

# 吉林延边五凤、五星山金矿床地球化学特征及其成因

贾大成<sup>1</sup>, 杜明龙<sup>1,2</sup>, 高文<sup>1</sup>, 张潇<sup>1</sup>, 姜涛<sup>1</sup>, 唐烁<sup>1,3</sup>, 何宽民<sup>1,3</sup>

1. 吉林大学地球探测与信息技术学院, 长春 130026; 2. 河北省地质矿产勘查开发局第五地质大队, 河北唐山 550002;  
3. 河北省地质矿产勘查开发局第四地质大队, 河北承德 067000

**摘要:**五凤和五星山金矿为延边地区中生代火山岩金、铜成矿带中典型的金矿床。通过岩石化学、成矿元素、流体包裹体和同位素组成等方面的分析, 提出五凤和五星山金矿床属于典型的冰长石-绢云母型浅成低温热液型金矿床, 其形成是深部火山-热液流体系统与浅成大气流体的混合。成矿构造环境与陆内造山带后期垮塌机制有关, 造山带的垮塌与古太平洋板块斜向俯冲导致的大型走滑剪切有密切的成因联系。

**关键词:**浅成低温热液型金矿床; 成矿地球化学; 成因类型; 延边地区

中图分类号: P597+.2; P611.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2012)05-0470-09

## Genesis and Geochemical Characteristics of the Wufeng-Wuxingshan Gold Deposit in Yanbian, Jilin, China

JIA Da-cheng<sup>1</sup>, DU Ming-long<sup>1,2</sup>, GAO Wen<sup>1</sup>, ZHANG Xiao<sup>1</sup>,  
JIANG Tao<sup>1</sup>, TANG Shuo<sup>1,3</sup>, HE Kuan-min<sup>1,3</sup>

1. College of Geo-exploration and Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;  
2. The No. 5 Geologic Party, Bureau of Geologic Exploration and Mineral Development of Hebei Province, Tangshan, Hebei 550002, China; 3. The No. 4 Geologic Party, Bureau of Geologic Exploration and Mineral Development of Hebei Province, Chengde, Hebei 067000, China

**Abstract:** The Wufeng-Wuxingshan gold deposit, which develops in the Mesozoic volcanic gold-copper metallogenic belt of the Yanbian area, is a typical gold deposit. The analytical results of petrochemistry, microelement, isotope and fluid inclusion show that the Wufeng-Wuxingshan gold deposit is a typical adularization-sericitization epithermal genesis type deposit. The deposit was formed by the interaction of deep volcanic-fluids and near surface atmospheric-fluids. The metallogenic tectonic setting is relevant to the collapse of the late intra-continental orogenic belt and the collapse of the orogenic belt is closely related with the large strike-slip shearing formed by the paleo-Pacific plate subduction.

**Key words:** epithermal gold deposit; metallogenic geochemistry; genesis type; Yanbian area

延边地区是我国东北一个重要的火山岩型金、铜矿化集中区<sup>[1]</sup>。成矿带在时、空和物质组成上受控于中生代火山盆地和浅成侵入体, 形成斑岩型、火山岩型和次火山岩型的矿床组合, 在该成矿带内既有中-高温热液金矿床, 也有低温热液金矿床, 甚至高温的斑岩型铜金矿床, 以及高硫化物型金矿和低硫化物型金矿<sup>[2]</sup>。五凤、五星山金矿床为该成矿带

内两个代表性的矿床, 对这两个矿床的成因类型一直存在多种认识, 曾以火山-次火山热液型金矿、热泉型金矿、低温热液型金矿来解释该矿床的成矿作用。本文通过与成矿有关火山岩岩石化学、微量元素、流体包裹体和同位素组成等方面的研究, 分析矿床形成的构造环境, 确定矿床的成因类型, 探讨该类型金矿的成矿作用, 为深入了解延边地区中生代火

收稿日期: 2011-10-19 收到, 12-05 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40973019); 中国地质调查局资助项目(1212010070306)

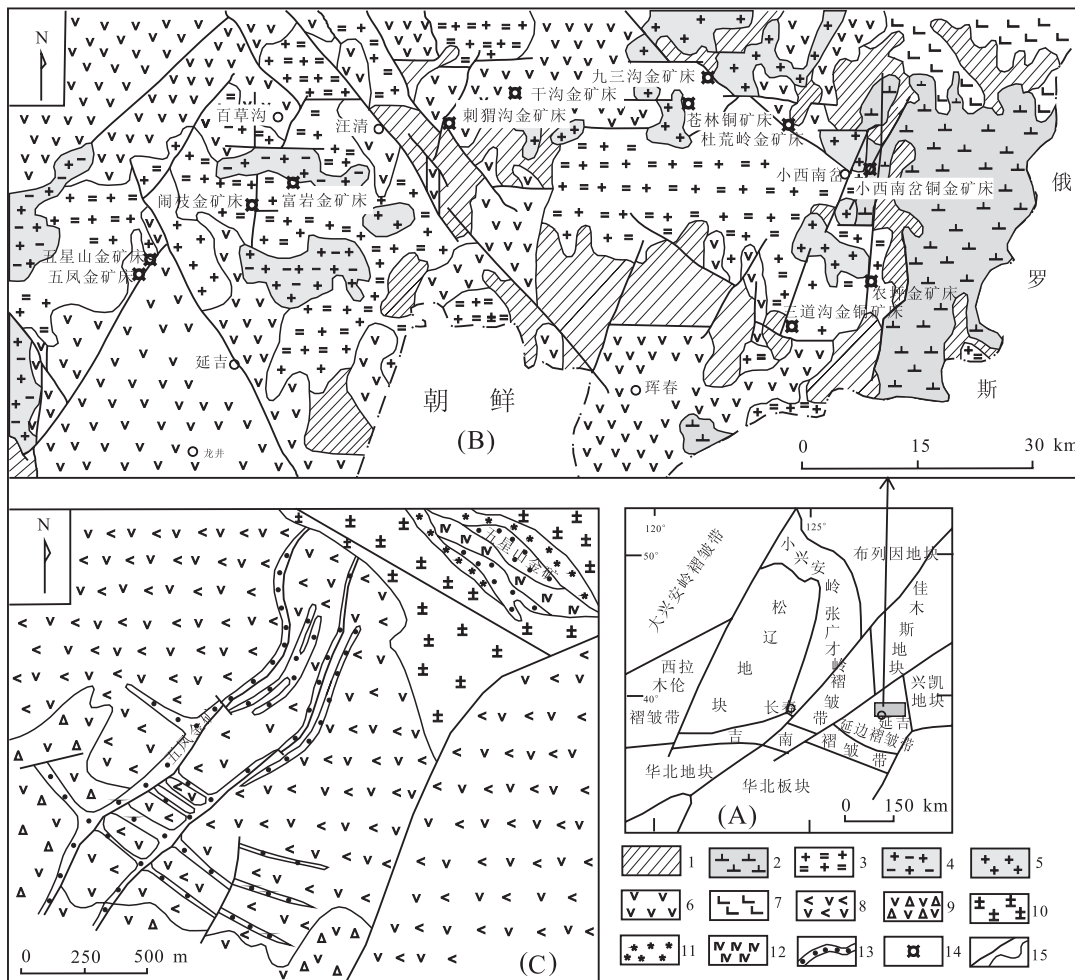
第一作者简介: 贾大成(1958-), 男, 教授, 研究方向: 矿床地球化学. E-mail: jiadacheng@sina.com.

