

# 铊矿物及铊的植物找矿

李德先<sup>1,2</sup>, 高振敏<sup>1</sup>, 朱咏喧<sup>1</sup>, 饶文波<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**[摘要]** 迄今为止, 世界发现铊的独立矿物 49 种, 我国已发现铊矿物 9 种, 其中铊明矾为贵州省发现的第一个铊的新矿物。铊矿物中铊与砷密切共生, 而硫是联系二者的重要桥梁。铊的植物找矿包括植物指示和植物矿石。一些植物中铊含量非常高, 可以作为寻找铊矿的有效指示植物。植物找矿作为一种新兴找矿技术, 还有许多研究工作有需要去做。

**[关键词]** 铊矿物 植物找矿 指示植物

**[中图分类号]** P618.88 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2003)05-0044-05

## 0 前言

铊在地壳和岩石中的丰度极低, 地表的丰度仅为  $0.45 \times 10^{-6}$ , 是分散元素之一。在地球化学和结晶化学上既具有亲石性又具有亲硫性, 前者表现为 Tl 与 K、Rb 等碱金属紧密共生, 后者表现为 Tl 与 Pb、Fe、Zn 等元素的硫化物有密切关系。铊的这种两重性在不同的地球化学环境中表现不一样<sup>[1]</sup>, 在高温阶段(如岩浆作用和伟晶作用阶段), 铊与碱金属元素呈类质同象集中在某些含钾的矿物中, 如云母、钾长石、铯榴石, 表现出亲石性; 而在低温高硫(砷)环境中, 则表现为亲硫性。铊一方面以类质同象进入云母类硅酸盐及各种硫化物的结晶格架中, 如铅、锌、铜、铁硫化物或铅、银和其它元素的硫盐矿物, 另一方面则形成自己的独立矿物。

铊的亲硫性明显大于亲石性, 这可从辉铊矿和褐铊矿的自由能看(在温度为 298 K 时,  $Tl_2S$  的  $\Delta G_f$  为 269.08 KJ/mol, 而  $Tl_2O_3$  的  $\Delta G_f$  值为 136.07 KJ/mol),  $Tl_2S$  的  $\Delta G_f$  远大于  $Tl_2O_3$  的  $\Delta G_f$ , 表明铊的亲硫性比亲石性强; 自然界中所发现的铊矿物大多数为硫化物和硫盐矿物的事实, 已有力地证实了这一点; 此外, 在自然界中, 铊除形成自己的独立矿物外, 因其地球化学性质与同属亲硫元素的 Cd、Pb、Zn、Fe、As、Au、Hg、Ag、Sb 等也有许多相似之处。所以铊也经常以微量元素形式进入方铅矿、黄铁矿、闪锌矿、辉锑矿、黄铜矿、辰砂、雄黄、雌黄和硫盐类矿

物中, 这同样体现出铊的亲硫性。

## 1 铊矿物

铊独立矿物的形成是铊的亲硫性的重要表现。迄今为止, 世界上共发现 49 种铊矿物(表 1), 其中绝大多数为铊的硫化物和硫盐类矿物。这些铊矿物分布在除非洲之外的世界各大洲<sup>[2]</sup>, 其中欧洲最多, 其次是美洲和亚洲, 铊矿物最多的 5 个国家是前南斯拉夫、瑞士、美国、法国和中国。

到目前为止, 我国已发现铊的独立矿物 9 种(表 2)。其中铊明矾是 2001 年刚刚发现的一种铊的硫酸盐新矿物, 也是贵州省发现的第一个铊的新矿物。

铊矿物虽然发现于不同的国家, 不同的矿床类型中, 但他们却有着共同的特点:

首先矿物多出现在低温硫化物矿床中, 且出现在成矿时代比较新的高硫高砷的地质体中。最典型的就是我国云南南华砷铊矿床和贵州滥木厂汞铊矿床。我国的大部分铊的独立矿物也是在这两个矿床中发现的。

其次从矿物组合方面, 可大致划分为 10 个元素组合<sup>[2]</sup>。分别为:

- (1) Tl - Hg - As - Sb - S;
- (2) Tl - Hg - As - S;
- (3) Tl - As - S;
- (4) Tl - As - Pb - S;

