因子分析、判别分析在五龙金矿床找矿勘探中的应用

项运筹

五龙金矿床是我国的大型金矿床之一。几年来我们在矿区的找矿勘探实践中，逐步摸索着用多元统计分析方法来进行盲矿体的预测和矿脉的评价。通过反复研究，收到了一定成效，实践证明，多元统计分析方法在五龙金矿床的找矿勘探工作中是有其实用价值的。

矿区地质概况

五龙金矿床发育在大面积的吕梁晚期之黑云母花岗片麻岩中。矿脉严格受断裂构造控制。细粒闪长岩所充填的北北东和北西两组东西构造带的扭裂隙为华夏式构造所复合，形成矿区的主要控矿构造：北北东向张扭性复合裂隙和北西向扭张性复合裂隙，而华夏式的北东向压扭性主体裂隙不太发育。前两者分别以700米左右和1000米左右的间距成带出现。矿脉陡倾斜，倾角一般约在75°以上，厚度一般为0.5米至2米，延长100米至700米不等，矿脉的延深一般均大于延长。金属硫化物充填于石英脉之纵横裂隙中。主要的两组控矿构造（北北东和北西）相互制约，组合成菱形格子状构造，它们的交线为矿体的侧伏线。成矿后的新华夏系（本区表现为晚期）北北东向压扭性断裂以每隔2.4公里左右的间距把矿区切成几个断块，并使矿脉边部产生压扭性（北北东组）和张扭性（北西组）复合断裂，同时还发育一些横切矿脉的次一级扭性断裂。矿区南部出露有燕山期花岗闪长岩体。

矿床属中高温热液含金石英脉型矿床，具多次矿化的特点，大致可分四个矿化阶段：

1.石英—白钨矿阶段：石英、白钨矿、黄铁矿（立方体、五角十二面体）。

2.金—硫化物阶段：黄铁矿、磁黄铁矿、自然金、辉铋矿。

3.多金属—硫化物阶段：黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、毒砂、自然金。

4.石英—碳酸盐阶段：石英、方解石、黄铁矿（立方体）、自然金、辉沸石。

其中以金—硫化物阶段为金的主成矿阶段。

矿物组合有一定的分带性特征：水平方向上，南西部高温矿物较多，如辉铋矿、毒砂等。而北东部中温矿物较多，如闪锌矿、方铅矿、黄铜矿。垂直方向上，上部以黄铁矿为主，下部黄铁矿、磁黄铁矿并可见闪锌矿、方铅矿和黄铜矿。

原生晕的分带性特征

从原生晕的各种数理统计分析结果，可以看到五龙金矿床的微量分散元素有比较明显的分带性特征：

1.通过各脉单元素分级频率统计，由上到下As、Ag高品级频率变小，Cu、Zn则高品级频率增大，而W主要分布在中上部（如图1）。

2.在分级频率统计的基础上，计算了两组元素的累乘含量比值（$\frac{As\cdot Ag}{Cu\cdot Au}$），为观察方便，该比值是用衬度值〔$\frac{Cx(点含量)}{Ca(异常下限)}$〕来进行计算的，这个比值在水平方向，向矿体侧伏方向增大（见图2）。在垂直方向，由上到下降低（如图3）。

3.原生晕中元素的分布，在多数情况下是遵循指数定律的（据P.N.杜包夫）：

$$Cx = Co\ e^{-\lambda x} + C\varphi$$

式中：Co—矿脉中的浓度；

Cx—距矿脉x距离上的浓度；

Cφ—元素的背景值。

通过元素迁移率$\frac{1}{\lambda}$的计算，在垂直方向有明显的变化规律，其中As、Ag的$\frac{1}{\lambda}$值由上到下逐渐降低，而Cu、Zn的$\frac{1}{\lambda}$值则相反（图4）。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

