

外, ρ_c 实际上与 ρ_2 是一样的。

参 考 文 献

- Knight, J. H. and Raiche, A. P. 1982, *Geophysics*, Vol. 47, p. 47~51
 Raiche, A. P. and Spies, B. R. 1980, *Geophysics*, Vol. 46, p. 53~64
 Spies, B. R. and Raiche, A. P. 1980, *Geophysics*, Vol. 45, p. 1197~1204

译自 *Geophysics*, 1983, Vol. 48, No. 6, p. 787~789

作者: A. P. Raiche

(常 非 译 燕 撰 校)

壤中吸附相态汞测量方法及其找矿效果

冶金部地质研究所 栾继琛 赵友方

近几年来,为解决厚层覆盖区常规化探找矿效果不佳的问题,我们试验研究了壤中汞气测量方法。虽然在各类覆盖区,壤中汞气测量取得了较好的找矿效果,但因该方法影响因素多,特别易受气候的影响,导致分析误差大、重现性差,不同季节的测量结果难以对比评价等。通过对壤中汞气异常形成机理的研究,发现含矿断裂上的土壤比不含矿断裂上的土壤含有更多的 Hg^0 、 $HgCl$ 和 $HgCl_2$;并且土壤中这种叠加吸附相态汞异常,主要来源于隐伏矿体,这就为地球化学探矿提供了理论依据。

本文侧重讨论壤中吸附相态汞的测量原理、工作方法、质量检验标准和找矿效果。

地球化学原理

汞为亲硫元素,在热液阶段多以自然汞和汞化合物的形式赋存在Cu、Mo、Pb、Zn、Fe等硫化物中,或伴随挥发性组分扩散、渗滤到岩

石、矿物的裂隙或包裹体中,形成汞的原生分散晕。在表生条件下,含汞的金属硫化物,能够通过氧化还原作用释放出 Hg^0 或汞的氯化物。由于 Hg^0 和可溶性汞的氯化物,在地下温度、压力增高的情况下,促使汞随水蒸气、地下水沿断裂向地表运移,特别是气态汞的穿透能力比溶液大得多。 Hg^0 和含汞溶液在迁移途中,易被矿床上方围岩、土壤吸附,如粘土、铁锰质胶体和有机质的吸附作用;同时形成壤中汞气异常。在氧化还原介质中,壤中汞气和吸附相态汞保持复杂的平衡状态,二者对矿体的赋存部位均有指示作用。

根据 Hg^0 及汞化合物热释峰温度,采用控温热释测量土壤中与矿关系密切的叠加价态汞(Hg^0 及部分 $HgCl$),达到寻找隐伏矿体的目的,这就是壤中吸附相态汞测量方法的地球化学原理。

测量方法

(一) 野外工作方法

壤中吸附相态汞测量的野外工作方法，基本上与土壤地球化学测量一样。首先要选择已知矿试验剖面，研究该方法在本区的找矿效果及异常特征，用以指导未知区的找矿评价工作。试验剖面要选择钻探对隐伏矿体控制较好，并尽量穿过已知矿体或含矿构造带。在普查找矿阶段，据矿床类型及其规模，宜采用100×20米~250×20~40米的测网。总之，以提高找矿效果和工效为前提，以不漏掉具工业意义的异常为目的。

野外采样要避免开废石废矿堆等干扰物，以采集35~40厘米的B层样品为佳。应特别注意的是：样品要晒干或凉干，切勿用火或烘箱烘烤。样品加工前用手揉碎或用木棒敲碎，过100目筛，取20克做分析用。

(二) 室内测定试验方法

壤中吸附相态汞测定方法，是测量方法的重

要环节，它是找矿评价效果好坏的关键。因此，对样品及其测定条件，必须通过试验确定。

1. 仪器最佳工作状态的选择

我们使用的GX-3型测汞仪，是南通县电子仪器厂生产的。测定样品（金丝取样管）时，要选择并保持仪器的正常工作状态（表1）。

项目	要求条件	备注
电源电压	220V ± 10%	工作时检查
仪器灵敏度	不低于1 × 10 ⁻¹¹ g Hg	工作时检查
管式炉温	600~700℃	金丝脱汞温度500℃ W炉丝呈红色
泵延时	50秒	脱汞时间
抽气流量	0.15~0.2升/分	
峰值漂移	< 5格/分	

