

# 新疆萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体成分、矿床成因和成矿预测\*

陈华勇<sup>1,2</sup> 陈衍景<sup>2\*\*</sup> 倪培<sup>3</sup> 张莉<sup>2</sup> 张增杰<sup>1</sup>

CHEN HuaYong<sup>1</sup>, CHEN YanJing<sup>2\*\*</sup>, NI Pei<sup>3</sup>, ZHANG Li<sup>2</sup> and ZHANG ZengJie<sup>1</sup>

1. 北京大学造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871

2. 中国科学院广州地球化学研究所成矿动力学重点实验室, 广州 510640

3. 南京大学内生矿床国家重点实验室, 南京 210093

1. Key Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Peking University, Beijing 100871, China

2. Key Laboratory of Metallogenic Dynamics, Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China

3. State Key Laboratory of Endogenic Ore Deposits, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2006-09-12 收稿, 2007-04-30 改回.

**Chen HY, Chen YJ, Ni P, Zhang L and Zhang ZJ. 2007. Chemical composition of fluid inclusions of the Sawayardun gold deposit, Xinjiang: Implications for ore genesis and prediction. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9):2189–2197**

**Abstract** Both barren and Au-bearing quartz veins occur in exploration area of the Sawayardun gold deposit, Xinjiang. Fluids extracted from the barren and Au-bearing quartz separates and pyrite separates roughly represent the characteristics of the fluids of preore-, early ore- and main ore-stages, and show contrasted chemical compositions. In early ore-forming stage, fluid immiscibility was the main mechanism resulting in precipitation of ore-metals; and associated Au-bearing quartz, albite and pyrite were formed. In the main ore-forming stage, fluid condensing and/or mixing was the major origin of metallic precipitation, causing formation of a great deal of Au-bearing minerals such as pyrite. Chemical compositions and the evolution of ore-forming fluids of the Sawayardun deposit are similar to those of the orogenic type mesothermal gold lodes in the world, especially similar to those of the Muruntau giant gold deposit in South Tianshan, Uzbekistan. This strongly suggests the Sawayardun gold deposit is an example of Muruntau-like orogenic type. This paper predicts that lodes XI and II are potential for further prospecting because their fluid compositions are similar to those of lode IV which has been evidenced to the best mineralized in the area by previous prospecting. Whereas the lode I is not recommended because its fluid compositions contrast to those of lode IV.

**Key words** Sawayardun gold deposit, South Tianshan, Ore fluid, Fluid inclusion, Ore genesis

**摘要** 新疆萨瓦亚尔顿金矿区发育含矿和无矿石英脉, 无矿石英、含矿石英及主要载金矿物黄铁矿所含包裹体捕获的流体成分有明显差异, 分别代表了成矿前、成矿早阶段和主成矿阶段的流体特征。早阶段成矿物质沉淀的主要机制为流体不混溶作用, 形成含矿石英、含钠矿物和部分黄铁矿等; 主成矿阶段则以流体浓缩及流体混合为主要机制, 形成大量黄铁矿等载金矿物。萨瓦亚尔顿金矿的成矿流体成分特征与世界造山型的中温热液脉状金矿类似, 尤其是与乌兹别克南天山造山带的穆龙套金矿类似, 表明其为较典型的穆龙套式的造山型金矿床。XI、II 矿化带流体成分特征与矿化最好的 IV 带类似, 勘探前景较好; 相反, I 矿化带与 IV 带差异明显, 不宜作为勘探重点。

