

四周倾斜的圆筒状矿体，直径2~3公里。南部I号异常可能是另一个含矿体。

形成本区自电异常的主要因素，是地下

水和矿体的物理化学过程。地下水的深度和矿体与斑岩电性的差异，控制了自电异常的形态。

## 汞的迁移转化和壤中汞气异常的形成

胡国廉 田俊杰 赖文明 常凤池 李德亮

实践证明，壤中汞气地球化学找矿方法，在我国铜、铅、锌、钨、锡、钼、汞、锑、金以及铁矿上都有一定的效果。由于在厚层运积物覆盖区它比次生晕等方法的效果好，故其试验和应用正不断扩大。但在工作方法、数据质量、应用条件和异常评价方面尚存在许多问题。我们认为，这些问题涉及到壤中汞气异常的形成机理和影响因素两个方面，而这两方面的深入研究又都必须先搞清汞的迁移和转化。本文就是试图从深部汞源中的汞和土壤中的汞之迁移、转化，探讨汞气异常形成等问题。

### 深部汞源的转化和迁移

前面提到的若干种金属矿床，在其矿石矿物和脉石矿物中含汞（表1），是大家知道的。矿体周围发育着汞的原生晕，也屡见报道。但在盲矿体中，这些固体矿物中的汞，是怎样与土壤中的汞气相联系，其发育

又受哪些因素控制，都还没有充足的材料说明。一般认为是成矿过程残留的汞气，或含汞矿物气化解造成的，即认为汞是自深部以气态向上迁移。那么，渗透着地下水的岩层和断裂，对气态汞的迁移必然是一种障碍。我们在凡口铅锌矿，在地表有壤中汞气异常地段之下部坑道，从控矿断裂破碎带（含水）里所测游离气态汞的含量，一般确实很低（表2）。因此汞以气态从深部穿透渗水的岩层（或断层）向地表迁移的假说，很难解释埋藏深、在潜水面下的盲矿体可以产生壤中汞气异常的事实。这便给我们提出一个新问题：汞是否还有另外的迁移形式？Leckie等对三种价态的汞在pH—Eh坐标系

坑道断裂破碎带中汞气含量(ng/m<sup>3</sup>) 表2

| 深度<br>(米) | F3  |     | F4  |    | F101 |    | F102 |    |
|-----------|-----|-----|-----|----|------|----|------|----|
|           | 样品数 | 平均  | 样品数 | 平均 | 样品数  | 平均 | 样品数  | 平均 |
| -120      | 8   | 16  |     |    | 2    | 25 |      |    |
| -160      | 8   | 6.8 | 1   | 2  | 2    | 4  | 1    | 1  |
| -200      | 8   | 18  | 1   | 1  | 8    | 11 | 2    | 2  |

若干矿物中汞的含量(ppm)范围 表1

|      |         |        |           |
|------|---------|--------|-----------|
| 铜矿   | 10~1000 | 自然金    | 1~100     |
| 锑矿   | 5~500   | 自然银    | 1~100     |
| 闪锌矿  | 0.1~200 | 重晶石    | 0.2~200   |
| 辉锑矿  | 0.1~150 | 白铅矿    | 0.1~200   |
| 雄黄   | 0.2~150 | 白云石    | 0.1~50    |
| 黄铁矿  | 0.1~100 | 萤石     | 0.01~50   |
| 方铅矿  | 0.04~70 | 方解石    | 0.01~20   |
| 黄铜矿  | 0.1~40  | 菱铁矿*   | 0.02~30   |
| 斑铜矿  | 0.1~30  | 石英     | 0.01~2    |
| 车轮矿  | 0.1~25  | 软锰矿    | 1~1000    |
| 辉铜矿  | 0.1~25  | 褐铁矿    | 0.1~500   |
| 白铁矿  | 0.1~20  | 赤铁矿*   | 0.02~0.05 |
| 磁黄铁矿 | 0.1~5   | 磁铁矿*   | 0.1~0.5   |
| 辉钼矿  | 0.1~5   | 锡石**   | 0.1~450   |
| 毒砂   | 0.1~3   | 黑钨矿**  | 0.1       |
| 雄黄   | 0.1~3   | 镍黄铁矿** | 46        |

