

华南某幔源热液金矿带的成矿特征和成因

王执均*

(浙江省有色金属地质勘探公司)

近年来,在江南古岛弧东侧,绍兴—江山深断裂中,陆续发现并勘探了一批金矿床。这类矿床埋藏浅,品位较高,易采易选,经济效益好,而且其地质背景、矿床特征、物质来源和成矿作用等方面,都有其独特之处,故可成为独立的金矿类型——幔源岩浆热液金矿。我国幅员辽阔,板块碰撞带和深断裂均较发育,寻找幔源岩浆热液金矿具有广阔的前景。本文着重讨论这类矿床的成矿特征和成因。

成矿地质背景

金矿带位于江南古岛弧与陈蔡优地槽接壤处,绍兴—江山深断裂的东北端(图1)。矿带西北侧是江南东安—雪峰期岛弧褶皱系的北东延伸部分。出露地层主要为中元古代双溪坞群,是一套由海相火山岩、硬砂岩、复理式韵律层夹陆相火山岩组成的不成熟岛弧堆积体,属绿片岩相。它与桂北四堡群层位大致相当,是江南古岛弧的基底构造层;其中产有与细碧角斑岩有关的黄铁矿型铜矿。

矿带东南侧属陈蔡弧前东安—雪峰期优地槽。出露地层主要为陈蔡群变质岩系,由碎屑沉积岩夹海相火山岩、碳酸盐岩组成;属前震旦系沉积,并经雪峰—加里东运动强烈变质。

微量金系统测量表明,双溪坞群平均含金0.014ppm,为地壳金丰度值的3.5倍,陈蔡群金含量与地壳丰度值一致(0.004ppm)。这显示了较高丰度的金的区域地球化学场,是此类金矿成矿的一个重要条件。

绍兴—江山(简称绍江)深断裂是一条长期活动的超壳深断裂。元古界表现为强烈的岩浆侵

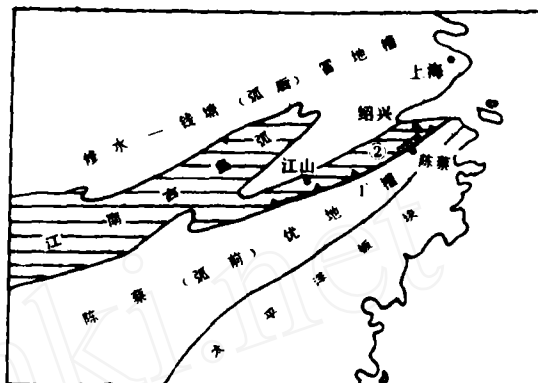


图1 横山幔源岩浆热液金矿带构造位置略图
①绍兴—江山深断裂 ②横山金矿带

入活动,是本区幔源岩浆热液金矿带的主要控岩控矿构造。加里东期表现为强烈的动力变质活动,形成了宽达数公里、逶迤近百公里的糜棱岩带,使金矿床普遍遭受较强的动力改造。显然,超壳深断裂是此类金矿成矿的一个构造前提。

成矿地质特征

1. 控矿岩体特征 金矿带赋存于横山岩体中,金的成矿作用严格受岩体控制,控矿岩体属幔源花岗岩类。它是与其共生的细碧角斑岩类同源侵入体。

(1) 控矿岩体呈狭长带状(长43km,宽0.5~6km),产于深断裂中,有同期同源的火山岩(中元古代双溪坞群)相伴产生。组成岩体的岩类较为复杂:从中基性、中性到酸性均有发育,但总体成分偏中性,以石英闪长岩为主。岩体中富含角砾辉石岩、角闪橄榄岩等超镁铁同源包体,同化混染成为斑杂构造较发育。

(2) 表1综合了目前公认的不同成因花岗岩类的岩石化学标型指数。由表可见,控矿岩体具

* 参加本文研究工作的还有赵筱福、王道远等同志。

幔源花岗岩类的岩石化学标型特征。

横山岩体岩石化学标型参数对比表*

表1

成因类型	岩体和岩石名称	$Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$, 分子数	Na_2O / K_2O	$Fe^{2+} / (Fe^{2+} + Fe^{3+})$, 原子数	查氏岩石化学类型
幔源型	横山 闪长岩	0.85	2.6	0.47	正常类型
	山 石英闪长岩	0.96	1.99	0.40	
	西裘 石英闪长岩	0.87	2.72	0.53	"
	石英闪长岩	<1	2.17~2.24	0.52~0.55	"
同熔型	花岗闪长岩	0.92~1.02	0.38~1.25	0.29~0.41	"
	石英闪长岩				铝过饱和
壳源	重熔型 花岗岩	1.03~1.07	0.4~1.27	0.27~0.39	"
	交代型 混合花岗岩	1.03~1.19	0.4~0.7	0.13~0.39	

