

2. 本方法的误差主要来自高斯求积公式的近似计算。为了用解析解来检验本方法的误差, 我们计算了一个常密度水平长方体的重力异常。该长方体走向长 6 公里, 水平宽 4 公里, 厚 2 公里, 顶板埋深 2 公里, 密度差 $\rho = 1$ 。在垂直走向、通过物体中部剖面上的重力异常如图 3 所示。图上的曲线是用解析式算出的精确解, 图上的点是用本方法计算的结果。误差小于 $1 \sim 1.5\%$ 。这种误差是容许的。

参 考 文 献

- [1] I. V. R. 默撒等, 译文载《物化探电子计算技术》, 1980 年, 第 2 期
[2] C. A. Brebbia, The Boundary Element Method for Engineers, Pentech Press, 1978

电法在某含锡多金属矿床上的异常综合特征 及 找 矿 效 果

汪矛忠

本区是在我国北方寻找含锡多金属矿产资源的一个远景区。由于大部地区为黄土覆盖, 地质构造又复杂, 研究程度较低。以前虽投入过一定的地质、物化探找矿工作, 但一直未取得大的突破。1983 年在该区投入了以电法为主的新仪器方法试验和综合找矿工作, 取得了显著的找矿效果。对新发现的 IP 异常进行了综合评价和定性解释, 并对其中可能为矿异常的 IP₂ 异常进行了定量解释和钻孔深部验证。验证结果, 不仅设计的 7 个钻孔都见矿, 而且每孔实际见矿深度范围和矿体品位, 基本上均与预期结果吻合。实践表明, 对于寻找这种地表无矿化, 化探异常不明确, 磁法无反应, 有一定埋深的隐伏矿床, IP 法具有独特的找矿效果。下面对所取得的结果作一简介。

地质概况及物性特征

1. 地质概况 (图 1) 区内出露的主要地层为二迭系林西组, 这是一套细一中粒砂岩和板岩 (P_2L_1)。由老到新可划分为四个岩性段: 暗色细碎屑岩段 (P_2L_1); 含磷岩段 (P_2L_2); 泥灰岩段 (P_2L_3); 杂色细碎屑岩段 (P_2L_4)。已知矿床和 IP₂ 异常主要分布在 P_2L_2 和 P_2L_3 两岩性段。矿床一般对围岩并无选择性, 但严格受构造控制。

区内断裂构造十分发育, 大致可划为三类: 成矿前断裂 (主要有北北西和南北向两组); 容矿

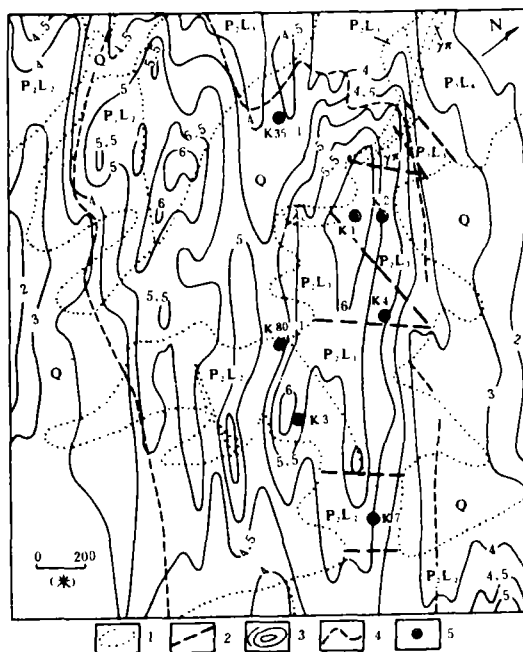


图 1 某矿区充电率异常及地质综合平面图

Q—第四系黄土; P_2L_1 —灰黑色砂岩; P_2L_2 —暗灰色含磷粉砂岩; P_2L_3 —黑色细砂岩; P_2L_4 —杂色粉砂岩; $\gamma\pi$ —花岗岩; λ —流纹岩; 1—地质界线; 2—断层; 3—充电率 (M_2) 等值线; 4—不同埋深矿体在地表投影范围; 5—见矿钻孔