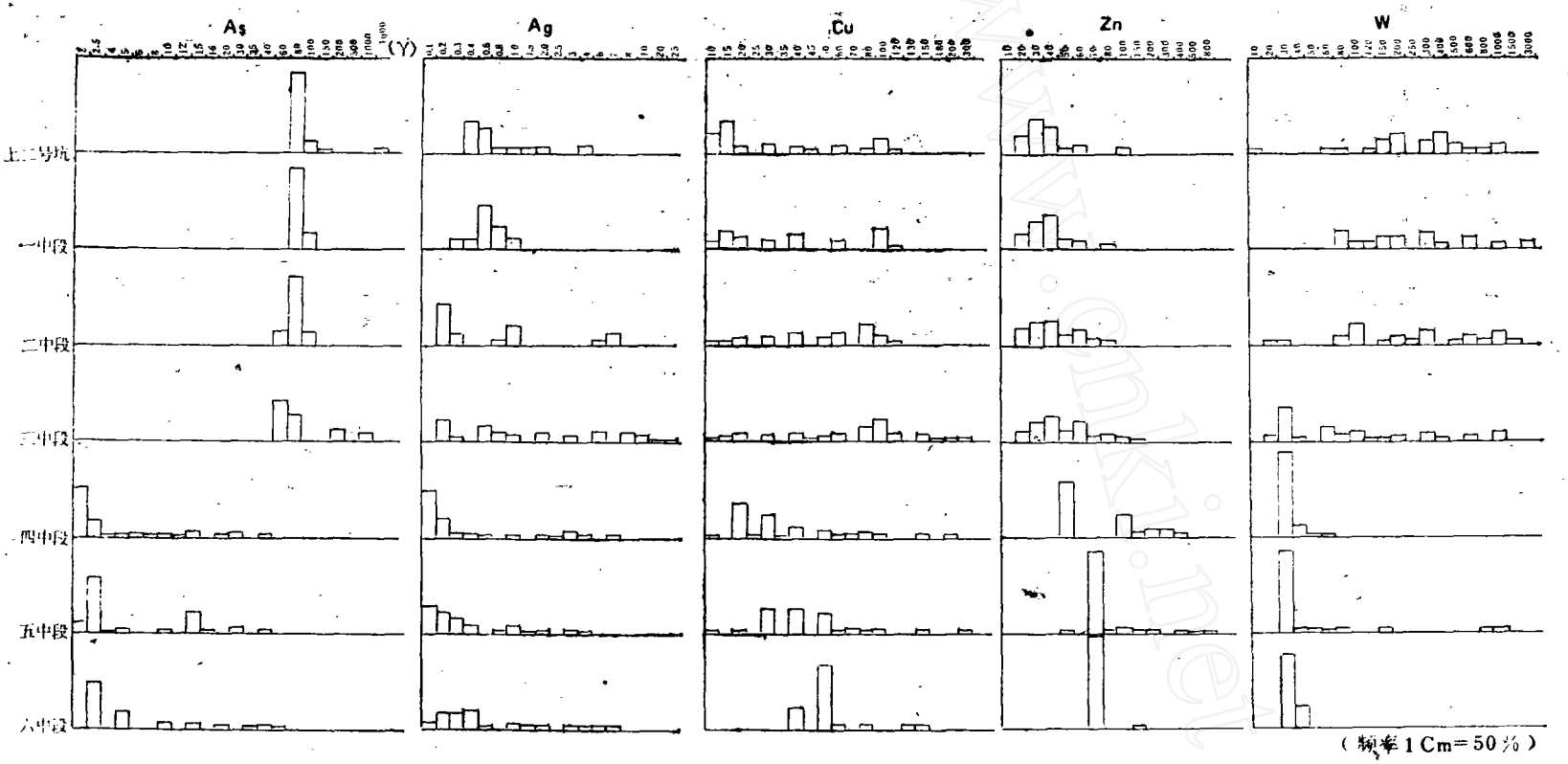

图 1 各脉单元素分级频率

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

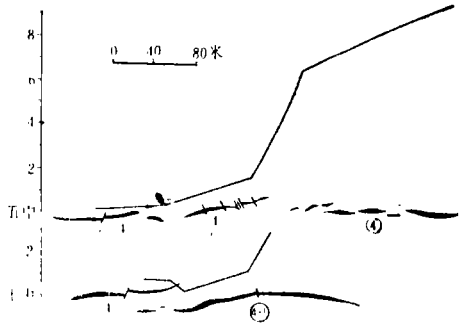

图 2　44—1 脉线含量比值$\left(\frac{As\ Ag}{Au\ Cu}\right)$纵剖面图

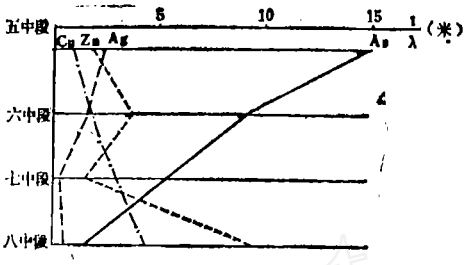

图 4　4—1脉元素迁移率垂直变化图

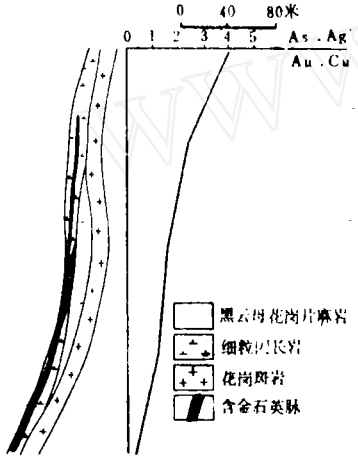

图 3　32—1脉累乘晕线含量比值垂直变化图

从因式分析看矿化特征

选择代表不同部位的两条最主要的含金石英脉(北东部的 2 脉和南西西部的10脉)，各取其地表和深部（井下七中段）的样品分别作了因子分析（整个计算过程是在物探公司DJS—21机上进行的），得到了一些比较明显的规律性的认识：

1.从各元素相关阵上非常清楚地看到不同部位金与铋这两个元素总是密切相关。另外，从正规化还原后的最后因子解，同样清楚地显示出：无论在哪里，金铋均在主公因子中。从而说明金铋是主成矿阶段的主成矿元素（见表 1 、表 2 ）。

2 脉 地 表 各 元 素 相 关 阵　(n = 19)　　表 1

As	1.00										
Au	0.05	1.00									
W	0.17	0.02	1.00								
Bi	0.20	0.72	0.24	1.00							
Ag	0.22	0.02	0.11	0.24	1.00						
Cu	0.04	−0.15	−0.10	0.30	0.16	1.00					
Zn	0.03	−0.09	−0.48	−0.18	0.13	0.08	1.00				
Pb	0.67	−0.12	0.17	0.19	0.20	0.48	0.30	1.00			
Ni	0.20	−0.07	0.69	−0.35	−0.07	−0.01	0.90	0.00	1.00		
Co	0.24	0.10	−0.08	0.61	0.46	0.64	0.20	0.45	−0.04	1.00	
Mo	−0.16	−0.03	0.08	−0.02	0.51	−0.09	−0.16	−0.25	−0.12	−0.04	1.00
	As	Au	W	Bi	Ag	Cu	Zn	Pb	Ni	Co	Mo

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 脉 七 中 段 各 元 素 相 关 阵 (n=39)

