

## 论浙江治岭头金银矿床的成矿物质来源

郑明华 刘建明

(成都地质学院)

我国东南沿海久负盛名的浙江遂昌治岭头金银矿床, 鉴于其规模和独特的地质特征, 曾引起人们的广泛兴趣。长期以来, 有众多的研究者对其开展过多方面的研究, 然而时至今日, 对该矿床的形成作用的认识, 仍众说纷纭, 莫衷一是。归纳起来主要观点有四: (1) 岩浆期后中低温热液成矿; (2) 变质热液成矿; (3) 变质热液成矿, 后期火山热液叠加; (4) 中低温火山热液成矿。

作者通过对该矿床的地质特征、成矿条件分析以及矿质的来源等方面的研究后认为: 浙江遂昌治岭头金银矿床, 乃是由加热环流的下渗雨水把赋矿围岩——陈蔡群变质岩系中的成矿物质活化并浸取出来, 然后迁移到张扭性断裂带中聚集成矿, 应属层控型地下水热液矿床。

### 一、矿床的主要地质特征

治岭头矿区内出露的主要岩石是上侏罗统的磨石山组火山岩和下伏的前寒武系陈蔡群变质岩, 二者呈角度不整合接触或断层接触。火山岩盖层属燕山晚期的产物, 以酸性熔岩和火山碎屑岩为主。

金银矿体呈含矿的石英大脉赋存于陈蔡群变质岩层中, 火山岩则不整合超覆于矿脉之上。在不整合面上的火山角砾岩中, 见有下伏金银矿体的大小不等的角砾, 角砾经分析一般含金达数 g/t。这显然表明, 金银矿化时代应早于火山岩。因此, 火山热液成矿的观点是不能成立的。

区内发育有相当数量的浅成侵入岩脉。这类岩脉大多是与成矿后的火山岩有关的次火山相产物, 如花岗斑岩、霏细岩、霏细斑岩、钠长斑岩等。区内也见少量成矿前的岩脉, 如石英闪长岩、细粒花岗岩和安山玢岩等, 它们均未遭到区域变质作用的影响。细粒花岗岩的钾-氩同位素全岩年龄为1.24亿年<sup>①</sup>; 成矿前的石英闪长岩侵位时代明显地早于燕山晚期火山岩, 而在浙江地区所有的早于印支期的侵入岩, 都有明显的变质和混合岩化现象<sup>②</sup>。因此, 可以推测其最可能的形成时期应属印支期或燕山早期。金银矿化时代则可限制于该石英闪长岩侵位以后至燕山晚期火山岩覆盖之前。据此, 与前寒武系陈蔡群变质岩有关的变质热液成矿的观点, 也是不能成立的。

① 据罗镇宽1982年资料。

② 据蔡蕙兰1980年“浙江省侵入岩期次划分及其规律性初步探讨”

此外,在矿床分布的一定范围内,至今未发现具有一定规模的侵入岩体。迄今也尚未发现金银矿化与侵入体存在有任何的直接联系。因此,认为矿化与岩浆期后热液有关的观点,无疑也是缺乏根据的。

该区区域的主构造线方向和区域片麻理走向同为北东向,但矿区内片麻理走向却是以北西向为主。由此推测矿区乃位于基底构造的转折或交叉部位。矿区变质岩中碎裂岩石常见,断裂和裂隙发育,其中以具多期扭动的南北向压扭性断裂组和北东—近东西向的张扭性赋矿断裂最为突出。

陈蔡群变质岩属角闪岩相,在矿区内以黑云斜长片麻岩为主,钾长石增多时可过渡为黑云二长片麻岩,常含石榴石和石墨。局部有变粒岩和浅粒岩产出,其中有些呈变质前的不规则侵入脉状。

矿区内陈蔡群变质岩的Cr/Ni比值平均为6.15,应属正变质<sup>①</sup>,全岩氧同位素值为+6.36—+6.66‰,位于典型的正变质岩区(图1);但稀土元素丰度则显示副变质特征(图2)。作者选用五种岩石化学计算和作图法,对区域上陈蔡群变质岩的13个岩石化学全分析样品以及矿区内变质岩的40个样品进行原岩恢复,所得结果虽不尽一致,但仍可得出下列认识:

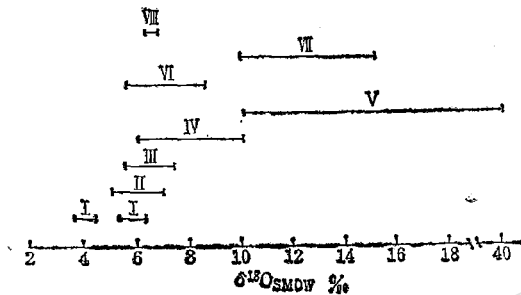


图1 各类岩石全岩氧同位素组成图解

I—陨石, II—超镁铁质岩石, III—玄武岩和安山岩, IV—酸性岩, V—沉积岩(以上据J.Hoefs,1980); VI—角闪岩相变质火山岩, VII—角闪岩相变质沉积岩(以上据崔文元,1983); VIII—治岭头矿区片麻岩(作者,1984)

Fig. 1. Diagram showing whole-rock oxygen isotopic composition of various sorts of rocks.  
I. Meteorite; II. Ultramafic rocks; III. Basalt and andesite; IV. Acid rocks; V. Sedimentary rocks; VI. Metamorphosed Volcanic rocks of amphibolite facies; VII. Metamorphosed sedimentary rock of amphibolite facies; VIII. Gneiss in Zhilington mining district.

(1) 区域中含矽线石的片麻岩为副变质岩(原岩为粘土岩),不含矽线石者正副变质兼有;  
(2) 矿区内的变质岩均不含矽线石,其原岩以中酸性火山凝灰岩为主,次为粘土岩及少量正常碎屑岩。部分变粒岩判定为中基性火山熔岩;(3) 矿区内的变质岩往往具有过渡性质,即在图解上占据过渡位置,判别函数值位于过渡区间。

由上可见,治岭头矿区变质岩应是一套含次火山岩的火山-沉积岩系。在火山活动强烈



图2 岩石稀土元素丰度模式

1—治岭头矿区片麻岩(作者,1984); 2、3—上中元古代页岩(Nance,1979)

Fig. 2. Chondrite-normalized REE pattern of different rocks.