注：\*为作者所在单位资料；\*\*引自《汞的原生分散》，其他引自Jonasson和Boyle。

中稳定场的研究成果（图1），对我们有很大启示。若将硫化矿床酸性矿体水的范围投影于其中，则可以发现此位置并非气态汞的稳定场。这是否可以认为，含汞矿物甚至包括由它们分解的游离汞，能转化为更稳定的HgCl<sub>2</sub>形式呢？为此，我们首先分析HgS在这条件下溶解的可能性。在溶液中存在Cl<sup>-</sup>浓度为3.5ppm时，HgS溶解度增加408倍，而Pb、Zn、Cd的硫化物只增加8~39倍，Cl<sup>-</sup>浓度为350ppm时，HgS溶解度增加44230倍（据Hahne等）。为进一步证实汞的可溶性，我们用5%Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>-1%NaCl溶液，在13℃时冷浸各种矿石。从16个矿区9种矿石的49个样品实验结果，证实了汞明显

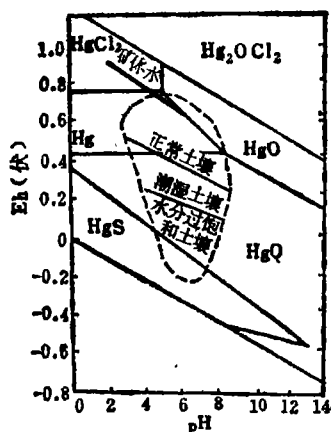


图1 Hg的稳定场  
(25°C, 10<sup>-3</sup>M, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与Cl<sup>-</sup>各为10<sup>-3</sup>M)  
据Leckie等

地从固体含汞矿物中移化而进入溶液(原始资料从略一编者)。同时水口山康家湾矿体水中也证实了有汞离子的存在。矿体水中出现  $\text{Cr}^{6+}$ , 说明介质是处于较强的氧化环境中, 根据铬的稳定场, 推测其 Eh 值应大于 400mv。因此导致含 Zn、Hg 等矿物部分溶解。无疑, 地下水中溶解氧对硫化物的溶解起着重要的作用。碱性重碳酸盐对 Pb、Zn、Cu、Ag、Hg 的硫化物虽然有一定溶解性, 但在潜水面下的缺氧情况下, 其作用弱的多。斯韦施科夫等(1962)的电化学溶解理论, 我们认为更有说服力。其中指出: 当导电性较高的不同电极电位矿物共存, 并有地下水流经其中, 移去反应产物的情况下, 高电极电位矿物可以使低电极电位矿物溶解速度增大。电极电位顺序由小到大为: 闪锌矿、辉锑矿、红砷镍矿、辉铜矿、方铅矿、斑铜矿、镍黄铁矿、毒砂、磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿、白铁矿。可见, 含汞较高的闪锌矿是易于溶解的。为进一步证实含汞矿物溶解后汞以络离子形式, 被地下水携带沿断裂带迁移, 我们从有汞气异常的断裂中, 采集坑道不同中段的断层泥, 用中性浸取, 测定汞的含量。表 3 证实了我们的推测, 断层泥中有大量的  $\text{Hg}^{2+}$ 。因此我们认为, 深部汞源的上述转化, 是汞可以达到地表的主要方式。但这并不排斥以气态汞直接迁移或溶于地下水中, 并在压力降低时使汞又转入气态的可能性。当矿体已侵蚀出露地表时, 由于地表中有丰富的氧和重碳酸离子, 以及地