As	1.00										
Au	0.01	1.00									
W	0.70	0.09	1.00								
Bi	-0.09	0.90	-0.04	1.00							
Ag	0.65	0.10	0.92	0.03	1.00						
Cu	0.50	0.47	0.57	0.31	0.54	1.00					
Zn	0.04	0.16	-0.07	0.11	0.03	0.26	1.00				
Pb	-0.21	0.03	-0.10	0.01	-0.09	-0.13	0.50	1.00			
Ni	0.01	0.17	0.09	0.06	0.01	0.28	0.24	0.45	1.00		
Co	0.27	0.72	0.11	0.66	0.11	0.60	0.27	0.08	0.11	1.00	
Mo	-0.07	-0.08	-0.03	-0.09	-0.05	-0.02	-0.07	0.37	0.38	-0.14	1.00
	As	Au	W	Bi	Ag	Cu	Zn	Pb	Ni	Co	Mo

10 脉 地 表 各 元 素 相 关 阵 (n=16)

As	1.00										
Au	0.74	1.00									
W	0.46	0.27	1.00								
Bi	0.52	0.80	0.07	1.00							
Ag	-0.04	-0.16	-0.14	-0.14	1.00						
Cu	0.26	0.16	0.76	0.02	0.07	1.00					
Zn	0.48	0.19	0.07	0.19	0.21	-0.07	1.00				
Pb	-0.28	-0.23	-0.23	-0.33	-0.12	-0.25	-0.50	1.00			
Ni	0.37	0.23	0.80	0.11	-0.09	0.32	0.28	-0.16	1.00		
Co	0.29	0.37	0.20	0.43	0.09	0.07	-0.14	-0.16	0.25	1.00	
Mo	-0.04	-0.16	-0.14	-0.14	1.00	0.07	0.21	-0.12	-0.09	0.09	1.00
	As	Au	W	Bi	Ag	Cu	Zn	Pb	Ni	Co	Mo

10 脉 七 中 段 各 元 素 相 关 阵 (n=22)

As	1.00										
Au	0.42	1.00									
W	-0.25	0.09	1.00								
Bi	0.23	0.83	0.07	1.00							
Ag	0.47	0.95	-0.08	0.70	1.00						
Cu	0.46	0.93	-0.02	0.64	0.99	1.00					
Zn	0.19	0.10	-0.08	-0.00	0.13	0.17	1.00				
Pb	0.49	0.93	-0.07	0.65	0.99	0.99	0.15	1.00			
Ni	-0.08	0.03	-0.04	-0.06	0.06	0.16	0.26	0.07	1.00		
Co	0.30	0.77	-0.01	0.48	0.84	0.89	0.20	0.85	0.54	1.00	
Mo	-0.08	0.09	0.38	-0.03	0.05	0.10	0.00	0.07	-0.02	0.15	1.00
	As	Au	W	Bi	Ag	Cu	Zn	Pb	Ni	Co	Mo

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2脉正规化还原后的最后因子解及公因子方差η　　表2

	地表						井下七中段					
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	η		F_1	F_2	F_3	F_4	η
As	0.10	-0.11	-0.91	0.02	-0.02	0.84	As	0.00	-0.85	-0.11	-0.01	0.73
Au	0.96	-0.00	0.04	-0.03	-0.13	0.94	Au	0.96	-0.05	0.05	-0.01	0.93
W	0.02	-0.77	-0.28	0.10	-0.11	0.69	W	0.01	-0.94	0.06	0.09	0.91
Bi	0.84	-0.24	-0.12	0.08	0.42	0.96	Bi	0.93	0.08	-0.00	0.05	0.89
Ag	0.10	0.03	-0.25	0.86	0.23	0.87	Ag	0.03	-0.92	0.01	0.43	0.84
Cu	-0.09	0.02	-0.05	-0.05	0.94	0.90	Cu	0.49	-0.67	0.12	0.26	0.77
Zn	-0.06	0.91	-0.25	0.04	0.06	0.90	Zn	0.12	-0.02	-0.02	-0.92	0.87
Pb	-0.08	0.06	-0.84	-0.06	0.42	0.89	Pb	-0.01	0.13	0.56	-0.67	0.78
Ni	-0.09	0.97	0.06	-0.05	-0.07	0.97	Ni	0.13	-0.09	0.74	-0.29	0.65
Co	0.30	0.09	-0.24	0.21	0.82	0.87	Co	0.83	-0.20	-0.08	-0.23	0.79
Mo	-0.07	-0.12	0.25	0.86	-0.11	0.84	Mo	-0.11	0.05	0.87	0.15	0.79