1. Gneiss in Zhilington mining district; 2, 3. Upper and Middle Proterozoic shale.

① 据贺同兴等1980年“变质岩石学”中资料, Cr/Ni>1.0者为正变质岩。

时,以中酸性凝灰质沉积为主;火山活动微弱时,则以粘土和陆源碎屑沉积为主。若两者兼而有之,则呈现过渡性特征。

矿区内现有金银矿带两条。主矿带由数条矿脉首尾相接而成,略呈左行斜列,矿带长约1200m,垂深350m左右,宽度最大达25m;次矿带的宽度小于7m,规模较小。在上述两个矿带中共圈出五个工业矿体。矿体旁侧的围岩普遍具绢云母化、硅化和黄铁矿化。

矿石中的金属矿物含量一般为2—8%,以黄铁矿为主,其次为闪锌矿、黄铜矿、方铅矿以及金银类矿物。已经确定的十三种金银矿物可归为四类:(1)金银固溶体系列矿物,这是本区金银的主要产出形式,其中包括自然金、银金矿、金银矿和自然银;(2)银的硫化物,如辉银矿、螺状硫银矿、硒辉银矿等;(3)银的硫盐,如硫锑铜银矿及其含硒异种;(4)金银碲化物,包括碲银矿、碲金银矿和碲铋银矿等。

矿石中可以划分出两个基本矿物组合:早期矿物组合和主期矿物组合。早期组合由含少量呈散状黄铁矿的白色石英和蔷薇辉石组成;主期组合以各种金属矿物大量发育为特征,且多构成较为集中的条带状、团块状和浸染状。这两个主要的矿物组合,代表着矿床形成的早晚两个主要成矿阶段。

## 二、金银及其他组分的来源

作者拟从以下诸方面来探讨治岭头矿床的矿质来源。

### (一) 地层中的金、银丰度及其变化

治岭头矿床及区域范围出露的火山岩层中金的分布,表现出平均值低、分布较均匀以及数据集中等共同特点(表1,图3)。

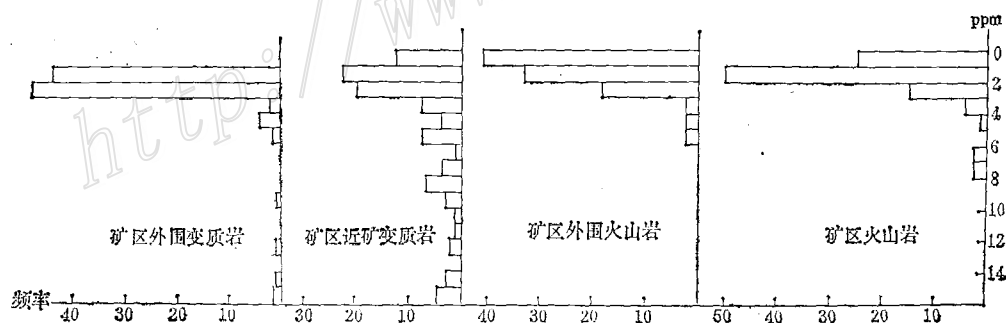


图3 岩石微金样品频率直方图

Fig. 3. Histogram showing gold content of various rocks.

陈蔡群变质岩——矿区的赋矿围岩,我们根据距离矿带的远近不同,划分出三个不同的地段:矿区外围地段、矿区内远矿无蚀变地段和近矿地段。

代表陈蔡群原始含金背景的矿区外围大面积变质岩,以含金平均值低和数据集中为特征(图3和表1),偶而可见部分样品的含金量较高,最高者可达17ppb。凡含金高于10ppb的样品均不含矽线石,含矽线石者无例外地含金偏低。由此,可得出以下信息:以副变质为主的陈蔡群含金普遍偏低,但当其中夹有相当数量的火山物质时,其含量则可能升高。

表 1 地层金银含量统计参数表

Table 1. Statistical parameters of gold-silver contents of the strata

样品位置和地层时代	岩石类型	金			银		
		n	$\bar{x}$	资料来源	n	$\bar{x}$	资料来源
矿区外围陈蔡群变质岩	黑云二长片麻岩	139	2.16	C, B			
	片麻岩类总平均	167	2.06	C, B			
	变粒岩类	21	1.86	C, B			
	片麻岩类及变粒岩类	188	2.04	C, B			
矿区外围侏罗系火山岩	酸性火山碎屑岩及熔岩	39	1.27	D	42	113	D
	酸性次火山岩	22	1.72	D, B			
	火山岩和次火山岩总平均	61	1.36	D, B	42	113	D
矿区内远矿无蚀变质岩	片麻岩类	39	12.4	B	17	550	A
	变粒岩类	9	11.3	B	3	870	A
	变质岩总平均	50	11.9	B	20	600	A
矿区内侏罗系火山岩	酸性火山碎屑岩及熔岩	74	1.78	C	3	567	A
	酸性次火山岩	24	1.23	C			
矿带两侧变质岩	片麻岩类和变粒岩类	95	4.77	A, C			
地壳克拉克值			4	E		70	E
世界平均丰度	片麻岩类及变粒岩类	1927	3.1	F			
	凝灰岩类	97	6.9	F	97	300	F
	中酸性—中性喷出岩	1357	12.9	F			

注: n—样品数;  $\bar{x}$ —算术平均值 (ppb); A—本文作者 (1984); B—浙江省地质科学研究所 (1983); C—浙江省丽水地质大队 (1982); D—浙江省金华地质大队 (1983); E—泰勒 (1964); F—博依尔 (1979)

能够代表矿区变质岩含金原始丰度的远矿无蚀变质岩, 含金量普遍较高, 其平均值为 11.9ppb, 是区域背景值的六倍, 是地壳克拉克值的三倍。此地段变质岩的含银量更为突出, 平均达 600ppb, 几乎高出克拉克值一个数量级。可见, 原岩以火山物质为主的冶岭头矿区变质岩, 是陈蔡群地层大面积贫金的背景下, 金银等成矿元素初步聚集的原始异常地段, 表明金银矿床在该区产出绝非偶然。