表温度较高, 使这种转化过程更容易发生。

根据以上探讨, 我们进一步推论: 汞气

凡口铅锌矿断层泥水溶性  $\text{Hg}^{2+}$  含量 表 8

| 采 样 位 置 | $\text{Hg}^{2+}$ (ng/g) |
|---------|-------------------------|
| 坑道—80米  | 7.04                    |
| —120米   | 4.97                    |
| —160米   | 5.40                    |
| —200米   | 5.22                    |

(样品数量为24件)

异常所能反映的矿体埋藏深度, 必然与上述再迁移条件有关, 即与汞源的含汞量, 矿石的矿物组合, 产状, 断裂带性质与规模, 上覆岩层孔隙度, 以及水文地质特点, 有密切关系。

### 土壤中汞的迁移和转化

不论从深部汞源迁移上来的, 或出露地表的矿体溶解转化来的汞络离子, 到土壤层后, 由于其电离势很高, 二价汞很容易被土壤还原性物质还原成气态汞而分布于土壤中汞气异常。

但土壤是一种特殊的介质。它是由无机和有机胶体组成的胶体体系, 也是由氧、有机质、微生物、铁、锰、硫、氢等保持复杂平衡的氧化还原体系, 而且也是由比例不确定、分布不均匀的毛管与非毛管孔隙组成的不均匀多孔体系。因此在土壤中汞气的运动既不同于在大气中的运动, 也不同于在化学惰性的均匀多孔体中的运动。

从实验中我们已认识到, 从土层底部来的汞 ( $\text{Hg}^0$ ) 气, 其运动方向具有各向异性的特点。其垂直向上可以达数十米, 而水平方向却很小。在毛细多孔体系中, 曾被许多人证实的著名试验是: 气体分子是从毛管的冷端向热端, 即由密度大向密度小迁移(雷柯夫《建筑热物理理论基础》)。我们认为, 可以将其引用于解释土壤中汞气的运动。土壤表、底层温差远远大于水平方向的温差。这事实和上述试验结合, 则与  $\text{Hg}^0$  气运动特点很吻合。这特点与汞气测量有关的是: ①由于侧向运动弱、储气的非毛管孔隙不均匀以及汞气密度大所导致的扩散速度小等原因, 使汞气在同一半径土壤中, 各处的浓度难以靠自由扩散而达到均匀。②土壤垂

直剖面中的结构、湿度、pH—Eh 以及土壤成分有差异。汞气在运动中，环境不断改变，使它发生转化，并在固定相和气相中处于不稳定的“平衡”，因而近地表处壤中汞气含量在不同景观或局部地段土壤中就要受到不同的转化作用影响，从而使气测的效果有所不同。因此，我们必须注意与气测有关的以下几种转化形式：

1.  $\text{Hg}^{2+}$  与  $\text{Hg}^0$  之间的转化。
2.  $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^0$  与  $\text{HgS}$  之间的转化。
3. 无机汞与有机汞之间的转化。
4.  $\text{Hg}^{2+}$  和  $\text{Hg}^0$  在胶体上的吸附和解吸。

也就是说，需要考虑气态汞和固定态汞间的转化影响的因素。

#### 1. Eh—pH 的影响

汞的各种存在形式中， $\text{Hg}^0$  及挥发性的  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$  对壤中气测量有利，而转化为  $\text{Hg}^{2+}$  时就不利于气测。 $\text{Hg}^0$  转化为  $\text{Hg}^{2+}$  所需要的理论 Eh 值为： $Eh = 850 + 30 \cdot \lg [\text{Hg}^{2+}]/\alpha$ 。[ $\text{Hg}^{2+}$ ] 为二价汞的浓度， $\alpha$  为汞的络合键能系数，对有机质可大于  $10^{21}$ 。若将 20cm 以下土壤正常的 Eh（约为 450~650mv）代入公式，似乎土壤中大部分  $\text{Hg}^0$  在存在有机质的情况下，将转化为  $\text{Hg}^{2+}$ 。但实际上由于土壤中存在大量微生物，特别是极毛杆菌的存在，可以使许多汞的化合物包括  $\text{HgS}$  转化为  $\text{Hg}^0$ ，或发生甲基化作用产生挥发性  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ ，使汞仍有部分保持气态。在 pH=6.5~7.5 时最适于这些微生物生存，而在 pH=3.8~12 范围内仍可存在（见《农业微生物》）。此外，土壤 Eh—pH 值也影响了土壤中变价元素如 Mn、Fe、S 的价态，从而引起对  $\text{Hg}^{2+}$  或  $\text{Hg}^0$  不同的影响。经我们测定，当土壤 pH 值大于 7 时，土壤中 100°C 相态的汞随 pH 增高而增加。