山岩金、铜成矿带提供典型矿床依据。

### 1 成矿地质背景及矿体特征

五凤、五星山金矿床位于延边中生代火山岩带内,火山岩带的基底属于华北板块北东陆缘与兴凯地块、佳木斯地块以及松嫩地块的拼合带部位<sup>[3]</sup>,中生代处于欧亚大陆东部的活动陆缘剪切带(图 1A)。

火山岩带总体呈北东东走向,主要由上侏罗统屯田营组和下白垩统金沟岭组安山岩-英安岩-流纹岩及粗安岩构成。火山岩带表现为若干火山盆地和局部隆起侵入岩的相间排列(图 1B),而在火山盆地内则表现为若干个火山机构相间排列。在破火山口构造范围内,断裂十分发育,形成构造密集区,并有环状及放射状张性断裂,控制含金石英-方解石脉的产出。



1-古生代浅变质岩;2-晚二叠辉长-闪长岩;3-晚二叠-早侏罗世花岗岩闪长岩-二长花岗岩;4-中晚侏罗世花岗岩;5-早白垩世花岗岩-花岗斑岩;6-中生代火山-沉积岩;7-新生代玄武岩;8-金沟岭组安山岩;9-金沟岭组火山碎屑岩;10-早白垩世碱长花岗岩;11-花岗细晶岩(130Ma);12. 次粗面安山岩;13-金矿化及蚀变带;14-区域内矿床;15-断裂带及地质界线。

1-paleozoic epimetamorphic rock; 2-late Permian gabbro-diorite; 3-late Permian-early Jurassic granodiorite-adamelite; 4-middle-late Jurassic granite; 5-early Cretaceous granite-granitic porphyry; 6-Mesozoic volcanic-sedimentary rock; 7-Cenozoic basalt; 8-andesite in Jingouling Group; 9-Pyroclastic rock in Jingouling Group; 10-early Cretaceous alkali granite; 11-granite-aplite(130Ma); 12-subtrachyandesite; 13-gold mineralized and altered balt; 14-deposits in the region; 15-faults and geological boundary line.

图 1 延边火山岩带和五凤、五星山金矿床地质图

Fig. 1 Geological map of the volcanic belt and the Wufeng-Wuxingshan gold deposit in the Yanbian area

五凤金矿床和五星山金矿床相距约 3 km,均产于延吉火山岩带西端的石人火山断陷盆地内。五凤金矿床围岩为金沟岭组安山岩,矿体和蚀变带位于火山放射状和环状断裂带,五星山金矿床围岩为花岗细晶岩脉及次粗面安山岩,从野外地质接触关系

可以见到中粗粒碱长花岗岩侵入金沟岭组安山岩,花岗细晶岩侵入于粗粒碱长花岗岩,而次粗面安山岩穿切细晶花岗岩(图 1C)。金沟岭组火山岩 Rb-Sr 等时线年龄为 139±14 Ma、137.5±10.8 Ma,K-Ar 年龄 140 Ma<sup>[4]</sup>,本次测得花岗细晶岩 K-Ar 年龄为 130

Ma, 赵羽军等<sup>[5]</sup>对五星山金矿床的方解石-石英矿脉样品进行了 Ar-Ar 年代学研究, 获得石英单颗粒包裹体的激光探针<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 等时线年龄为 123±7 Ma ( $n=21$ , MSWD=6.5), 由于五凤金矿与五星山金矿受同一火山机构控制, 表明成矿为早白垩世。

五凤金矿床矿体为单脉-复脉-网脉状, 而五星山金矿床矿体为网脉-细脉浸染状。五凤金矿以石英脉、冰长石-方解石脉、含方解石-石英脉产于金沟岭组火山岩中。五星山金矿以冰长石、石英网脉和方解石、石英网脉产于次粗面安山岩的接触带中。这两个矿床的矿石矿物主要为自然金、自然银、辉银矿、黄铁矿, 脉石矿物主要为石英、方解石、冰长石和高岭土。矿脉两侧发育硅化+绢云母化+钾化土绿泥石化的近矿蚀变带, 向外出现绢云母化+高岭土化的次生混合泥化带, 最外为青盘岩化蚀变带。

## 2 容矿火山岩系地球化学特征

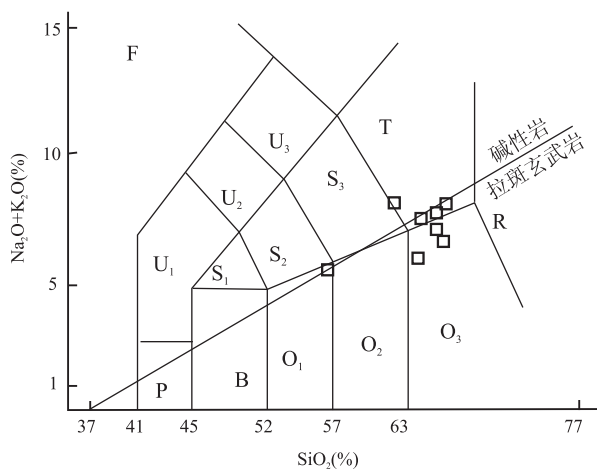
### 2.1 容矿火山岩岩石化学特征

据五凤、五星山金矿区容矿火山岩岩石化学分析结果<sup>[6]</sup>, SiO<sub>2</sub> 含量为 56.82%~66.72% (表 1), 属于中基性-中酸性岩石组合, 在火山岩分类的 TAS 图解中, 容矿火山岩表现出安山岩、英安岩和粗安岩、粗面岩组合, 火山岩投点沿着钙碱性系列和碱性系列的界线呈线性分布, 既包含钙碱性系列, 又包含碱性系列, 具有钙碱性和碱性过渡系列的特征, 反映为偏碱性钙碱质火山岩岩石系列 (图 2)。对于其中的粗安岩、粗面岩组合, 由于 Na<sub>2</sub>O ≤ K<sub>2</sub>O, 因此属于安粗岩系, 相当于橄榄安粗岩-橄榄安粗质英安岩组合。在 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解上, 亦表现出中钾-高钾岩系的特征 (图 3)。