断裂 (以北西向为主); 成矿后断裂 (南北向)。矿体绝大多数赋存在北西向硅质—碳酸盐胶结的构造角砾岩或碎裂岩带中, 并沿含矿裂隙带成群

或成带产出。矿床成因与次火山岩有关,属裂隙充填热液矿床。

2.物性特征 岩(矿)石电参数测定结果列于表1,由表1可看出:

(1) 矿石与区内广泛分布的砂质板岩和中粒砂岩有明显的电性差异。矿石的极化率 η 比围岩高3~4倍,电阻率 ρ ,比围岩低7~15倍。相对围岩而言,矿石表现有高极化和低电阻的特征:

(2) 矿化围岩也具有较高的极化率,但略低于矿石的极化率,导致IP干扰异常。不过矿化围岩的电阻率大大高于矿石的电阻率而与围岩的近似。因而可采用综合方法区分矿与非矿异常。

(3) 由于该类型矿体多赋存在普遍被花岗岩脉、石英岩脉等高阻岩脉所充填的含矿裂隙带中,因此在地面实测的 ρ 值必然是二者的综合反映。

矿区及外围各类岩(矿)石的电参数

表1

岩(矿)石名称	块数	电 阻 率 ρ (Ω M)				极 化 率 η (%)				备 注
		极大值	极小值	算术平均	几何平均	极大值	极小值	算术平均	几何平均	
砂 板 岩	54	530	203	380	371	3.00	0.50	1.75	1.63	地 表
中粒砂岩	33	1486	330	900	807	5.80	2.50	4.60	4.51	地 表
花岗斑岩	32	1023	517	700	684	3.55	1.50	2.60	2.56	地 表
矿 石	15	59	0.23	22	8.0	37.50	20.50	27.77	27.40	坑 道
含矿围岩	20	672	170	370	338	22.00	12.50	16.20	16.03	坑 道
不含矿围岩	30	943	507	720	708	14.00	3.50	7.17	6.78	坑 道
含水矿化围岩	10	158	25	62	48	21.00	15.00	18.35	18.23	坑 道

矿床上地球物理场的基本形态及矿异常的综合特征

1983年完成了包括已知矿床在内的约37平方公里面积性电测,和一条穿越矿区长40公里的区域性地质物化探综合剖面测量。通过对资料的分析研究,得到以下几点初步认识:

1.在区域性长剖面上,激发极化场的背景清晰平稳,波动不大,仅在已知矿床和个别推测为矿的点上出现较背景场高3~4倍的 η 异常。异常与岩性关系不密切,主要受该区北西向容断裂构造制约,呈现为一条沿北西向断裂带断续分布的异常带。沿断裂带倾向,异常往往以多个相互平行的异常群出现。所构成的激化极化场的基本分布特征,反映了裂隙充填型热液多金属矿床上电场的基本特点,指出了硫化物富集部位。

2.根据对已知矿区面积性电法试验及异常钻探验证结果的分析对比,矿异常的综合特征是:

(1) 矿异常均与含矿破裂带有密切关系,其位置和范围一般不超出断裂构造带所分布的范围。

(2) 异常具明显的方向性,其充电率 M_2 及对应的视电阻率 ρ ,和二次场衰减速度 $\bar{\beta}$,在平面等值线图上,均呈现为北西向展布的长轴状平行

