

文章编号: 1000-4734(2001)04-0710-06

# 流体-岩石相互作用

## ——流体包裹体及蚀变岩某些成分变异的特征

魏俊浩<sup>1,2</sup> 李志德<sup>2</sup> 赵永鑫<sup>2</sup> 陆建培<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学开放研究实验室, 贵州 贵阳 550002;  
2. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 以五龙金矿为例, 在同一剖面上采集了不同成矿阶段的含金石英脉和近矿蚀变岩样品, 根据矿流体包裹体和蚀变岩成分的测定结果, 系统地讨论了不同成矿阶段流体包裹体成分( $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^+$ 、 $Mg^+$ 、 $CO_2$ 等)和不同蚀变岩成分( $K_2O$ 、 $Na_2O$ 、 $CaO$ 、 $MgO$ 、 $CO_2$ 等)的变化规律, 结果表明, 从第二成矿阶段到第四成矿阶段, 流体中的 $Na^+$ 、 $Ca^+$ 、 $Mg^+$ 含量有明显的升高的趋势,  $K^+$ 含量降低, 蚀变岩中,  $K_2O$ 由远离矿体的原岩到靠近矿体的蚀变岩其含量增加, 而 $Na_2O$ 、 $CaO$ 、 $MgO$ 逐渐降低, 这种流体包裹体和蚀变岩中的某些相应成分的变化特征, 应该是流体-岩石相互作用的结果。

**关键词:** 流体/岩石相互作用; 流体包裹体; 蚀变岩; 五龙金矿

中图分类号: P618.51 文献标识码: A

**作者简介:** 魏俊浩, 男, 1961年生, 副教授, 博士, 从事矿床地球化学和矿产勘查学研究。

五龙金矿位于辽宁省丹东市西 30 km 处, 是我国著名的大型石英脉型金矿, 已有 60 余年的矿业开发史。该矿床位于鸭绿江大断裂的西侧, 定位于印支期黑云母花岗岩中(图 1), 并和成矿前的细粒闪长岩脉密切伴生, 该脉已发生了明显的围岩蚀变。热液矿床中的流体-岩石相互作用是普遍存在的地质事实, 在宏观上表现为围岩蚀变, 微观上表现为元素的带入带出。从常量、微量元素物质交换的角度前人对蚀变岩和原岩做了大量的工作<sup>[1~15]</sup>。主要表现在利用常、微量元素等研究糜棱岩、蚀变岩的流体-岩石相互作用。本文根据水-岩反应的基本思路, 采用成矿期流体包裹体及蚀变岩中某些相应成分含量的规律性变化, 讨论了在成矿过程中成矿流体与容矿围岩的物质交换。

### 1 矿床地质

五龙金矿位于三股流花岗岩体的北西侧, 其容矿围岩为印支期黑云母花岗岩, 矿体和成矿前闪长岩脉伴生, 并且定位于近南北向( $NE5^\circ \sim 10^\circ$ )

和北西向( $NW 320^\circ$ )两组断裂中, 矿体总体形态以脉状为主, 规模大者(延长大于 100 m)多以大脉状, 小者(延长小于 50 m)以扁豆状或透镜状为主。SN 向矿体近直立, NW 向矿体向西南倾, 倾角  $50^\circ$  左右, 通过坑道和手标本观测, 依据石英脉的先后关系及金属硫化物产状可将内生成矿期划分为五个成矿阶段: I. 纯石英阶段; II. 石英-黄铁矿阶段; III. 自然金-辉铋矿-硫化物阶段; IV. 灰石英-多金属硫化阶段; V. 碳酸盐阶段。其中自然金-辉铋矿-硫化物阶段为主要成矿阶段。围岩蚀变类型主要为黄铁矿化、硅化、绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化。