表 1 延吉五凤、五星山金矿区主要氧化物分析结果表

Table 1 Major elements compositions of the rocks in the Wufeng-Wuxingshan gold deposit

岩性(样品数)	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOS	合计
辉石安山岩(2)	56.82	0.44	17.82	4.54	2.21	0.11	2.52	7.51	3.63	1.4	2.85	99.9
安山岩(10)	64.85	0.62	15.63	3.52	1.27	0.1	2.04	1.69	2.64	4.52	2.96	99.8
斜长安山岩(3)	63.96	0.62	16.18	3.41	1.1	0.06	1.77	2.69	3.3	2.64	3.66	99.4
石英安山岩(2)	62.39	0.57	16.1	2.85	1.92	0.07	2.06	2.52	3.09	5.12	3.08	99.8
无斑安山岩(7)	66.74	0.46	14.99	2.97	1.26	0.06	1.41	1.56	3.68	3.85	2.87	99.9
斜长角闪安山岩(4)	65.24	0.57	15.76	2.74	0.81	0.06	1.24	3.2	4.2	2.88	3.87	101
安山岩质角砾熔岩(1)	65.13	0.35	15.91	3.3	0.45	0.04	1.63	2.6	4.03	2.69	3.56	99.7
安山质集块熔岩(1)	65.51	0.35	15.52	3.49	1.06	0.11	1.71	1.56	3.9	2.8	3.78	99.8



B-玄武岩; U<sub>1</sub>-碱玄武岩; U<sub>2</sub>-响岩质碱玄武岩; U<sub>3</sub>-碱玄武岩; S<sub>1</sub>-粗面玄武岩; S<sub>2</sub>-玄武质粗面安山岩; S<sub>3</sub>-粗面安山岩; O<sub>1</sub>-玄武安山岩; O<sub>2</sub>-安山岩; O<sub>3</sub>-英安岩; T-粗面岩; R-流纹岩; F-似长石岩; P-苦橄玄武岩

B-basalt; U<sub>1</sub>-tephrite; U<sub>2</sub>-phonolitic tephrite; U<sub>3</sub>-tephritic phonolite; S<sub>1</sub>-trachybasalt; S<sub>2</sub>-basaltic trachyandesite; S<sub>3</sub>-trachyandesite; O<sub>1</sub>-basaltic andesite; O<sub>2</sub>-andesite; O<sub>3</sub>-dacite; T-trachyte; R-rhyolite; F-foiidite; P-picrite basalt.

图 2 五凤地区火山岩分类 TAS 图解<sup>[7]</sup>

Fig. 2 TAS diagram of volcanic rocks in the Wufeng area<sup>[7]</sup>

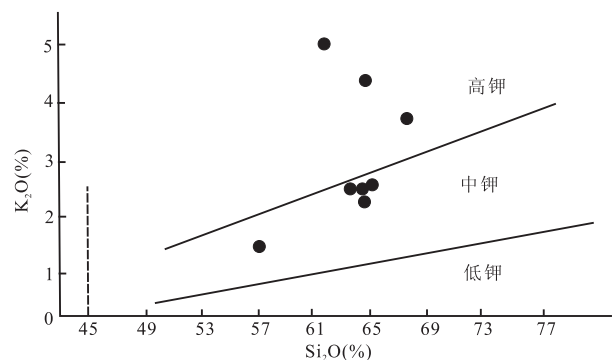


图 3 五凤地区火山岩钾质分类图(底图据文献[8])

Fig. 3 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> diagram of volcanic

Rocks in the Wufeng area(modified from ref. [8])

对于延边地区以及矿区容矿火山岩系列的属性问题, 不同研究者多认为该区火山岩属于钙碱性火山岩系, 其形成与太平洋板块俯冲有关<sup>[9]</sup>。然而近年来随着对钙碱性火山岩系研究的不断深入, 提出钙碱性火山岩系是一个成分变化范围比较广, 成因和构造环境复杂多样的岩石系列<sup>[10]</sup>, 不仅仅形成于大洋板块的俯冲消减带, 也形成于陆内造山带和剪切带等多种构造环境, 尤其是在众多的造山带, 其熔

融的动力学过程主要与岩石圈伸展-减薄作用相关。五凤、五星山金矿区容矿火山岩系明显不同于典型陆缘岛弧的钙碱性火山岩系列<sup>[11]</sup>,与大兴安岭南部地区火山岩系列相比 K<sub>2</sub>O 含量略低<sup>[12]</sup>。一般情况下在火山岩分类 TAS 图解的碱性岩系中,粗面岩系(如歪长粗面岩)常发育在洋岛火山岩组合中,与大洋板块俯冲有关,而安粗岩系常发育在造山带,造山带的钾玄岩系列往往具有低 TiO<sub>2</sub> 的特征,由此可以推测五凤、五星山金矿区火山岩系形成于陆内造山带的构造环境。

在五凤、五星山金矿区分别采自矿体及其附近的不同围岩,在吉林大学分析测试中心利用 ICP-MS 方法获得稀土元素含量。岩矿石稀土元素呈规律变化,由安山岩—粗面安山岩—钾长花岗岩—细粒花岗岩—含金石英脉,ΣREE、LREE/HREE、(La/Lu)<sub>N</sub> 和 δEu 等参数逐渐降低(表 2),矿区岩、矿石轻稀土元素富集,稀土元素的配分模式均呈一致的右倾型(图 4),岩、矿石的稀土配分模式极为相似,具有同源演化的特征,反映成因上的关联性。从火山岩、次火山岩、浅成侵入体到矿石,逐渐出现负铈异常,表明在岩浆分异过程中,随着 SiO<sub>2</sub> 的降低和基性斜长石的晶出 δEu 减小,也表明成岩和成矿处于同一岩浆演化体系中,成矿物质来源与火山岩、次火山岩和浅成侵入体有关。

2.2 成矿微量元素特征

为了解成矿元素的迁移和富集规律,分别采集远离矿体的新鲜岩石、弱蚀变的围岩、强蚀变的围岩、矿化蚀变岩,在吉林大学分析测试中心进行原子吸收光谱分析,获得与成矿元素相伴生的主要元素含量。五凤金矿直接围岩为金沟岭组火山岩,从元素分析结果可以看出,金沟岭组火山岩金平均值为