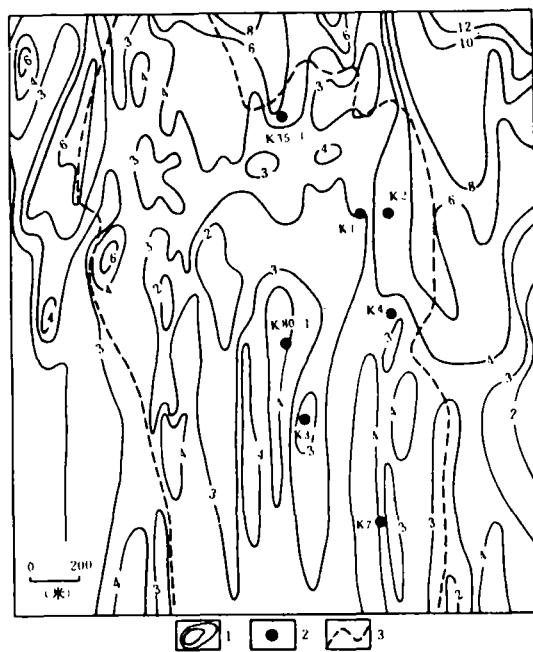


图2 某矿区视电阻率 ρ 等值线平面图

1— ρ 等值线(单位 10^2 欧姆米); 2—见矿钻孔;

3—不同埋深矿体在地表投影范围

异常(图1,2)。

(3) 充电率 M_2 异常规整圆滑,强度不大(见图1)。两个已知矿的异常 IP_1 和 IP_2 的峰值为6.46~6.52(%),但背景场较低($<1.5\sim$

2.0 %),因此在已知矿体上仍可获得较正常场高3~4倍的明显异常,与物性测定结果吻合。按3倍正常场($M_2 = 4.5\%$)等值线圈得的异常范围: IP_1 异常走向长为1.8公里,宽约550米; IP_2 异常走向长1.9公里,宽约500米。

(4) 对应IP异常的 ρ_s 等值线呈现为高低阻相间并与破裂带走向一致的条带状等值线带,其 ρ_s 值一般在200~400(ΩM)之间,与不含矿破裂带及无矿地段的 ρ_s 值以及等值线的形态均有明显的差异,如图2在矿区北部无矿地段, $\rho_s > 600 \sim 1800$ (ΩM),而在深部无矿,地表为第四系覆盖的地段, ρ_s 值一般均小于200(ΩM),呈现为大片稳定的低阻、低极化区。

(5) 已知矿上二次场衰减速度 β (200~780 ms)有明显的异常, $\beta = 0.78 \sim 0.82 \text{秒}^{-1}$,较理想地反映了金属硫化物的中期衰减特征,而外围无矿地段, $\beta \geq 0.84 \sim 0.92 \text{秒}^{-1}$,形成明显的背景场地。

(6) 根据在矿区及其外围所完成的49个IP

测深点的资料来看, η_s 测深曲线均为A型,曲线与轴的夹角大于 $40 \sim 50^\circ$, $\rho_s^{\max} \geq 15\%$; ρ_s 曲线为KH型。正常场上IP测得的 η_s 曲线虽也随极距增大而逐渐上升,但上升较缓慢,曲线与轴的夹角一般不超过 30° ,且 $\eta_s^{\max} \leq 5\%$; ρ_s 曲线一般为A型,二者明显不同。已知矿及正常场上的IP测深曲线类型特征及其差异见图3。

矿与异常的关系及解释验证效果

1. 矿与充电率 M_2 异常的关系 该矿床属裂隙充填型热液多金属矿床,矿体沿含矿裂隙成群成带产出,不可能按常规方法对单个矿体进行定量解释。另外,组成矿体的矿种较为复杂,既有金属硫化物(如黄铜矿、方铅矿和闪锌矿),又有金属氧化物(如锡石),它们显然具有不同的充电率和导电率。因此要掌握矿与异常的关系,必须首先了解引起异常的机制和矿体的元素共生组合规律。统计研究了矿区各主要剖面上60余个钻孔资料,并按不同元素组合的矿体厚度、品位分别