10脉正规化还原后的最后因子解及公因子方差η

	地表					井下七中段				
	F_1	F_2	F_3	F_4	η		F_1	F_2	F_3	η
As	0.62	-0.08	0.33	0.48	0.73	As	0.51	-0.47	-0.00	0.48
Au	0.86	-0.17	0.13	0.23	0.84	Au	0.98	0.07	0.01	0.96
W	0.12	-0.12	0.97	0.09	0.99	W	0.01	0.83	-0.13	0.70
Bi	0.88	-0.13	-0.08	0.22	0.84	Bi	0.78	0.03	-0.19	0.65
Ag	-0.06	0.98	-0.04	0.11	0.98	Ag	0.98	-0.06	0.09	0.98
Cu	0.03	0.12	0.82	-0.04	0.69	Cu	0.96	0.01	0.21	0.97
Zn	0.03	0.12	0.01	0.94	0.90	Zn	0.07	-0.17	0.60	0.40
Pb	-0.21	-0.14	-0.18	-0.64	0.50	Pb	0.97	-0.05	0.12	0.97
Ni	0.12	-0.11	0.76	0.23	0.66	Ni	0.00	0.09	0.89	0.81
Co	0.72	0.24	0.19	-0.29	0.70	Co	0.80	0.11	0.54	0.94
Mo	-0.06	0.98	-0.04	0.11	0.98	Mo	0.09	0.74	0.04	0.56

2.从表2还可以看出，由上部到下部，由北东部到南西部，公因子数减少，但其因子轴上的元素却相对集中。如北东部的2脉地表有五个公因子，其第一公因子里只有Au、Bi两个元素。而南西部的10脉七中段仅有三个公因子，但其第一公因子里却包含有Au、Bi、Ag、Cu、Pb、Co六个元素。初步认为这是反映每次矿液活动均是由南西到北东，由下而上进行，所以近矿源处各矿化阶段的微量元素叠加程度就高，结合矿区南部花岗闪长岩岩体中有成矿期之微量元素异常及其时空方面与成矿的关系，从而导出该岩体应为矿床的成矿母岩。

3.钨与镍在上部见于同一公因子中，而深部则在不同公因子里。这反映它们既有各自的成因特点，又有空间上的密切关系。钨主要分布在中上部（图1），系含金石英脉的特征元素；镍则是细粒闪长岩的特征元素，从因子计量曲线图上(如图5)可清楚地看到这一关系。而含金石英脉与细粒闪长岩在空间上又关系密切，所以钨与镍在上部相关，而下部相关不明显（见表1、表2）。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

