学综合异常主要分布在 12~18 线的 SW、NE 侧和 26、32 线的北侧。

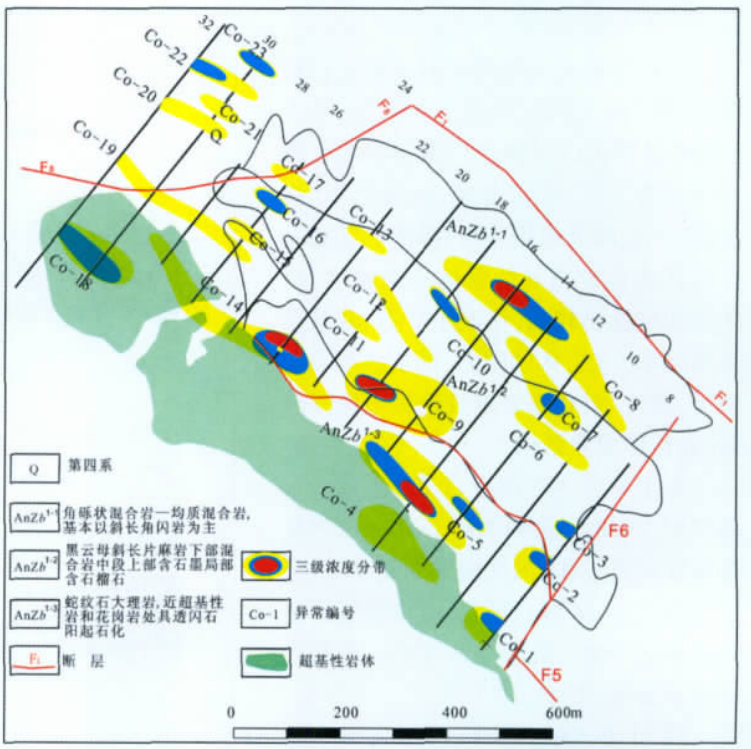

图 6　地电提取 Co 异常

Fig. 6　Co anomaly extracted by geoelectrochemical technology

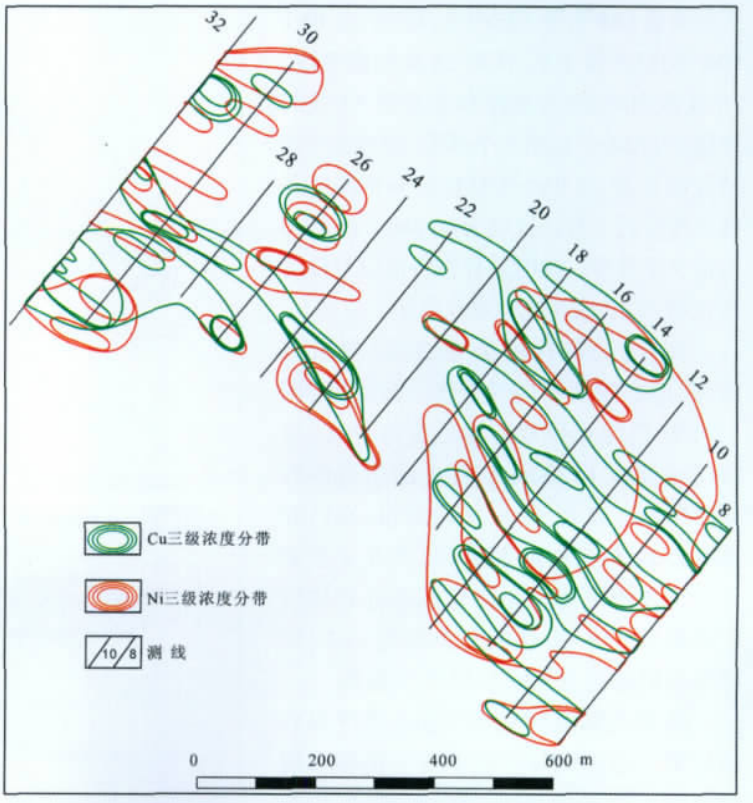

图 7　地电提取 Cu、Ni 组合异常

Fig. 7　Composite Cu-Ni anomaly extracted by geoelectrochemical technology

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

4 地球物理特征

岩石与矿石的物理性质主要是以付开泉等[6](表 2)的资料为主要依据,从表 2 中可以看出以下特点:①铜镍硫化物矿体具有三高(即高密度、高极化率、高磁性)一低(即低电阻率)的特征。②超基性岩体或含矿超基性岩体一般密度、极化率和磁性仍较高,仅次于矿石,并且是高电阻率。③岩体的围岩、深变质岩一般密度、磁性、极化率普遍较低和电阻率较高,往往形成背景场。