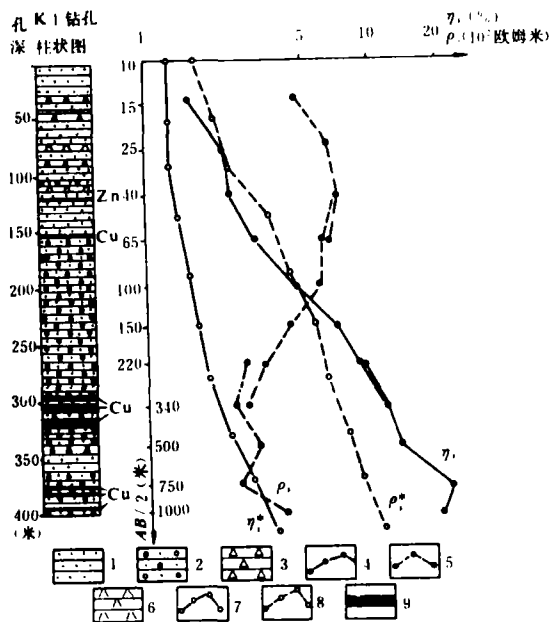


图3 已知矿体上及正常场区的IP测深曲线

1— P_2L_3 细砂岩; 2—矿化细砂岩; 3—破碎带; 4—已知矿上 η_s 曲线; 5—已知矿上 ρ_s 曲线; 6—流纹岩脉; 7—正常场上 η_s 曲线; 8—正常场上 ρ_s 曲线; 9—矿体

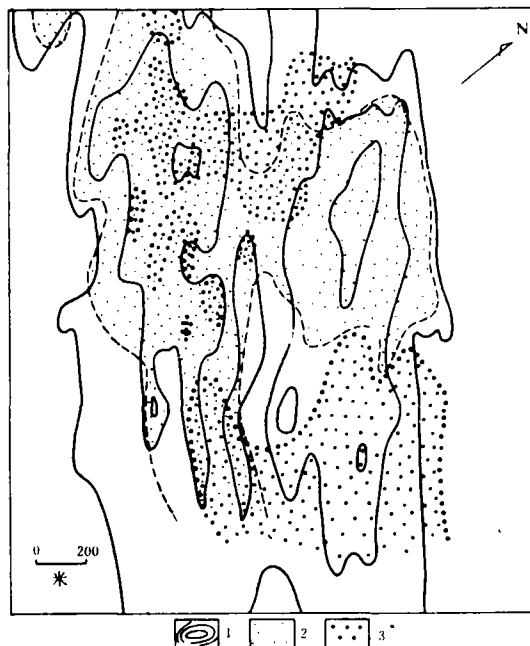


图4 钻孔中累积线含量 $\Sigma(L \times C) > 1$ 的Cu、Pb矿体在地表的投影范围以及和IP异常的关系

1—IP异常, $M_2 = 4 \sim 6\%$; 2—钻孔中 $\Sigma(L \times C) > 1$ (米·%)的铜矿范围; 3—钻孔中 $\Sigma(L \times C) > 1$ (米·%)的铅矿范围

与充电率 M_2 异常进行了分析对比, 初步得出矿与异常存在如下关系:

(1) 矿体的元素共生组合基本可分为Cu、Sn、Ag 和Pb、Zn、Ag 两类。前者主要分布于矿区西北部, 集中于矿体的中带; 后者明显地组成矿体的头矿和尾矿, 集中于矿床沿走向的两端, 具有明显的水平和垂直分带性。引起充电率异常的矿种主要为金属硫化物的黄铜矿和方铅矿, 而且充电率 M_2 值的大小与钻孔中矿体的Cu、Pb积累的总线含量 $\Sigma(L \times C)$ (米·%) (以下简称“矿体品级”) 关系最密切, M_2 异常的边界与钻孔中按矿体品级圈定的边界品位以上的矿体范围基本吻合 (图4)。

(2) 在充电率 M_2 异常范围内, M_2 值的大小与矿体品级存在一定的比例关系。由相关分布图 (图5) 可见, 二者基本呈正相关。其比例系数

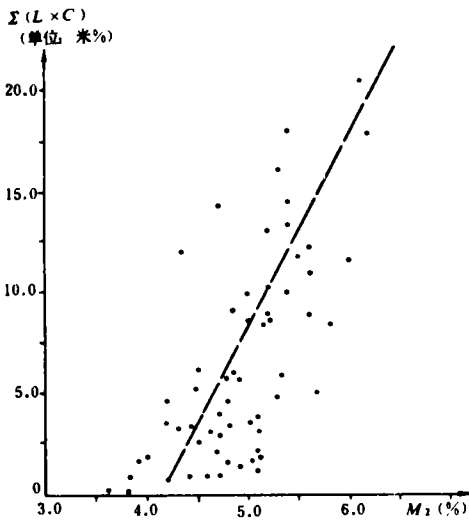


图5 矿体中Cu + Pb总线含量与充电率的相关分布图

$$K = \frac{M_2}{\Sigma(L \times C)} \text{ (米}^{-1}\text{)} \text{ 大致为 } 0.1, \text{ 即单位}$$