### 2 围岩蚀变分带及样品采集

矿体围岩为蚀变闪长岩脉, 其蚀变分带为: 强硅化、黄铁矿化蚀变闪长岩( $C_3$ ); 硅化、绢云母化、黄铁矿化蚀变闪长岩( $C_2$ ); 硅化、绢云母化、绿泥石化蚀变闪长岩( $C_1$ ); 未蚀变闪长岩脉( $C_0$ )。按蚀变分带分别对样品进行了采集(图 2), 每个蚀变分带采集两个样品。流体包裹体样品的采集选择与成矿有密切关系的 II、III、IV 三个成矿阶段, 每个成矿阶段采两个样品, 测试矿物均为石英。

收稿日期: 2001-11-03

基金项目: 国家科技部“九五”攀登预选项目(编号: 95-预-39)

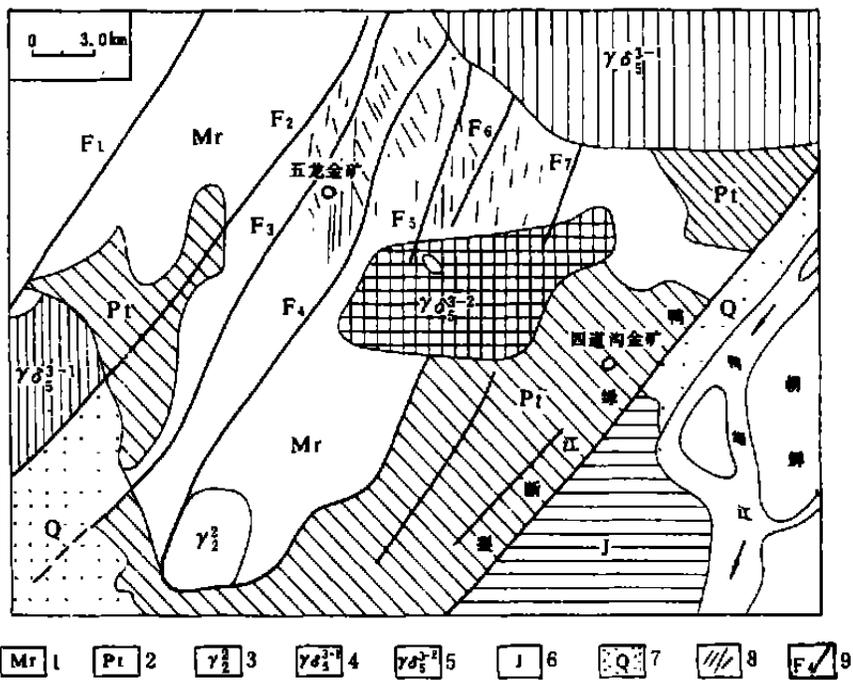


图 1 五龙金矿区域地质图

Fig. 1. Regional geological map of the Wulong gold deposit.

- 1. 黑云母花岗岩 2. 元古界辽河群变质砂岩 3. 花岗岩 4. 角闪石花岗岩 5. 三股流花岗岩 6. 侏罗纪火山岩
- 7. 第四纪沉积物 8. 脉岩及矿体充填的断裂构造 9. 断裂及构造

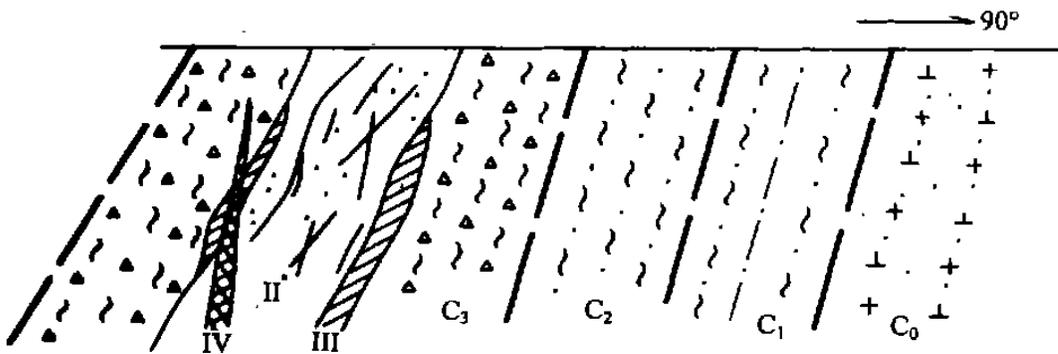


图 2 蚀变岩分带及矿体穿插关系示意图

Fig. 2. Sketch showing orebody interpenetration relationships and altered rock zoning.