曾受矿液活动影响的矿带两侧的变质岩, 含金量则显著降低, 平均仅 4.77ppb, 如表 1 所示。显然, 此地段变质岩中的金曾发生过大规模的迁移。从金在空间上的分布曲线 (图 4) 来看, 在火山岩范围内曲线低而缓, 但一进入变质岩区曲线就剧烈起伏, 变化显著。金 (包括银) 的此种分布特征表明, 沿变质岩中各种裂隙和断裂, 金银等成矿组分曾发生过不均匀的活化和迁出。在裂隙发育部位, 金的迁出量最大, 因而其目前的含量必然显示低值; 在裂隙不很发育的部位, 由于金的迁出量较少, 从而保留了原始含金较高的特点。

为了验证并给出定量模式, 作者系统地采制了一条横切矿带的变质岩微量金地球化学剖面 (图 5), 剖面上金含量的变化趋势, 显示得更加清晰。变质岩的含金量与其距矿带的远近呈密切的正相关, 相关系数  $r = +0.96$ 。换言之, 随着与矿带距离的加大, 岩石中金含量显示出增高的趋势, 这充分表明金的迁移方向是从围岩进入矿带的。随着与矿带距离的增大,

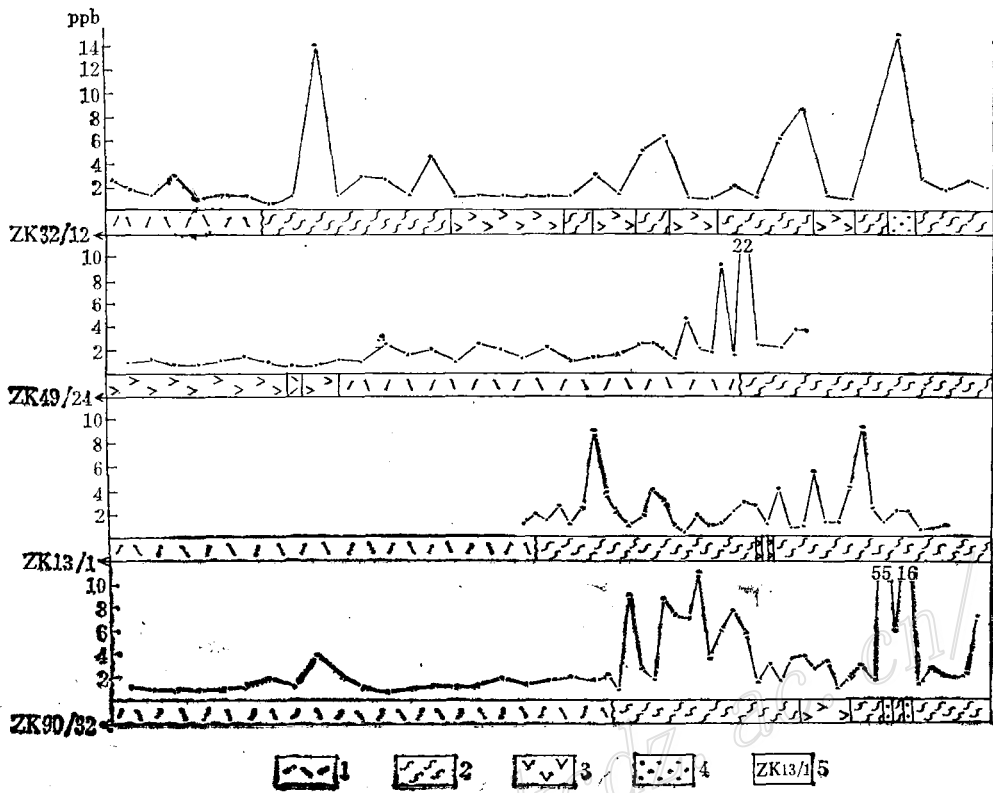


图4 岩石中金含量的空间变化曲线

1—火山岩；2—变质岩；3—酸性火山岩；4—石英脉；5—钻孔及编号

Fig. 4. Diagram showing spatial variation in gold content of various rocks.

1. Volcanic rocks; 2. Metamorphic rocks; 3. Acid volcanic rocks; 4. Quartz veins; 5. Drill hole and its serial number.

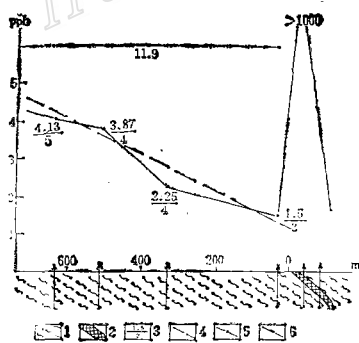


图5 变质岩微量金地球化学剖面

1—变质岩；2—金-银矿脉；3—含金量 (ppb) 及样品数；4—拟合的回归直线；5—实测含金曲线；6—变质岩原始含金丰度(中子活化分析，灵敏度达ppb级)

Fig. 5. Geochemical section showing variation in gold content of metamorphic rocks.

1. Metamorphic rocks; 2. Gold-silver ore vein; 3. Gold content (ppb) and sample number; 4. Fitting regression line; 5. Measured gold-content curve; 6. Original gold abundance of metamorphic rocks (determined by neutron activation analysis with sensitivity of ppb).

岩石中金的迁出量渐趋减少，至特定距离后将减小为零，在此则完全保留其原始含金特征。此距离值可用以下方法算得：在图5上拟合出一条岩石含金量 $x$ (ppb) 随距离 $c$ (m) 而变化的回归直线，回归直线方程为 $c=200x-210$ ，当 $x_0=11.9$ ppb时，即金的迁出量为零时，可算得曾有金迁出的单侧岩石宽度为2171m。又利用积分法算出矿带两侧变质岩中金的迁出总量

为75t (计算时取矿带长1200m, 金迁出带的比深为1000m), 此数值远大于已知矿带所探明的金储量。作者认为, 多出的这一部分金, 可能代表着矿区内尚未探明的最大潜在金储量。