表 2 延吉五凤、五星山金矿区岩、矿石稀土元素参数表  
Table 2 REE factors of the rocks and ores in the Wufeng-Wuxingshan gold deposit

岩性	安山岩	粗面安山岩	钾长花岗岩	细粒花岗岩	含金石英脉
ΣREE(×10 <sup>-6</sup> )	127.12	115.51	114.25	86.49	48.38
LREE(×10 <sup>-6</sup> )	116.69	104.06	99.89	76.36	38.23
HREE(×10 <sup>-6</sup> )	10.43	11.45	14.36	10.13	10.15
δEu	0.78	0.67	0.35	0.50	0.34
LREE/HREE	11.19	9.09	6.96	7.54	3.77
(La/Lu) <sub>N</sub>	16.24	13.40	8.63	11.08	2.50

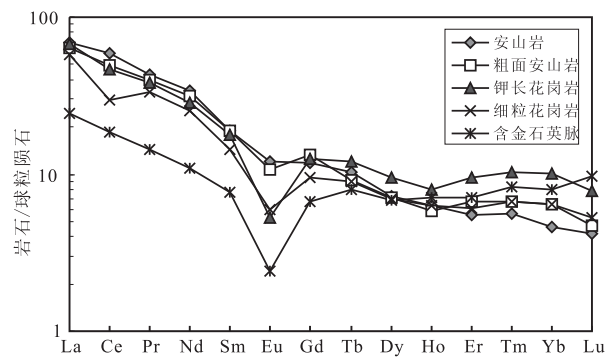


图 4 五凤地区金矿稀土配分模式图  
(球粒陨石标准化值据文献[13])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of the Wufeng gold deposit (Chondrite normalized data from ref. [13])

0.026, 银平均值为 0.132(表 3),分别是维诺格拉多夫玄武岩均值的 6.5、1.2 倍,是上地壳元素丰度的 14.4、2.64 倍;五星山金矿直接围岩为碱长花岗岩、细粒花岗岩和次火山岩,其金、银等成矿元素含量均高于维诺格拉多夫玄武岩均值和上地壳元素丰度值(表 3),其浓度克拉克值均大于 1,显示这套火山岩、侵入岩及次火山岩是矿质的主要来源。

表 3 五凤、五星山金矿床岩石微量元素含量表

Table 3 Trace elements composition of the rocks in the Wufeng-Wuxingshan gold deposit

地区	蚀变带及岩相	岩石类型	样数	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Sb	w <sub>B</sub> (%)
五凤	火山岩	安山岩	14	0.026	0.132	34.4	16.1	51	14.86	0.74	
	青磐岩化	弱蚀变安山岩	13	0.036	3.33	13.17	19.33	43.83	68.73	1.77	
	硅化、高岭土化	强蚀变岩安山岩	12	0.054	3.8	14.5	23.5	44.5	70.1	1.54	
	硅化、冰长石化、方解石化	蚀变岩	14	0.36	3.13	15	22.13	45.13	74.05	1.37	
	侵入岩	碱长花岗岩	12	0.022	0.120	12.0	40.0	40	—	—	
五星山	次火山岩	次粗安岩 次英安岩	13	0.015	0.725	13.0	26.2	13	13.75	0.42	
	青磐岩化	弱蚀变安山岩	15	0.015	0.725	13.0	26.2	13	13.75	0.42	
	硅化、高岭土化	强蚀变安山岩	12	0.526	6.7	11.5	9.5	52	28.8	0.57	
	硅化、冰长石化、方解石化	蚀变岩	21	2.686	4.2	17.5	18.5	66	45.8	0.68	
	玄武岩 <sup>[14]</sup>			0.004	0.11	94	7	118	2.2	0.6	
	上地壳元素丰度 <sup>[15]</sup>			0.0018	0.05	25	20	71	1.5	0.2	

五凤金矿区由火山岩—弱蚀变安山岩—强蚀变安山岩—蚀变岩, Au、Ag 含量逐渐升高, 由矿区火山岩到弱蚀变安山岩的面积型蚀变过程中成矿元素富集了 1.37 倍, 由矿区火山岩到强蚀变安山岩的线型蚀变过程中成矿元素富集了 2.06 倍, 由矿区火山岩到强蚀变安山岩的近矿蚀变过程中成矿元素富集了 7.88 倍, 而要富集到矿体(边界品位 =  $1 \times 10^{-6}$ ) 则成矿元素至少要富集 38.46 倍, 反映 Au、Ag 不断富集的过程(表 3), 进一步表明火山岩是成矿物质的主要来源, 也反映五凤金矿的矿质富集主要集中在矿化蚀变作用的后期。

五星山矿区也具有按火山岩—弱蚀变安山岩—强蚀变安山岩—蚀变岩顺序 Au、Ag 的含量逐渐升高的趋势(表 3), 如果将次火山岩作为初始的矿源层, 那么由矿区次火山岩到弱蚀变次火山岩过程中成矿元素富集了 9.32 倍, 由矿区次火山岩到强蚀变次火山岩过程中成矿元素富集了 23.9 倍, 而富集到矿体(边界品位 =  $1 \times 10^{-6}$ ) 则成矿元素至少富集

45.45 倍, 反映出五星山金矿的富集程度要高于五凤金矿, 而且五星山金矿的矿质富集主要集中在矿化蚀变作用的中后期。

### 3 同位素及包裹体地球化学特征

#### 3.1 稳定同位素特征

由表 4 可知, 五凤和五星山矿体中黄铁矿和花岗细晶岩中浸染状黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}$  在 1.0‰~3.1‰ 之间, 平均 1.64‰, 接近陨石硫组成, 表明成矿物质中硫属深源硫。五凤矿脉中方解石  $\delta^{13}\text{C}$  在 -6.9‰~-9.4‰ 之间, 平均为 -8.0‰, 变化范围窄, 与原始地幔的  $\delta^{13}\text{C}$  值(-2‰~-9‰) 接近<sup>[16]</sup>, 表明方解石及成矿热液中碳来自深部幔源。五凤和五星山矿体中石英  $\delta\text{D}$  在 -66‰~-98‰ 之间, 平均为 -87‰,  $\delta^{18}\text{O}$  在 0.8‰~8.8‰ 之间, 平均为 4.55‰, 根据矿物-水关系式<sup>[17]</sup>, 计算石英  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  在 -3.18‰~-7.25‰ 之间, 平均为 -4.94‰。在  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ - $\delta\text{D}$  相关图中反映成矿流体以大气降水为主(图 5)。