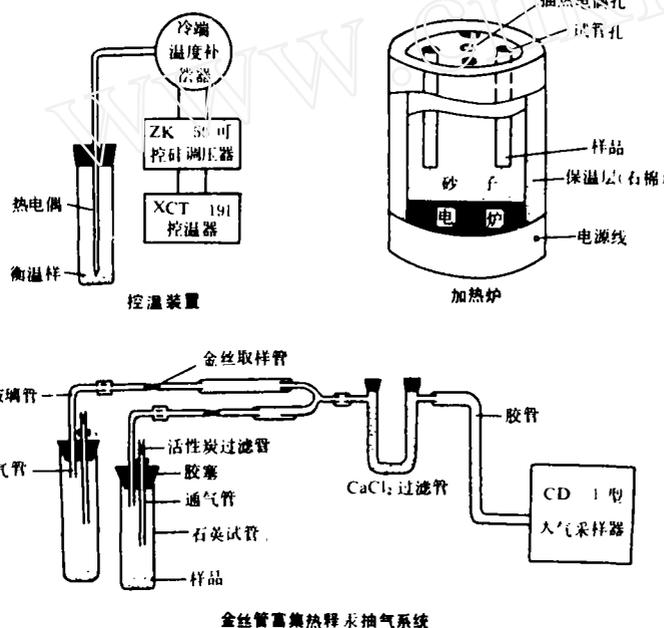


图1 自动控温热释汞装置示意图

试验结果表明：土壤吸附汞的能力与颗粒表面积有关，单位体积内土壤颗粒愈多，表面积则愈大，吸附能力愈强；细粒土壤富含有机质，也有利于汞的吸附。此外，在热释温度、时间不变的条件，粒度小的样品热释完全。因此，采用<100目的样品，热释汞量高，异常较清晰。

土壤热释控温装置见图

1。热释炉的温度要求均匀、稳定。热释时金丝富集汞气的抽气流量为0.25升/分。

上述样品热释、测定的仪器工作条件，必须严加控制，否则难以达到样品分析误差的要求。

2. 对样品及热释条件的试验

a. 样品粒度 壤中吸附相态汞量的高低与土壤粒度有关，如金口岭铜矿床76线的土壤粒级试验，发现<100目的比60~100目的含汞高（图2）；沙滩角铁铜矿床37线的试验表明，<100目的汞量比60目、80目的高。

b. 热释温度 吸附相态汞的热释温度，取决于土壤性质、组分和汞的存在形式。所谓吸附相态汞，主要指Hg⁰和部分HgCl₂，故热释温度应低于160℃。如广西两江铜矿区I—I线土壤剖面不同热释温度的试验，其中以140℃的热释汞量曲线最佳，在I、II和IV号矿体上出现三个

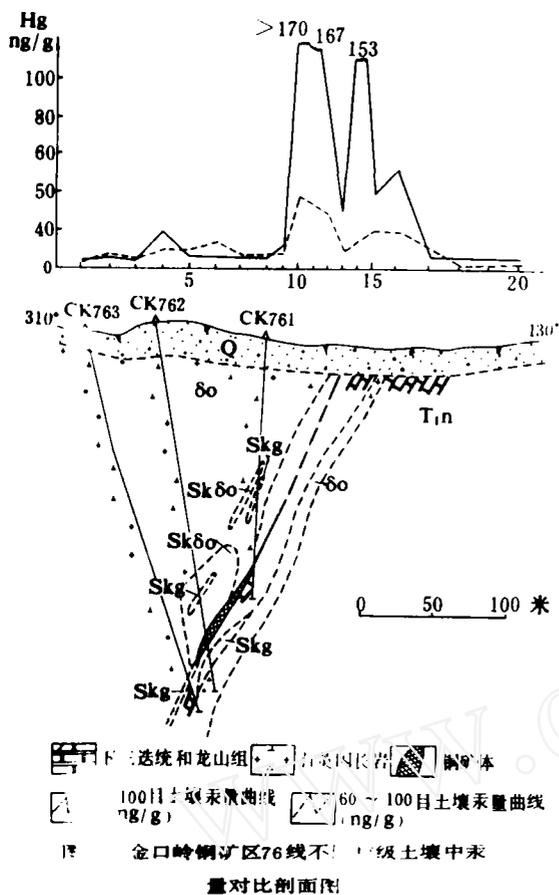


图2 金口岭铜矿区76线不同深度土壤中汞量对比剖面图

Sk—夕卡岩化石英闪长岩; Skg—夕卡岩

清一异常峰,并与壤中水气异常吻合(图3)。在加山硫金矿区,以160℃的热释汞量曲线最佳。在铜山矿区以120℃的热释汞量曲线最佳。因此,在不同地区开展壤中吸附相态汞测量时,热释汞的最佳温度,必须通过试验确定。