**关键词** 萨瓦亚尔顿金矿; 南天山; 成矿流体; 流体包裹体; 成矿机制

中图法分类号 P618.51

\* 国家 973 项目 2007CB411303 课题、国家自然科学基金项目 (No. 40425006)、科学院百人计划项目的资助。

第一作者简介: 陈华勇, 男, 1976 年生, 博士, 矿床学方向, E-mail: huayongchen@hotmail.com

\*\* 通讯作者: 陈衍景, E-mail: yjchen@pku.edu.cn; gigyjchen@126.com

## 1 引言

乌兹别克斯坦的穆龙套 (Muruntau) 金矿 (约 4300t 金, Berger, 1998) 和吉尔吉斯斯坦的库姆托尔 (Kumtor) 金矿 (约 280t 金) (Ivanove, 2000) 等超大型金矿发现于中国邻区的南天山造山带, 激发了我国地质学家在我国天山构造带中寻找同类金矿的热情, 直接导致 20 世纪 90 年代新疆维吾尔自治区乌恰县萨瓦亚尔顿金矿的发现。萨瓦亚尔顿金矿位于中国与吉尔吉斯边境附近的南天山构造带内, 黄金储量 > 100t, 远景资源量约 300t (Rui *et al.*, 2002)。很多学者 (叶锦华等, 1999; 刘家军等, 1999, 2001) 研究了该矿床的地质特征、成矿时代和成因, 认为它属于穆龙套型金矿。但是, 前人对成矿流体、成矿物理化学条件研究较为薄弱, 限制了成矿作用的分析 and 成矿模式的建立, 甚至影响到矿床成因类型的确定。因此, 作者补充了详细的流体包裹体热力学研究 (陈华勇等, 2004), 确定其成矿物理化学条件与穆龙套型金矿一致 (Cole *et al.*, 2000, Graupner *et al.*, 2001, Wilde *et al.*, 2001), 属于造山型金矿。本文重点报道成矿流体成分研究的结果, 展示其成矿流体与穆龙套型金矿相似性和独特性, 并据此探讨了流体运移及矿质沉淀的机制, 以供地质勘探和研究参考。

## 2 区域地质和矿床地质

萨瓦亚尔顿金矿位于塔里木板块西北缘的南天山构造带 (图 1a), 南天山造山带最终形成于晚古生代晚期塔里木

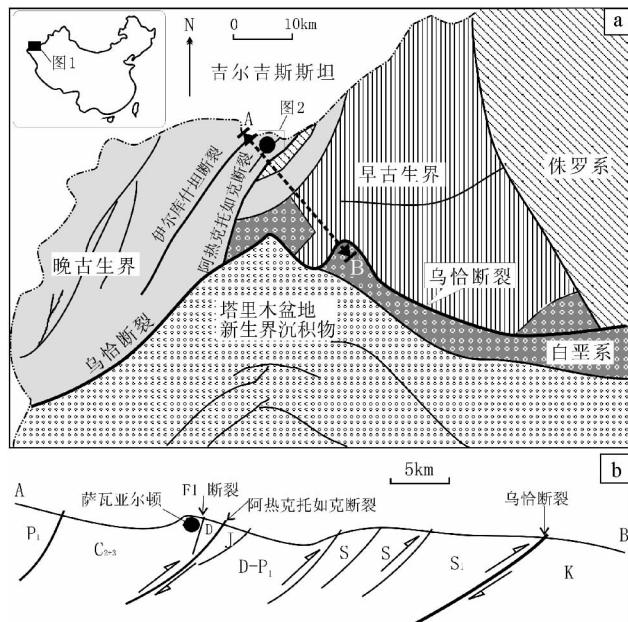


图 1 萨瓦亚尔顿金矿区域地质图 (据陈华勇等, 2004)

Fig. 1 Map showing regional geology of the Sawayardun gold deposit (From Chen Huayong *et al.*, 2004)

板块与哈萨克板块的碰撞造山过程, 碰撞前经历了南天山大洋的俯冲消减, 碰撞后受到中生代陆内造山作用的影响。赋矿地层为石炭纪被动陆缘环境的浊积岩系 (刘家军等, 1999, 2001), 自下而上分为 3 个岩性单元: 下部主要为灰色变质石英砂岩和碳质板岩, 最底部为含薄层泥灰岩和生物碎屑灰岩; 中部为深灰色-黑色薄层粉砂岩和碳质板岩互层; 上部为灰色粉砂岩、板岩, 间夹薄层的黑色碳质板岩、硅质岩、泥质/硅质灰岩, 顶部出现安山岩和凝灰岩。萨瓦亚尔顿金矿床定位于中部岩性单元。