**[收稿日期]** 2002-07-24; **[修订日期]** 2003-02-25; **[责任编辑]** 余大良

**[基金项目]** 中国科学院与云南省合作项目“个旧锡矿深部及外围成矿预测研究”(编号: 2000YZ-05)资助。

**[第一作者简介]** 李德先(1969年-), 女, 1993年毕业于长春地质学院, 获学士学位, 在读博士生, 工程师, 现主要从事地球化学研究工作。

表1 自然界中已知铊的独立矿物一览表<sup>[3-5]</sup>

顺序号	矿物名称	化学式	所属类别
1	贝磷铊矿(Bernardite)	Tl(As,Sb) <sub>5</sub> S <sub>8</sub>	铊的硫化物及硫盐
2	辉铊矿(Carlinite)	Tl <sub>2</sub> S	
3	硫铊铋铅矿(Chabourneite)	(Tl,Pb) <sub>21</sub> (Sb,As) <sub>91</sub> S <sub>147</sub>	
4	硫铊铋铁铜矿(Chalcothallite)	(Cu,Fe) <sub>6</sub> Tl <sub>2</sub> SbS <sub>4</sub>	
5	斜硫铊汞矿(Christite)	TlHgAsS <sub>3</sub>	
6	硫铊铋铁铜矿(Chalcoestibite)	Cu <sub>6</sub> Tl <sub>2</sub> SbS <sub>4</sub>	
7	硫铊金银铊矿(Criddleite)	TlAg <sub>2</sub> Au <sub>3</sub> Sb <sub>10</sub> S <sub>10</sub>	
8	Dorallcharite	(Tl,K)Fe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	
9	硫铊锡铊矿(Ernigglite)	Tl <sub>2</sub> SuAs <sub>2</sub> S <sub>6</sub>	
10	硫铊铅铊矿(Edenharterite)	TlPbAs <sub>3</sub> S <sub>6</sub>	
11	硫铊矿(Ellisite)	Tl <sub>3</sub> As <sub>3</sub>	
12	硫铊铋汞矿(Galkhaite)	(Cs,Tl)(Hg,Cu,Zn) <sub>6</sub> (As,Sb) <sub>4</sub> S <sub>12</sub>	
13	Gillulyite	Tl <sub>2</sub> (As,Sb) <sub>8</sub> S <sub>13</sub>	
14	硫铊铋铅矿(Hutchinsonite)	(Pb,Tl) <sub>2</sub> As <sub>5</sub> S <sub>9</sub>	
15	硫铊铋银铅矿(Hatchite)	(Pb,Tl) <sub>2</sub> AgAs <sub>2</sub> S <sub>5</sub>	
16	硫铊铜铊矿(Imhofite)	Tl <sub>6</sub> CuAs <sub>16</sub> S <sub>40</sub>	
17	辉铊铋铅矿(Jentschite)	TlPbAs <sub>2</sub> SbS <sub>6</sub>	
18	Jankovicite	Tl <sub>5</sub> Sb <sub>9</sub> (As,Sb) <sub>4</sub> S <sub>22</sub>	
19	红铊矿(Lorandite)	TlAsS <sub>2</sub>	
20	辉铊矿(Picotpaulite)	TlFe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	
21	硫铊矿(Pierrotite)	Tl <sub>2</sub> Sb <sub>6</sub> As <sub>4</sub> S <sub>16</sub>	
22	斜硫铊矿(Parapierrhotite)	Tl(Sb,As) <sub>5</sub> S <sub>8</sub>	
23	Perillalite	K <sub>8</sub> Tl <sub>4</sub> Al <sub>12</sub> Si <sub>24</sub> O <sub>72</sub> ·20H <sub>2</sub> O	
24	斜硫铊矿(Orthorhombic)	Tl <sub>3</sub> As <sub>4</sub>	
25	硫铊矿(Raguinite)	TlFeS <sub>2</sub>	
26	硫铊铜铊矿(Rohaite)	TlCu <sub>5</sub> SbS <sub>2</sub>	
27	硫铊汞铊矿(Routhierite)	TlCuHg <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	
28	拉硫铊铋铅矿(Rathite)	(Pb,Tl) <sub>3</sub> As <sub>5</sub> S <sub>10</sub>	
29	硫铊铋银铅矿(Rayite)	(Ag,Tl) <sub>2</sub> Pb <sub>8</sub> Sb <sub>8</sub> S <sub>21</sub>	
30	硫铊铋矿(Rebulite)	Tl <sub>5</sub> Sb <sub>5</sub> As <sub>9</sub> S <sub>22</sub>	
31	斜硫铊铜铊矿(Stalderite)	TlCu(Zn,Fe,Hg) <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>6</sub>	
32	斜硫铊汞铊矿(Simonite)	TlHgAs <sub>3</sub> S <sub>6</sub>	
33	铊黄铁矿(Tl Pyrite)	(Fe,Tl)(S,As) <sub>2</sub>	
34	硫铊铁铜矿(Thalcausite)	TlCu <sub>3</sub> FeS <sub>4</sub>	
35	硫铊铁铊矿(Thalfenisite)	Tl <sub>6</sub> (Fe,Ni,Cu) <sub>25</sub> S <sub>26</sub> Cl	
36	灰泥岩(Vaughanite)	TlHgSb <sub>4</sub> S <sub>7</sub>	
37	硫铊铋汞铊矿(Vrbaitite)	Tl <sub>4</sub> Hg <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> As <sub>8</sub> S <sub>20</sub>	
38	维硫铊矿(Weissbergite)	TlSbS <sub>2</sub>	
39	铜红铊铅矿(Wallisite)	PbTl(Cu,Ag)As <sub>2</sub> S <sub>5</sub>	
40	Sicherite	TlAg <sub>2</sub> (As,Sb) <sub>3</sub> S <sub>6</sub>	
41	硒铊铁铜矿(Bukovite)	Tl <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> FeSe <sub>4</sub>	铊的硒化物
42	硒铊银铜矿(Crookesite)	Cu <sub>7</sub> (Tl,Ag)Se <sub>4</sub>	
43	硒铊铜矿(Sabatierite)	Cu <sub>4</sub> TlSe <sub>3</sub>	
44	硫酸铊矿	Tl <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	铊的硫酸盐矿物
45	铊明矾(Lanmuchangite)	TlAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·12H <sub>2</sub> O	
46	铊铜矿(Cuprostitite)	Cu <sub>2</sub> (Sb,Tl)	铊(铋)化物
47	水铊铊矿(Monsmedite)	K <sub>2</sub> O·Tl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·8SO <sub>3</sub> ·15H <sub>2</sub> O	铊的矾类矿物
48	褐铊矿(Avicennite)	Tl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	铊的氧化物
49	亚硫酸铊矿	Tl <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	铊的亚硫酸盐矿物