c. 热释时间 当热释温度不变的情况下,试样热释时间的长短,直接影响汞量的高低。但时间过长又影响工作效率。通过金口岭矿区76线土壤剖面的试验,发现热释1分钟和2分钟的汞量异常不明显;而热释4分钟、5分钟和6分钟则较清晰(图4)。同时发现热释时间达到4分钟后,如继续增加时间,汞量差异不大。因此,热释时间以4分钟较适宜。

d. 试样重量 通常仪器的灵敏度的高低,决定于试样的重量,如使用GX-3型测汞仪,试样重量不宜过大,以0.01~0.1克为宜;如试

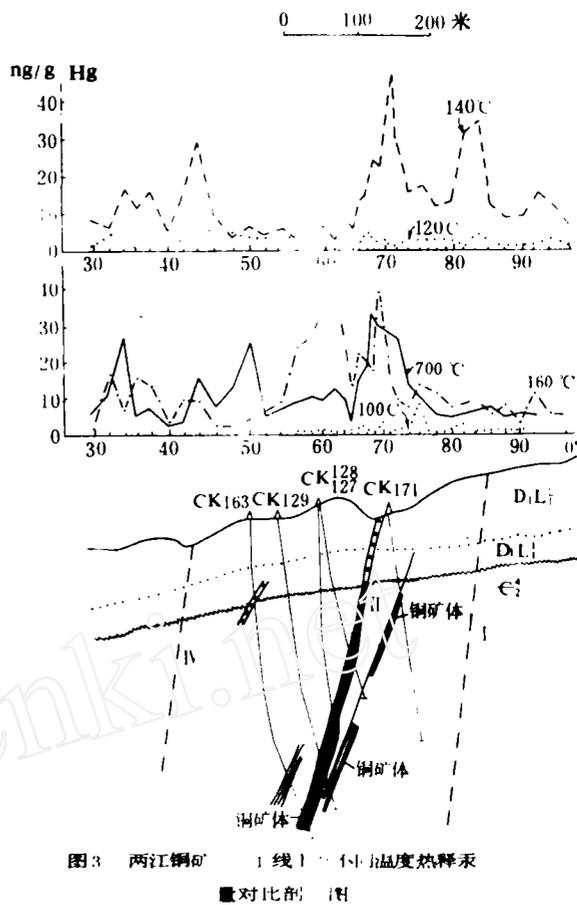


图3 两江铜矿1线不同温度热释汞量对比剖面图

D₁L—砂页岩; D₂L—石英砂岩; E₂—砂页岩互层

样为含汞较高的硫化矿物,试样应减少到0.01~0.02克。

3. 试样热释方法

首先用金丝取样管连接热释石英管和CD-1型大气采样器,然后量取0.1克试样,盛在热释石英管内,并插入控温砂浴炉中,在最佳热释温度和时间(4分钟)内,启动大气采样器,边热释边抽气(0.25升/分),使热释出的汞气(Hg⁰)富集在金丝团上。为了提高工效,可用石英管同时热释多个试样,分别用金丝取样管将汞气富集起来(图1)。此外,还可将试样盛在石英舟内,置入石英管式炉中单个热释。这种方法精度高,但工效低。