## (二) 变质岩中铜、铅、锌含量的变化

鉴于矿石中金、银与铜、铅、锌硫化物密切共生, 作者又考察了横切矿带剖面上的变质岩中铜、铅、锌含量的变化。由图6不难看出, 矿带两侧变质岩中铜、铅、锌的含量均

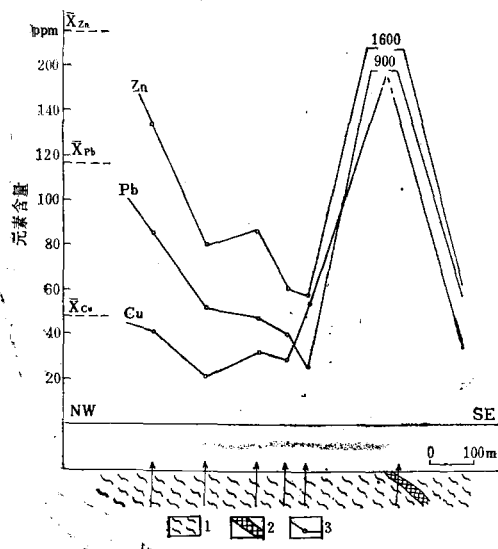


图6 矿区L<sub>52</sub>线变质岩铜、铅、锌地球化学剖面图  
1—变质岩; 2—金—银矿脉; 3—元素含量曲线; X<sub>Cu</sub>、X<sub>Pb</sub>、X<sub>Zn</sub>分别代表Cu、Pb、Zn元素含量本底

Fig. 6. Geochemical section of copper, lead and zinc along exploration line L<sub>52</sub> in the mining district.

1. Metamorphic rocks; 2. Gold-silver ore vein;  
3. Curve of element content. X<sub>Cu</sub>, X<sub>Pb</sub> and X<sub>Zn</sub> refer to background of Cu, Pb and Zn respectively.

多元统计因子等, 却可能给出较为真实的信息。这是由于某些元素原子结构和地球化学参数很相似, 在特定的地球化学过程中具有类似的行为而常共同迁移和相伴产出, 在许多情况下能较好地保持其来源地的特征<sup>[1]</sup>。因此, 作者选用某些特征性显示清晰的元素对比值来讨论岩矿石间在微量元素方面的亲缘关系(表2)。结果表明, 矿石与片麻岩之间具有明显的继承性, 而与其它岩类则无此特征。此外, 变质岩中的Cr/Ni比和Cr/V比在空间上显示剧烈变化, 它们在金银矿带中的变化亦很大, 而且其变化规律与两侧变质岩的变化大体一致, 表现出明显的制约关系。

## (四) 稳定同位素特征

冶岭头矿床的矿石铅属正常铅,  $\Phi$  值模式年龄为5.2—7.1亿年, 平均为6.1亿年(表3)。这清楚地说明矿石中的铅并非来自印支期或燕山期的火山岩浆活动。但这一年龄值却恰与陈蔡群的铷—锶法等时线年龄(6.74亿年)相近, 这就印证了矿石中铅来自陈蔡群的结论是正确的。

矿石中金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为+0.33—+7.44‰, 总平均值为+5‰(表4), 在

岩中铜、铅、锌含量的变化。由图6不难看出, 矿带两侧变质岩中铜、铅、锌的含量均低于矿区变质岩中相应元素的本底值, 并且越接近矿带其含量越低, 但至矿带时则急剧上升。倘若剖面完整, 必将勾划出一“W”形的变化曲线来, 从而也清晰地显示出铜、铅、锌从围岩向矿带迁移、聚集的趋势。

## (三) 岩(矿)石的微量元素特征

表2示矿区内各类岩石和金银矿石中某些微量元素含量及元素对比值。表2的下半部列出的矿石与各类岩石之间的相对差值( $\Delta$ ), 作者用来描述矿石与岩石之间在微量元素特征上的差异。 $\Delta$ 值愈小, 矿石与该类岩石在微量元素特征上就愈接近。不难看出, 矿石与片麻岩之间, 不管在元素含量上抑或在元素对比值上都很接近, 其亲缘关系是显而易见的。但矿石与火山岩及石英闪长岩之间则相距甚远。

一般而言, 地质体中各微量元素的丰度与其物质来源地可能不尽相同, 但反映元素之间关系的某些综合参数, 如元素对比值、

表2 矿区岩矿石微量元素含量统计参数  
Table 2. Statistical parameters of minor element contents of rocks and ores from the mining district

岩矿石类型	元素含量 (ppm)														元素对比值								
	Ti		Cr		Ni		V		Yb		Y		Co		Zn		Y		Ni		Ti		
	n	$\bar{x}$	n	$\bar{x}$	n	$\bar{x}$	n	$\bar{x}$	n	$\bar{x}$	n	$\bar{x}$	n	$\bar{x}$	n	$\bar{x}$	n	$\bar{y}$	n	$\bar{y}$	n	$\frac{Ti}{V}$	
金银矿石	540	2421	682	216	677	18.8	42.1	677	646	3.4	467	10.5	547	7.9	421	1050	3.16						57.4
片麻岩	441	3516	1359	166	1142	27.0	81.0	1301	1301	4.5	1291	9.5	697	12.6	1251	315	2.15						43.4
火山岩	131	936.6	387	88.5	343	3.8	7.4	344	344	5.7	344	57.3	134	3.2	131	707	10.11						126.7
石英闪长岩	116	4191	210	52.4	210	14.3	107.3	210	210	5.0	210	4.1	116	12.1	116	105	0.82						39.1
克拉克值		5700		102		75	135			0.8		33		25		70							
酸性岩世界平均丰度		2300		25		8.1	41			4.1		34		5.1		61							
矿石与各类岩石之间的相对差值 ( $\Delta$ )																							
矿石-片麻岩	45		30		44		92		33		11		59				49		11				32
矿石-火山岩	159		144		397		472		70		447		149				219		100				120
矿石-石英闪长岩	73		312		31		155		50		154		53				286		102				47

注: n为样品数;  $\bar{x}$ 为元素含量算术平均值 (据丽水地质大队原生晕样品统计);

$$\Delta = \frac{x_1 - x_2}{x_2} \times 100 (x_1 > x_2), \text{ 其中 } x_1 \text{ 为矿石, } x_2 \text{ 为岩石.}$$

表 3 矿石铅同位素组成

Table 3. Lead isotopic composition of the ore

编 号	铅同位素比值			Φ 值模式年龄 (亿年)	资料来源
	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$		
A <sub>1</sub>	18.114	15.795	39.280	6.1	本文作者 (1984)
A <sub>2</sub>	18.258	15.974	40.088	7.1	
C <sub>1</sub>	17.963	15.618	38.571	5.2	王义文 (1982)

