

两个验证剖面检验结果表 表 7

地区剖面	弯子街矿床 某剖面	高峰山矿床 某剖面
分带性指数及数值 (lg)		
Cu/Sn	0.4337	1.6990
Cd Pb/Bi Sn	0.3500	4.6467
Cu Pb/Bi Sn	2.1642	5.0447
Cu Cd/Be Bi	1.3463	4.6167
Cu Cd/Be Sn	0.8017	4
Cu Cd/Bi Sn	-0.7894	4
Cu Pb Cd/Be Bi Sn	2.5322	6.3457
分带性指数及预测 Z 值 (米)		
Cu/Sn	670.9	1169.7
Cd Pb/Bi Sn	458.8	1266.2
Cu Pb/Bi Sn	513.8	818.54
Cu Cd/Be Bi	717.7	1286.5
Cu Cd/Be Sn	791.2	1714.35
Cu Cd/Bi Sn	470.1	1161.2
Cu Pb Cd/Be Bi Sn	662.7	1232.8
Z 值 (米)	613.9	1253.6
实际 Z 值 (米)	500	1050
$Z_0 - \bar{Z}/Z_0 \times 100$ (%)	22.78	17.68

素分带序列是类同的。

结 论

1. E. M. 克维亚特科夫斯基应用分带性指数确定矿体截面深度的方法^[4], 可适用于个旧东部矿区用构造原生晕确定成矿花岗岩面 Z 的数值 (深度)。

2. 个旧东部矿区中, 成矿花岗岩沿围岩层间剥离带和构造断裂中均有相类似的原生晕的元素分带系列, 已为文中应用分带性指数确定花岗岩面 Z 值的效果所证实。沿构造轴向的原生晕元素

分带序列为 (从下而上): Be→Bi→Sn→Ag→Cd→Pb→Cu。

3. 个旧东部矿区确定成矿花岗岩面 Z (埋深) 的原生晕分带性指数为: Cu/Sn, Cd Pb/Bi Sn, Cu Pb/Bi Sn, Cu Cd/Be Bi, Cu Cd/Be Sn, Cu Cd/Bi Sn, Cu Pb Cd/Be Bi Sn 等七个。随着分析技术的改善, 将来能够检出的元素越多, 可能个数会有增加或修改。

4. 根据最佳分带性指数 (指标) 的 $lg Z - a + blg v_n$ 回归方程计算预测的成矿花岗岩面 Z 值 (深度), 与真深度 (Za) 相比: 单一分带性指数确定的成矿花岗岩埋深, 误差一般较大, 同时使用七个分带性指数预测成矿花岗岩深度, 准确度较高。

本文承林振芳工程师给予帮助, 顺致谢意。

参考文献

- [1] 云南某冶金地质勘探队, 地质与勘探, 1975 年第 1 期 40 页
- [2] 云南冶金地质勘探公司物探队, 地质与勘探, 1980 年第 2 期 51 页
- [3] 中国地质科学院地质情报所方法室化探组编写, 《苏联原生晕研究近况》, 地质科技动态, 1978 年第 4 期 (试刊)
- [4] 叶, 米. 克维亚特科夫斯基 (张国容、邱郁文译), 《岩石化学找矿法 (内生金属矿床岩石化学普查方法)》, 地质出版社, 1980 年 1 月
- [5] 中国科学院数学研究所数理统计组编, 《回归分析方法》, 科学出版社, 1975 年

生物地球化学找铜矿的方法

生物地球化学找矿, 是通过发现植物的地球化学异常, 以确定基岩矿化情况的方法。

岩石、矿体 (包括原生异常), 由于表生风化作用, 转变为风化产物 (以矿物形式或非矿物形式存在), 部分是可溶性的含氧酸盐, 如硝酸盐、碳酸盐、硫酸盐、有机络合物等, 为生长在该区的植物根系, 无休止地选择性吸收; 即使是难溶化合物, 如硫化矿, 也因为植物根系分泌的