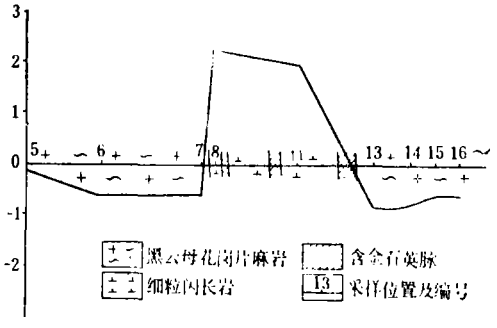

图5　10脉地表423－2线F_3因子计量曲线图

判别分析在矿体预测与评价中的应用

为在找矿勘探中对盲矿体预测及矿脉的深部评价，能从原生晕这方面作出定量的判断，应用了“两类判别分析”方法：

1.已知母体的选择：主要是考虑矿脉的头部和尾部，同时照顾到两组主要的控矿构造及不同地段。共选择了有充分工程控制的20条矿脉作为计算判别函数的已知母体。

2.变量组合的确定：建立在上述数理统计的基础上，主要从元素分带性着眼，结合矿化阶段及含矿地质体的特征元素来考虑。

3.计算方法：整个演算过程只用台式计算机或袖珍电子计算器来进行。

最初我们用的是单元素组合，分别计算了三至五个变量的数组判别函数，其效果均较差，经F检验仅有一组三个变量(As、Ag、W)的判别函数，在25%信度有显著差异。后来我们考虑到组合晕具有比单元素晕更能客观反映矿体异常等优点，所以又用了累乘含量组合来进行判别计算，效果明显提高，所计算的三组不同组合的判别函数，经F检验，均在10%信度就有显著差异（表3），说明用累乘含量组合进行判别分析，能使两类母体获得更好的分离。

从表3可看到其中以第四个判别函数为最优判别函数，其准确性最高（90.9%），漏矿机率最小（9.1%），I值最大，经F检验在10%信度有显著差异。这个判别函数由四组变量共九个元素参加计算，其中As、Ag为头部元素组合；Au、Bi为主成矿元素组合；Cu、Pb、Zn为尾部元素组合；W、Ni为含矿地质体特征元素组合。

通过一年多来42脉带深部评价的实践检验，证明判别分析在矿区的找矿勘探中确实可当作一个比较直观的依据。我们作出17个判别，已有13个得到了验证（其中3个系检验性追算），全部正确（表4）。所以说判别分析基本上是能够反映客观实际的。如516线1978年施工的1599孔未见矿，但经判别计算R＞Ro，说明下部有望，于是1979年我们继续施工后排1598孔，在预计部位见到了2.7米（穿厚）含金石英脉工业矿体，收获了储量，而1598孔判别计算结果R＜Ro，说明下部无望，最近竣工的1589孔确实未见矿，证实矿体已尖灭（图6）。又如524线1978年施工的1596孔，判别计算R＜Ro，下部为无望地段，1979年经后排1597孔验证，

各种变量组合判别函数一览表　　表3

变量及其组合	判别函数 R	分界值R_0	I 值	准确性C	漏矿机率b	F 检 验
As, Ag, Cu, W, Bi	R=13.62101A′－9.23688B′+2.77260C′－13.57740D′+3.82037E′	9.22143	0.08828	69.2%	18.2%	在25%信度，仍无显著差异
As, Ag, W	R=12.30909A′－5.89739B′－9.70693C′	5.58998	0.06495	72.7%	27.3%	在25%信度，有显著差异
As Ag, Au Bi, Cu Pb Zn, W Ni, Mo	R=6.05261A′－4.95058B′－18.89600C′－8.31258D′+11.61860E′	－11.33953	0.11861	81.8%	18.2%	在10%信度，有显著差异
As Ag, Au Bi, Cu Pb Zn, W Ni	R=4.58426A′－4.96350B′－20.99158C′－5.84014D′	－10.21650	0.22781	90.9%	9.1%	〃
As Ag, Au Bi, W	R=2.77921A′－3.45442B′－10.47309C′	－2.22251	0.10331	72.7%	27.3%	〃