在Ⅰ矿区 NE 侧进行了 100m×40m 测网的 TEM 测量和 100m×10m 测网的高精度磁测工作,测区内共布设了 10 条物探测线 8~26 线(图 11)。将物探野外数据经过处理,做出测区 TEM、高精度磁测异常图(图 11、图 12)。

图 11 是 TEM 晚时道异常平面剖面图,反映了测区内深部低阻体异常的分布规律。为便于下面的分析,图中划分为 3 个异常,编号为 TEM-1、TEM-2 和 TEM-3,分别位于 22 线至 26 线的南西段、16 线至 20 线的北东段和 8 线至 14 线的中段。TEM-1 包括 2 个异常,均为宽双峰特征的异常。TEM-2 只有 1 个异常,3 条线上晚时道异常特征均为宽单峰。TEM-3 包括 2 个异常,晚时道异常特征以双峰为主,8 线和 12 线左侧为单峰特征。

图 12 为磁化极上延 200m 异常平面图,地表磁性不均匀干扰已被滤掉。图 12 中红色为正异常,绿色为负异常,反映了地面以上 200m 高度上隐伏岩体的异常特征。从图 12 中可以看出,在已知超基性岩体与 F_1 断裂之间,存在 1 个磁异常,推测可能是由隐伏超基性岩体所引起的;在 18~20 线的北侧突出一块,可能是由局部隐伏的小岩体所引起的。