有机酸, 在一定程度上被溶解了。这样, 使成矿元素及其伴生元素, 浓集于植物机体内。根据植物相应部分 (根、茎、叶、枝) 的灰分分析资料, 可以推断地下隐伏矿床的存在和规模。此种方法, 多用在植被发育良好的森林区、大面积覆盖的草原区、厚层土壤区、矿体露头被冲积层掩盖的地区以及沼泽和沙漠区。

进行生物地球化学调查, 应尽量考虑以常见

的具有代表性的深根植物为基础。尤其是在沙漠和半沙漠地区,应选择有深根的湿性植物。因为植物的金属含量,取决于土壤组成、pH值、水文条件、植物种类、植物器官、元素种类,变化幅度较大。某些植物有选择性地吸收土壤中的金属;而对金属的吸收,在很大程度上取决于根系入土深度。深根植物的根系特别发达,能深入30米以上的土壤及其下伏基质中,向四处蔓延的面积很大,所以根系能吸收大量土壤和地下水中的金属离子。

据报道,利用这种简便、快速、经济而有实效的生物地球化学方法,找铜、铅、锌、镍、钴、钼、铁、锰、铀、钨等矿床,有一定成效,尤以找铜矿效果更显著(铜是植物的生物化学反应的催化剂)。

下面介绍三个生物地球化学找铜矿的实例。

应用相思树的生物地球化学 勘查铜—镍矿床

在气候炎热干旱的埃及东南沙漠区——阿布斯韦尔和阿布哈尼玛,它们位于北纬 $22^{\circ}\sim 25^{\circ}$,蕴藏着丰富的复杂铜镍矿床。该地区系前寒武纪火成变质岩,覆盖着冲积土。岩石露头虽能显示局部地球化学异常,但仅能以较密网格,收集大量样品分析后,才能获得良好的异常数据。

山谷中到处生长着多年生的深根植物——相思树(金合欢属)。应用相思树进行的生物地球化学调查,已获得初步成功。调查结果表明,在干旱地区进行地球化学勘查,用植物比冲积层和地下水更为有效。

为了进行该区生物地球化学调查,按100米正方形网格,采集相思树的嫩枝、茎和根,分析其中五种元素,即Cu、Pb、Zn、Co、Ni的含量。

将植物样洗净、晾干或烘干,在马弗炉中灰化后,采用极谱分析法分析灰分中的铜、铅和锌的含量,检出限量为5ppm;用比色法分析镍和钴的含量,检出限量分别为2和1ppm。从这些分析结果看来,相思树枝吸收这些元素的量,与矿化有空间关系。

在阿布斯韦尔和阿尼玛两地区,铜都被相思

树高度吸收。树枝吸收量最大,其次是茎,最少的是根。含铜量1000ppm的等浓度线,位于离矿化区100~200米处。相反,离矿化区100米远的冲积层中的铜值,却低到背景值范围。这就证明相思树对铜的勘查,比冲积层更为有用。

由于镍有毒性,使得相思树吸收镍,较吸收铜受限制。在阿布斯韦尔和哈尼玛地区,镍异常不多,而且异常范围和强度都较小。

相思树有强烈的吸收锌的趋向。在阿布斯韦尔区,相思树枝灰分中,锌的平均含量为442ppm;而对应冲积层中,锌的平均含量仅为90ppm。相思树枝中,锌的浓度最大,其次是茎部,根中含锌量最低。锌的1000ppm等值线,离小闪锌矿体约100~200米,然而在冲积层中,离矿区仅100米处的锌含量,却下降到背景值。由此得出结论,在生物地球化学中,锌和铜一样,可作为指示元素。

在铜—镍矿区还发现了高的铅含量,证实了铜镍锌矿区也存在有铅。由于铅具有毒性,相思树仅能吸收一定限度的铅。在枝、茎、叶中铅含量相近。阿布斯韦尔区相思树枝灰分中,铅的500ppm等值线离矿区100~200米。