4. 汞量测定方法

在测定之前,应对测汞仪进行标定,并根据

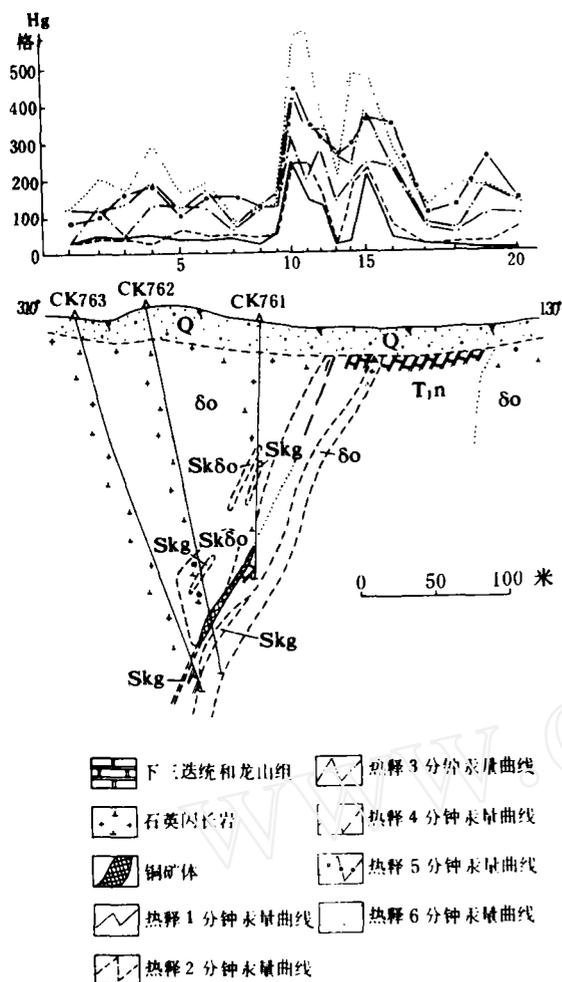


图4 金口岭76线在140℃不同热释时间壤中汞量对比剖面图
(其余图例同图2)

室温抽取一定量的饱和汞蒸气(通常5 μl),对仪器的工作测程进行标定。然后利用“饱和汞蒸气浓度关系表”,按照仪器读数换算出仪器的格值当量(ng/格)。

测定样品的方法是:将已富集汞的金丝管,插入600℃的管式电炉中,使金丝团位于炉膛中心,并使金丝管的一端插入测汞仪的进气口;同时启动“泵延时”开关。延时50秒钟后,泵自动抽气(0.2升/分),使金丝团蒸馏出的汞气进入仪器的吸收池内测定之。用下式换算壤中汞含量:

$$C_i = \frac{C_0 \cdot N_i}{G}$$

式中: C_i —壤中吸附相态汞含量(ng/g);
 C_0 —标定仪器的格值当量(ng/格);
 N_i —测定样品的仪器读数(格);
 G —热释样品的重量(g)

汞量测定质量的检验标准

壤中吸附相态汞测定重现性要比壤中汞气测量好,如能严格控制测定条件,如按定量分析的

误差计算公式: $\delta = \frac{|C_1 - C_2|}{1/2(C_1 + C_2)} \times 100\%$,

以允许相对误差 $\delta < 33\%$,合格率 $W > 80\%$ 为检验质量合格的话,通常也能达到化探分析的误差要求,如老鸦岭铜矿床3线土壤剖面的重测结

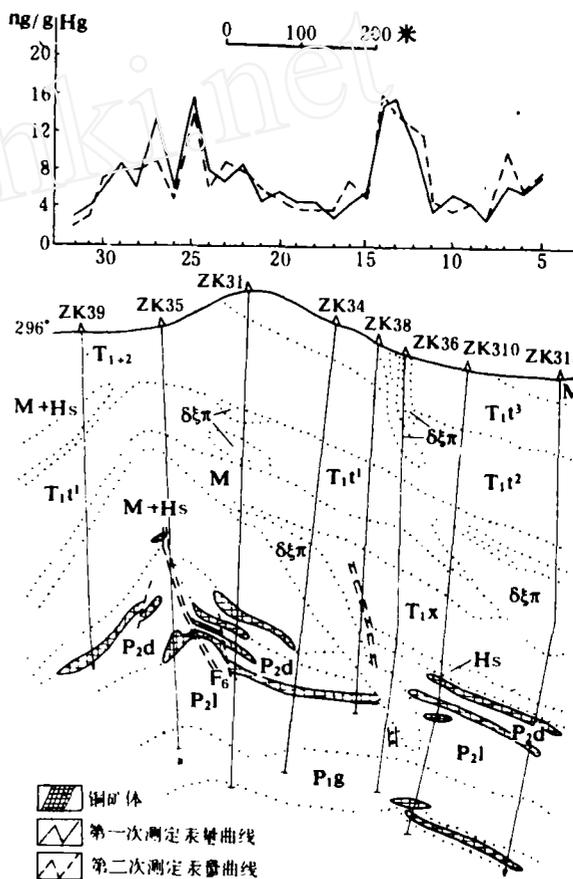


图5 老鸦岭矿区3线壤中汞量重复测定结果对比剖面图

T_{1t} —塔山组; T_{1x} —小凉亭组; P_{2d} —大隆组;
 P_{2l} —龙潭组; P_{1g} —孤峰组; M —大理岩; HS —
角岩; $\delta E \pi$ —闪长正长斑岩