表 4 五凤、五星山金矿矿物硫、碳、氢、氧同位素组成

Table 4 S, C, H, O isotopic compositions of minerals in the Wufeng-Wuxingshan gold deposit

样号	矿物名称	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	数据来源	样号	矿物名称	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	数据来源	样号	矿物名称	$\delta\text{D}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰)	数据来源
9WBC3	黄铁矿	1.2	[9]	C1	方解石	-7.8	[9]	CB1	石英	-90	3.2	-4.85	[18]
9WBC1	黄铁矿	2.5	[9]	C2	方解石	-7.9	[9]	CB2	石英	-78	0.8	-7.25	[18]
9WBC2	黄铁矿	2.6	[9]	C3	方解石	-6.9	[9]	CB3	石英	-72	4.5	-3.55	[18]
9WBC4	黄铁矿	1.6	[9]	C4	方解石	-9.4	[9]	CB4	石英	-75	2.4	-5.65	[18]
9WBC6	黄铁矿	1.4	[9]	C5	方解石	-8.2	[9]	CB5	石英	-92	3.3	-4.75	[18]
9W XI-3	黄铁矿	1.0	[9]	9WBC3	方解石	-7.7	[9]	WBC3	石英	-96	4.5	-3.55	[9]
J367	黄铁矿	0.6	[18]					WBC1	石英	-88	5.3	-6.68	[9]
J371	黄铁矿	3.1	[18]					WBC2	石英	-98	7.0	-4.98	[9]
wf-01	黄铁矿	1.4	[6]					WBC4	石英	-66	4.6	-3.65	[9]
wf-02	黄铁矿	1.0	[6]					WBC6	石英	-87	5.7	-6.28	[9]
wxs-01	黄铁矿	1.6	[6]					W XI-3	石英	-87	8.8	-3.18	[9]
平均值		1.64				-8.0				-84.45	4.55	-4.94	

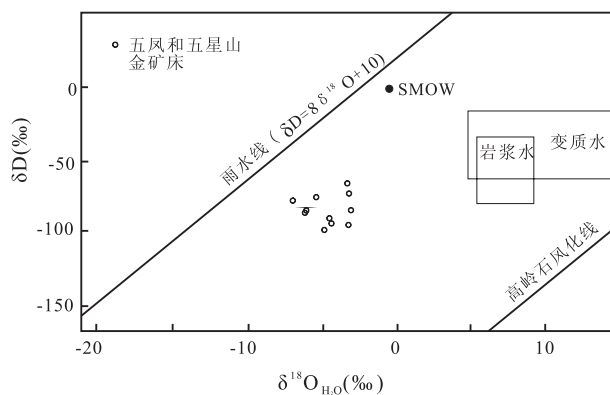


图 5 五凤、五星山金矿  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ - $\delta\text{D}$  相关图

Fig. 5  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ - $\delta\text{D}$  diagram of the Wufeng-Wuxingshan gold deposits

#### 3.2 矿物流体包裹体测温及成矿物理化学条件

3.2.1 流体包裹体温度 通过对矿石石英中包裹体 169 个均一法测温数据统计<sup>[9, 18, 19]</sup>, 五凤金矿床流体包裹体均一温度变化在 130~310℃, 其变化范围可分为 3 个温度区间: 第一温度区间为 290~320℃, 气液两相包裹体的气液比大于 30%; 第二温度区间为 170~230℃, 气液比为 20%~30% 的包裹体居多; 第三温度区间为 130~160℃, 主要为气液比小于 10% 的气液两相包裹体, 但主要集中在 170~230℃, 代表主成矿期的温度范围。五星山矿床流体包裹体均一温度变化于 160~330℃, 也可分为 3 个温度区间, 分别为第一温度区间 300~330℃、第二温度区间 220~300℃ 和第三温度区间 160~

220℃,但主要集中在230~280℃,与五凤矿床相比温度变化范围相差不大,但主要温度区间高于五凤矿区。

3.2.2 流体包裹体盐度 在五凤金矿床和五星山金矿床流体包裹体中很少有含子晶的三相包裹体,因此采用包体的冰点温度计算成矿流体的盐度<sup>[20]</sup>。陈雷等<sup>[19]</sup>在五凤金矿床获得10个流体包裹体的冰点温度,其变化范围在-0.5~-0.8℃,计算盐度在0.88%~1.4%(wt)之间(表5)。在五星山矿区获得8个流体包裹体的冰点温度<sup>[13]</sup>,变化范围为-2.5~-8.2℃,盐度为4.38%~12.39%(wt)之

间(表5)。可以看出五凤和五星山金矿床成矿流体的盐度较低,尤其是五凤金矿床。

3.2.3 流体包裹体压力和形成深度 利用流体包裹体的压力近似代表成矿压力并依此推测成矿深度,利用流体包裹体盐度、温度与密度、压力的关系<sup>[21]</sup>,通过NaCl-H<sub>2</sub>O体系的两相温度-压力-密度的等溶线相图获得相应的密度和压力。五凤金矿床的流体密度为0.853~0.943 g/cm<sup>3</sup>,相应的压力为3.50~201.92(×10<sup>5</sup>)Pa;五星山矿床的流体密度为0.853~0.943 g/cm<sup>3</sup>,相应的压力为12.22~100.67(×10<sup>5</sup>)Pa(表5)。

表5 五凤和五星山矿床流体包裹体均一温度、盐度、密度和压力

Table 5 Homogenized temperature, salinity, density and pressure of fluid inclusions in the Wufeng-Wuxingshan gold deposits

五凤矿床							五星山矿床						
样号	均一温度/℃	冰点温度/℃	盐度(%)	密度/g·cm <sup>-3</sup>	压力/MPa	推测深度/km	样号	均一温度/℃	冰点温度/℃	盐度(%)	密度/g·cm <sup>-3</sup>	压力/MPa	推测深度/km
1	136.4	-0.5	0.88	0.943	12.547		1	233.4	-8.2	11.93	0.943	2.727	0.295
2	206.1	-0.8	1.4	0.869	2.011	0.362	2	230.6	-6.2	9.47	0.869	2.645	0.311
3	218.4	-0.8	1.4	0.853	7.638	0.914	3	272.5	-2.9	4.8	0.853	5.540	0.663
4	214.9	-0.5	0.88	0.854	6.561	0.784	4	190.1	-2.5	4.18	0.854	1.222	
5	202.8	-0.4	0.71	0.869	1.171	0.138	5	255.8	-6	9.21	0.869	4.105	0.482
6	209.1	-0.5	0.88	0.862	20.192		6	267.7	-8.6	12.39	0.862	4.842	0.573
7	210.4	-0.6	1.05	0.861	0.614		7	315.1	-4.4	7.02	0.861	10.067	1.193
8	210.7	-0.7	1.23	0.862	1.012		8	263.8	-4.2	6.74	0.862	4.765	0.564
9	210.2	-0.8	1.4	0.864	7.348	0.868							
10	210.2	-0.7	1.23	0.863	0.350								