* 据南京大学地质系和杨超群等资料编。

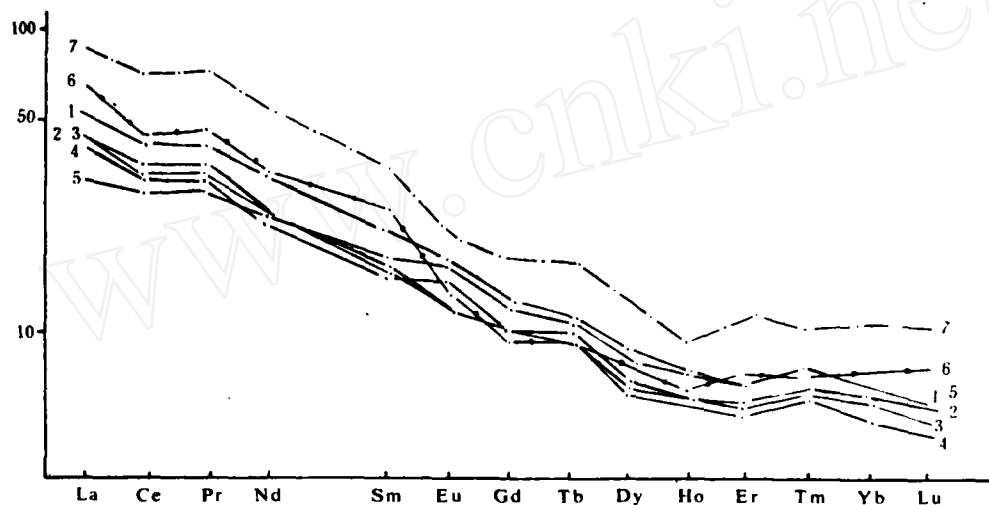


图2 横山岩体稀土配分曲线图

横山岩体: 1—闪长岩; 2—石英闪长岩; 3—石英闪长岩; 4—细粒闪长岩;

5—斜长角闪岩; 双溪坞群: 6—角斑岩; 西裘岩体: 7—石英闪长岩

(3) 从微量元素特征来看, 控矿岩体的稀土配分型式与双溪坞群角砾岩、西裘幔源石英闪长岩¹⁾基本相同, 三者呈大致平行的右倾平滑曲线(图2)。它的特征是: $\Sigma REE = 100.83\text{ppm}$, $LREE/HREE = 3.22$, 不出现明显的Eu异常 ($Eu/Ek = 0.885$)。

值得一提的是, 控矿岩体(石英闪长岩)和双溪坞群火山岩均以富含钪(16.8ppm)、铬(102ppm)、钒(260ppm)等过渡元素为特征,

表明两者属同源演化的产物。它们明显高于华南同熔型花岗岩类($Ni 13\text{ppm}$, $Cr 15\text{ppm}$), 而与华南幔源型花岗岩类相一致($Ni 26 \sim 48\text{ppm}$, $Cr 84 \sim 216\text{ppm}$)²⁾。

(4) 控矿岩体(石英闪长岩)平均含Rb 66.9ppm, 含Sr 864.3ppm, $Rb/Sr = 0.077$, 远远低于华南同熔型花岗岩的平均比值($Rb/Sr = 0.52$)。三个全岩样 Sr^{87}/Sr^{86} 为0.70543~0.70595, 落在大洋玄武岩源区 Sr^{87}/Sr^{86} 上限附近, 一定

1) 王德滋等: 老南幔源花岗岩特征, 1982年。

2) 徐克勤等: 华南花岗岩成因与成矿, 1982年。

程度上反映了岩体的幔源性质。

2. 控矿构造特征 矿带中所有金矿均产于断裂带中, 成矿作用严格受断裂构造控制。成矿的主要特征是:

(1) 控矿断裂带的总体产状和绍江深断裂的产状基本一致: 它是控矿岩体侵位的晚期, 受绍江深断裂继续活动影响的产物, 大致呈北东 60° 的舒缓波状展布, 倾角约 65° 。沿断裂带千糜岩和糜棱岩等构造岩较发育。属压性断裂。控矿断裂具有配套产出的特点, 金矿体的大小受控矿断裂规模制约: 北东向含矿断裂代表了区域主压应力方向, 所以一般规模较大, 受其控制的金矿床规模也较大。与其配套的东西向扭断裂和北西向张断裂, 一般规模较小, 产于其中的金矿规模亦相应较小。

(2) 金的富集作用与构造力学性质密切相关。金矿体主要赋存于压性构造带的张性部位, 如含矿断裂倾角由陡变缓处, 金矿体常有加厚富集现象。

(3) 控矿断裂的地球化学特征是伴有多元素(Pb, Cu, Co, Mn) 原生扩散晕及金异常。特别是铅异常可作为成矿断裂的可靠标志。

3. 围岩蚀变特征 这类金矿的围岩蚀变主要有绢云母化、碳酸盐化(铁白云石化、方解石化)、绿泥石化及黄铁矿化。金矿化强度与蚀变强度有关。金矿化较好的地段, 一般蚀变较强, 蚀变带亦较宽(10~20余米)。各类蚀变具有一定的空间分布规律, 自金矿体向两侧围岩依次出现如下蚀变组合:

矿体 $\rightarrow$ 绢云母化+铁白云石化、方解石化+黑电气石化 $\rightarrow$ 绿泥石化+方解石化 $\rightarrow$ 斜黧帘石化石英闪长岩。此外, 整个蚀变带均见微弱的黄铁矿化。这个蚀变组合及分布序列, 大体反映了含矿热液自控矿构造向两侧围岩蚀变交代作用从早到晚, 温度由高到低, 蚀变由强到弱的时控演变规律。

绢云母化是重要的近矿蚀变, 产于紧靠矿脉两侧的围岩中, 蚀变带较窄, 一般在1米左右。绢云母多呈细鳞片状集合体产出, 浅绿色, 油脂光泽。该蚀变带一般无长石, 原岩斜长石和角闪

石、黑云母等暗色矿物已全部解体, 并叠加黑电气石化、碳酸盐化等蚀变。铁白云石化常见于绢云母化带, 多与方解石紧密共生呈脉状产出, 其形成要晚于绢云母化。方解石化蚀变范围较宽, 但以紧靠矿体底板最为发育, 并随着远离矿体而逐渐减弱。

各蚀变带在蚀变交代过程中元素的进出情况见表2。

从表2可以看出:

(1) 围岩在蚀变交代过程中, Si、K阳离子大量带出, 表明金矿脉中的Si和白云母中的K可能部分来源于含矿围岩(石英闪长岩)。

(2) Ti 、 $Fe^{3+}+Fe^{2+}$ 总量变化不大, 但 Fe^{3+} 明显转化为 Fe^{2+} , 岩石中有大量 H^{+} 带入, 说明蚀变作用是在氧逸度较低的还原环境中进行的, 而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的增加, 可能与这些元素的残留富集有关, 其增量大小基本上反映了碳酸盐化的强弱。

(3) 绢云母化蚀变带阳离子的增减最为剧烈, 如 Si^{4+} 、 Al^{3+} 、 Na^{+} 的大量带出; H^{+} 、 Ca^{2+} 的大量带入, Mg^{2+} 、 K^{+} 也明显加入。这说明了绢云母化带是交代作用较强的近矿蚀变带。矿体上盘绿泥石化、方解石化蚀变带中往往叠加金、铅、铜、锰原生晕异常, 这可作为近矿蚀变的有效地球化学标志。