与冲积层基质相比,相思树显示出有较高浓缩铅的能力。在阿布斯韦尔区,离开矿区约200米处,相思树枝最高铅含量为56ppm,而距离矿区500米处,则含铅量仅为20ppm。

应用铅笔柏进行的生物 地球化学试验

在美国密苏里州日内瓦区,铜矿产在Powell建造的奥陶系加拿大白云岩内,坡度平缓,并覆盖有1.5~3米厚的残积物,这样就造成土壤钻探困难,只能进行生物地球化学勘查。此外有2个已知铜矿化区,主要是铁、铜和锌的硫化物。两个矿床中铜的品位都已达到25%。铜矿山由于采矿、运输、冶炼时遭受到一定程度的污染,就决定不再进行详尽的研究。但另一个策尔铜矿区,则仅受到有限的干扰。

选择的植物样,主要是铅笔柏(东方红柏)。

进行生物地球化学试验时,采集铅笔柏二年嫩枝样。在一些阴暗难以通行的铅笔柏森林区,

就采集红栎（红橡树）、黑栎（黑橡树）和白栎（白橡树）的树皮样代替（栎树，我国也叫麻栎或橡，通称柞树——编者）。

将洗净、干燥后的铅笔柏树枝和栎树皮，在

马弗炉中灰化，溶于酸后，再应用原子吸收分光光度法分析。测出样品中的Cu、Pb、Zn、Fe、Mn、Co、Ni七种元素的含量（表1）。

策尔矿区121份铅笔柏树枝样中，7种元素分析数据(ppm)的总体统计值

表 1

	$\bar{x}$ (背景值)	高 值	低 值	S (标准离差值)
铜 灰	83.4	133	45.5	15.2
铜典型试验	3.0	4.3	2.1	0.44
铅 灰	88.1	300	21.5	33.1
铅典型试验	3.2	10	0.65	1.2
锌 灰	480	1150	250	150
锌典型试验	18	50	9.1	5.8
铁 灰	1530	4100	632	561
铁典型试验	56	20	14	20
锰 灰	3420	13000	275	2370
锰典型试验	120	510	10	87
镍 灰	52	99	10	20
镍典型试验	1.9	3.6	0.33	0.74
钴 灰	35	63	14	10
钴典型试验	1.3	2.9	0.33	0.42

所得结果说明铜、锌的异常值能很好地与已知矿化区吻合。从Cu、Zn和Co的曲线（原图不清晰，图略——编者）来看，可推断矿化区已延伸上坡，以及在地质图上稍微高一点的地方。这些植物种属，并不生长于全部采样地区。元素铜、

锌、钴可认为是与矿化作用有关。此外，众多而广泛的异常值，从已知矿区向上伸展和向下延伸约300米之远。钴仿佛形成围绕铜和锌的异常晕，并附加一个小而强的Cu—Zn—Co异常，它的位置是在离矿化区约600米的坡上。

策尔矿区121份铅笔柏样品总体中干植物样和灰分样中7种微量元素含量的比较

表 2

	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn	Ni	Co
灰分中单一元素含量，占总异常样的百分数	29	23	30	33	10	10	11
干植物中单一元素含量，占总异常样的百分数	39	41	30	38	15	24	17
灰分和干植物二者中单一元素含量，占总异常样的百分数	32	36	40	29	75	66	72
异常样总数	31	32	20	24	20	29	29

在这个小区域调查，勘测出几个中粒黄铁矿。从这些资料可推断出广阔的矿化区和一个较小的强矿化区（位于矿化露头上坡处）。而所有列举出的各种形式的铜、锌异常数据，证明是完全与已