矿区东为阿热克托如克断裂, 西为伊尔克什坦断裂, 二者皆为倾向 NW 的逆冲断裂 (图 1b), 两断裂之间发育了一系列次级层间断裂带和韧性剪切带 (图 2), 为控矿构造 (陈华勇等, 2004, 及其引文)。其中, F1 逆掩断层具韧性剪切带性质, 控制了萨瓦亚尔顿金矿定位 (图 1, 2), 使金矿体产于其上盘的更次级构造中, 并与次级断裂产状近乎一致 (图 2)。矿区外围二叠系地层中含碱性玄武岩夹层, 矿区内岩浆活动微弱, 仅有少量碱性辉绿岩脉和和闪长岩脉, 且多顺层侵入 (图 2), 年龄介于 270.5 ~ 127.9Ma 之间 (刘家军等, 2001)。

矿区已发现 24 条矿化构造带, 其中 I、II、IV、XI 矿带较重要, 含金 1 ~ 4g/t。部分矿体上部可圈出独立锑矿体 (叶庆同等, 1999; 陈华勇等, 2004)。主要围岩蚀变有黄铁矿化、毒砂化、硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化等。矿化过程大致分为 3 个阶段: 早阶段无矿石英 + 黄铁矿 (含量少, 但晶形好) 组合; 中阶段绢英岩化 + 多金属硫化物 (大量它形黄铁矿和毒砂、磁黄铁矿、锑化物等) + 铁白云石组合; 晚阶段以碳酸盐细脉为标志。中阶段由不同世代的矿物组成, 为主成矿阶段。金主要以自然金和金银矿的形式产出, 毒砂、黄铁矿为主要载金矿物; 矿石组构以网脉状、角砾状和浸染状为主。

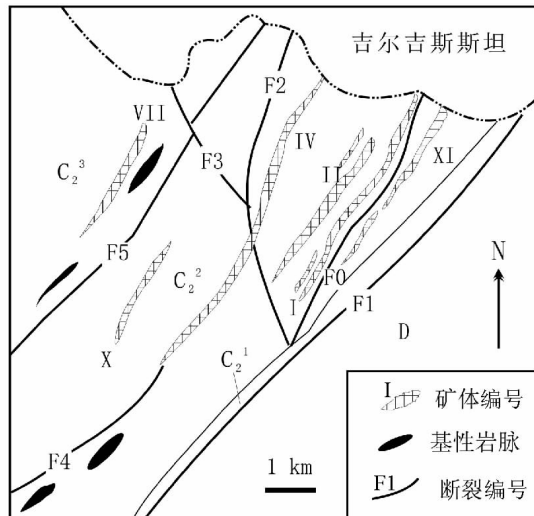


图 2 萨瓦亚尔顿金矿地质简图 (据陈华勇等, 2004)

Fig. 2 Sketched map showing the geology of the Sawayardun gold deposit (Chen Huayong *et al.*, 2004)

### 3 样品地质及测试

样品主要采自 I, II, IV 及 XI 号脉的探槽和钻孔岩心, 包括了无矿和含矿石英脉中的石英。无矿石英脉具有顺层产出的特点, 脉体常呈破碎的透镜状, 硫化物和毒砂、锑化物较少, 主要由白色或无色的纯净石英组成, 石英晶体较大, 石英之间有微弱重结晶, 有定向拉长和绢云母化、碳酸盐化现象, 所含流体包裹体为 A 型 ( $H_2O + NaCl$ ), 次为 C 型 ( $CO_2$  包裹体), 无 B 型 ( $H_2O + NaCl + CO_2$ )。含矿石英脉以细脉形式产于构造蚀变带中, 与毒砂、黄铁矿等金属矿物共生; 常显示定向结构, 矿物破碎、细粒化现象常见; 石英一般为烟灰色, 晶体较小, 绢云母化、碳酸盐化强烈, 局部辉锑矿含量高时石英呈块状; 在含矿石英脉或团块中, 可见细脉或浸染状硫化物, 局部可见放射状毒砂集合体; A、B、C 型流体包裹体均常见。不同类型流体包裹体特征参见表 1 和陈华勇等 (2004) 详细介绍。