4. 矿床主要特征

(1) 金矿体均产于幔源石英闪长岩岩体之断裂带中, 成矿受岩体及构造双重控制。皆呈脉状产出, 规模小到中型, 工业类型属贫硫化物石英脉型金矿。

(2) 矿石组份单一。主要有用元素为金, 伴生元素除银、硫可回收利用外, 铜、铅、碲、镍、钼等含量甚微, 均无工业意义。

(3) 矿物成分简单。主要载金矿物为黄铁矿, 次为褐铁矿。黄铜矿、黑电气石等虽含金, 但无回收价值。

金的赋存状态有二种形式: 一种以自然金、碲金矿(仅见于黄铜矿中)独立矿物存在于黄铁矿、黄铜矿及少数石英中。自然金呈包裹体金、裂隙金出现。粒度为 $0.002\sim 0.135mm$, 其中89%

属细粒金。另一种呈次显微粒状分散在黄铁矿、石英、黑电气石、方铅矿、碲镍矿中，经低温烘烤，有迁移归并加大为可见金现象。

(4) 矿石多呈极不均匀的团块状及细脉状，具碎裂—糜棱结构、片理化构造。

(5) 成矿作用大体可划分早晚二期三个阶段，早期为自然金—石英—绢云母阶段及自然金—石英—硫化物阶段；晚期为硫化物—碳酸盐阶段。其中自然金—石英—硫化物阶段为工业金矿体，其余阶段均无工业价值。

矿床成因和成矿模式

1. 成矿时代 控矿岩体属中元古代双溪坞群火山杂岩晚期侵入体，产于其中的金矿床之较大铅同位素年龄值为10亿年，成矿时代当属中元古

代晚期。

2 成矿温度和矿液成分 根据围岩蚀变、矿物组合特征和矿物包裹体测温等资料（表3），认为该矿床为中温热液矿床。

璜山金矿4件石英包裹体成分测定结果（表4）表明，矿液以高盐度（常见NaCl子晶），高氟、富CO₂为特点。与矿带西南产于陈蔡群之多成因大型金矿——冶岭头金矿和马郢金矿相比，钾、钠和氟离子均高出后者1~2个数量级。这可能是璜山金矿钾化（绢云母化）、碳酸盐蚀变和黑电气石发育的原因。

钾、钠离子占阳离子平均总数55.89%，表明矿液富碱（金属），其中钾离子丰度从深到浅，由低至高；金元素也相应由矿化演变成矿体。这反映了金的成矿作用与钾离子在成矿溶液中的丰度变化有密切的联系。

璜山金矿ZK161孔蚀变围岩元素增减情况

表2

蚀变带	单位晶胞中阳离子数增减量											备注
	Si ⁴⁺	Ti ⁴⁺	Al ³⁺	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	H ⁺	
绢云母化	-113	+2	29	-1	-4	+0.2	+8	+32	-28	+1	+256	矿体 ↓ 围岩
绿泥石化	44	+1	+9	+2	-6	-0.3	+11	+7	-8	-7	+48	
方解石化	-1	+1	+7	-1	+10	0	+13	-1	+6	-5	-29	
石英闪长岩*	469	4	138	12	21	0.4	31	38	47	32	302	

* 未蚀变的石英闪长岩原岩中单位晶胞的阳离子数。

石英（高温）包裹体成分

表4

样号	矿液成分 mg/10g												
	H ₂ O	CO ₂	CH ₄	CO	H ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	F	Cl	Na/K	Cl/F
1 ¹	8.000	0.436	0.002	0.004	0.0005	0.1235	0.0096	0.0757	0.101	0.0592	0.0476	1.33	0.80
2 ²	5.250	0.840	0.004	0.007	0.0015	0.118	0.0086	0.0488	0.1035	0.0590	0.044	2.121	0.75
冶岭头 ³			23.38*	2.42*	3.14*	0.0102	0.0147	0.0075	0.001	0.001	0.0415	0.82	41.5
马郢 ⁴	6.00	0.2965	0.0014	0.0025	0.003	0.040	0.0120	0.050	0.0036	0.0036	0.015	0.96	4.17

备注 ①金矿体；2个样组成；②金矿化带，2个样组成；③大型金矿；④小型金矿

* 测试单位：湖南冶金地质研究所，1983年。单位为ml/100g。

3. 黄铁矿微量元素标型特征（表5） 璜山金矿中黄铁矿含钴较高，平均达665g/t，且Co

>Ni，Co/Ni=4.93。Se含量接近一般热液矿床；矿床具有岩浆热液成因特征。

璜山金矿黄铁矿中微量元素含量对比 (B/T)