矿体品级的矿体大致可引起0.1%的充电率效应。图5中统计点比较分散, 主要是由于矿体不同埋深的影响。但因该矿床矿体倾角一般较小, 故忽略不计深度影响仍可显示上述线性关系。同时由图5可见, 该矿床的所有矿体都分布在 $M_2 = 3.8 \sim 6.5\%$ 等值线范围内, 而且 $M_2 = 3.8\%$ 的异常等值线恰好与边界品位的矿体边界对应, $M_2 > 4.2\%$ 的异常等值线则大致地圈出了工业品位以上的富矿所分布的范围。

2. 矿与视电阻率 ρ_s 值的关系 由矿体品级与 ρ_s 值相关分布图 (图6) 可见:

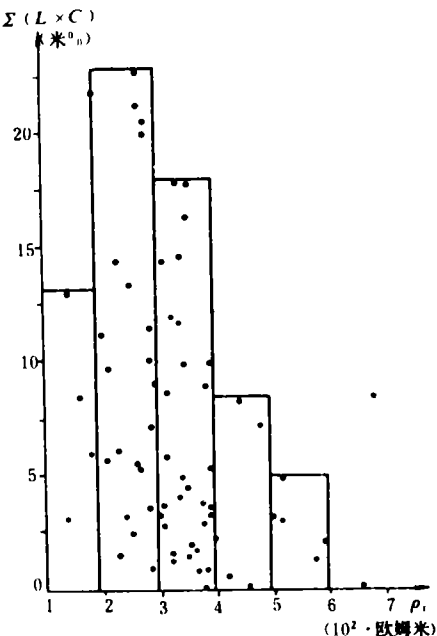


图6 矿体中Cu + Pb总线含量与视电阻率 ρ_s 相关分析图

不同矿体品级见矿孔数的 ρ_s 概率分布统计						表 2
孔数 N (%)	ρ_s (ΩM)					
$\Sigma(L \times C)$ (米·%)	100~200	200~300	300~400	400~500	500~600	600~700
> 0.5	9	32	45	6	6	2
> 5.0	14	43	37	6	0	0
> 10.0	17	44	39	0	0	0
> 15.0	12	50	38	0	0	0
> 20.0	20	80	0	0	0	0

(1) 见矿品位超过边界品位以上的钻孔, 绝大部分分布在 $\rho_s = 150 \sim 600 (\Omega M)$ 的范围内, 这样的见矿钻孔有63个, 占总数的95.5%。在 $\rho_s = 150 \sim 600 (\Omega M)$ 范围内, 上述见矿孔又绝大部分分布于 $\rho_s = 200 \sim 400 (\Omega M)$ 的范围内, 约占总数的82.5%, 而在 $\rho_s = 150 \sim 200 (\Omega M)$ 和 $\rho_s = 400 \sim 600 (\Omega M)$ 范围内的见矿孔, 仅分别占8%和9.5%。

(2) 矿体品级与 ρ_s 值大小的关系, 按概率统计有以下规律(表2):

矿体品级 $\Sigma(L \times C) \geq 0.5 (\text{米} \cdot \%)$ 的见矿钻孔主要分布在 $\rho_s = 200 \sim 400 (\Omega M)$ 范围内。随矿体品级的增高的见矿孔, 则集中在 $\rho_s = 200 \sim 300 (\Omega M)$ 范围内, $\Sigma(L \times C) \geq 20 (\text{米} \cdot \%)$ 的见矿孔在此范围内则占总数的80%。