果: 平均相对误差 $\delta = \pm 19.43\%$, $W = 83.3\%$ 。重测汞量曲线吻合程度好, 完全符合化探分析和找矿评价的要求 (图 5)。但沙滩角铁铜矿床 37 线土壤剖面的重测结果 $\delta = \pm 27.25\%$, $W = 64.7\%$, 表明平均相对误差偏大, 合格率较低。按上述汞质量检验标准衡量, 显然是不合要求的。尽管如此, 汞量异常仍较清晰的反映出矿体的赋存部位。

众所周知, 汞的地球化学特性较活泼, 汞测的影响因素较多, 尤其对超微量汞 (ppb 级) 的测定误差更难控制。我们认为应当根据实际情况, 在能够达到化探找矿评价要求的前提下, 制定相应的切合实际的测汞质量检查标准是必要的。地科院物化探矿研究所曾建议: 对样品中的汞量, 应按汞含量范围, 分别规定相应的最大允许相对误差 (表 2)。我们对表 2 稍加补充和修正。初步认为这个衡量测汞质量的标准是合理的。

表 2

汞含量范围 (ppb)	允许最大相对误差 (%)	备注
<10	100	①<10ppb, 原无要求, 为此次补充的;
10~20	60	②10~20ppb, 原定为100%, 似偏高, 此次修正为60%;
21~100	40	
101~1000	30	
>1000		③ $W > 80\%$ 为合格

如果按表 2 中的标准, 重新检验沙滩角铁铜矿床 37 线汞量重测结果, 我们将看到由原来 6 个样品超差, 而降为 2 个样品超差或接近超差, 其合格率由原来的 64.7%, 提高到 88.2% (表 3)。这样就达到了合格要求。找矿实践也表明, 这样的分析结果, 完全能够满足壤中吸附相态汞测量的要求, 找矿效果较好。

表 3

样品号	C_1 (ng/g)	C_2 (ng/g)	$C_1 - C_2$	$1/2 (C_1 + C_2)$	$\frac{C_1 - C_2}{1/2 (C_1 + C_2)} \times 100\%$
7/37	25.55	17.52	+ 8.03	21.54	+ 37.28 *
8/37	51.10	34.31	+ 16.79	42.71	+ 39.31 *
9/37	2.92	2.48	+ 0.44	2.71	+ 16.30
10/37	34.31	32.12	+ 2.15	33.22	+ 6.47
11/37	18.25	20.44	- 2.19	19.35	- 11.31
12/37	11.68	14.24	- 2.56	12.96	- 19.75
13/37	29.93	17.89	+ 12.04	23.91	+ 50.36 * _△
14/37	13.14	14.24	- 1.10	13.69	- 8.04
15/37	1.46	1.10	+ 0.36	1.28	+ 28.13
16/37	7.30	5.84	+ 1.46	6.57	+ 22.22
17/37	12.05	10.95	+ 1.10	11.50	+ 9.57
18/37	4.38	2.48	+ 1.90	3.43	+ 55.39 *
19/37	5.48	8.47	- 2.95	6.98	- 42.26 *
20/37	18.25	9.49	+ 8.80	13.86	+ 63.49 * _△
21/37	9.49	7.30	+ 2.19	8.40	+ 26.07
22/37	35.77	36.50	- 0.73	36.14	- 2.02
23/37	16.06	12.41	+ 3.60	14.24	+ 25.28