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

四组变量（AsAg，AuBi，CuPbZn，WNi）判别分析效果一览表　　表 4

勘探线号	工 程 号	采样位置	样数	R（Ro = - 10.2165）		判　别　效　果
				A（有望）	B（无望）	
516	1599孔	92—274米	29	- 9.84494		后排1598孔探见穿厚2.70米工业矿体
516	1598〃	245—345米	23		- 10.69958	下部1589孔未见矿
520	1558〃	139—227米	19		- 12.04833	后排1593孔相应部位未见矿
520	1593〃	341—462米	22		- 12.39663	待验证
524	1596〃	168—288米	24		- 11.43780	后排1597孔见非工业矿体
524	1596〃	291—370米	11		- 12.11594	后排1597孔未见矿
524	1597〃	335—407米	14		- 13.52595	后排1590孔未见矿
524	1597〃	431—522米	15		- 10.27668	〃
*528	三坑三中段	24273测点穿脉	10	- 7.23855		下部1595孔探见穿厚16.04米工业矿体
*528	1595孔	224—277米	10		- 10.32135	后排1594孔探见非工业矿体
528	1594〃	342—415米	12	- 10.08568		待验证
*532	1579〃	204—287米	16		- 11.63475	下部1546孔见0.13米非工业矿体
532	1579〃	301—384米	10		- 11.20697	待验证
532	1546〃	293—400米	22		- 12.71919	下部1574孔未见矿
532	1546〃	453—515米	13	- 7.30908		待验证
536	1566〃	62—131米	12		- 12.10312	后排1700孔见0.08米非工业矿体
536	1566〃	140—267米	15		- 11.60390	后排1700孔未见矿

* 为后补工程之检验性追算

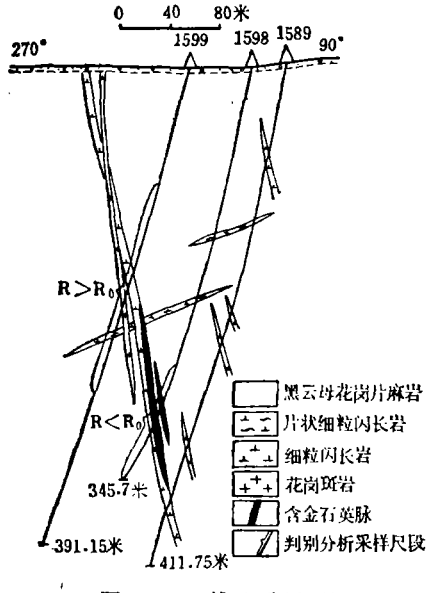

图 6　516线地质剖面图

虽见石英脉，但无工业品位，而1597孔判别计算仍为R＜Ro，下部还是无望，再经后排1590孔证实判别无误（图 7 ）。

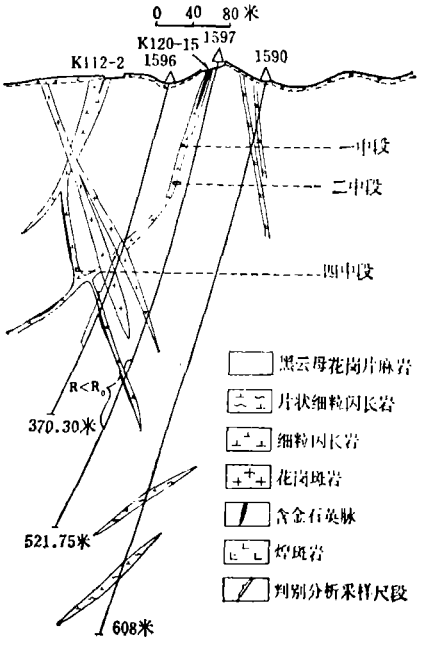

图 7　524线地质剖面图

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

几 点 体 会

1.样品原始分析结果之准确性是多元统计分析的基础，对计算结果将起决定性作用。所以采样、加工、化验分析都应该严格要求。此外，由于测试条件的限制，一些元素尚不能分析或分析灵敏度过低，限制了统计分析的准确性，所以说测试水平的提高应会改进多元统计分析的效果。

2.统计分析中，考虑到含金石英脉中各种组分变化的不均匀性，矿体中的样品应予剔除（迁移率计算除外），而全用围岩中的样品来进行统计分析，这样有助于得出统计规律。

3.判别分析结果和成矿规律相结合进行综合分析，才能更好地发挥作用。如528线（图8）1595孔所见的南北向含金石英脉（陡倾斜者）延深到后排1594孔已近于尖灭，经判别分析R＞Ro，说明下部有望，但后排1576孔并未见矿，后来结合控矿构造特征分析，原来是这里有一组北西向含矿构造（缓倾斜者）与之交汇，根据两组控矿构造的复合规律，这组北西向含矿构造将限制南北向组含矿构造的发展，所以推断这里的R＞Ro，可能为北西组盲矿体的反映，而并不是说1594孔之南北向矿体向下能变好。