#### 2. 土壤有机质和粘土矿物的影响

有机质和粘土矿物是土壤的两个主要成分。不少资料阐述了它们对  $\text{Hg}^{2+}$  固定的影响，但对  $\text{Hg}^0$  气的固定之影响，资料很少。Sheng C. Fang 以静态试验研究了五种土壤和六种粘土矿物及其他物质对  $\text{Hg}^{2+}$  气的固定，认为粘土矿物中伊利石固定  $\text{Hg}^0$  的能力最强，高岭石最弱，有机质中胡敏酸最强，被固定的汞量与介质汞气的浓度在一定范围内呈线性关系，符合 Freundlich 方程。这

部分汞仅有少量转化为  $\text{Hg}^{2+}$ ，但其余部分的状态尚不清楚。为了查明被固定的汞的存在状态。我们作了动态试验——以 0.1 升/分的流速向 0.3 克土壤注射定量汞气，再测定漏掉的汞量，又作静态试验——将 0.3 克土壤置于饱和汞蒸气中静放数日，测定土壤中增加的汞量，并用热释法测定土壤中的汞。我们发现，加入汞气的土壤，除原有的 220°C 热释峰增强外，在 100~150°C 区增加一个峰。图 2 说明土壤中有两种相态的汞。200~240°C 的汞与土壤腐植质的热释峰吻合（据 Gonzalez-vila），因此我们认为这是与腐植质结合的汞，也可能还包括部分的  $\text{HgCl}_2$ ，而 100°C 的汞认为是粘土矿物表面物理吸附的汞。后者吸附量虽低于前者，但却更清楚地反映后来叠加的气态汞。同时，明显看出有机质对汞气的固定能力比粘土矿物强。被土壤吸附的汞，随汞气浓度的增加、汞气处理时间的增加而增加。但是，土壤固定  $\text{Hg}^0$  的能力，比  $\text{Hg}^{2+}$  弱得多，已证实 5  $\gamma$  的  $\text{Hg}^{2+}$ ，可被 1 克土壤固定 93% 以上。20  $\gamma$  的  $\text{Hg}^{2+}$  也不低于 57%（据杨国治等）。蒙脱石 pH 值为 5 时，固定  $\text{Hg}^{2+}$  的能力最强，而高岭石却在 pH=9 时最强。而有机质的固定作用，则可在 pH 值更低时发生，且其固定量较粘土矿物大。

#### 3. 铁、锰的高价氧化物的影响

铁与锰的高价氧化物对  $\text{Hg}^{2+}$  或  $\text{Hg}^0$  气都有较强的固定能力，且  $\text{MnO}_2$  又较  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  强（表 4），但铁氧化物固定的汞，处于 126°C 的低温吸附状态，而  $\text{MnO}_2$  则处于

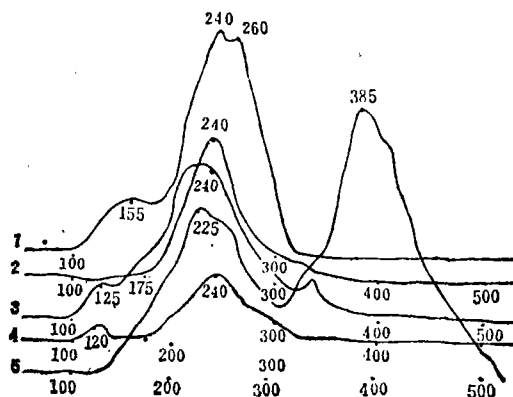


图 2 若干土壤热释图

1. 用汞气处理的土壤；2. 未用汞气处理的土壤；3. 用汞气处理的含碘土壤；4. 未用汞气处理的含碘土壤；5. 用  $\text{Hg}^{2+}$  处理的土壤