* 表示为原来超差者, $\delta = \pm 27.25\%$, $W = 64.7\%$

△: 按表 2 中质量检验标准衡量为超差者, $W = 88.2\%$

大批生产样品的测汞质量监控方法是：从每批样品中随机抽取5~10%，编为密码重测检

验。重测结果按表2标准，计算合格率，其公式如下：

$$\text{合格率}(W) = \frac{\text{未超差的样品数}(N_i)}{\text{重测样品数}(N)} \times 100\%$$

通常 $W > 80\%$ 为测汞质量合格，结果可靠，可以用于化探找矿评价工作。

找矿效果

(一) 已知矿的试验效果

壤中吸附相态汞测量试验，1980~82年在两江和铜陵地区进行了数个不同类型矿床的试验，均取得较好的找矿效果。现仅以三个矿区的试验为例说明如下：

1. 老鸦岭夕卡岩型热液交代铜矿床

该矿床位于青山背斜的南东翼，矿体赋存在次一级的穹窿状背斜中，主要受大隆组(P₂d)控制，隐伏深度一般在150~300米。矿石矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿等。

通过3线、4线剖面的试验，在矿体和含矿断裂的上方，出现6~20ng/g的汞量异常（异常下限为4ng/g），最大峰值为25ng/g。异常清晰地反映出矿体的赋存部位（图5）。

2. 金口岭夕卡岩型铜矿床

矿床位于铜官山背斜的北西翼。矿体产于石英闪长岩与三迭系中、下统灰岩接触带中，隐伏深度200米左右。围岩蚀变有夕卡岩化、硅化、黄铁矿化等。矿石矿物有黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿等。

通过76线、86线的试验，含矿接触带上方出现较清晰的汞量异常，一般强度在30~170ng/g之间（异常下限10ng/g），反映出含矿构造的隐伏部位（图2）。

3. 白家山夕卡岩型铜矿床

矿床位于铜官山背斜中段，背斜轴呈“S”形扭动部位的北西翼。石英闪长岩与二迭系栖霞组(P₁q)灰岩接触带处成矿。围岩蚀变为夕卡岩化、大理岩化、硅化等。矿体隐伏深度100~200米。矿石矿物有磁铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、自然铜、赤铜矿等。