- C<sub>3</sub>. 强硅化、黄铁矿化蚀变闪长岩 C<sub>2</sub>. 硅化、绢云母化、黄铁矿化蚀变闪长岩 C<sub>1</sub>. 硅化、绢云母化、绿泥石化蚀变闪长岩
- C<sub>0</sub>. 未蚀变闪长岩 II、III、IV. 分别代表三个成矿阶段的含金石英脉

### 3 蚀变岩及流体包裹体成分演化

#### 3.1 蚀变岩成分演化

表 1 列出了原岩及蚀变岩的岩石化学组成, 可以看出, SiO<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>O 等常量元素由闪长岩(脉)到逐渐靠近矿体的蚀变岩其含量有明显升高的趋势, 说明这些成分是由流体被带进了闪长岩(脉)

中, 而 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、MgO、CaO、MnO、CO<sub>2</sub> 的含量逐渐降低。微量元素 Rb、Sr 从原岩到蚀变岩其含量也有升高的特征, 但在强硅化、黄铁矿化蚀变岩中又显出降低的特点, 是因为蚀变增强后, Sr 的寄主矿物斜长石含量降低的缘故, Ni、Cr、Co 也具有明显降低的趋势, 这种常量元素和微量元素的变化, 说明了是流体与围岩发生水/岩反应的综合作用结果, 同时也引起了蚀变岩类型的变化, 图 3 表

明,从原岩到靠近矿体的蚀变岩,其岩石的化学成分和矿物成分发生了变化,也就是说原岩从中性岩成分最终蚀变成酸性岩的成分,靠近矿体岩石

成分变异愈大蚀变愈强,蚀变强度与流体活动强度有关。

表1 不同类型蚀变岩岩石化学组成

Table 1. Petrochemical compositions of different altered rocks

岩石类型	主量元素/%											微量元素/( $\mu\text{g/g}$ )								
	SO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>	Rb	Sr	Y	Zr	V	Ni	Cr	Co
C <sub>0</sub>	52.28	17.79	1.48	6.03	7.28	5.36	2.34	2.49	0.09	0.86	0.22	3.73	117	313	137	159	56.3	83.6	388	26.0
C <sub>1</sub>	55.68	16.95	2.63	5.47	4.93	3.94	2.25	3.43	0.07	1.08	0.40	2.38	220	428	103	198	32.8	64.6	132	21.1
C <sub>2</sub>	56.92	14.65	2.05	3.67	3.08	4.86	2.77	3.36	0.04	0.92	0.24	2.85	160	452	117	143	45.2	8.6	<5	16.5
C <sub>3</sub>	63.72	14.49	2.85	0.83	1.27	1.00	1.91	5.01	0.02	0.95	0.25	0.84	249	113	126	154	63.4	6.7	<5	15.1