550℃的高温吸附状态(图3)。徐才栋认为(见《汞冶炼的理论基础》),  $Hg^0$ 可能与 $MnO_2$ 生成 $Hg_2MnO_2$ 的化合物。但酸性土壤的锰土(如水口山,  $pH = 5 \sim 5.5$ ), 壤中气态的汞仍相当可观, 可引起较强的异常(可达 $n \cdot 10ng$ )。而该区地表大气中含汞却很低( $<0.03ng/m^3$ )。这现象我们尚无法解释。

铁锰氧化物对汞气的动态固定试验 表4

| 加入汞量(ng) | $MnO_2(0.3克)$ |      | $Fe_2O_3(0.3克)$ |      |
|----------|---------------|------|-----------------|------|
|          | 固定量ng/g       | 固定率% | 固定量ng/g         | 固定率% |
| 0.18     | 0.6           | 100  | 0.65            | 95   |
| 0.36     | 1.2           | 100  | 0.79            | 63   |
| 0.92     | 2.4           | 100  | 1.47            | 68   |
| 1.8      | 6.0           | 100  | 4.10            | 62   |
| 3.6      | 11.6          | 99.9 | 3.20            | 24   |
| 6.0      | 19.9          | 99.8 | 4.0             | 20   |

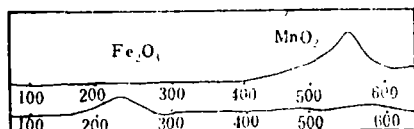


图3

#### 4. 卤素离子和硫的影响

矿体上方土壤中, 这些组分含量往往增高。这些组分在土壤中的分布与有机质有密切关系。 $Cl^-$ 一般为200ppm,  $Br^-$ 为10ppm,  $I^-$ 为2~4ppm。硫在非钙碱性土壤中为0.01~0.1%, 且多呈有机硫存在, 而在钙碱性土壤中虽可达 $n\%$ , 但多呈硫酸盐存在, 对 $Hg^0$ 气影响不大。我们用含有机质土壤分别加入 $KI$ 、 $KBr$ 、 $NaCl$ 、 $Na_2S$ 和半胱氨酸使碘、溴含量各为1ppm, 氯为0.1%, 硫为0.4%。注入不同量汞气进行动

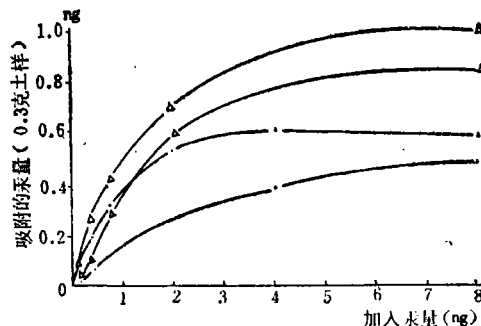


图4 含Cl、Br、I、S土壤对汞气的固定量

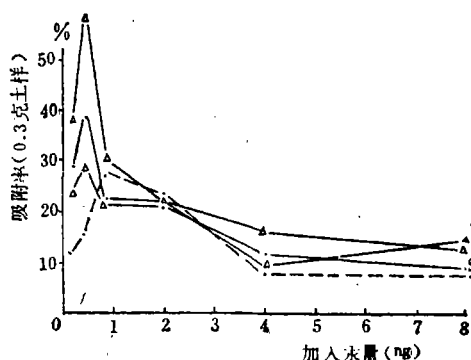


图5 含Cl、Br、I、S土壤对汞气的固定率

态试验。同时也在13℃饱和汞蒸气中做静态试验测定土壤中100℃相态的汞。从图4、5看出, 上述组分对汞的固定的影响是不同的, 溴和碘离子可抑制土壤对气态汞的固定, 而且使100℃相态的汞有所增高(表5), 因此对气测是有利的。而 $S^{2-}$ 的存在, 使100℃相态汞有所降低, 但当土壤形成硫