表2 我国已发现铊的独立矿物

矿物名称	化学式	发现地	资料来源
硫铊铋铅矿(Hutchinsonite)	PbTlAs <sub>5</sub> S <sub>9</sub>	云南南华	张宝贵 <sup>[6]</sup>
辉铊矿(Picotpaulite)	TlFe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>		张忠 <sup>[7]</sup>
硫铊矿(Ellisite)	Tl <sub>3</sub> As <sub>3</sub>		张忠 <sup>[7]</sup>
铊黄铁矿(Tl Pyrite)	(Fe,Tl)(S,As) <sub>2</sub>		张宝贵 <sup>[8]</sup>
红铊矿(Lorandite)	TlAsS <sub>2</sub>	贵州滥木厂	陈代演 <sup>[9]</sup>
斜硫铊汞铊矿(Christite)	TlHgAsS <sub>3</sub>		李锡林 <sup>[10]</sup>
铊明矾(Lanmuchangite)	TlAl(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·12H <sub>2</sub> O		陈代演 <sup>[11]</sup>
硫铊铁矿(Raguinite)	TlFeS <sub>2</sub>		李国柱 <sup>[12]</sup>
褐铊矿(Avicennite)	Tl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	西藏洛隆	毛水和 <sup>[13]</sup>

- (5) Tl - Sb - Pb - S;
- (6) Tl - As - Sb - Au - (Ag) - S;
- (7) Tl - As - Sb - S;
- (8) Tl - As - Pb - Zn - S;
- (9) Tl - Hg - U - As - Mo - S;
- (10) Tl - Sb - Cu - S;

从以上元素组合来看,出现频率较多的元素有As、Sb、Hg、Pb、Cu,尤以As的出现频率最高,几乎在每一类组合中均会出现,这与自然界中的铊矿物大多出现在地质时代较新的高硫高砷地质体中的事实相吻合。