注: 计算年龄值时,  $T = 4.51 \times 10^9$  年,  $a_0 = 9.50$ ,  $b_0 = 10.36$

$\lambda_1 = 1.537 \times 10^{-10}$  /年,  $\lambda_2 = 9.722 \times 10^{-10}$  /年

表 4 矿石的硫同位素组成 ( $\delta^{34}\text{S}\%$ )Table 4. Sulfur isotopic composition of ores ( $\delta^{34}\text{S}\%$ )

岩 (矿) 石	矿 物	变化范围	平均值	极 差	均方差
金银矿石	闪锌矿 (5)	+1.95—+5.36	+3.2	3.41	1.41
	方铅矿 (4)	+0.33—+2.70	+1.2	2.37	0.56
	黄铁矿 (44)	+2.83—+7.44	+5.5	4.61	0.99
	平均 (53)	+0.33—+7.44	+5.0	7.11	1.64
近矿蚀变岩	黄铁矿 (6)	+2.83—+6.44	+4.7	3.81	1.48

(括号内数字为样品数)

频数直方图上具塔式效应, 显示与酸性—中酸性岩浆岩的硫同位素特征大体一致。

如前所述, 矿区变质岩中存在大量的中酸性火山物质, 而从表 4 中则不难看出, 其硫同位素组成变化与矿石的硫同位素组成极为相似。因此, 矿石中的硫亦可能来自陈蔡群变质岩层。

综合资料可得到如下的结论: 矿床中金、银及其他主要组分应来自矿带两侧的地层陈蔡群。换言之, 陈蔡群是成矿物质的提供者 (至少是主要的提供者), 即矿源层。

### 三、成矿流体的来源

氢氧同位素通常作为研究成矿流体来源最有效手段之一而广为应用。根据浙江省地质科学研究所 (1983) 资料, 治岭头金银矿床成矿溶液的  $\delta^{18}\text{O}$  值均小于 +3.5‰, 变化范围为 -2.25—+3.41‰, 平均为 +1.06‰;  $\delta\text{D}$  值平均为 -60‰, 与矿区现代雨水的  $\delta\text{D}$  值 (-74‰, 本文作者, 1984) 仅差一个小的数值 (表 5, 图 7)。矿液样品所测数值均落在雨水线与变质水之间, 最靠近变质水的 AB<sub>7</sub> 号样采自蚀变片麻岩, 其余样品的  $\delta^{18}\text{O}$  值均随均一温度的升高而增大。令人惊奇的是, 所有样品的  $\delta\text{D}$  值几乎完全一致, 以至可以在  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$  座标图上描绘



表5 成矿溶液的氢氧同位素组成 (SMOW, ‰)

Table 5. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of the ore-forming fluids (SMOW‰)

样号	样品名称	测试矿物	均一温度(°C)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$	$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$
AB <sub>22</sub>	灰白色含金脉石英	石英	248	-2.25	-60.2
AB <sub>18</sub>	灰白色含金脉石英	石英	290	+0.54	-58.6
AB <sub>8</sub>	灰白色含金脉石英	石英	345	+2.55	-61.4
AB <sub>7</sub>	蚀变片麻岩	石英	303	+3.41	-60.4

注：表中 $\delta\text{D}$ 值系直接测定石英包裹体水； $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值系测定样品石英的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SiO}_2}$ 值，然后经公式 $1000\ln\alpha = 3.38(10^{-6} T^{-2}) - 290, 200 - 500^\circ\text{C}$  (据Clayton et al, 1972) 换算而得。

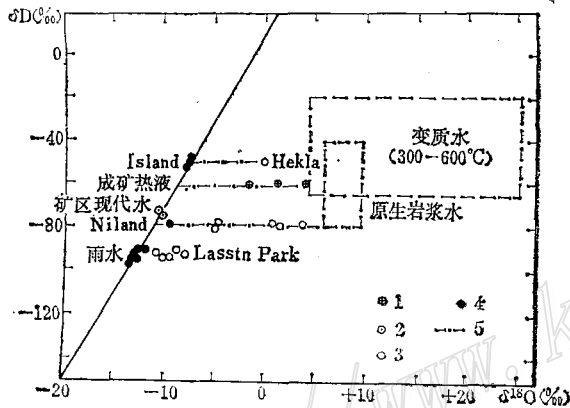


图7 各种成因水的 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解  
1—治岭头矿床成矿溶液；2—矿区现代大气水；  
3—4—世界某些现代地热系统的热水和当地大气水；5—氧同位素漂移线

Fig. 7.  $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$  versus  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  diagram of waters of various origins.

1. Ore-forming fluids of the Zhilingtou deposit; 2. Present meteoric water in the mining district; 3-4. Hot waters of some present geothermal systems in the world and the meteoric waters at the corresponding places; 5. Drift line of oxygen isotopes.

出一条平行横轴 ( $\delta^{18}\text{O}$ 轴) 的水平直线，这是雨水在岩石圈中被加热而成的热水体系所具有的典型特征<sup>[2][3]</sup>。众所周知，下渗雨水总是具有轻的同位素组成，而其流经的岩石矿物则多具有重的同位素组成。这样，它们之间发生氧同位素交换则是势所必然，其结果是使热水的氧同位素越来越重，表现为向 $\delta^{18}\text{O}$ 值增大的方向漂移。此外，热水的温度越高，同位素交换就进行得越充分，漂移的距离也越大。

由于岩石矿物含氢极少，热水的氢同位素将基本上保持不变，从而可在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 图解上绘出一条平行于 $\delta^{18}\text{O}$ 轴的水平直线。在图7上作者还标出了某些现代地热异常区下渗雨水加热环流体系的氢氧同位素组成模式以资对比。不难发现这些标准系统的图形与治岭头矿床矿液的图形何其相似乃尔！这表明后者成矿溶液是由下渗雨水加热演化而来，而且还揭示出治岭头矿区在成矿的当时，可能位于一个地热异常区的范围内。治岭头矿床显然是与该地热异常相伴生的热水系统的活动产物。这一认识可以从地质现象的研究中获得有力的支持。按常识，现代地热异常区一般都是沿板块边界的活动带分布，区内往往有岩浆活动的迹象，系统中热能即主要来自上升岩浆。进入印支旋回以来，随着西太平洋毕鸟夫带的形成和发展，中国大陆东缘发生构造活化，转变为太平洋型活动大陆边缘。在我国东南沿海地区，普遍发育有印支期的岩浆活动。在治岭头矿区则表现为石英闪长岩等成矿前岩脉的形成，这些与现代地热异常区产出的地质背景是极为相似的。