注:表中数据为2个样品的平均数;分析者:湖北省地质实验研究所 刘志华, 1998; 分析方法:主量元素用湿化学法测定,微量元素用原子吸收法测定。

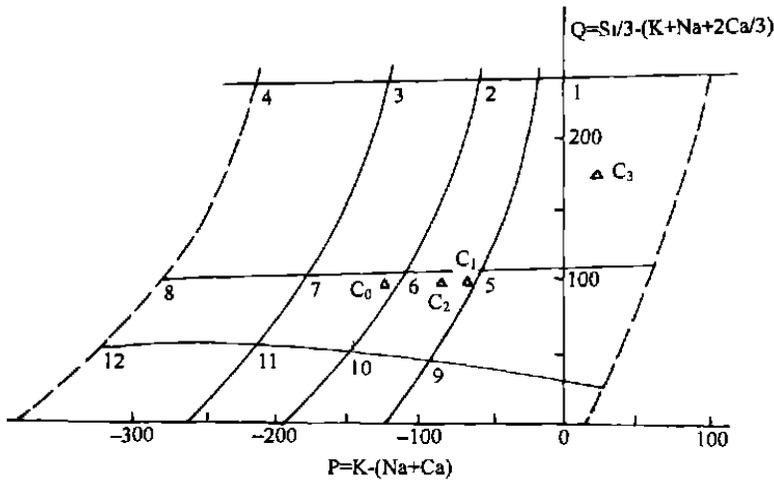


图3 Q-P图<sup>[19]</sup>

Fig. 3. Q-P classification diagram.

1. 花岗岩 2. 石英二长岩 3. 花岗闪长岩 4. 英云闪长岩 5. 石英正长岩 6. 石英二长岩 7. 石英二长闪长岩  
8. 石英闪长岩 9. 正长岩 10. 二长岩 11. 二长闪长岩 12. 闪长岩

### 3.2 流体包裹体成分演化

流体包裹体气液相成分见表2,气相成分中该矿床和我国其它石英脉型金矿相比,H<sub>2</sub>O含量明显偏高<sup>[17~18]</sup>,其次CO<sub>2</sub>含量也很高,三个主要成矿阶段CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比值多在0.01~0.2之间变化。包裹体中水的含量,CH<sub>4</sub>的含量随着成矿演化逐渐降低,CO<sub>2</sub>除第三阶段的含量偏低外,其它两个阶段CO<sub>2</sub>含量远远超过正常石英脉型矿床<sup>[16]</sup>。流体中Ca<sup>2+</sup>含量最高,依次为K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>,Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>比值前两个阶段变化不大,第四阶段Na<sup>+</sup>含量明显升高,考察流体中主要的阳离子

Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>不难发现,随着成矿流体演化Mg<sup>2+</sup>+Ca<sup>2+</sup>含量逐渐升高。流体中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>离子含量很高,这和其它石英脉型金矿床相比具有明显差别,其原因是流体和围岩发生水/岩反应的结果,成矿流体阴离子中Cl<sup>-</sup>含量高,F<sup>-</sup>含量低,上述成分特征与大多数含金石英脉型金矿流体富Cl<sup>-</sup>,贫F<sup>-</sup>的结论一致<sup>[17~18]</sup>,而SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>在第三阶段含量最高。综合分析五龙金矿三个主要成矿阶段流体成分变化不难得出如下结论:①不同阴离子和阳离子的含量随着成矿流体演化有升高或降低的趋势,②第三成矿阶段流体成分和第二、第四阶段有较大的差别,这可能是成矿流体脉动性演化的结果。

表 2 不同成矿阶段流体包裹体成分组成( $\mu\text{g/g}$ )  
Table 2. Compositions ( $\mu\text{g/g}$ ) of fluid inclusions of different stages