砷与铊密切共生,究其原因尚不清楚。笔者试从三方面进行论述:

1)从地球化学方面来说(表3),砷是一个相当复杂的元素,自然界中以正3价和正5价的砷最重要,As<sup>3+</sup>主要出现在硫化物或硫盐中,As<sup>5+</sup>则主要与氧形成砷酸盐。从Tl、As化学参数的对比来看,许多参数比较接近,都具有较强的亲硫性,为Tl、As共生提供了条件,因此,砷出现在含铊的硫化物或硫盐中是有可能的。

2)硫,尤其有机硫是联系二者的桥梁。对我国贵州兴仁滥木厂和云南南华砷铊矿床的研究发现<sup>[14]</sup>,铊矿石中含有大量的生物化石,而且每每出现富集生物化石和生物化石碎屑的矿石都是富铊矿石。两个矿床都已证实,生物有机硫参与成矿,特别是参与含硫砷矿物的成矿。而砷是一种强的亲硫元素,与硫的地球化学性质极其相似,尤其在低温成矿条件下,与硫一样呈有机砷参与生物成矿。在有机成矿时,有机砷和有机硫结合(化合)形成矿物的配位体比无机硫和无机砷形成矿物或络合物更为优先和有利。因此我们可以推测在生物成因的硫砷矿物中有有机硫,也必然会有一定量的有机砷。通过对硫同位素组成和大量的有机组分的测定,说明铊矿

石中有大量的有机硫存在,所以也必然出现了大量的有机砷。

3)地质原因:对贵州省西部地区铊、砷物质来源的研究表明<sup>[15]</sup>:As、Tl 可能来源于早二叠世晚期的一次大规模地壳活动——东吴运动产生的峨眉山玄武岩。其证据是覆盖于贵州西部富铊矿床之上的峨眉山玄武岩中,As、Tl 元素的含量明显高于克拉克值(As 含量: $113 \times 10^{-6}$ ,克拉克值:1.8;Tl 含量  $> 1 \times 10^{-6}$ ,克拉克值:0.43),说明这些元素在西部

玄武岩中有较大的富集。因此我们可以推测晚二叠世时期,峨眉山玄武岩浆喷发期间,伴随着火山热液活动,大量的 As、Tl 及其它微量元素呈极分散状态进入后来的沉积盆地,后又沉积了龙潭组煤系地层及其它地层。处于成岩期的这些地层中 As、Tl 及其它微量元素仍呈极分散均一状态。但在燕山期构造运动作用下,这些分散元素 As、Tl 发生活化迁移,并在通过煤层及其它上部地层时,在局部地段富集,就形成了高砷煤及高铊的金属矿床,继而形成 As、Tl 矿物。

表 3 Tl、As 化学参数对比<sup>[16]</sup>

元素	电子构型	电负性	地壳丰度( $\times 10^{-6}$ )	地球化学电价	原子半径(埃)	共价半径(埃)	离子半径(埃)	离子电位
Tl	$6s^2 6p^1$	1.4(+1) 1.9(+3)	0.45	1+ 3+	1.704	1.48	1.47(+1) 0.95(+3)	0.68(+1) 3.16(+3)
As	$4s^2 4p^3$	2.0	1.8	3+, 3- 5+	1.248	1.20	2.22(-3) 0.46(+5)	10.87(+5) -1.35(-3)

## 2 铊的植物找矿及土壤修复

在已发现的 49 种铊矿物中,有辉铊矿、硫铊矿、斜硫铊矿、维硫铊矿、硫铊矿等 9 种铊矿物发现于卡林型金矿中,说明铊与金有着密切的关系。铊在地壳中的丰度非常低,但铊与金的地球化学和晶体化学性质很相似,在矿物和矿体中常共生,作为指示元素找金,其异常范围大而且清晰,尤其在隐伏金矿(化)体的地表,金含量很低( $Au < 1 \times 10^{-9}$ ),但铊显示的异常可高出金几倍至几百倍。因此以往常用铊作为寻找金矿,特别是隐伏金矿的指示性元素。利用铊法在找金国内外均有许多报道<sup>[17-22]</sup>。