知矿区相对应的。

至于铁异常对该区的勘查工作，似乎价值不大。这大概是由于残积土壤中铁氧化物的含量高，铁和铅两者都是严格地受残积土壤分布的限制，

而不是受邻近铜矿区的控制。

在策尔矿区的钴值,大于美国地质测量时的钴值(在该区地质测量时,铅笔柏灰分中Co的平均值为1.2~6.5ppm,最高为15ppm)。而本次试验,铅笔柏灰分中钴的一般含量为35ppm,最大值高达63ppm,说明钴值是高的,是一个指示元素。但从塌陷构造中,不能检查出矿化来。

在铜矿区也进行了一些取样的对照试验,从这些地方取样所得的微量钴值显然是降低了。这是由于霜冻后取样,或者是由于铅笔柏森林间空地的高pH值(7.5)所致。

在铜矿冶炼厂位置的铅笔柏样品灰分中的铜含量仅为101.3ppm,而策尔矿区铜最大值为133ppm。在铜矿山,从12个采样点的铅笔柏灰分中的铜含量来看,是低值的(54~102ppm)。这或许也是由于受林间空地土壤的高pH值所影响的。

在同一地点采集的铅笔柏和红栎树样之间,有一奇妙的关系,即:在同时生长着这两种植物的地区,分析红栎树皮中锌含量与铅笔柏枝中的锌含量成反比例。Harbaugh于1959年也曾发现栎树枝与铅笔柏枝中锌含量有类似的关系。

维克尔铜钼矿区的生物 地球化学调查

维克尔铜钼矿区,位于美国南亚利桑那州Pinal的维克尔山东部沙漠地区。该区基岩是从前寒武纪到第三纪的。最古老的地质体是石英岩和石灰岩。这两种建造都被辉绿岩广泛侵入。这三种岩石都是前寒武纪的,属于Apache组。维克尔矿区是硫化物矿床,包含有黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、辉钼矿以及闪锌矿等。矿床附近仅有几处矿化露头,较大部分矿床目前几乎完全被古老的前寒武纪衍生出来的荒废冲积物埋藏。成矿后期的冲积层覆盖达250英尺(约75米)厚。野外试验区是在Phoenix和Tucson之间,因为那儿有一个被钻孔圈定的矿床,而且它表面的自然特色,还没有被扰乱。该矿区在地质上和气候上都与南方盆地流域类似。

这次生物地球化学研究,共取样2400份,其

中包括土壤、基岩和植物样。一般是采用200英尺(约60米)的方格网,而在远离矿体的区域,则使用400英尺(约120米)间隔。采样地点选择在那些离开活动河床或明显被矿物质污染的地方,在每一样品点,采取土壤样。原始土壤样品,要在低温下烘干或晾干,筛取小于60目粒度部份,留作分析用。从深达2~6英寸(约5~15厘米)深处采取基岩样。并选择三种广泛分布于调查区域的深根植物来进行试验。它们是美洲铁木和小丘假紫荆,还有一种深根沙漠灌木——几阿苏油树(或蒸木油树)。铁木和几阿苏油树的茎、叶分开取样;而小丘假紫荆,则因叶子太稀少,难从茎上分离开来,因此采用茎叶混合样。茎是二年生茎,叶子则需新生叶。将植物的茎和叶都洗净、干燥、切碎、研细。在马弗炉中1000°F(约550°C)下,灰化约12小时,然后用原子吸收光谱,测定茎、叶灰分中的Cu、Mo、Zn、Mn的含量;用硫氰酸盐比色法测定灰分中的Co含量。但本试验仅报道了土壤和铁木茎灰分的分析数据资料。

将分析获得的元素—介质数据,按一定间隔分成组,然后以频率对浓度绘制直方图,发现这4种元素,在土壤和植物(取样介质)中的含量,都呈对数正态分布,再在概率格纸上以累积频率对浓度,描绘出累积频率分布曲线图,找出它们的背景值、异常下限值(表3)。并绘制出等值线图,每一幅等值线(等高线)图都是根据350~400个适当分布的采样点取样分析资料来描绘的。