通过8线剖面的试验，在矿体及其上盘出现

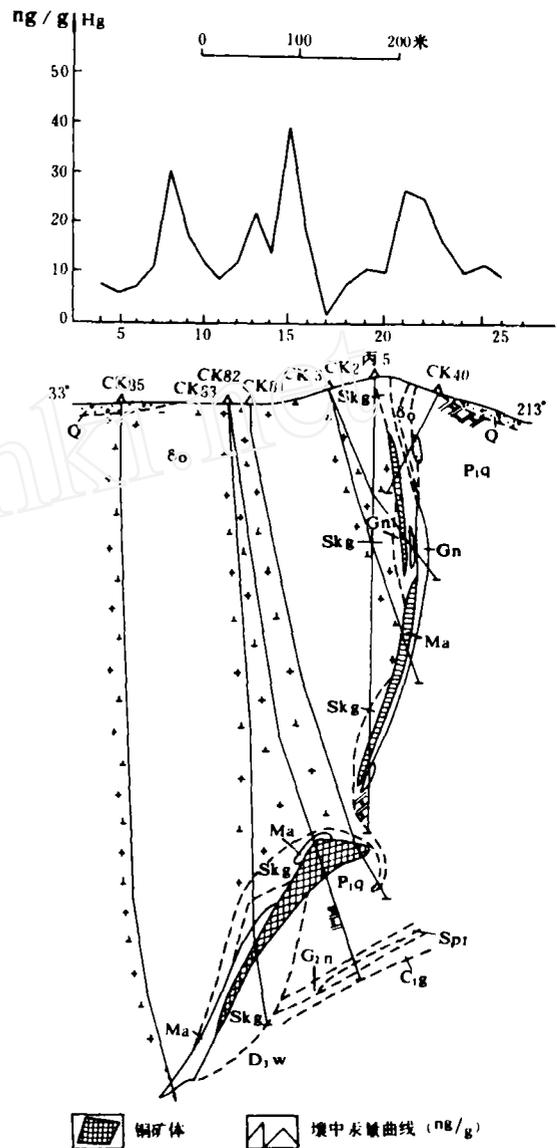


图6 白家山铜矿区8线地质及壤中汞量异常综合剖面图

P₁q—栖霞组大理岩；D₁w—五通组大理岩；
δo—石英闪长岩；Skg—石榴石夕卡岩；
Spt—蛇纹石滑石；Ma—磁铁矿；Gn—铁帽

10~39ng/g的多峰汞量异常(图6)。如19~26点之间异常峰是浅部产状直立的磁铁矿体的反映;而7~16点之间的双峰异常是深部产状缓倾斜的铜矿体的反映。

(二) 未知测区的测量效果

1. 代家冲测区

测区位于铜官山背斜南西段北西翼,东西向凤凰山基底断裂带的西端。由背斜核部向北西依次出露地层为 $S_1 \sim P_2$,主要由灰岩、砂页岩组

成。北东和北西向断裂较发育,沿高丽山组上部,有十多处透镜状铁帽分布。代家冲和古松三号铁帽含金分别为8.67克/吨和24.2克/吨,成矿地质条件有利。

为探明铁帽的形态、规模问题,投入1.5公里²的1:2万(200×20米)壤中吸附相态汞测量,共发现三条汞量异常带,编为I、II、III号(图7)。确定壤中汞量的背景值和异常下限分别为5ng/g和15ng/g。

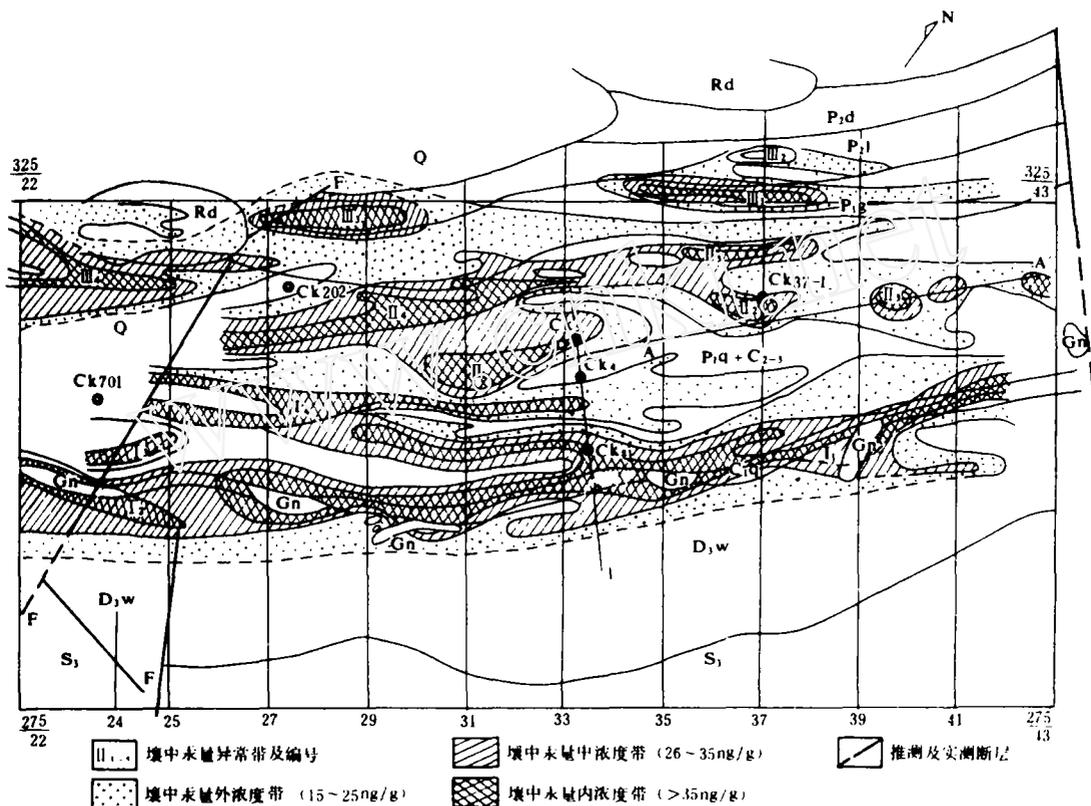


图7 铜官山矿区外围代家冲测区地质及壤中汞量异常综合平面图

Q—第四系; Rd—第三系; P₂d—大隆组; P₂l—龙潭组; P₁g—孤峰组; P₁q + C₂₋₁—栖霞组、黄龙—船山组; C₁g—高丽山组; D₃w—五通群; S₁—坟头组; Gn—铁帽

a. I号异常带 位于高丽山组(C₁g)附近,由多个浓集中心组成(指内浓度带范围),编号为I₁~I₄号。汞量异常带形态呈不规则的条带状,轴向与岩层走向一致。在铁帽赋存部位,异常带均有膨胀现象,大约为铁帽宽度的2~5倍。原因是铁帽的赋存部位,多为控矿断裂交汇发育部位。此外,壤中汞量异常受地形的