成矿阶段	温度/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ $(\text{g}/\text{cm}^3)$	样品号	包裹体成分组成/ $(\mu\text{g/g})$														$\text{CO}_2$ / $\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}$ / $\text{CO}_2$	$\text{Na}^+$ / $\text{K}^+$	
				$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Li}^+$	F	Cl	$\text{SO}_4^{2-}$	HCO	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2$	CO	$\text{CH}_4$	$\text{H}_2$				$\text{N}_2$
II	300	0.910	Q1-II	2.60	4.60	7.90	0.27	0.005	0.35	4.88	2.50	141.50	2057.10	241.00	1.05	7.14	0.06	2.38	0.117	0.004	0.565
			Q2-II	2.12	2.87	6.78	0.92	0.005	0.27	5.46	3.15	118.49	1547.56	182.47	2.63	4.38	0.12	2.50	0.118	0.014	0.739
III	250	0.960	Q1-III	2.02	3.74	0.93	3.95	0.012	0.12	3.02	15.00	147.31	980.28	11.26	0.50	0.85	0.04	2.28	0.011	0.043	0.540
			Q2-III	1.97	2.76	2.21	1.84	0.003	0.32	3.64	8.72	193.54	676.42	21.57	1.16	2.78	0.07	1.99	0.032	0.053	0.714
IV	160	1.025	Q1-IV	9.98	1.29	65.25	2.52	0.020	0.10	7.95	5.00	214.00	589.43	123.50	2.10	0.50	0.08	0.32	0.210	0.017	7.736
			Q2-IV	6.32	1.74	47.82	2.19	0.005	0.24	4.67	3.62	162.40	824.07	105.84	3.05	0.74	0.05	0.24	0.128	0.029	3.653

注: 分析者为宜昌矿产地质研究所包裹体室 李桃叶; 分析方法: 热爆超声波提取, 液相成分  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Li}^+$  原子吸收光谱法(日立 180-80AAS),  $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  光度分析法(日立 220A 紫外/可见分光光度计), 气相成分气相色谱(SP 3420 气相色谱)。

### 4 成矿流体与容矿围岩(石英二长闪长岩)之间的物质交换

上面分别讨论了容矿围岩在蚀变过程中成分的变异和不同成矿阶段流体主要成分的变化特征, 虽然岩石化学所测定的化学成分和成矿流体的组成不能完全对等, 但仍有不少成分在流体与围岩发生反应时发生了带入和带出的变化规律, 图 4 a、b 分别表示了流体与围岩发生反应过程中相同化学成分的变异规律。图 4 a 中折线为取不同成矿阶段两样品成分值的平均值, 并以第二成矿阶段成分平均值作为分母, 求出不同成矿阶

段成分比值, 做出折线图, 图 4 b 用相同方法得到。图 4 a、b 中所反映的五种特征成分具有明显的反消长关系, 三个主要成矿阶段随着成矿演化, 流体中只有  $\text{K}^+$  和  $\text{CO}_2$  含量是降低的, 而  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  的含量有明显的升高趋势。而图 4 b 中所反映的五种成分变化规律恰和流体中的成分变化相反, 只有  $\text{K}_2\text{O}$  从原岩(闪长岩脉)到靠近矿体的蚀变岩其含量有升高的趋势, 其它成分逐渐降低, 图 4b 围岩中  $\text{CO}_2$  含量的降低推测是  $\text{CaCO}_3$  以方解石脉单独存在的缘故(采样时避开碳酸盐脉), 这种成矿流体中组分含量和蚀变岩特征成分含量的变化规律, 表明了成矿过程中流体-岩石相