3. 推断解释与验证效果 根据矿与异常关系推测的矿体位置、分布范围和矿体品级, 与钻孔验证结果基本一致。各孔实际见矿情况见表3及图7、图8。例如, 布置在 $M_2 \geq 5\%$ 和 $\rho_s < 400 (\Omega M)$ 范围内的K1, K2, K3, K7等钻孔, 除K3孔进尺138米后因故停站, 未达到推测的见矿深度外, 其他均见到品级 $\Sigma(L \times C) > 5.0 (\text{米} \cdot \%)$ 的富矿。而布置在 $M_2 < 5$

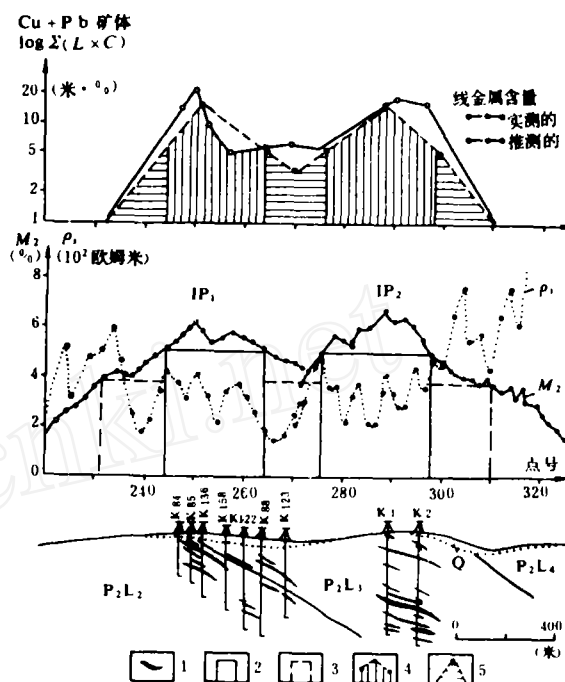


图7 140线IP₂异常半定量解释和钻孔验证结果综合剖面对比图

1—矿体, 2— $M_2 \geq 5\%$ 范围; 3— $M_2 \geq 3.8\%$ 范围; 4—推测的 $\Sigma(L \times C) \geq 5 (\text{米} \cdot \%)$ 的富矿范围; 5—推测的矿体边界至 $\Sigma(L \times C) < 5 (\text{米} \cdot \%)$ 的矿体范围

推测钻孔见矿品级及见矿深度与钻孔验证结果的对比

表3

钻孔编号 终孔深度 (米)	点号 线号	充电率 M_2 (%)	视电阻率 ρ_s (ΩM)	推测见矿品级 $\Sigma(L \times C)$ ($\text{米} \cdot \%$)	实际见矿品级 $\Sigma(L \times C)$ ($\text{米} \cdot \%$)	预计见矿深度及范围 (米)	实际见矿深度及范围 (米)	备 注
K35—1 318	275 136	4.20	440	< 1.0	0.45	160~400	143~209	由图8分析, 在318~400米内还可见到Cu, Sn, Ag矿体。
K1 400	290 140	6.19	337	> 10.0	17.93	60~400	65~425	
K2 450	296 140	5.31	352	> 5.0	16.32	80~420	65~425	
K4 450	296 144	4.79	350	1.0~3.0	1.36	60~360	65~355	
K3 138	278 148	5.56	118	< 5.0	0.80	60~400	65~	
K80—1 173	275 145	4.82	439	1.0~3.0	0.60	/	/	此孔设计400米, 预计在138~400米还可见富矿
K7 300	293 152	5.10	370	> 5.0	29.38	100~350	107~300	未作IP测深 终孔时仍见矿

IP 测深 ρ_s 曲线电算拟合解释成果表

表 4

测深点位置 点号 线号	相应钻孔 编 号	矿带上盘 ρ_s (ΩM)	矿带下盘 ρ_s (ΩM)	矿带电性层解释结果			
				顶板埋深(米)	底板深度(米)	厚度(米)	ρ_s (ΩM)
290 110	K 1	950	600	80	420	340	250
295 110	K 2	950	600	60	400	340	250
296 144	K 4	750	600	60	360	300	200
293 152	K 7	500	600	100	350	250	200