表 5

样品名称	Au	Ag	Se	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Co/Ni
黄铁矿 4	192.5 高	8	21.0	1360 高	180	110	520	120	
5	88.0	14	15.3	1000	110	30	670	90	
6	51.5	8	15.8	390	130	30	770	60	
2	32.3	7	13.8	570	100	20	490	90	
3	27.5	8	17.3	430	120	30	440	140	
1	8.6 低	8	21.4	240 低	170	70	53	7400	
黄铁矿平均值			17.4	665	135				4.93
璜山岩体平均值				19.5	19.6				1.02
维氏中性岩平均值				10.0	55.0				0.18

测试单位：冶金部地质研究所，1983年。

璜山金矿矿物包裹体测试结果

表 3

测试矿物	爆裂法温度, °C			均一法温度, °C		
	样品数	范围	平均	样品数	范围	平均
石英	20	285~350	317	12	270~340	318
黄铁矿	6	165~215	188			

测试单位：江西冶金地质勘探公司地质研究所，1983年。

值得注意的是，璜山岩体以富钴（高出维氏值1倍）为特征，显示其间的成因联系。有人认为，一般金银矿床黄铁矿中钴、镍含量与金、银含量存在反比关系⁴⁾，但本矿床恰恰相反，黄铁矿中钴、镍含量与金、银含量大体呈正比关系。可见璜山金矿是个较特殊的类型。

4. 成矿物质来源 对矿带中一些具代表性金矿床的研究表明，与自然金紧密共生的载金黄铁矿硫同位素，与陨硫同位素组成基本一致；而与自然金成连生晶包裹体产出的方铅矿铅同位素，则落在现代海岭岩石铅范围内，表明这些金矿的成矿物质具有幔源特征。

(1) 硫同位素组成特征和硫源分析 (以璜山金矿床为例) 具团块状、细粒状金矿石中10件载金黄铁矿的硫同位素分析， δS^{34} 呈偏离零

值较小的正值 ($\bar{X} = 2.35\%$)，变化范围窄 ($R = 1.22\%$)，塔式效应显著 (图3)，离散度很小 ($\sigma = 0.37$)，说明这类金矿的硫源具有单一稳定、高度均化的特点。

根据黄铁矿的产出条件，参考大本模式 (图4)，对硫源作如下判别：

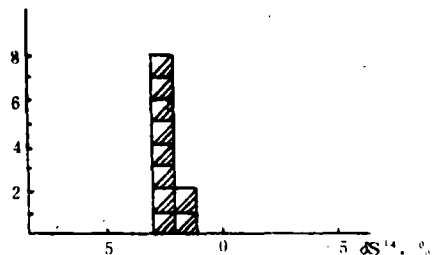


图 3 璜山金矿黄铁矿硫同位素组成

璜山金矿成矿过程中，早期矿化表现为石英—绢云母（白云母）—黄铁矿化；晚期为方解石—铁白云石—黄铜矿化。根据包裹体测温资料，矿床形成温度为160~350°C，主要成矿温度为200~300°C。早期的矿化蚀变——绢云母化、黄铁矿化是在酸性—弱酸性条件下渗透交代的产物，其pH值应在绢云母稳定区（3~7）内。晚期的矿化蚀变属交代蚀变，是在中性—弱酸性介质环境下沉淀的产物。其pH值相当于方解石—硅灰石—碱长石集合体系统稳定区（6~8）。璜山金矿主要成矿期的Fe—S—O系矿物只有黄铁矿，未出现赤铁矿、硫盐和磁黄铁矿；非金属矿物主