一般将流体包裹体压力理解为岩石圈压力,主要来源于静岩载荷压力,因此多采用某一固定的地压梯度值来估算形成深度。由于岩石圈中不同地点的压力是不一致的,而就矿床而言其成矿深度仅相当于岩石圈中某一点的压力,岩石圈中某点压力为: $p=g\rho h$ (式中 $g$ -重力加速度; $\rho$ -密度; $h$ -深度)<sup>[22]</sup>,该公式的应用关键是选取有意义的密度值,为了选取有意义的密度值,本文利用均一温度进行校正,一般地表以下温度和压力具有正相关关系,因此选取表5中温度和压力呈正相关的密度值进行深度计算。推测五凤矿床成矿流体的形成深度总体区间为914~138 m(表5),其中深部矿化形成的深度区间为914~784 m,浅部矿化形成的深度区间为362~138 m,结合目前实际开采情况,在地表形成大采坑富矿地段,北东1号矿脉钻孔控制深度为600 m,矿化带依然存在,再向下无工程控制,因此推测的形成深度与实际基本吻合。五星山矿床成矿流体的形成深度总体区间为1193~295 m(表5),深部矿化形成的深度为1193 m,中部矿化形成的深度为663~482 m,浅部矿化形成的深度为311~295 m。从整体看五

星山矿床成矿流体的形成较五凤矿床深,如果按两个矿床为统一成矿体系看,推测五星山矿床在相对较深部位形成,而五凤矿床在相对较浅部位形成。

3.2.4 流体包裹体成分 陈仁义等<sup>[18]</sup>对五凤金矿床和五星山金矿床流体包裹体也进行了分析,从中可以看出成矿流体以液态为主,并且其中主要为H<sub>2</sub>O,液相成分中阳离子是以K<sup>+</sup>和Na<sup>+</sup>为主,并且K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>>1,K<sup>+</sup>>Na<sup>+</sup>>Ca<sup>2+</sup>≈Mg<sup>2+</sup>,阴离子以SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>以及Cl<sup>-</sup>为主,并且SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>Cl<sup>-</sup>>F<sup>-</sup>>NO<sub>3</sub><sup>-</sup>。气相成分以CO<sub>2</sub>、CO为主以及少量N<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>,并且CO<sub>2</sub>≈CO>N<sub>2</sub>>CH<sub>4</sub>>H<sub>2</sub>。

#### 4 矿床成因类型及成矿作用探讨

##### 4.1 矿床成因类型

五凤金矿床和五星山金矿床的形成均与火山喷发活动有关,五凤金矿床多呈脉状赋存于火山熔岩、火山碎屑岩中,矿体火山喷发形成的受环状、放射状裂隙控制;五星山金矿床呈细脉浸染状赋存于浅成侵入体和次火山岩中,受火山喷发机构控制。成矿多发生于火山喷发的间歇期或末期,成矿滞后于围

岩 1 Ma 以上,具有热液成矿特征。矿体具有典型的绢云母+冰长石+黄铁矿±绿泥石矿物组合,不出现硫砷铜矿和辉铋矿。五凤金矿床和五星山金矿床流体包裹体均一温度主要集中在 220~280℃ 之间,成矿压力较低,具有低温、低压的成矿特点。矿体形成深度主要集中在千米以内,属于浅成。成矿流体盐度较低,属低盐度范围。综上所述,认为五凤金矿床和五星山金矿床应属于浅成低温热液型金矿床。进一步按矿物组合分类应相当于希尔德等<sup>[23]</sup>提出的石英-冰长石-绢云母-方解石型浅成低温热液金矿床或低硫型浅成低温热液金矿床。

#### 4.2 成矿作用

由于成矿物质与金沟岭组火山岩具有同源性,以及成矿物质碳、硫及流体包裹体成分等深部来源特征,可以认为存在一个深部火山-热液成矿系统,同时由于流体包裹体中存在大量大气流体氢、氧同位素成分,因此浅成低温热液金矿床的成矿作用是一个复杂过程,但可以认为深部火山-热液成矿系统在浅部与大气流体的混合构成五凤金矿床和五星山浅成低温热液金矿床成矿作用的核心。

为了便于讨论成矿作用过程,可以人为地分为两个部分,一是深部火山-热液成矿系统,二是浅成混合热液成矿系统。对于深部火山-热液流体系统,其形成与火山岩当时所处的构造环境和岩浆演化密切相关,关于延边地区中生代火山岩形成的构造环境主要有隶属于与古太平洋板块俯冲有关的活动大陆边缘<sup>[24]</sup>和陆内造山带<sup>[25]</sup>两种不同认识,本文通过分析更倾向于陆内造山带的认识,但陆内造山带的垮塌与古太平洋板块斜向俯冲导致的大型走滑剪切有密切的成因联系。目前对延边地区屯田营组和金沟岭组火山岩的形成时代多认为是晚侏罗世—早白垩世,此时的古太平洋板块的运动方向以向北为主,如伊泽奈崎板块俯冲方向为北北东<sup>[26]</sup>,很难在欧亚大陆东部形成俯冲带或宽阔的活动大陆边缘,但由于小角度的斜向快速俯冲可以在陆缘一侧形成一系列大型走滑剪切深大断裂带,这些断裂带深达上地幔乃至切割岩石圈。这些剪切深大断裂带在大陆内部形成剪切拉分盆地,在造山带导致岩石圈结构失稳,造成岩石圈拆沉和减薄,致使软流圈地幔的上升,由此导致岩石圈地幔部分熔融,形成初始玄武质岩浆,初始玄武质岩浆在上升过程中及地幔岩浆房分别发生橄榄石和辉石的分离结晶作用,当向上运移过程中可能由于地壳的部分混染,其成分转化为偏碱性的富钾的钙碱性岩浆,富钾的钙碱性岩浆晚期通过相分离可以形成高盐度的流体和低盐度高温

高压气液态流体,后者由于流体盐度较低,携带重金属较少,密度较低,因此可以上升到较浅部位<sup>[27]</sup>,因此五凤、五星山金矿床的深部成矿流体应以后者为主。