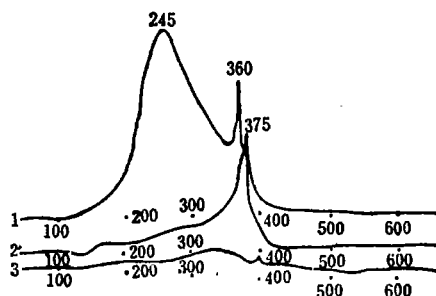


图6 含硫土壤热释图

1. 含S 0.4%吸附汞气; 2. 含S 0.4%未吸附汞气; 3. 不加 $Na_2S$ 土壤

化物的其他阳离子大大超过汞的含量时, 硫对汞气的影响不甚显著。热释谱(图6)显示出汞并不是固定成无机硫化物(360℃的热释峰并未增高)。然而在200~250℃出现峰区, 与腐植质热释峰一致。我们推测, 有可能汞是与含硫的有机物结合。

含I、Br、S土壤对100℃ $Hg$ 的静态吸附试验 (ppm) 表5

| I、Br、S各自含量 | 0   | 0.04 | 0.1  | 0.4  | 1    | 4    | 10   |
|------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| I对Hg的吸附量   | 2.6 |      | 4    |      | 3.5  |      | 4.73 |
| Br对Hg的吸附量  | 2.6 |      | 2.73 |      | 4.43 |      | 3.33 |
| S对Hg的吸附量   | 2.6 | 2.6  |      | 1.73 |      | 0.66 |      |

### 5. 微生物作用的影响

微生物作用, 是土壤中元素地球化学行为具有自己特点的重要原因之一。它对汞的转化和存在形式有相当重要的作用。

(1)  $\text{Hg}^{2+}$  转化为  $\text{Hg}^0$ : 土壤中分布很广的极毛杆菌, 可以迅速将加入到土壤中的  $\text{HgCl}_2$ 、 $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Hg}(\text{Ac})_2$ 、 $\text{HgSO}_4$ , 甚至  $\text{HgS}$  还原成  $\text{Hg}^0$ , 而转为气态。它属好气的嗜温菌, 因此在  $20\sim 25^\circ\text{C}$  生长最好, 而在  $3\sim 45^\circ$  也可生存。

(2) 甲基化作用: 许多微生物如淡水帽菌, 以及 *Tubificoides* 菌, 可以使土壤中无机汞转化为甲基汞。碱性时生成的  $(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$  易于挥发, 或光解为  $\text{Hg}^0$ 。因此上述两种作用对气测都有利。

(3) 硫的转化: 土壤中含大量的各种硫菌, 它们可以使各种硫化物转化为对气态汞无害的硫酸盐。但嫌气条件下的反硫菌, 能将  $\text{SO}_4^{2-}$  还原成  $\text{S}^{2-}$ , 使土壤中许多阳离子形成硫化物, 对气态汞则成为不利因素。

### 研究汞的表生转化的实际意义

我们认为从找矿角度, 根据汞的表生迁移和转化开展的壤中汞气异常形成机理的研究, 具有以下实际意义:

#### 1. 壤中汞气找矿应用条件的分析

我们已了解到土壤的 pH—Eh 环境以及土壤的若干组分综合地影响着气态汞在土壤中的含量, 从而使不同条件的地区, 汞气找矿的效果有所不同。任何一种找矿方法, 只有应用于条件有利地区, 才能发挥其积极作用。因此我们试图根据是否有利于气态汞的因素, 分析壤中汞气找矿的应用条件。表 6 划分出两类环境条件, 但在有利的景观区内, 有时也包括不利的局部地段。介于两者之间的过渡类型, 目前暂不另外划分。在深部汞源不很丰富的情况下, 不利因素的影响将更为突出, 异常显著减弱甚至发现不了, 在确定工作方法或评价异常时, 需加以考虑。