Cu、Zn、Mn、Co四种元素含量(ppm) 表3

元素	介质	分布范围	背景值	异常下限值
Cu	土壤	1~820	30	15
	铁木茎灰	40~280	90	110
Zn	土壤	10~12,000	65	90
	铁木茎灰	90~2,400	400	700
Mn	土壤	210~870	410	500
	铁木茎灰	70~430	150	350
Co	土壤	<0.3~25	0.6	1.1
	铁木茎灰	4~75	12	16

由于铜和钼在空间上都相接近,使得它们大多数异常值的位置是相同或相近的。虽然钼的异

常值局限于一定的范围,较铜的异常范围要小些,通常这二个元素含量数据是重复一致的。

土壤中铜、钼和锰的含量与隐伏矿床并无空间关系,仅能反映出下伏岩石金属露头的化学性质。这些异常样局限于狭窄范围内,表明这三种元素在该环境中仅具有有限的移动性。相反,土壤样中锌异常位置,表明锌具有较大的迁移能力,锌已经从含锌高的露头,朝着活动的河床流域方向下坡了。虽然根据这些锌异常并不能圈定铜—钼矿床,但是它能指出有利的矿化边缘带。

第一组图(图1~图3)说明了Cu(Mo)Mn和Zn在土壤中的异常分布。

图1中Cu(Mo)的土壤异常分布,大都局限于露头区域的残积土壤中,主要是在2个石英岩露头层(老围层)和古生代的碳酸盐岩石内。正如人们所料,在矿床上覆盖的搬运冲积层上,没有重要的铜(钼)异常。然而铜(钼)异常分布显示出Cu已从露头区的残积土,沿下坡进入邻接的搬运冲积层内。每个异常都以小黑点描绘在地质图上。通常认为是无地球化学意义的。

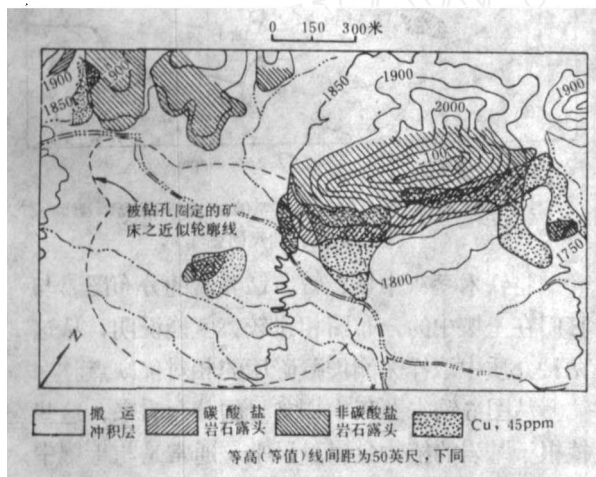


图1 土壤中铜异常(等值线或等高线)图

与土壤中铜异常对照来看,土壤中锌异常(图2)分布面积宽广,最大锌异常限制分布于古生代的碳酸盐露头,以及在这些露头下面的富钙质的斜坡(然而该区的铜异常却受很大程度的限制)。锌已经散布迁移至基岩之外,较铜迁移的距离大得多。由于锌的巨大移动性,使得2个石英岩露头层没有锌异常,但是,在那儿却都有

铜异常。在碳酸盐岩富矿露头上广泛分布的锌异常和分布范围较小的铜异常,都是由于风化时元素富集和迁移的结果。另一方面,石英岩露头土壤中存在有铜异常而无锌异常,可认为是与上述的分散现象有关,或者由于石英岩的稳定性起作用,而不是浅成的富集结果。由于异常样的分布型式,就说明了斑岩铜矿型的分带。外带是由在活动的碳酸盐岩石内的锌和富铜透镜状矿体形成,而内带是由贫锌富铜的不活动岩石形成。