影响而有一定的位移。

尽管汞量异常有位移,但仍能反映铁帽的形态、规模及分布特征,如33线附近已施工的CKB1孔,位于汞量内浓度带中,则见到20米厚的铁帽;而CK1和CK5孔,因位于汞量异常带边缘,故只见到褐铁矿化现象。

b. II号异常带 赋存在栖霞组(P₁q)层

工业意义的含金矿体。

2. 某矿区外围测区

位于M背斜和N背斜之间的向斜部位。向斜翼部由下三迭统和上二迭统组成，主要岩性为灰岩、砂页岩。燕山期的闪长岩、石英闪长岩与成矿关系密切。测区恰好位于M和N背斜中段，轴向呈S形扭动部位，推断为多组断裂和褶皱构造的交汇复合部位，成矿地质条件较有利。测区被水稻田覆盖，常规化探没有找矿效果。

通过9公里²的1:2.5万(250×40米)的壤中吸附相态汞测量，发现六个主要异常，经综合研究划为三大类，其中I、II类异常具有工业意义。

a. I类异常 称为某铜矿式异常，包括I₁和I₂号汞量浓集中心(指内浓度带范围)，是测区内最有找矿远景的异常(图8)。

I₁号异常形态似脚印状，轴向北东。异常长800米，宽300米左右。汞量一般在16~20ng/g，最大25ng/g(异常下限6ng/g)，I₁号异常中心部位位于某铜矿床南西侧，相距700米左右。异常强度和规模与某铜矿床的富集地段相当，二者呈雁行状排列。据异常分布特征，推断I类异常位于北东、北西和东西向断裂、褶皱构造的交汇复合部位，有可能受某铜矿床那样的穹窿状背斜构造的控制。

I₂号异常的规模和强度较小，反映褶皱和矿化向北西有减弱的趋势。

b. II类异常 称为某含金硫铁矿式异常，包括II₁和II₂号异常(图8)，是测区内较有找矿远景的异常。

II类异常形态呈透镜状，长700米，宽300米左右。汞量浓度一般为25ng/g，最大>39ng/g，是测区内汞量浓度最大的异常。

据II₁号异常南侧有与成矿关系密切的闪长岩体露头；附近地段黄铁矿化较普遍，又有Cu、Zn次生晕异常；还有II类汞量异常强度与附近的某含金硫铁矿床的汞量异常强度相当，故推断II类异常可能是与隐伏闪长岩体有关的硫铁矿体的反映。

c. III类异常 称为某铁帽式异常，包括III₁和III₂号异常。异常地段有铁帽体分布。该异常地段，以往钻探证实其工业意义不大，就是零星分布的铁帽反映。

结 论

(一) 壤中吸附相态汞测量原理与壤中汞气测量原理相同，因此，二者具有同样的找矿效果。特别是前者能够解决水稻田覆盖区的普查找矿问题，这就扩大了化探找矿范围。

(二) 壤中吸附相态汞异常的形态、规模受地形的影响而有一定的位移；但汞量浓集中心(指内浓度带范围)的形态、规模及分布特征，基本反映了矿化富集体的规模、赋存部位及分布特征。

(三) 找矿实践表明，在能够满足化探找矿评价要求的前提下，按汞含量范围，制定相应的测汞质量检验标准是合理的。

(四) 壤中吸附相态汞测量比壤中汞气测量优越得多，如采样方法简单、工效高、影响因素少、重现性好、样品可兼测其他元素及留作检查等。因此，该方法相对成本较低，经济效益高。

(五) 试验结果表明，含黄铁矿化的炭质页岩、煤系地层以及地表废矿石堆等，对壤中吸附相态汞测量有干扰作用。在异常评价时应引起注意。

参 考 文 献

- [1] 冶金部地质研究所气测组，地质与勘探，1982年第3期，第53页。
- [2] 常凤池等，应用热释法研究土壤中汞的存在形式，内部资料，1980。
- [3] 地质部物探所、情报所编译，汞的地球化学译文集，1981。
- [4] 中国科学技术情报研究所译编，地理环境污染与保护译文集，第八集，1980。
- [5] 伍宗华等，壤中气汞量测量找矿法，内部资料，1981。