对于浅成混合热液成矿系统,其成矿过程可以出现两种情况,一是当大气降水与向上迁移的低盐度气液态流体混合形成成矿热液,成矿热液在火山通道或次火山岩侵入等部位,由于构造和物理化学环境的突然改变而发生沸腾。沸腾作用形成爆破角砾,在裂隙附近形成细脉和网脉,使金属矿物沉淀出来,并与围岩反应发生围岩蚀变。这种沸腾作用周期性的发生使金及金属矿物多次沉淀,形成多期成矿和矿物分带,致使矿质富集形成五星山式(低硫型)浅成低温热液金矿床;二是分离出来的低盐度气液态流体,或沸腾残余的含矿流体沿裂隙系统上升过程中,在近地表附近与大量萃取并溶解了金属、钾、钠、氯化物和硫等循环的大气降水来源的流体相混合,由于冷、热和不同性质热液的混溶作用,一方面物理化学条件的改变使得流体中的金属离子溶解度降低,促使了金属硫化物的沉淀,在裂隙附近形成细脉和网脉充填形成石英-方解石脉、石英矿脉,另一方面与围岩反应发生围岩蚀变。混合的地表循环流体主要是雨水,其成矿深度一般小于 1.5 km。这种混溶作用周期性地发生,形成多期成矿,致使矿质富集形成五凤式(低硫型)浅成低温热液金矿床。

## 5 结 论

五凤和五星山金矿形成与延吉盆地中生代金沟岭组火山岩和次火山岩有关,成岩、成矿大地构造背景属于陆内造山带的垮塌,造山带垮塌的机制与晚侏罗世-早白垩世古太平洋伊泽奈崎板块向北北东方向运动导致陆缘一侧形成大型剪切深大断裂带有关,剪切深大断裂带导致造山带岩石圈结构失稳,造成岩石圈拆沉和减薄,致使软流圈地幔的上升和岩石圈地幔部分熔融,这是延边地区初始岩浆和成矿热液形成的构造环境。

五凤和五星山金矿段形成于与火山喷发有关的放射状、环状裂隙和火山通道相的次火山岩爆发角砾岩中。主成矿温度在 220~280℃,成矿压力较低,成矿深度距地表小于 1.5 km,成矿流体盐度较低,具有石英-冰长石-绢云母-方解石矿物组合,其成因类型属于典型的低硫型浅成低温热液型金矿床。

五凤和五星山金矿床元素地球化学和稳定同位素及流体包裹体研究结果表明,成矿热液中矿质主要为深部来源,与火山岩、次火山岩具有同源性,而

成矿流体主要来源于大气降水。深部火山-热液流体系统与浅成大气降水流体的混合是五凤和五星山浅成低温热液型金矿床的主要成矿过程。

### 参考文献 (References):

- [1] 芮宗瑶, 张洪涛, 王龙生, 陈仁义, 金伯禄, 金逢沫, 万玉胜, 周永昶, 孟庆丽. 吉林延边地区斑岩型-浅成热液型金铜矿床[J]. 矿床地质, 1995, 14(2): 99-126.  
Rui Zongyao, Zhang Hongtao, Wang Longsheng, Chen Renyi, Jin Buolu, Jin Fengzhu, Wan Yusheng, Zhou Yongchang, Meng Qingli. Porphyry-epithermal gold, copper deposits in Yanbian area Jilin province[J]. Mineral Deposits, 1995, 14(2): 99-126. (in Chinese with English abstract)
- [2] 贾大成, 胡瑞忠, 冯本智. 吉林延边地区中生代火山岩金铜成矿系列及区域成矿模式[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(3): 224-229.  
Jia Dacheng, Hu Ruizhong, Feng Benzhi. Gold-copper metallogenic series and metallogenic model of Mesozoic volcanic belt in Yanbian area, Jilin Province[J]. Journal of Changchun Science and Technology University, 2001, 31(3): 224-229. (in Chinese with English abstract)
- [3] Jia D C, Hu R Z, Lu Y, Qiu X L. Collision belt between the Khanka block and the North China block in the Yanbian Region, Northeast China[J]. J. Asian Earth Sci., 2004, 23(2): 211-219.
- [4] 殷长建, 彭玉鲸, 靳克. 中国东北东部中生代火山活动与泛太平洋板块[J]. 中国区域地质, 2000, 19(3): 303-312.  
Yin Changjian, Peng Yujing, Jin Ke. Mesozoic volcanism in the eastern part of Northeast China and Transpacific plate[J]. Regional Geology of China, 2000, 19(3): 303-312. (in Chinese with English abstract)
- [5] 赵羽军, 孙景贵, 王清海, 门兰静, 李怡欣, 郭佳, 崔培龙. 吉林延边地区浅成热液金(铜)矿床的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 激光探针测年与成矿时代讨论[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 156-169.  
Zhao Yujun, Sun Jinggui, Wang Qinghai, Men Lanjing, Li Yixin, Guo Jia, Cui Peilong.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  laser probe dating and discussion on metallogenic epoch of epithermal Au-Cu deposit in Yanbian area of Jilin[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(2): 156-169. (in Chinese with English abstract)
- [6] 贾大成, 张潇, 卢焱, 李立志, 高文. 吉林省延吉五凤和五星山浅成低温热液型金矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 133-148.  
Jia Dacheng, Zhang Xiao, Lu Yan, Li Lizhi, Gao Wen. Wufeng and Wuxingshan Epithermal hydrothermal gold deposits in Yanbian area, Jilin Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011:133-148. (in Chinese)
- [7] Le Bas N J, Le Maitre R W, Streckeisen A. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. J. Petrol., 1986, 27: 745-750.
- [8] Le Maitre R W. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms[M]. Oxford: Blackwell, 1989: 1-193.
- [9] 孟庆丽, 周永昶, 柴社力. 中国延边东部斑岩-热液脉型铜金矿床[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001.  
Meng Qingli, Zhou Yongchang, Chai Sheli. The porphyry and hydrothermal gold and copper deposits in the eastern Yanbian region of China[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Publishing House, 2001. (in Chinese)
- [10] 邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 罗照华, 戴圣潜, 李凯明. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山-深部过程[J]. 地质论评, 2000, 46(1): 41-48.  
Deng Jinfu, Zhao Guochun, Zhao Hailing, Luo Zhaohua, Dai Shengqian, Li Kaiming. Yanshanian igneous petrotectonic assemblage and orogenic-deep processes in east China[J]. Geological Review, 2000, 46(1): 41-48. (in Chinese with English abstract)
- [11] Nguyen H, Kozo U. Geochemistry of Cenozoic basalts in the Fukuoka district (northern Kyushu, Japan): Implications for asthenosphere and lithospheric mantle interaction[J]. Chem. Geol., 2003, 198: 249-268.
- [12] 连长云, 尹冰川. 大兴安岭西坡中生代火山岩形成机制[J]. 地质地球化学, 2000, 28(2): 26-37.  
Lian Changyun, Yin Bingchuan. Forming mechanism of the mesozoic volcanic rocks on the western slope of Daxinganling [J]. Geology-Geochemistry, 2000, 28(2): 26-37. (in Chinese with English abstract)
- [13] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins[M]. London: Geol. Soc. Spec. Publ., 1989, 42: 313-345.
- [14] Vinogradov A P. Average concentration of chemical elements in the chief types of igneous rocks of the crust of the Earth [J]. Geochemistry, 1962, 7: 555-571. (in Russian)
- [15] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1985:312-315
- [16] Deines P. Mantle carbon: Concentration, mode of occurrence and isotopic composition[A]. Schidlowski M, et al. Early organic evolution: Implications for mineral and energy resources[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992, 133-146.
- [17] Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. Oxygen isotope exchange quartz and water[J]. J. Geophys. Res., 1972, 77: 3057-3067.
- [18] 陈仁义, 芮宗瑶. 五凤浅成热液金矿床地质特征及成矿机理研究[J]. 矿床地质, 1993, 12(1): 20-28.  
Chen Renyi, Rui Zongyao. Geological characteristics and metallogenic mechanism of the Wufeng epithermal gold deposit, Jilin Province[J]. Mineral Deposits, 1993, 12(1): 20-28. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈雷, 孙景贵, 赵俊康, 门兰静, 梁树能, 陈冬, 逢伟. 延边五凤五星山金(银)矿床的流体包裹体特征及成因模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(4): 566-576.  
Chen Lei, Sun Jinggui, Zhao Junkang, Men Lanjing, Liang Shuneng, Chen Dong, Pang Wei. Characteristics of fluid inclusions and genetic model of Wufeng-Wuxingshan gold (sil-