土壤中的高锰值,几乎完全被局限于露头区(图3),大部分在圈定矿床的外部边缘。显然土壤中高锰值与锌相似,恰好代表一个环绕矿床的天然外带。在中生代岩石朝北面附近的露头出现明显的锰斑。土壤中锰值与对应基岩中锰值相比时,在残积碳酸盐衍生物土壤中,并没有发现锰的富集,而在残积石英衍生物土壤中却稍有锰的富集。

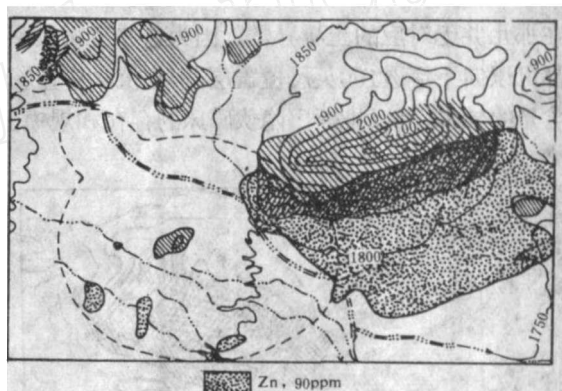


图2 土壤中锌异常(等值线或等高线)图
(其他图例及比例尺同图1)

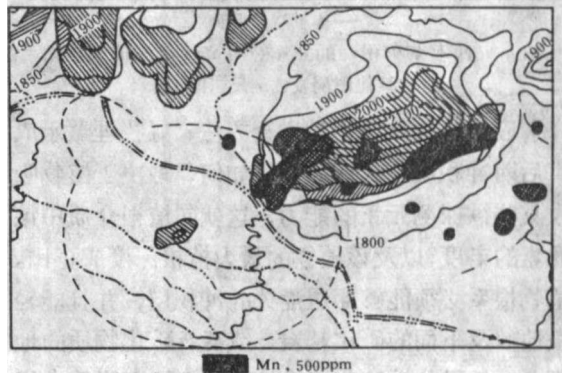


图3 土壤中锰含量等值线(或等高线)图
(其他图例及比例尺同图1)

在维克矿床区域残积土壤中的铜(钼)异常分布,与对应的锌或锰异常不同,能指出更接近的埋藏矿床的位置。广泛分布的高锌值说明,利用锌只适合于区域普查(土壤),而不适于详查找斑岩铜钼矿床。查明土壤中锰的分布,其基本用途,还没有弄清楚。

并无明确的证据能证实这四种(Cu、Mo、Mn、Zn)元素是由于毛细管作用或其他途径,从矿化基岩,通过覆盖表面的冲积层向上移动。在成矿后期冲积层中,这四种元素的重要异常分布,都局限于直接在其下或邻近的露头区域,并且在重力的影响下向下迁移。

第二组图(图4~图6)分别是铁木茎灰中锰、铜(钼)锌的含量图。三种植物(美洲铁木、几阿苏油树、小丘假紫荆)灰分中的锰含量除外。三种元素含量表明异常样已延伸到矿化露头外800英尺处,进入覆盖着成矿后期冲积层的隐伏矿床,在那儿并无对应的土壤异常。因为这些植物根系都可以向下穿透100英尺覆盖层。根据植物中金属含量的异常,可以推断出隐伏矿床的存在和规模。

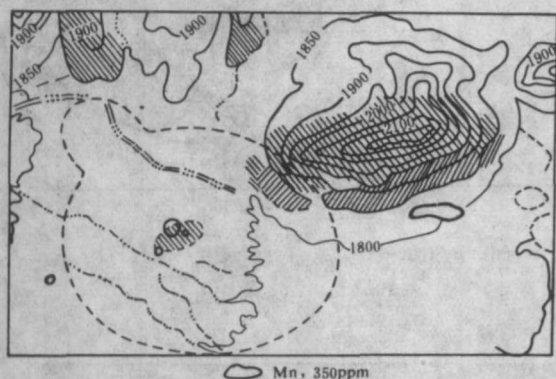


图4 铁木茎灰中锰的分布(等高线或等值线)图
(其他图例及比例尺同图1)