综合高精度磁测和 TEM 法所得到的异常,考虑到异常在平面上的展布规律及其与已知超基性岩体、矿带、F_1 大断裂带的平行关系,根据近矿外围的地层

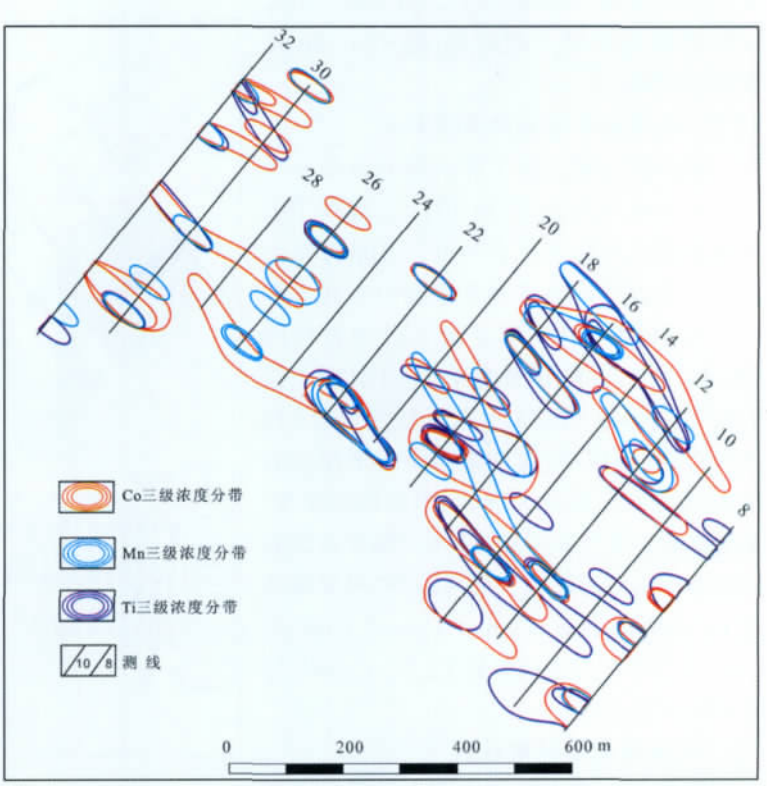

图 8 地电提取 Co、Mn、Ti 组合异常

Fig. 8 Composite Co-Mn-Ti anomaly extracted by geoelectrochemical technology

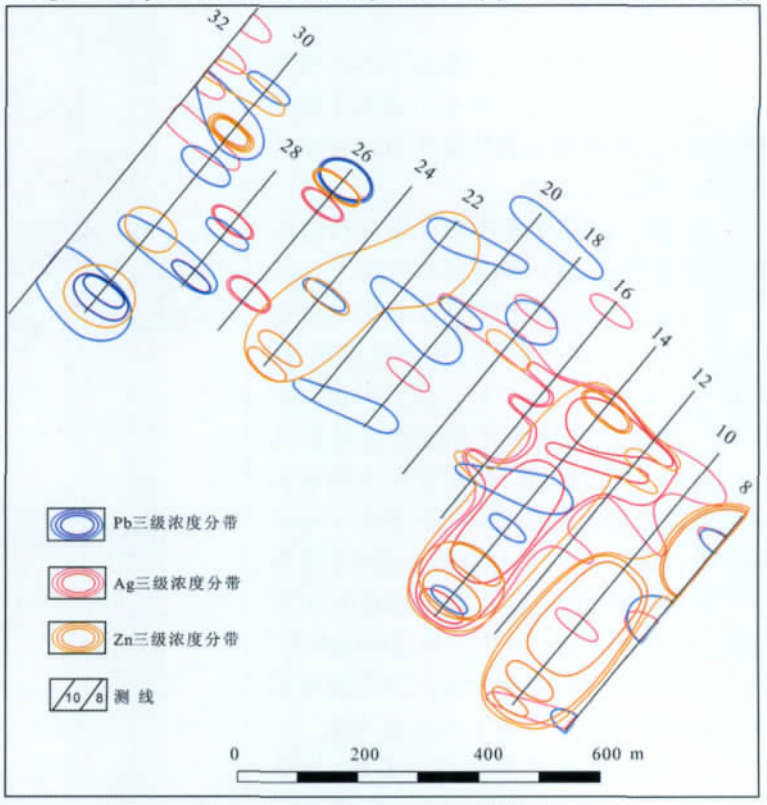

图 9 地电提取 Ag、Pb、Zn 组合异常

Fig. 9 Composite Ag-Pb-Zn anomaly extracted by geoelectrochemical technology

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

磁性特征,推测已知矿带和 F_1 断裂带之间存在一条未知的隐伏超基性岩体带和隐伏矿化带。

5　找矿标志的确定

找矿标志是指能够直接和间接地指示矿床存在或可能存在的一切现象和线索。根据对金川铜镍硫化物矿床控矿因素和成矿规律的分析,结合地质、地球电化学、地球物理实际探测的结果,将Ⅰ矿区隐伏矿找矿标志划分为三大主要标志,即地质标志、地球电化学标志和地球物理标志。

(1)地层:含矿超基性岩体主要侵位于大理岩、片麻岩和斜长角闪岩中。其中片麻岩、斜长角闪岩化学性质稳定,透水性差,是较好的隔挡层,使成矿物质能够在超基性岩浆内充分结晶分异。大理岩则化学性质活泼,有利于形成接触交代型矿化。

(2)构造:深大断裂是金川矿区的主要控矿断裂,具有长期和多期活动叠加的性质,为含矿岩体提供了侵入通道和就位空间。后期构造对含矿岩体的改造,一方面破坏岩体的连续性和完整性,另一方面可在岩体内形成张裂低压带,构造变质热液可携带被活化的成矿物质沿这些张裂空间充填交代,形成特富矿,因此不同方向大断裂的交会部位是多期成矿热液活动的有利场所和矿体定位的重要空间。

(3)岩浆岩:成矿物质主要由超基性岩浆提供,超基性岩既是成矿母岩,也是主要矿体的围岩。因此超基性岩体是寻找铜镍硫化物矿体最直接的岩浆岩找矿标志。

(4)地球电化学:地电提取异常以 Cu、Ni 异常为直接的地电提取找矿标志,其余的元素异常以辅助的形式作为找矿的间接标志。另外,土壤离子电导率异常是对土壤中可溶性离子总浓度的反映,因此也可作为该区寻找隐伏矿体的重要标志。