#### 2. 探索利用汞的存在形式评价异常

地表污染和富汞岩石产生的壤中汞气异常是发现矿体或断裂产生的叠加汞源异常的严重障碍之一, 需努力加以区分。地表污染引入的汞多呈  $\text{Hg}^{2+}$  形式, 由于它可被土壤强烈地吸附, 其迁移距离不大, 已经查明其

影响范围一般不超过 60cm, 向土层深部递减, 而且经我们初步测定被土壤吸附的  $\text{Hg}^{2+}$  其热释谱表现在  $225^\circ\text{C}$  及  $380^\circ\text{C}$  的峰温 (图 2), 富汞岩石产生异常地段的土壤其热释峰温区出现在  $180\sim 250^\circ\text{C}$ 。而矿体叠加汞源产生的汞气异常地段土壤, 除  $180\sim 250^\circ\text{C}$  出现热释峰外, 在  $100\sim 150^\circ\text{C}$  还出现一个特征峰。图 7 更清楚地表示富汞岩石 (石英角斑岩) 的壤中汞气异常在土壤  $100^\circ\text{C}$  相异常上被排除了。因此, 利用土壤垂直梯度和热释谱有可能区分壤中汞气异常的来源。

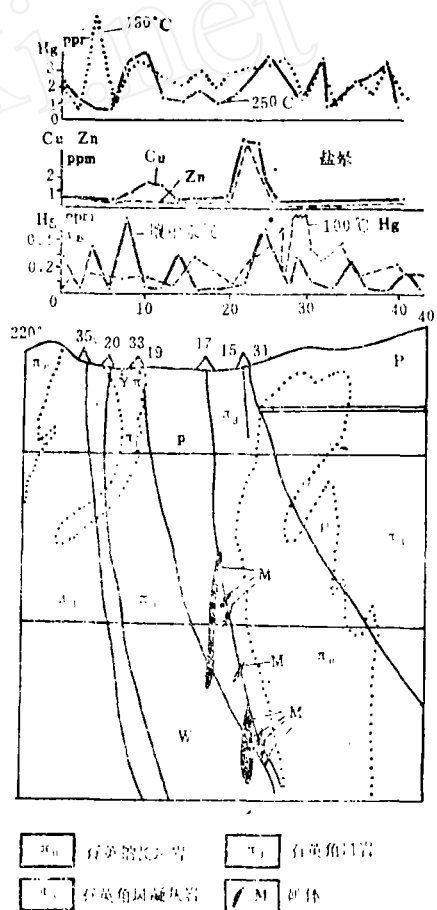


图 7 小铁山地区某线综合剖面图

#### 3. 汞的存在形式异常 (相异常) 找矿意义的探索

土壤全汞量只能反映土壤原始组分, 因此只有在坡积地区可以反映土壤层下部的矿体或其原生晕。但运积层土壤的原始组分则无法反映下部矿化, 也不反映矿化产生的汞气穿透运积层的信息。前面提到叠加汞气源在土壤  $100\sim 150^\circ\text{C}$  的特征峰温, 与壤中汞