#### 四、金银进入溶液的机制及迁移

作者在对矿物气液包裹体的测定和物理化学计算中,得到了成矿各阶段的一系列物理化学参数值(表6)。不难看出,成矿热液具有酸性、贫硫、高温、氧化性较强、 $\text{Cl}^-$ 活度中等的特点。近代对金地球化学热液性状的研究表明,类似热液中金主要以氯络合物形式存在<sup>[4]</sup>。当溶液中总硫活度( $\alpha_{\text{S}_2}$ )小于 $10^{-3}\text{mol/L}$ 时,金的各种硫络合物即不起显著作用。由于氧逸度和 $\text{Cl}^-$ 活度不是太高,形成 $\text{Au}^{+3}$ 氯络合物以及形成高配位氯络合物的趋势小<sup>[5]</sup>。因此,本文在讨论中仅考虑 $\text{Au}^{+1}$ 的二配位氯络合物( $\text{AuCl}_2^{-1}$ )。银的地球化学热液性状亦然。即金、银在矿液中主要以 $\text{AuCl}_2^{-1}$ 和 $\text{AgCl}_2^{-1}$ 的形式存在。

表6 成矿的物理化学参数综合表

Table 6. Composite metallogenic physicochemical parameters

参数	单位	成矿前	矿化早阶段	矿化主阶段	矿化晚期
温度(T)	°C	>350	320	270	300
压力(P)	Pa	$5 \times 10^7$	$3 \times 10^7$	$2 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
pH		3.5	4	5	6
Eh	V	>+0.4	+0.35	+0.2	<+0.2
氧逸度( $f_{\text{O}_2}$ )	Pa	$1.01325 \times 10^{-25}$	$1.01325 \times 10^{-29}$	$1.01325 \times 10^{-33}$	$1.01325 \times 10^{-38}$
硫逸度( $f_{\text{S}_2}$ )	Pa	$>1.01325 \times 10^{-5}$	$1.01325 \times 10^{-5}$	$1.01325 \times 10^{-6}$	$<1.01325 \times 10^{-6}$
总硫活度( $\alpha_{\text{S}_2}$ )	mol/L	$>10^{-4.5}$	$10^{-4.5}$	$10^{-6.5}$	$<10^{-6.5}$
氯活度( $\alpha_{\text{Cl}}$ )	mol/L	1	1	1	1

根据矿床勘探成果<sup>①</sup>,成矿溶液共沉淀出了 $6.0125 \times 10^6\text{t}$ 的 $\text{SiO}_2$ 。又根据对 $\text{SiO}_2$ 在各种温压条件下溶解的实验结果<sup>[4]</sup>,在冶岭头矿床沉淀开始到结束的温压区间, $\text{SiO}_2$ 饱和溶液的溶解度差为 $0.0156\text{mol/L}$ ,换言之,每百吨热液约沉淀出 $0.094\text{tSiO}_2$ 。这样,欲沉淀出 $6.0125 \times 10^6\text{tSiO}_2$ ,则需 $6.4 \times 10^9\text{t}$ 热水,这就是形成矿床所需的最小水量。现在取得的金、银地质总储量分别为 $30\text{t}$ 和 $700\text{t}$ ,由此可算得矿液中金、银的地质浓度差<sup>②</sup>(考虑到本矿床全部石英中伴随金银矿物沉淀的主矿化阶段石英仅占43%)为 $5.5 \times 10^{-8}\text{mol/L}$ 和 $2.35 \times 10^{-6}\text{mol/L}$ 。

直接用矿带的 $\text{Au/SiO}_2$ 比值,也可算得金、银的地质浓度差。本矿床金和银的品位分别为 $12.71$ 和 $277.91\text{ppm}$ ,矿石中 $\text{SiO}_2$ 含量为92.5%。设工业矿体的质量占整个矿带的 $1/3$ ,则 $\text{Au/SiO}_2 = 4.58 \times 10^{-6}$ , $\text{Ag/SiO}_2 = 100.148 \times 10^{-6}$ ,由此算得金和银的地质浓度差分别为 $5.1 \times 10^{-8}\text{mol/L}$ 和 $2.03 \times 10^{-6}\text{mol/L}$ 。很显然,这些数据与前面的计算结果基本一致。

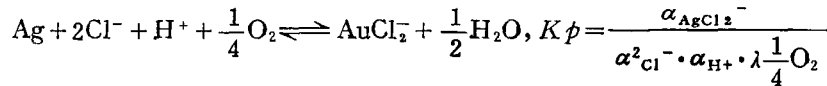
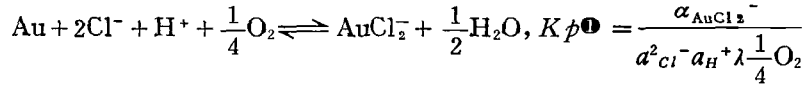
在现代地热异常区的热水中,常有富含金、银的沉淀物生成,这些热水含金多在 $0.05-1.0\text{ppb}$ 之间,含银多在 $1-20\text{ppb}$ 之间<sup>[4][5]</sup>。因此,作者从纯地质角度考虑,设在本矿床成矿末期残液中金和银的含量为 $0.1$ 和 $3.0\text{ppb}$ ,那么利用以上的浓度差值,即可算出在金银沉淀之初,其地质浓度分别为 $5.05 \times 10^{-8}\text{mol/L}$ 和 $2.00 \times 10^{-6}\text{mol/L}$ ;在成矿的末期为 $5.08 \times$

① 由浙江地矿局丽水六队实施勘探。

② 矿床金的地质浓度,从纯地质角度考虑系指形成该矿床所需的金浓度。地质浓度差,则指热液中开始沉淀时的金浓度与沉淀结束时金浓度之差。

$10^{-10}$ mol/L和 $2.78 \times 10^{-8}$ mol/L。

综合诸方面的因素，作者提出矿液在变质岩中环流时，岩石中的金银主要通过下列化学反应活化进入溶液：



当物理化学条件改变时，上述反应逆向进行，则金、银等从溶液中呈自然金属形式沉淀下来。

根据化学热力学原理，相应于标准状态，化学反应过程的吉布斯自由能在任意温压下的改变值 ( $\Delta G_T^p$ ) 可由下式算得：

$$\Delta G_T^p = \Delta H^0 - T\Delta S^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT - T \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT + \Delta n RT \ln P$$