目前,利用植物,尤其特征植物找矿已日益受到重视。铊作为一种剧毒元素,在地壳中含量非常低,但在某些植物体内却可以超常富集,对蕨类植物和桦树中铊含量的分析表明<sup>[23]</sup>:铊在蕨类植物中强烈富集,而在桦树中强烈贫化,在同一底质上生长的两

种植物铊的含量相差 3~4 数量级,铊对不同植物的选择性非常明显。因此利用植物寻找铊矿有着很大的优势。铊植物找矿包括植物指示作用和植物矿石。

### 2.1 植物指示

由于不同种类的植物对元素的吸收有选择性,导致元素在不同种类的植物体中有着不同的含量范围和平均含量水平,它们对地下特定矿化反映的敏感性和效果亦存在很大的差异。因此植物中不同的铊含量对铊矿体具有一定的指示意义。如邹振西等<sup>[24]</sup>通过对各类植物体内某成矿元素含量变化范围、平均含量水平、富集系数以及衬度系数等量化指标(表 4)的测定可知,除大金发藓外,其余 7 种植物均为找寻铊矿的有效指示植物,尤以在本区分布较广的芒箕、南烛和榔榆更为理想,并构成了一个特征植物组合,并用此技术在杨家湾找到了铊的工业矿体。

表 4 各类植物中铊的量化参数<sup>[24]</sup>

植 物	Tl 含量范围	平均值	富集系数(平均含量值/背景值)	衬度系数(平均含量值/异常下限值背景值)	$\omega(Tl)/10^{-6}$	
					背景值	异常下限值
芒箕	5.6~104	40.68	9.25	2.79	4.40	14.56
蜈蚣草	17.9~233	90.97	20.68	6.25		
南烛	3.5~40.7	18.56	4.22	1.27		
榔榆	1~106	21.77	4.95	1.50		
黄花草	11~68.1	33.67	7.65	2.31		
醉鱼草	4.9~117	27.5	6.25	1.89		
石松	64~115	40.84	9.28	2.88		
大金发藓	0.11~0.42	0.21	0.05	0.014		

不同蔬菜中的铊含量差别很大(表5),卷心菜、牛皮菜由于根系发达,因此体内铊含量较高。另外,同一植株的不同部位也表现出很大的差异,叶和根中铊含量明显高于茎中铊含量;同一种植物生长长期的比生长期短的铊含量高;同一植物的老枝比新枝中含铊量高。因此,不同植物以及同一植物的不同部位对铊的指示作用并不相同,在实际运用中要加以区别。

表5 不同植物体内及植物不同部位铊含量<sup>[25-26]</sup>

名称	铊含量/ $10^{-9}$	名称	铊含量/ $10^{-9}$		
			叶(老叶)	茎	根
卷心菜	54~99	甘蓝	21~420.5 (1614.4)	12.5~14.02	7.5~42.22
牛皮菜	16.2~21.6	叶用甜菜	3.75	51.5	29.75
马铃薯	10.6~21.2	莴苣	15.75	3.00	15.07
葱	3.65~6.0	韭菜	13.5	12.5	12.75
蒜苗	5.95~7.0	菜蕻	69.7	60	98
童蒿菜	5.2~9.0	白菜	32.5	-	47.5

## 2.2 土壤修复与植物矿石

世界上,金属污染的土壤正在逐步增加,对土壤系统中的金属(尤其重金属)的污染与治理已成为国际上的难点与热点,植物修复正在被迅速而广泛的接受。植物吸收作为植物修复的一种重要技术,主要是指利用超积累植物根系吸收一种或几种污染物,特别是有毒金属,并将其转移、贮存到植物茎叶,然后收割茎叶,焚烧回收金属。超富集植物最初由Brooks等作为分类单位而定义的<sup>[27]</sup>,是指干重含量 $>1000$  mg/kg的重金属Ni的植物。这个浓度相当于生长在超基性富镍土壤中,未经积累的植物浓度的100倍。后来这个术语又被推广定义植物所吸收的大部分重金属,除了Cd(界限100 mg/kg)、Au(界限1 mg/kg)和Zn、Mn(界限10,000 mg/kg)。