壤中汞气测量工作地区类型的划分

表 6

| 类 型                        | 有 利 的 环 境 条 件                                                                                                                                                                                                                         | 不 利 的 环 境 条 件                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 转<br>化<br>形<br>式           | $\text{HgCl}_2 \longrightarrow \text{Hg}^0$<br>$\text{HgS} \longrightarrow \text{Hg}^0$<br>$\text{R-Hg} \longrightarrow \text{Hg}^0$<br>$\text{Hg}^{2+} \longrightarrow (\text{CH}_3)_2\text{Hg}$ 或 $\text{CH}_3\text{HgX}$<br>(X-卤素) | $\text{Hg}^0 \longrightarrow \text{Hg}^{2+} - \text{HgO}, \text{H}_2\text{O}$<br>$\text{H}^+$<br>$(\text{CH}_3)_2\text{Hg} \longrightarrow \text{CH}_3\text{Hg}^+$<br>$\text{Hg}^0(\text{Hg}^{2+}) \longrightarrow \text{HgS}$<br>$\text{Hg}^0(\text{Hg}^{2+}) \longrightarrow$ 有机质、 $\text{MnO}_2$ 、粘土矿物<br>等的吸附态 |
| 因<br>素<br>群                | 土壤性质                                                                                                                                                                                                                                  | 亚粘土、壤质土                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|                            | 土 厚                                                                                                                                                                                                                                   | >50cm                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                            | 湿 度                                                                                                                                                                                                                                   | 中等一半干燥                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                            | 通 气 性                                                                                                                                                                                                                                 | 中 等                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                            | Eh—pH                                                                                                                                                                                                                                 | 1. Eh < 400mv 时                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                            | 条 件                                                                                                                                                                                                                                   | $\frac{\text{Eh} + 600}{13 - \text{pH}} > 70 \sim 72$                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 土<br>壤<br>组<br>成           | 微生物作用                                                                                                                                                                                                                                 | 反硫菌活动强                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|                            | 土                                                                                                                                                                                                                                     | 1. 有机质很多, 有腐烂植物残体, 卤素含量低;                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|                            | 壤                                                                                                                                                                                                                                     | 2. 含 $\text{S}^{2-}$ 浓度中等;                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 土<br>壤<br>种<br>类<br>举<br>例 | 华北潮土、黄土, 华东下蜀黄土, 西北黄土, 西南黄壤, 华南赤土, 各种母质的干稻田土。                                                                                                                                                                                         | 强酸性红壤, 淹水稻田土, 中高山区山地薄层积土, 戈壁滩, 东北黑色森林土, 沼泽地区。                                                                                                                                                                                                                                                                      |

的反映较相似, 而且有更好的专属性(图 7)。这意味着可进一步研究制定以相异常为基础的壤中吸附气找矿方法。它对不利于气态汞发育的地区, 可能具有更好的效果。

## 结 论

1. 深部含汞硫化物在各种溶解作用和地下水文地质条件有利时, 汞被溶出, 并以氯的络合物形式被地下渗流携带沿着断裂和岩石孔隙上升至地表, 在土壤微生物其他还原物质作用下还原成  $\text{Hg}^0$  气, 土壤表底层温差使  $\text{Hg}^0$  气沿非毛管孔隙上升并在土壤中形成壤中汞气异常。

2. 在土壤中迁移的  $\text{Hg}^0$  气由于土壤的 Eh—pH 值, 有机质、微生物活动、粘土矿物、卤素离子、铁锰氧化物、硫等组份的影

响, 使其受到固定和气化两种相矛盾的作用, 它的相态也随具体的条件而变化, 在各种相态间, 维持复杂的动平衡。

3. 土壤固定  $\text{Hg}^0$  气的容量和速度都比对  $\text{Hg}^{2+}$  弱的多。其固定能力随  $\text{Hg}^0$  气浓度增大而呈指数减弱。土壤中的被固定  $\text{Hg}^0$  气与汞气浓度的关系符合 Freundlich 吸附方程, 在含量不高时呈线性关系。

4. 被土壤固定的  $\text{Hg}^0$  气, 主要存在于  $100 \sim 150^\circ\text{C}$  (粘土矿物或  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的吸附态) 以及  $200 \sim 250^\circ\text{C}$  (与有机物结合及  $\text{HgCl}_2$  的状态) 的热释温区。后者的固定作用比前者强, 速度快, 但前者更能反映被吸附的叠加成份的气态汞。

5. 研究汞气的表生转化条件具有找矿实际意义。