式中  $\Delta H^0$  和  $\Delta S^0$  分别为标准状态下该反应的焓变和熵变； $\Delta C_p$  是反应的等压摩尔热容的改变值； $\Delta n$  是该反应气体物质摩尔分数的变化； $R$  是通用气体常数。

当化学反应达到平衡时，又有  $\Delta G_T^p = -RT \ln Kp$ ，于是，根据有关物质的各项热力学数据<sup>②</sup>，并代入已知的各成矿物理化学参数，即可算得在成矿各阶段  $\text{AuCl}_2^-$  和  $\text{AgCl}_2^-$  的溶解度（表7，图8）。倘若以上认识正确，那么计算结果应与金和银的地质浓度及矿床的地质事实相吻合。我们从表7可得到以下信息：

(1) 在300℃以上，金银的溶解度远高于其地质浓度，这就从理论上证明了岩石中的金银通过上述反应活化进入溶液是完全合理的。在类似条件下，我们计算的结果与世界一些研究者关于金银溶解度的实验值或计算值极为相似<sup>[6][7]</sup>。

(2) 由金银氯络合物沉淀出自然金（银）的控制因素有：降温、减压、pH值升高、 $\lg f_{\text{O}_2}$  下降、 $\alpha_{\text{Cl}^-}$  下降。这些特征与矿化过程中的变化趋势是一致的，见表6所示。

(3) 地质浓度计算时，得到金沉淀的浓度区间为  $2.00 \times 10^6 - 5.08 \times 10^{-10}$  mol/L。从图8中可见，此浓度区间对应的温度范围是220—260℃，这正是治岭头矿床金属矿物沉淀主阶段

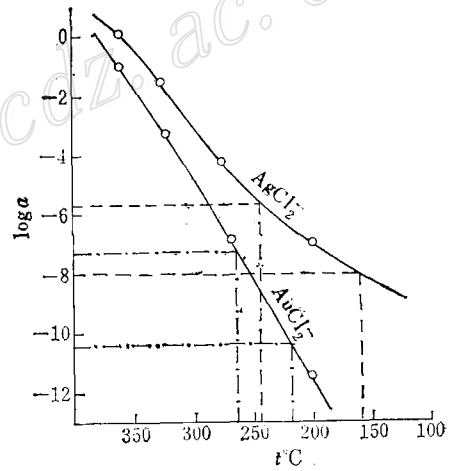


图8 矿液演化过程中金银溶解度变化曲线  
(图中点划线和虚线分别为金、银的沉淀区间)  
Fig. 8. Diagram showing variations in solubility of gold and silver during the evolution of ore-forming fluids.

①  $Kp$  为化学反应平衡常数， $\alpha_x$  为  $X$  组分的活度， $f_y$  为  $y$  组分的逸度。  
② 热力学数据均可在有关文献中查得。

表 7 金银络合物溶解度计算表  
Table 7. Calculated solubilities of gold-silver complexes

序 号	化学方程式	金银络合 物溶解度 mol/L	成矿前	早阶段	主阶段	矿化晚期
			$T = 360^{\circ}\text{C}$ $P = 5 \times 10^7 \text{Pa}$ $\lg f_{\text{O}_2} = -25$ $\text{pH} = 3.5$	$T = 320^{\circ}\text{C}$ $P = 3 \times 10^7 \text{Pa}$ $\lg f_{\text{O}_2} = -29$ $\text{pH} = 4$	$T = 270^{\circ}\text{C}$ $P = 2 \times 10^7 \text{Pa}$ $\lg f_{\text{O}_2} = -33$ $\text{pH} = 5$	$T = 200^{\circ}\text{C}$ $P = 1 \times 10^7 \text{Pa}$ $\lg f_{\text{O}_2} = -38$ $\text{pH} = 6$
1	$\text{Au} + 2\text{Cl}^- + \text{H}^+ + \frac{1}{4}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{AuCl}_2^- + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	$\lg M_{\text{AuCl}_2^-}$	-0.38	-3.22	-6.84	-11.28
2	$\text{Ag} + 2\text{Cl}^- + \text{H}^+ + \frac{1}{4}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{AgCl}_2^- + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	$\lg M_{\text{AgCl}_2^-}$	0.77	-1.4	-4.17	-6.75

较晚时期的温度区间，与矿物生成顺序的研究不谋而合。银的沉淀温度区间略晚于金，为245—160℃。事实是，金银紧密共生而银略晚于金生成；螺状硫银矿（形成于177℃以下）局部见于矿脉上部等，这一事实及其实验室的研究结果与地质计算及理论计算结果的一致性，表明本文的一系列结论无论如何都是可以加以考虑的。

## 五、结 语

1. 根据以上分析，治岭头金银矿床的形成过程可概括为：（1）含金银等成矿组分较丰富的海底火山-沉积岩系的形成；（2）沉积岩系发生变质、褶皱和上升，并产生张扭性断裂；（3）下渗雨水加热环流系统从地层中溶滤出金、银、铜、铅、锌等，并在张扭性断裂带中卸载；（4）成矿之后遭风化剥蚀，并被燕山期火山岩所覆盖。

2. 鉴于矿脉仅形成于陈蔡群中，矿脉中的有用组分主要来自该地层，地层控制特征明显，应属层控型矿床。决定矿床层控型产出的因素有：（1）矿区陈蔡群的原始金、银丰度高，为矿化作用奠定了雄厚的物质基础；（2）矿区陈蔡群历经多次构造活动的改造，断裂裂隙发育，构成了矿液活动的良好场所；（3）矿区变质岩中，某些岩性有利于矿液中金属组分的沉淀。

3. 当陈蔡群以副变质为主的岩性构成时，其含金量普遍偏低，但当其中夹有火山凝灰物质时，地层中的金银丰度显著升高，从而构成矿源层。倘若在这种部位断裂裂隙发育，且具地下水溶液和能量来源，则发生矿化作用的是显而易见的。

4. 治岭头金银矿床的形成机制相当复杂，成矿物质的富集和沉淀是多次的。在异常地热场中的下渗雨水加热环流系统，对本区成矿具有决定性的意义。有充分的证据表明，治岭头金-银矿床乃层控型也下水热液矿床。

本文曾得到张斌、帅德权同志的帮助，在野外工作期间得到浙江丽水地质大队许金坤、熊珊工程师的大力支持，使研究工作得以顺利进行，在此谨致谢忱！

## 主要参考文献

- 〔1〕 成都地质学院〈矿床学〉编写组 1978 矿床学（上、下册） 地质出版社
- 〔2〕 G. Faure 著 潘曙兰等译 1977 同位素地质学原理 科学出版社
- 〔3〕 Hoefs, J., 1980, Stable Isotope geochemistry, Springer-Verlog Berlin Heidelberg New York.