应用生物地球化学勘查方法,寻找埋藏于成矿后期冲积层下矿床的效果如何,取决于植物吸收某些欲探测元素的能力,这就同植根介质中该元素的丰度,以及该植物的最大植根深度成正比。植物根系必须能够穿透荒芜的冲积层,并且能轻微地触及下面的矿化基岩,或富含矿化物质的地下水。如果分析这些植物的组织,就可获得有用的数据资料。在理想情况下,几阿苏油树根,可

以穿透10英尺深(约3米多);而铁木和小丘假紫荆的根,却可穿透100英尺(约30米)之深。即使在平常,也能穿透约50英尺(约15米)的深度。

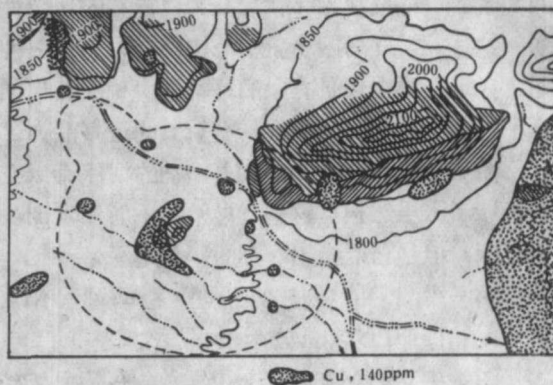


图5 铁木茎灰中铜异常(等高线)图
(其他图例及比例尺同图1)

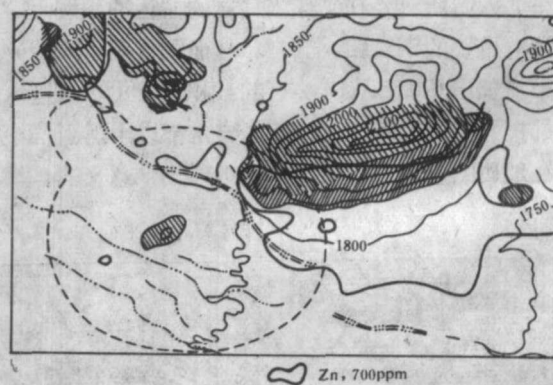


图6 铁木茎灰中锌异常(等值线或等高线)图
(其他图例及比例尺同图1)

将铁木茎灰中铜、锌、锰异常的分布图,与它们在土壤中的分布图相比较,就能说明,从这两种介质中取样探测埋藏矿床的相对优缺点。

从图5铁木茎灰中铜含量的分布看来,这些植根于基岩的植物金属量异常,通常是与土壤中高铜值有关。铁木茎灰分中铜异常,环绕着被钻孔圈定的矿床中心的石英岩露头层(老围岩),大都是在迁移冲积土层上,而被对应土壤异常抵消一部分,因此在矿床外边厚度不超过100英尺(约30米)厚冲积层上的小异常,也是重要的。这些异常的位置在石英岩露头层和露头北面的巨大区域之间。在铁木茎灰生物地球化学图的右边,展示着有显著的铜异常,而在对应的土壤图上,

却没有完全出现这种铜异常。

铁木茎灰中锌异常(图6)比土壤中锌异常分布的更广。在土壤中,锌具有高度迁移性,而沿着较长的地下水,接近地表流域的灰分中的锌异常浓度,也强有力地指明锌能在地下水中迁移,而迅速地被该区深根植物的根系吸收并浓集。在石英岩露头层根本没有植物锌异常值。

图4显示出铁木茎灰中有高锰值,这是至今我们已研究过的生物地球化学图的特殊典型。和铜、钼、锌不同,锰不能被上述三种植物中的任何一种所浓集。因此,在生物地球化学图上出现的高锰异常,并不是真异常。它仅代表少数几个数理统计值,发生在正态分布高值的一端。所以锰对生物地球化学勘查铜—钼矿床并无用处。