研究表明<sup>[28]</sup>:在Biscutella Laevigate和Iberis intermedia两种植物中铊含量都非常高,在Biscutella中铊含量达到干重的1.4%,在Iberis中铊含量达到干重的0.4%。用每亩10吨的生物量的实验田进行观察,Iberis应产生大约700 kg/h植物矿石,其中包含8 kg的铊,以当时300,000 \$/t的铊价格来计算,创造价值2400 \$。从经济角度来说,植物找矿可以产生每亩500 \$的经济价值,还不包括植物矿石焚烧所产生的电力的额外收入。因此,如果要有足够的可利用的被铊污染的土地,那么铊的植物采矿将具有很大的潜力。值得一提的是,植物找矿是一种“绿色”技术,应该成为低品位矿石露天开采的

替代技术。

## 2.3 铊的植物找矿应注意的问题

由于铊是剧毒元素,在矿山开采过程中,铊矿石暴露于地表,在天然水作用下,进入表生地球化学循环,进而进入土壤、水体、植物中,由食物链又进入人体,给人类的健康带来很大的危害,贵州兴仁滥木厂汞铊矿矿区周围居民具有明显的铊中毒症状就是很好的实例。个别矿山由于在开采过程中造成对环境的巨大危害,也被当地环保局勒令停产。因此,传统的找矿方法已经受到了很大的限制。

植物找矿作为一种“绿色”找矿方法具有成本低,方法简便等优点。通过对植物的集中处理,造成二次污染的机会较少,且植物修复是一个自然过程,易被公众接受。同时还可以进行土壤修复。但植物找矿作为一种新兴找矿技术,还有很多方面发展很不成熟,因此在运用这项技术时要注意以下几个问题:

1)目前可作为铊矿指示作用的植物很多,但要选择适用于找矿目标的有效指示植物<sup>[29]</sup>。要考虑到植物对其赖以生长的底质(岩石、矿石及其风化产物)中成矿元素的敏感性,对矿体周围地球化学晕所形成的含矿异常清晰度,并且选中的植物应分布广泛,便于采样和对比;

2)植物中铊含量的高低不仅与植物种类有关,还与生长植物的土壤中铊含量高低呈正相关性,而且与植物的不同部位以及生长期有密切关系。因此,我们在选择有效植物的同时,还要注意植物生长期以及植物的不同部位;

3)尽管植物体内铊含量在一定程度上能够指示铊异常及铊矿体的存在,但还必须结合控矿因素和矿化特征等地质手段才能正确评价其找矿功能;

4)植物矿石在提取过程(如焚烧)中,铊向大气挥发的速度应以不构成生态危害为限,避免造成二次污染。

总之,植物找矿方法虽然具有传统方法所不及的技术和经济上的双重优势,但其商业规模一直没有得到确定,许多研究工作还有待于我们去做。例如通过植物的基因操作、土壤添加剂,或者在引导超富集过程中金属的潜在淋滤作用等手段,来增加植物吸收金属的含量的研究工作。只有当我们把这些问题搞清楚之后,我们才会了解植物找矿技术的真正价值。

[参考文献]