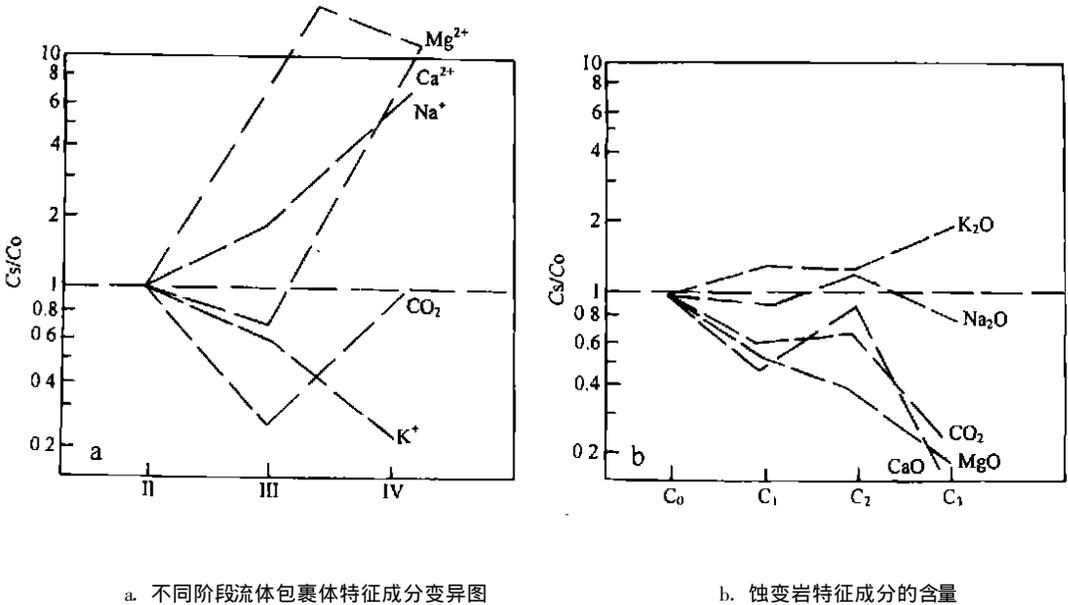


图 4 流体包裹体与蚀变岩某些相应成分的变化关系

Fig. 4. Variation relationship of some component of altered rocks with fluid inclusions.

(a 图中,  $C_0$  为 II 阶段包裹体特征成分含量,  $C_s$  代表 III、IV 阶段包裹体特征成分的含量; b 图中,  $C_0$  为原岩特征成分含量,  $C_s$  代表  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  蚀变岩的特征成分含量)

互作用的存在,其成分的变异过程可表示为:

(1)  $K^+$  的带入,流体中  $K^+$  降低,蚀变岩中  $K_2O$  含量升高(图4),表现为钠长石和钙长石的绢云母化。

(2) 由于  $H_2O$ 、 $CO_2$  的作用,辉石、角闪石等铁、镁矿物水解形成绿泥石、方解石和石英。

(3)  $Si$  和  $Fe$  的带出,在裂隙中形成石英脉,部分  $Fe^{2+}$  与  $S$  结合形成黄铁矿化。

## 5 讨论与结论

(1) 热液矿床中围岩蚀变是流体-岩石相互作用重要的地质事实,流体-岩石相互作用在宏观上

表现为不同类型的围岩蚀变,微观上表现为元素的带入带出。

(2) 围岩蚀变类型受流体成分和蚀变岩原岩成分控制,蚀变强度与流体的活动强度和流体成分与原岩成分差异有关。

(3) 该矿床从第二成矿阶段到第四成矿阶段,流体包裹体中  $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  含量有明显升高的趋势, $CO_2$ 、 $K^+$  含量降低。

(4) 蚀变岩中  $K_2O$  由远离矿体原岩到靠近矿体的蚀变岩其含量增加,而  $Na_2O$ 、 $MgO$ 、 $CaO$ 、 $CO_2$  逐渐降低,这种流体中成分和蚀变岩中成分变异特征应该是流体-岩石相互作用的表现。