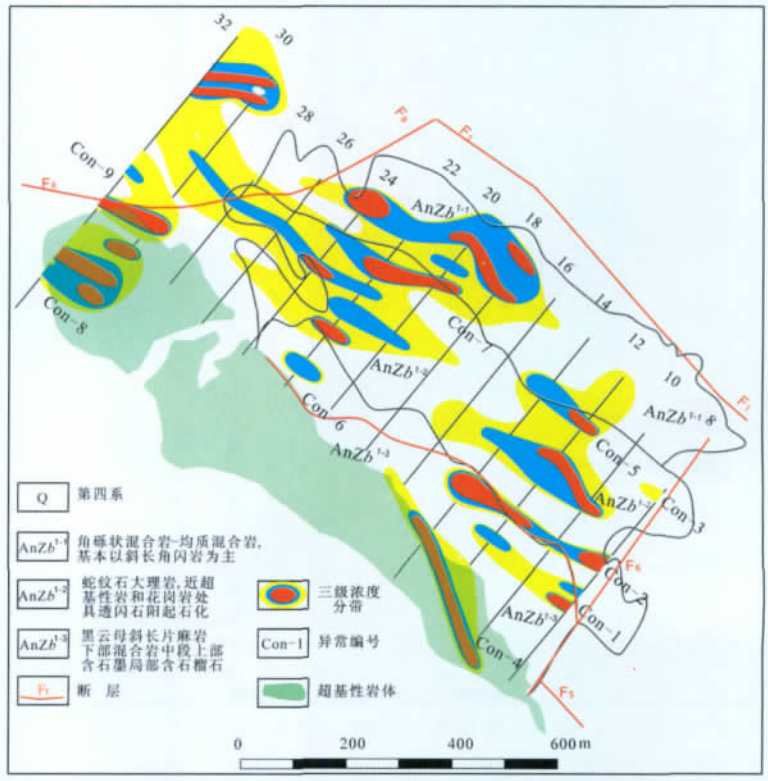

图 10　土壤离子电导率平面异常图

Fig. 10　Plan view of ionic conductivity anomaly of soil

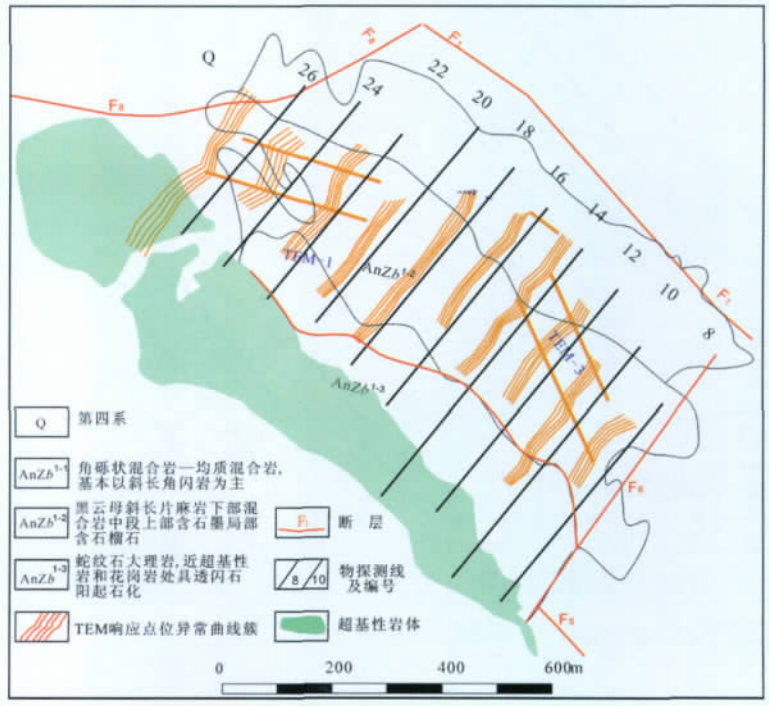

图 11　TEM 异常平面剖面图

Fig. 11　Plan view and profile of TEM anomaly

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

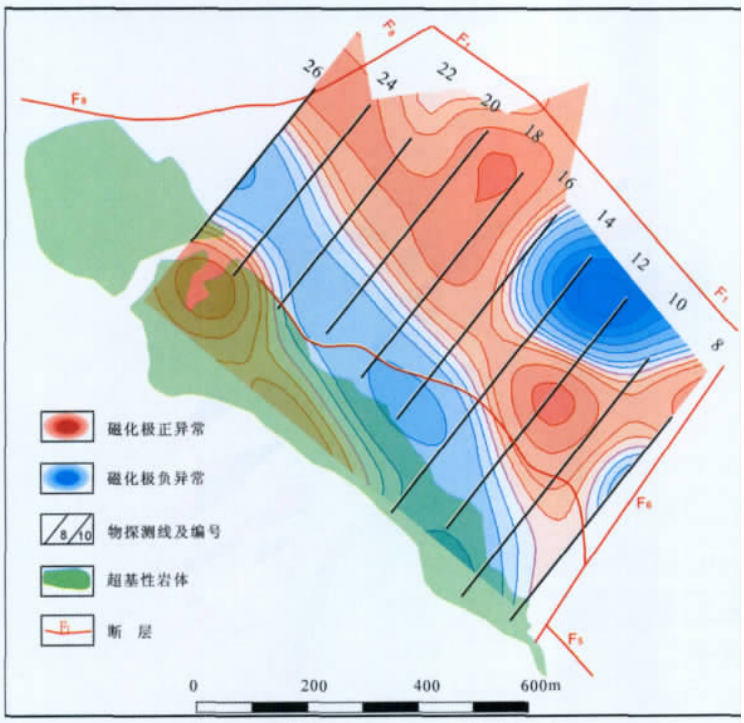

图 12 磁化极上延 200m 异常平面图

Fig. 12 Plan view of upward continuation of 200m for reduction-to-pole of magnetic anomaly



图 13 Ⅰ矿区成矿远景区图

Fig. 13 Metallogenic prospective zone in No. Ⅰ mining area

(5)地球物理：测区的硫化物矿体具有高磁低电阻的特点，超基性岩体具有高磁高电阻的特点。因此瞬变电磁法(TEM)和高精度磁测法组合异常可作为寻找地下低阻体和隐伏超基性岩体的重要标志。

6 地、物、化多元信息成矿预测

结合测区的地质特征和物化探异常情况，在测区共圈出 4 个成矿远景区(图 13)。所圈出的 4 个远景区除ZC-4(因实际地理位置的限制未能进行物探测量)没有物探异常外，其余 3 个远景区均具有较好的电化学组合异常，与断裂关系密切，且都有高磁异常和 TEM 异常与之对应，因此具有较好的找矿前景。ZC-4 号远景区，虽然没有物探资料，但从地理位置来看，该远景区临近 F_1、F_8 的交会处，电化学组合异常较好，且 32 线上出现了 Cu 的极高值，因此也具有进一步工作的价值。

参考文献

[1]汤中立，李文渊.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，1995.

[2]汤中立，钱壮志，姜常义，等.中国镍铜铂岩浆硫化物矿床与成矿预测[M].北京:地质出版社，2006.

[3]刘高.高地应力区结构性流变围岩稳定性研究[D].成都理工大学硕士学位论文，2001.

[4]Govett G J S. Differential secondary dispersion in transported soils and postmineralization rocks: an electrogeochemical interpretation, 1973[C]//Jones M J. Geochemical Exploration. I.M.M. Publ., 1972:81-91.

[5]Kieran D. Fluid-rock interaction in crustal shear zone: a directed percolation approach[J]. Geology, 1994, 22: 843-846.

[6]罗先熔.地球电化学勘查及深部找矿[M].北京，冶金工业出版社，1996.

[7]煤炭科学研究院地质勘探研究所，西安矿业学院数学研究室.数学地质基础与方法[M].北京:煤炭工业出版社.1981.

[8]付开泉，李白祥.甘肃金川铜镍矿床地质-地球物理综合找矿模型[J].甘肃地质，2006，15(1):62-66.

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