- [4] Barnes, H. L., 1979, *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Second Edition. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons.
- [5] Boyle, R. W., 1979, *The geochemistry of gold and its deposits*. Ministry of Supply and services Canada.
- [6] Baranova, N. N. and Ryzhenko, B. N., 1981, Computer simulation of the Au-Cl-S-Na-H<sub>2</sub>O system in relation to the transport and deposition of gold in hydrothermal processes. *Geoch. Inter.*, pp. 40-60.
- [7] Seward, T. M., 1976, The stability of chloride complexes of silver in hydrothermal solutions up to 350°C, *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 40, pp. 1329-1350.

## MATERIAL SOURCES OF THE ZHILINTOU GOLD-SILVER ORE DEPOSIT IN ZHEJIANG PROVINCE

Zheng Minghua and Liu Jianming

(Chengdu College of Geology)

### Abstract

Zhilintou is the place of a well-known gold-silver ore deposit on the southeastern coastal area of China. In the mining district, there are exposed Upper Mesozoic acidic volcanic rocks and Precambrian metamorphic rocks. The metamorphic rocks, which are the host rocks of extensive quartz ore veins, consist mainly of some kinds of gneisses and have complex structures characterized by well developed fissures. In the ore, there exist such metallic minerals as pyrite, sphalerite, galena, chalcopyrite and various kinds of gold and silver minerals.

The metamorphic rocks in the mining district are rich in gold and silver (averagely gold 11.9 ppb, silver 550 ppb). In both sides of the ore vein, however, the gold content of the metamorphic rocks decreases evidently (merely 4.77 ppb on average), and the distribution of the gold becomes quite irregular. All this suggests that gold in these parts was mobilized and migrated in an uneven manner. The measuring of the variation in gold content along a section transecting the gold veins has confirmed this conclusion. The gold abundance increases with the distance, indicating the undoubted migration of gold from the surrounding rocks into the ore veins. The measured amount of the migrated gold is much higher than the gold reserve of the deposit. It is also found that the Cu, Pb and Zn in the surrounding rocks show a tendency of migration into and concentration in the ore veins. The characteristics of trace elements in the ore is quite similar with those in the metamorphic rocks. The lead model dates of the ore are close to the ages of the metamorphic rocks, and the sulfur isotope com-

position of the ore is similar with that of the metamorphic rocks. It is therefore obvious that gold, silver and other ore materials in the ore must have mainly come from the metamorphic strata. In other words, the strata must have served as the source bed.

The ore-forming hydrothermal solutions bear the characteristics of "oxygen isotope shift", that is, with the  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  data of the ore fluids, one can draw a horizontal straight line parallel to the  $\delta^{18}\text{O}$  axis of the  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$  coordinate. This is typical for the heated rain water in a convection system within the lithosphere. Considering the geological setting, the authors hold the opinion that it was the heated rain water that mobilized the ore materials in the metamorphic rocks, and then transported and concentrated them in tension-shearing fissures, thus forming the Zhilintou ore deposit.

(上接第38页)

会议对51篇论文进行了广泛地学术交流,对我国南、北方硅铁建造特征和时空、分布规律进行了深入探讨,进一步提出了退化变质、叠加蚀变对前寒武纪铁矿可能存在的富化作用。应用现代综合手段、稳定同位素地质、变质作用热力学分析研究变质成矿作用有了新的进展。对我国各类交代岩的地质特征、生成机理与金属矿化的关系、热液性质、矿质沉淀机理作了大量研究,进一步深化了碱质交代及挥发性组分在成矿作用中的认识,探讨了交代作用中一些理论问题。论文还反映我国成岩成矿实验技术、同位素地质、成矿热力学分析、电算技术有了较大提高,各学科间进一步结合已成趋势;将交代理论用于成矿预测有的已取得了明显的地质效果,发现了一些新的交代矿床、矿石类型和罕见的交代矿物。

为进一步促进变质成矿作用、交代成矿作用的研究,代表们一致建议:①建立在矿床专业委员会领导下的相应学术研究组织;②举办各类学习班,在大专院校中加强这两个学科的教学与科研,尽快提高人员素质,建立科研梯队。

第一届“变质作用、交代作用与成矿关系学术讨论会”秘书组供稿

## 全国稀土元素地球化学学术讨论会在浙江宁波召开

### The Nationwide Symposium on Geochemistry of Rare Earth

#### Elements Held in Ningbo, Zhejiang Province

由中国矿物岩石地球化学学会、中国地质学会矿床专业委员会、中国稀土学会共同召集的稀土元素地球化学学术讨论会于1985年11月4日—10日在浙江省宁波市召开。来自全国各地的120多名代表出席了这次会议。会议收到了137篇论文摘要,会上交流了80多篇论文。

代表们对会上交流的稀土资源概况、稀土矿床类型、矿物岩石矿床的稀土元素地球化学及稀土元素的分析测试方法等颇感兴趣。特别是对目前我国进行稀土元素分析的各种测试方法的精度和灵敏度,以及稀土元素地球化学研究中值得注意的一些问题,各抒己见,展开了热烈的讨论,会议开得紧张热烈。

通过会议交流和讨论,代表们一致认为,稀土元素地球化学的研究工作已经在我国地质学的各个领域开展起来,对探讨矿物、岩石和矿床的形成条件和物质来源等方面获得了新的信息,取得了可喜的成果。代表们感到收益不小。

为了进一步开展稀土元素地球化学研究工作,代表们呼吁:分析测试部门应加强稀土元素分析测试方法的研究,特别是应努力提高 $\Sigma\text{REE}$ 含量在1—10ppm或更低含量样品稀土分量的测定精度。

邹天人供稿