3) 徐国凤等：《地质论评》，1980年第6期。

4) 韩德权：《地质与勘探》，1981年第9期。

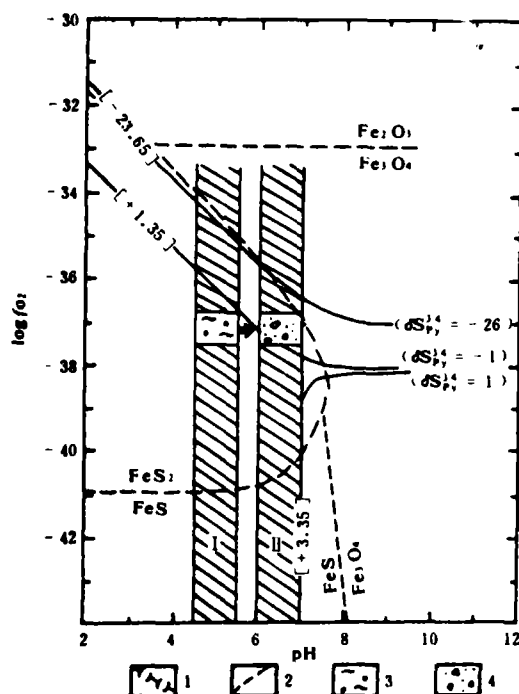


图4 璜山金矿黄铁矿 δS^{34} 与溶液中 δS^{34} 、Fe—S—O矿物稳定场、

f_{O_2} 及pH关系比较图
($T = 250^\circ\text{C}$, $f = 1.0$)

- I—与钾长石—绢云母—石英相平衡时溶液pH值;
II—与方解石—硅灰石—碱长石相平衡时溶液pH值;
1—圆括号、方括号内数字分别为 δS^{34} 等于0和2.35‰的等值线; 2— $\Sigma S = 0.01$ 克分子/公斤水时, Fe—S—O的矿物界线; 3—主成矿期, 石英—绢云母—黄铁矿沉淀区; 4—成矿晚期, 方解石—铁白云石—黄铜矿沉淀区

要为绢云母、铁白云石, 未见石墨, 其氧逸度大体相当于大本划分的第三氧化态之间。

璜山金矿主要成矿期的载金黄铁矿沉淀区域, f_{O_2} 和pH值的变化对载金黄铁矿硫同位素 δS^{34} 值反应不敏感, 主要受成矿热液中 $\delta S^{34}_{\text{FeS}}$ 的制约。在此区间内沉淀的黄铁矿 δS^{34} 值($\bar{X} = 2.35\text{‰}$)应和成矿热液中 $\delta S^{34}_{\text{FeS}}$ 大体平衡一致, 接近陨石硫数值。据此认为该金矿的硫同位素应属幔源。

(2) 铅同位素组成特征和铅源分析 璜山金矿和庙下畝金矿的两件矿石铅(方铅矿、含方铅矿包裹体的黄铁矿)同位素组成(表6)表明, 两金矿中矿石铅都是前寒武系古老正常铅, 其同位素比值更接近于地幔铅特征; 表明本区金矿中铅亦来源于上地幔。

需要指出的是, 上述矿石铅常与自然金成连生晶包裹体产于黄铁矿中, 有力地揭示了这类金矿中的金元素是与其载体黄铁矿中硫、铅元素一起, 均同时来源于地幔。

5. 成矿机理和成矿模式

(1) 成矿机理 在东安—雪峰期, 由于太平洋板块向华北大陆俯冲, 形成了江南古岛弧及其伴生的绍(兴)江(山)壳幔深断裂。幔源局部熔融的玄武质岩浆, 沿绍江深断裂底上涌; 在运移过程中产生分结作用, 形成璜山岩体。该岩体侵位晚期, 在地热梯度较高的火山岛弧构造背景下, 普遍产生了以钠黝帘石化为主要特征的自变质作用; 其结果使岩石中的中长石转变为斜黝帘石,

方铅矿、黄铁矿铅稳定同位素

表6

取样地点	测试矿物	Pb^{208}/Pb^{204}	Pb^{207}/Pb^{204}	Pb^{206}/Pb^{204}	模式年龄(百万年)
庙下畝金矿	方铅矿	17.15	15.42	36.85	1000 (R. F. C. 法)
璜山金矿	黄铁矿	17.659	15.469	37.612	686
地幔 ¹⁾		18.1	15.42	37.70	
下地壳 ¹⁾		17.27	15.29	38.58	
上地壳 ¹⁾		19.33	15.73	39.08	

¹⁾ 据H. L. Barnes, 1979。

并释放出氢离子。这就导致了岩浆期后热液含较高的氢离子活度。这种含有较高氢离子活度、高

盐度和高温的成矿溶液是一种具有高化学能的酸性溶液。当它们沿着岩体晚期出现的构造带运移时, 与两侧围岩发生交代作用, 首先使岩石中的

暗色矿物水解，氢离子加入到围岩中去，而围岩中的碱金属离子和部分铁、镁、硅等惰性组分被活化出来，导致两侧围岩钾、硅含量降低。溶液中钾离子活度不断增高、氢离子活度不断降低，pH 值相应地从酸性向弱酸性演化。在富钾溶液的作用下，绢云母化蚀变取代水解作用，使近矿围岩中残存的斜长石全部解体，形成宽达 1 米多的绢云母化蚀变带。SiO₂ 亦相继沉淀，形成石英脉。