- ver) deposit, Yanbian[J]. Journal of Jilin University(*Earth Science Edition*), 2008, 38(4): 566—576. (in Chinese with English abstract)
- [20] Hall P L. Freezing point depression of NaCl-H<sub>2</sub>O solution [J]. *Economic Geology*, 1988, 83(1): 197—202.
- [21] Roedder E. Fluid inclusion[M]. *Reviews in Mineralogy*, 1984, 12: 252—289.
- [22] 胡宝群, 王方正, 孙占学, 刘成东, 白丽红. 岩石圈中的地压梯度[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 139—143.  
Hu Baoqun, Wang Fangzheng, Sun Zhanxue, Liu Chengdong, Bai Lihong. The pressure gradient in the lithosphere [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 139—143. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘连登, 陈国华, 吴国学, 张克尧, 石建基, 张进高. 我国浅成热液金矿的分类探讨[J]. *长春科技大学学报*, 1999, 29(3): 222—226.  
Liu Liandeng, Chen Guohua, Wu Guoxue, Zhang Keyao, Shi Jianji, Zhang Jingao. A discussion on the classification of epizonal gold deposits in China [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 1999, 29(3): 222—226. (in Chinese with English abstract)
- [24] 赵全国, 许文良, 靳克, 裴福萍. 延边地区中生代火山岩的岩浆源区: 来自 Sr Nd 同位素和深源捕虏体(晶)的证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, 35(4): 416—423.  
Zhao Quanguo, Xu Wenliang, Jin Ke, Pei Fuping. The magma source of mesozoic volcanic rocks in Yanbian area: Evidence from Sr Nd isotopes and deep-seated xenoliths(Xenocrysts)[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2005, 35(4): 416—423. (in Chinese with English abstract)
- [25] 祁进平, 陈衍景, Franco Pirajno. 东北地区浅成低温热液矿床的地质特征和构造背景[J]. *矿物岩石*, 2005, 25(2): 47—59.  
Qi Jinping, Chen Yanjing, Franco Pirajno. Geological characteristics and tectonic setting of the epithermal deposits in the Northeast China[J]. *J. Mineral. Petrol.*, 2005, 25(2): 47—59. (in Chinese with English abstract)
- [26] Northrup P C J, Royden L H, Burchfiel B C. Motion of the Pacific Plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extrusion along the eastern margin of Eurasia[J]. *Geology*, 1995, 23: 719—722.
- [27] Williams-Jones A E, Heinrich C A. Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits [J]. *Economic Geology*, 2005, 100(7): 1287—1312.

· 学会之声 ·

## 2012 年全国矿物科学与工程学术研讨会会议纪要

2012年7月18日至20日,由我会所属的六个专业委员会(工艺矿物学、矿物岩石材料、环境矿物学、矿物物理矿物结构、成因矿物学和找矿矿物学)主办,中国硅酸盐学会工艺岩石学分会协办,东北大学秦皇岛分校、中国地质大学(北京)矿物岩石材料开发应用国家专业实验室、中国科学院矿物学与成矿学重点实验室、西南科技大学教育部固体废物处理与资源化重点实验室联合承办的“2012年全国矿物科学与工程学术研讨会”在东北大学秦皇岛分校北戴河校区召开。来自北京大学、南京大学、中山大学、中国地质大学、等20所科研院所和高校的140余位代表出席会议。中国地质大学(北京)廖立兵教授主持会议开幕式,中山大学彭明生教授致开幕辞,东北大学秦皇岛分校副校长才书训教授致欢迎辞,我会副秘书长刘莉发表了支持矿物学发展的讲话。

会议以《矿物学报》增刊的形式出版论文摘要集,共收录论文摘要110余篇。会议交流了10个大会报告和6个分会场特邀报告,分会场48个报告以及43份墙报。会议交流的内容主要包括:高新技术在矿物学研究中的应用,矿物-微生物相互作用,粘土矿物材料(蒙脱石),纳米矿物材料。

经过两天的交流,会议顺利结束。北京大学鲁安怀教授在闭幕辞中对会议给予充分肯定,并强调基础矿物学是根本,应用矿物学应进一步在资源、环境、材料等领域发挥支撑作用,呼吁加强矿物学方向的专家学者间的学术交流,以更有力地报告与国际接轨。谢先德院士也对矿物学的发展提出了三点希望:①组织和谐的矿物学团队,进一步加强团结、加强交流与合作;②加强矿物学在地球科学中的中心作用;③要进一步加强国际交流。