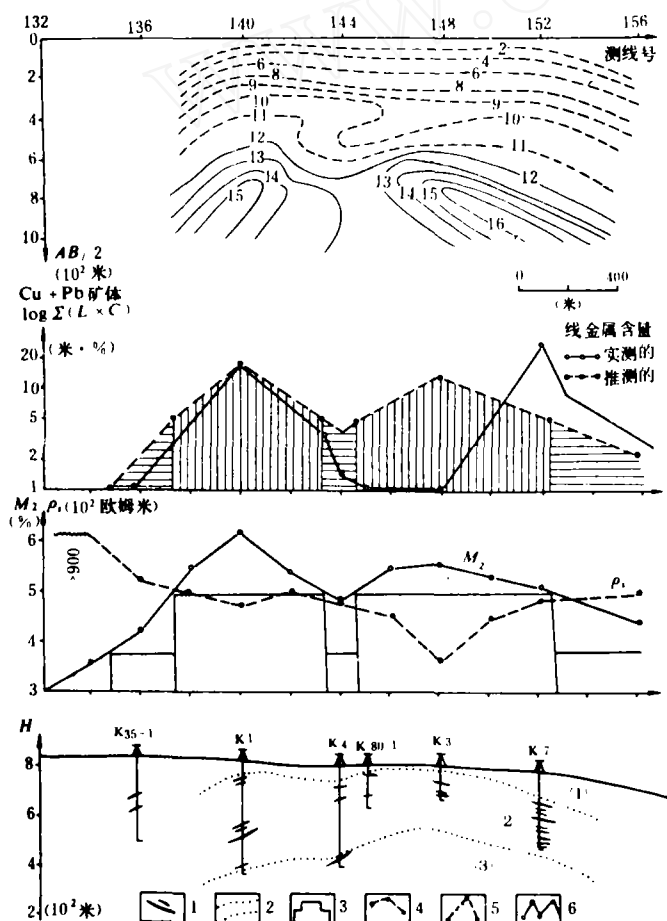


图 8 异常沿走向半定量解释及钻孔验证结果对比综合平面图

1—矿体；2—电性层分界线及推测见矿深度范围；3— $>5.0 M_2 > 3.8\%$ 范围；4—推测的 $\Sigma(L \times C) > 5.0$ (米·%) 的富矿范围；5—推测的矿体边界到 $\Sigma(L \times C) < 5.0$ (米·%) 的矿体范围；6—钻孔矿体的实际 $\Sigma(L \times C)$ 曲线

(%) 和 $\rho_s > 400$ (ΩM) 范围内的 K 35—1, K 80—1 和 K 4 孔, 实际见矿品级 $\Sigma(L \times C) > 1$ (米·%), 与推测结果吻合。K 80—1 孔因事故提前停钻, 原来预计要在 173 米以下才能见 $\Sigma(L \times C) > 0.6$ (米·%) 的边界品位以上的矿体。

利用 IP 测深资料对异常进行定性解释, 确定矿体空间分布位置及产状具有明显的解释效果 (详见图 3 和图 8)。利用特征点法以及用 PC 1500 型计算机分别对 η_s 曲线进行解释和对 ρ_s 曲线电算拟合, 所得结果列于表 4。已施工的 7 个验证钻孔在预计见矿深度及范围内, 均见多层矿体和连续的矿化, 而且解释推断的矿带顶、底的深度, 除个别钻孔因故未达设计深度外, 均与实际见矿深度及范围基本吻合, 解释精度一般不大于 10%, 最大不超过 20% (见图 8)。

与上述成果表明, 电法是寻找含锡多金属隐伏矿床的一种快速、经济、有效的方法, 而正确掌握矿异常的综合特征和模型, 以及矿与异常在空间分布和数量上的关系, 是能否取得预期找矿效果的关键。我们就是这样工作的, 在不到一年的时间内, 向国家提交了一个具有中型规模的含锡多金属矿床。