[1] 龙江平,张宝贵,张忠,等.铊的地球化学异常与金矿找矿

- [J]. 地质与勘探, 1994, 30(5): 56~61.
- [2] 颜文, 刘孝义, 龙江平. 铊(Tl)——一个不可忽视的土壤污染元素[J]. 土壤学进展, 1995, 23(3): 21~28.
- [3] Jerome O. Nriagu, Thallium in the Environment, Volume 29 in the Wiley Series in Advances in Environmental Science and Technology[J]. A Wiley - interscience Publication, 1998, 5~6.
- [4] 张忠, 龙江平. 金汞砷铊矿床中的铊[J]. 地质找矿论丛, 1994, 9(2): 67~74.
- [5] www. webmineral. com / chem / chem - Tl. shtml [DB/oL].
- [6] 张宝贵, 张忠, 龚国红, 等. 硫砷铊铅矿(PbTlAs<sub>5</sub>SS<sub>9</sub>)在中国的发现和研究[J]. 矿物学报, 1995, 15(2): 138~143.
- [7] 张忠, 张兴茂, 张宝贵, 等. 南华砷铊矿床雄黄标型特征[J]. 矿物学报, 1996, 16(3): 315~320.
- [8] 张宝贵, 王三学, 张忠, 等. 南华砷铊矿床铊黄铁矿的发现和初步研究[J]. 矿物学报, 1998, 18(2): 174~178.
- [9] 陈代演. 红铊矿在我国的发现和研究[J]. 矿物学报, 1989, 9(2): 141~147.
- [10] 李锡林, 安贤国, 安树仁, 等. 斜硫砷铊矿在自然界的第二次发现[J]. 科学通报, 1989, 34(1): 53~55.
- [11] 陈代演, 王冠鑫, 邹振西, 等. 新矿物——铊明矾[J]. 矿物学报, 2001, 21(3): 271~277.
- [12] 李国柱. 兴仁滥木厂汞铊矿床矿石矿物成分与铊的赋存状态初探[J]. 贵州地质, 1996, 13(1): 24~37.
- [13] 毛水和, 卢文全, 杨有富, 等. 褐铊矿在我国的首次发现[J]. 矿物学报, 1989, 9(3): 253~256.
- [14] 张宝贵, 胡静, 张忠, 等. 铊矿床生物成矿初探[J]. 中国科学院矿床地球化学开放研究实验室年报 2000, 90~93.
- [15] 聂爱国. 贵州西部地区地球化学性疾病物源探究[J]. 贵州环保科技, 2000, 6(3): 33~35, 45.
- [16] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984, 393~399.
- [17] 沈远超, 曾庆栋, 刘铁兵, 等. 隐伏金矿定位预测[J]. 地质与勘探, 2001, 37(1), 1~7.
- [18] 贾大成, 胡瑞忠. 金矿勘查中铊的找矿意义[J]. 地质与勘探, 2001, 37(6), 1~4.
- [19] 侯嘉丽, 杨密云. 铊元素分析在非卡林型金矿找矿中的应用研究[J]. 黄金科学技术, 2002, 10(1): 41~46.
- [20] 曾庆栋, 沈远超, 杨金中, 等. 山东乳山金矿区及外围铊地球化学找矿研究[J]. 黄金科学技术, 1998, 6(4): 8~13.
- [21] H V Warren, S J Horsky. 铊——一种生物地球化学勘查金的工具[J]. 地质地球化学, 1988, 2(总 167 卷): 13~15.
- [22] Massa P J, Ikramuddin M. 美国内华达州科莫矿区含金银石英脉及伴生火山岩中的铊[J]. 地质地球化学, 1987, 4(总 158 卷): 7~10.
- [23] 陈代演, 王华, 任大银, 等. 铊的地球化学与找矿的若干问题讨论——以黔西南主要铊矿床(点)为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 18(1): 57~60.
- [24] 邹振西, 陈代演, 任大银. 植物灰分法在黔西南某些铊矿床(点)的初步应用[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版): 2000, (6): 15~24.
- [25] 黄立春, 霍学义, 郭昌清. 兴仁县回龙村矿石、废矿渣对周围环境的铊污染调查[J]. 工业卫生与职业病, 1996, 22(3): 158~160.
- [26] 张忠, 陈国丽, 张宝贵, 等. 滥木厂铊矿床及其环境地球化学研究[J]. 中国科学(D辑): 1999, 29(5): 433~440.
- [27] Brooks R R, Lee J Reeves R D. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7: 49~57.
- [28] C W N Anderson, R R Brooks, A Chiarucci, et al. Phytomining for nickel, thallium and gold[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1999, 67: 407~415.
- [29] 陈代演, 邹振西, 任大银. 植物找矿法在寻找铊矿床中的初步应用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(4): 397~400.

## THALLIUM - BEARING MINERALS AND VEGETATION PROSPECTING FOR THALLIUM

LI De-xian<sup>1,2</sup>, GAO Zhen-min<sup>1</sup>, ZHU Yong-xuan<sup>1</sup>, RAO Wen-bo<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** 49 thallium-bearing minerals have been found in the world, and 9 of them in China. Lanmchangite is the first new discovered thallium-bearing mineral in Guizhou province. Arsenic has a close relation with thallium in thallium-bearing mineral, and sulfur, especially organic sulfur, is an important factor. Vegetation prospecting for thallium includes plant indication and plant ore. Some plants with high contents of thallium are effective indicator plants. There are a lot of works to be carried out in vegetation prospecting for thallium.

**Key words:** thallium-bearing mineral, vegetation prospecting, indicator plant