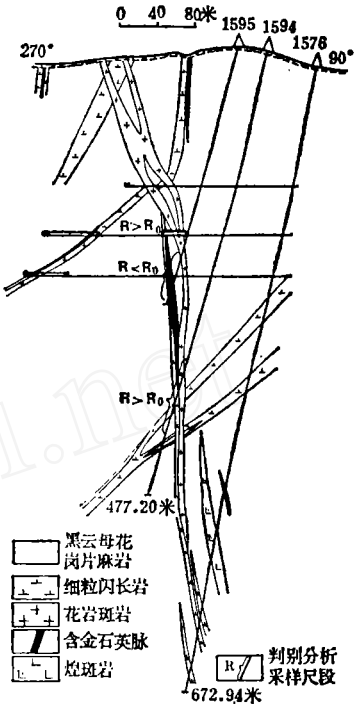

图 8　528线地质剖面图

通过反复研究和实践，初步取得了这些收获，但是由于作者技术水平的限制，尚有不少问题需进一步探索。在这项工作中，始终得到赵衍江工程师的指导和其他有关同志的帮助，谨此致谢。

1：400 万《中国海相火山建造及其铁铜矿产分布图》编制完成

该图集中反映了冶金部地质研究所与首钢地质研究所历年来对海相火山铁铜矿床成因类型、火山岩石学、原岩恢复及火山建造类型划分等方面的科研成果。编图工作以1：20万（截至1978年12月）及1：100万区测资料为基础，并参考了1976年版1：400万中华人民共和国地质图，中国地质图集、矿产图集，各省（市、区）的地质矿产图、地层表、各种地质报告和论文等数百份资料。

这项研究成果由图纸、说明书、矿床（点）登记表三部分组成。今年四月，冶金部地质司组织专门审查鉴定会通过，现已付印。

该图根据火山建造形成方式、不同岩石组合在各地质时代分布的层位、火山喷发物距火山口之远近及其岩相差别，将海相火山建造类型划分为：（1）火山岩建造，主要为熔岩、次火山岩、火山角砾岩、集块岩、火山凝灰岩，位于火山喷发中心区；（2）火山碎屑岩建造，主要为中细粒火山凝灰岩、沉凝灰岩、含凝灰质沉积岩类及少量熔岩、次火山岩，位于近火山区；（3）火山碎屑沉积岩建造，主要为沉凝灰岩、含凝灰质的沉积岩类，位于远火山区。图中以不同颜色表示火山岩的时代，不同线条表示火山建造类型，不同花纹表示岩性种类，清晰醒目。

含火山岩类地层一般以统或组为基础，厚度在百米以上者均有所表示，主要以1：400万中华人民共和国地质图表示的地层时代作为火山建造时代划分标准。

海相火山岩多产于活动地槽环境，岩石大多经受区域或接触变质改造。编图中充分注意了原岩恢复工作。

根据海底火山活动资料，通过成矿作用、成矿环境分析，将与海底火山活动有关的铁铜矿床划分为：（1）火山—岩浆矿床、（2）次火山岩型矿床、（3）火山气液矿床、（4）火山沉积矿床、（5）复合型火山矿床及（6）后期改造型火山矿床等六类及若干亚类。图中以不同符号区分矿床成因类型和规模。

通过该图可对我国海相火山建造及其铁铜矿产的分布轮廓获得一个清晰的基本认识，并为我国与海底火山活动有关的矿产普查找矿及火山学的研究提供了一份基础资料。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net