## 参 考 文 献

- [1] Gresen R L. Composition-volume relationships of metasomatism[J]. *Can. Geol.*, 1967, 2: 48~65.
- [2] O'Hara K. Fluid flow and volume loss during mylonitization: an origin for phylonite in an overthrust setting, North California[J]. *Tectonophysics*, 1988, 156: 21~36.
- [3] O'Hara K and Blackburn W H. Volume-Loss model for trace-element enrichments in mylonites[J]. *Geology*, 1989, 17: 524~527.
- [4] Selvestone J, Mortean G and Staude J M. Fluid channelling during ductile shearing: transformation of granodiorite into aluminous schist on the Tauern Window, Eastern Alps[J]. *J. Metamorphic Geol.*, 1991, 9: 419~431.
- [5] Gant J A. The isocon diagram: A simple Solution to Gresens' equation for metasomatic alteration[J]. *Econ. Geol.*, 1986, 81: 1976~1982.
- [6] Ague J J. Evidence for major mass transfer and volume strain during regional metamorphism of pelites[J]. *Geology*, 1991, 19: 855~858.
- [7] Brimhall G H and Dietrich W F. Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems: Results on Weathering and pedogenesis[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1987, 51: 567~587.
- [8] Etheridge M A, Cox S F and Wall V J. The role of the fluid phase during regional metamorphism and deformation[J]. *Metamorphic Geol.*, 1983, 1: 205~226.
- [9] 邓海琳,涂光炽,李朝阳,等.地球化学开放系统的质量平衡: I. 理论[J]. 矿物学报, 1999, 19(2): 121~131.
- [10] 邓海琳,涂光炽,李朝阳,等.水/岩比的地球化学意义: II. 理论[J]. 矿物学报, 1999, 19(3): 267~272.
- [11] 杨新岳. 变形岩石的体积损失和流体岩石相互作用[J]. 地质科技情报, 1994, 13: 21~26.
- [12] 黄智龙,肖化云,朱丹,等.云南镇沅金矿煌斑岩矿化过程中元素活动规律[J]. 矿物学报, 1998, 18(2): 337~344.
- [13] 魏俊浩,刘丛强,等.围岩蚀变过程中元素迁移规律的定量研究-以河南石板沟金矿蚀变岩为例[J]. 地球化学, 1999, 5: 479~486.
- [14] Wei J-H and Li J-W. Characteristics of element migration in the process of wall-rock alteration on the Shibangou gold deposit[J]. *Western Henan. Acta Geologica Sinica*, 1999, 73: 201~207.
- [15] Debon F and LeFort P. A chemical mineralogical classification of common plutonic rocks and associations[J]. *Trans. R. Soc. Edinburgh Earth Sciences*, 1982, 73: 135~149.
- [16] 魏俊浩,刘丛强,丁振举.热液型金矿围岩蚀变过程中元素迁移规律——以张家口地区东坪金矿、后沟金矿、水晶屯金矿为例[J]. 矿物学报, 2000, 20(2): 200~206.
- [17] 李荫清.吉林海沟金矿成矿流体的地球化学特征[J]. 地质学报, 1994, 68: 48~61.
- [18] 李荫清,陈殿芬.吉林小西南岔金矿床流体包裹体及成矿作用研究[J]. 矿床地质, 1995, 14: 151~173.

## EVIDENCE FROM CHARACTERISTIC COMPOSITIONS OF FLUID INCLUSIONS AND ALTERED ROCKS FOR FLUID/ROCK INTERACTION: AS EXEMPLIFIED BY THE WULONG GOLD DEPOSIT

Wei Junhao<sup>1,2</sup> Li Zhide<sup>2</sup> Zhao Yongxin<sup>2</sup> Lu Jianpei<sup>2</sup>

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

2. *China University of Geosciences, Wuhan 430074*)

**Abstract:** On the basis of deposit geology, samples from Au-bearing quartz veins of different metallogenic stages and altered rocks near the orebodies were collected systematically in the same section. In terms of the characteristic compositions of altered rocks and fluid inclusions, the variation trend of altered rock ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $CO_2$ ) and fluid inclusion compositions ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $CO_2$ ) have been discussed. The results indicate that  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  show an obvious increasing tendency from the second to third ore-forming stages, but  $K^+$  shows a gradual decrease. Whereas in the altered rocks,  $K_2O$  and  $Na_2O$ ,  $CaO$  and  $MgO$  from protolith to altered rocks near the orebody show an increasing and decreasing tendency, respectively. The mutual-complementing of characteristic components is due to fluid/rock interaction in the metallogenic processes.

**Key words:** fluid-rock interaction; fluid inclusion; altered rock; Wulong gold deposit