由于水解作用、钾交代作用的结果，使溶液中的 Fe²⁺ 和 Mg²⁺ 离子，以及硫逸度增高；随着温度降低、pH 值改变，黄铁矿和少量黄铜矿开始晶出。溶液中浓集的金的各种络合物亦遭破坏，析出的自然金沉淀，并被黄铁矿捕获、包裹或沉

淀于黄铁矿裂隙中。

成矿作用的晚期，在降温减压、弱酸—弱碱性条件下，溶液中的 CO₂ 和围岩中的钙交代作用增强，形成方解石化。重碳酸盐因 CO₂ 减压逸出而被分解，沉淀出难溶的碳酸盐（方解石、铁白云石）充填于石英脉和围岩裂隙中。这就是成矿晚期碳酸盐化蚀变的机理。

(2) 成矿模式 根据上述分析，并结合成矿物质来源、成矿区域地质背景，可将这种幔源岩浆热液金矿大致概括为图 5 的成矿模式。

工作中曾得到南京大学王德滋教授、周新民副教授的指导和帮助，华北矿产研究所高凡副研究员为我们系统地审定了含矿岩体薄片，在此一并致谢。

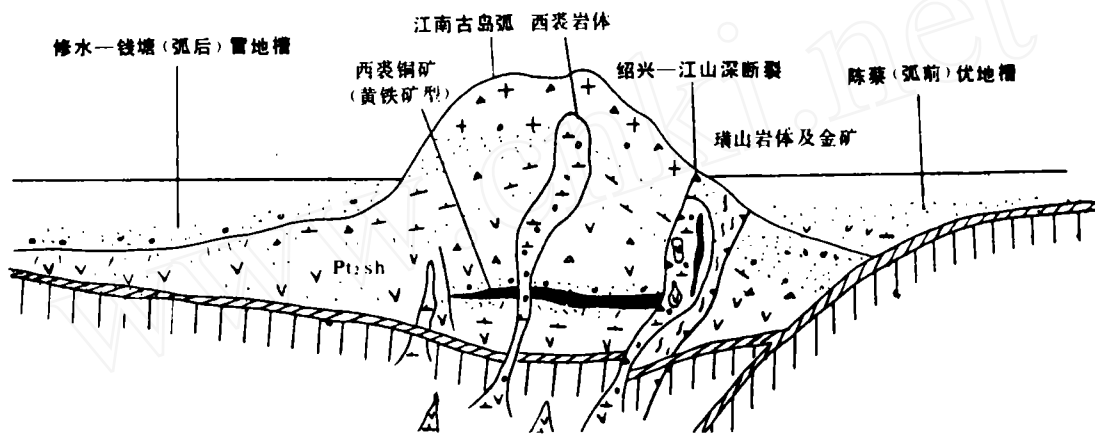


图 5 填山幔源岩浆热液金矿成矿模式图
Ptash—双溪坞群火山岩系

密西西比“河谷”还是密西西比“流域”？



小资料

长期来，提及美国“Mississippi Valley type”铅锌矿的文章，常把“valley”一词译为“河谷”，这是不对的。

在美国英语中，valley有两个意思：一是“an elongated lowland between ranges of mountains, hills or other uplands, often having a river or stream running along the bottom”（山脉、山丘或其高地之间的长形低地，常有河流流过），大体相当

汉语的“河谷”；更确切讲应相当于“谷地”，因为只是经常有而不是必定有河流流过，二是“the extensive land area drained or irrigated by a river system”，即河流（确切地说是“河系”）的流域。美国中部这些独具特色的铅锌矿，分布在密西西比河及其支流（首先是密苏里河）的广大地域内，这里“Valley”（注意第一个字母是大写）显然是“流域”的意思。所以，正确的译法应是“密西西比河流域铅锌矿”，而不是“密西西比河谷铅锌矿”。

【戴问天】