生长在残积土上植物灰分中的铜、钼和锌异常,一般是与它们各自的残积土壤异常一致。但是,即使植根于残积土上,植物灰分中的锰值,依然是无用数据。比较上述的任一种植物灰分中的某一元素含量,与邻接土壤中该元素含量,我们可获得如下结论:

植物灰分中铜含量,较其邻接的植根土壤中铜含量大9倍;植物灰分中钼含量较其邻接的植根土壤中钼含量大12倍;植物灰分中锌含量较其邻接的植根土壤中锌含量大8倍。在本试验的所有情况下,植物灰分中锰含量,都比其邻接植根土壤中锰含量为低。

用上述三种植物作为取样介质,来圈定埋藏矿床,显示出相同的优越性。这是由于这三种植物都能浓集铜、钼和锌。在铜(钼)的生物地球化学图上所见到的元素异常,与对应土壤图中该元素的异常的位置,往往符合。因此,应用铜(钼)

的生物地球化学图,比应用锌的生物地球化学图能更精确地圈定出埋藏的矿床。在成矿后期冲积层内,生物地球化学取样,可以显示出土壤取样所没有的两种异常。

第一类型的异常,称为地下水异常,与那些植根于暂时被水浸透的土壤中的植物不同,那儿的深根植物的根系,能轻微地触及地下水,而吸收和浓集大量铜、钼、锌等元素。例如沿着河道流域的铁木茎灰分中的锌异常,较土壤中锌异常分布范围广泛得多的事实,就很好的说明了此点。因此制作出生长或接近于活动河流的干冲积物上的植物灰分中的锌分布图,可能是隐伏矿床的一种较好的勘探方法。

第二类型的异常,称为基岩异常。生长在荒芜冲积层,但植根于矿化基岩上或其附近,则其金属异常值必然存在于植物灰分中,而不是在邻接的冲积层表面。这种类型的重要异常,发生于接近异常露头区域的浅冲积层上,也可发生于孤立的浅成埋藏小丘、或矿化基岩的脊梁上。

在维克尔矿床上的荒芜冲积层上,第二种类型的生物地球化学异常,已经延伸到离开任何重要土壤异常800英尺(约240米)之远。由于植物样具有第二种类型的金属异常,而土壤却没有,因此生物地球化学勘查有显著的优越性,它是在沙漠地区、盆地和山区寻找隐伏矿床的有用工具。

景 漪 据以下资料编译

- [1] Geochemical Exploration, Special Volume 11 (1970), pp. 426~434.
- [2] Ibid., pp. 401~409.
- [3] Geochemical Exploration, Vol. 6 (1976), pp. 163~175.

(上接第41页)
$$\text{白云石 } (\%) = 4.58 \times (\text{MgO} - 0.20 \times \text{Al}_2\text{O}_3) \quad (3)$$

$$\text{方解石 } (\%) = 1.78 \times (\text{CaO} + 0.22 \times \text{Al}_2\text{O}_3 - 1.39\text{MgO}) \quad (4)$$

$$\text{粘土矿物 } (\%) = 4.95 \times \text{Al}_2\text{O}_3 \quad (5)$$

$$\text{石英砂与硅质矿物 } (\%) = \text{SiO}_2 - 2.65 \times \text{Al}_2\text{O}_3 \quad (6)$$

当 $\text{SiO}_2 < 2.65 \times \text{Al}_2\text{O}_3$ 时,石英砂与硅质矿物含量为零,粘土矿物计算公式相应改为:

$$\text{粘土矿物 } (\%) = \text{SiO}_2 + 2.30 \times \text{Al}_2\text{O}_3 \quad (5')$$

笔者对华北某区下寒武统860个岩样和文献中100余个碳酸盐岩化学分析样矿物成分计算的结果,证明上述公式是可行的。请读者加以比较。