表 1 萨瓦亚尔顿金矿不同类型流体包裹体的岩相学特征

Table 1 Petrography of different type fluid inclusions of the Sawayardun deposit

A 型: $H_2O + NaCl$	气、液两相盐水溶液, 气液比主要变化于 10% ~ 80%。在萨瓦亚尔顿金矿中占主导地位。可分为向液相均一的 A1 亚型和向气相均一的 A2 亚型, 但以 A1 亚型为主
B 型: $H_2O + NaCl + CO_2$	含 $CO_2$ 盐水溶液包裹体。多见三相共存现象, 即 $H_2O + NaCl$ (液) - $CO_2$ (气) - $CO_2$ (液)。约占 2%, 可分为向液相均一的 B1 亚型和向气相均一的 B2 亚型, 主要为 B2 亚型。
C 型: 富/纯 $CO_2$	纯 $CO_2$ 包裹体, 激光拉曼及测温证实其含少量 $CH_4$ , $N_2$ 等气体。多为气液两相, 少量为单相的气相或液相。约占总数 9%, 全部向气相均一, 密度较小。

17 件样品 41 个包裹体的激光拉曼光谱原位测试在中国地质大学 (武汉) 激光拉曼光谱实验室运用 MKI-1000 型激光拉曼光谱仪完成。

用于群体包裹体成分的石英和黄铁矿单矿物样品系在显微镜下挑选出的纯度大于 99%、粒度为 40 ~ 60 目的矿物颗粒。就石英样品而言, 还要放入 100mL 烧杯中, 加入 1 : 1 的  $HNO_3$ , 并在  $60^\circ C \sim 80^\circ C$  下加热 12h; 倒掉酸后, 用蒸馏水清洗样品 4 ~ 6 遍, 超声震荡 5min, 再用蒸馏水浸泡一周, 每天换水一次; 之后在  $60^\circ C$  恒温烘箱内烘干。

朱和平和王莉娟 (2000) 曾详细介绍了群体包裹体成分的测试方法和精度。其中, 气相成分的提取和测试过程为: 取 50mg 石英样品放入洁净的石英管内, 逐渐升温到  $100^\circ C$ , 抽真空, 待分析管内压低于  $6 \times 10^{-6} Pa$  后, 以  $1^\circ C / 3s$  的速度将爆裂炉内的温度逐渐升高到  $450^\circ C$ , 提取气体; 用四极质谱仪测试包裹体的气相成分, 四极质谱的型号为日本真空技

术株式会社生产的 RG202 型; 仪器重复测定精密度  $< 5\%$ 。液相成分的提取和测试过程为: 取石英样品 1g 在马福炉中爆裂 10min, 爆裂温度上限为  $450^\circ C$ ; 加入 5mL 蒸馏水、超声离心震荡 10min; 提取离心后的清液, 用离子色谱测量阴、阳离子成分; 测试仪器为日本岛津公司 (SHIMADZU) 生产的 HIC-6A 型 C-R5A 色谱处理机, 淋洗液是 2.5mM 邻苯二甲酸 - 2.4mM 三 (羟) 甲基氨基甲烷; 流速为阴离子 1.2mL/min, 阳离子 1.0mL/min; 重复测定精密度  $< 5\%$ 。按照上述方法, 作者对 27 件样品 (22 件石英和 5 件黄铁矿) 进行了群体包裹体气相成分四极质谱分析和液相成分离子色谱测试, 分析结果见表 2, 3 和 4 以及下文讨论。

### 4 矿物流体包裹体成分特征

#### 4.1 无矿石英与含矿石英

无矿与含矿石英不仅在矿物特征上有显著区别 (表 1), 而且其包裹体成分也有显著差异 (表 2, 3, 4; 图 3)。含矿石英中包裹体流体的阴、阳离子含量均高于无矿石英 (表 2 及图 3A), 其中  $SO_4^{2-}$  含量为后者的 6 ~ 7 倍。含矿石英包裹体  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$  含量高于无矿石英,  $Na^+$  相差不大。

在包裹体气相成分方面, 两类石英的  $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $CO$ 、 $O_2$ 、 $H_2S$  含量相近, 但无矿石英  $N_2$  和  $CO_2$  等则明显高于含矿石英 (表 3 及图 3B)。事实上, 包裹体岩相学和热力学研究

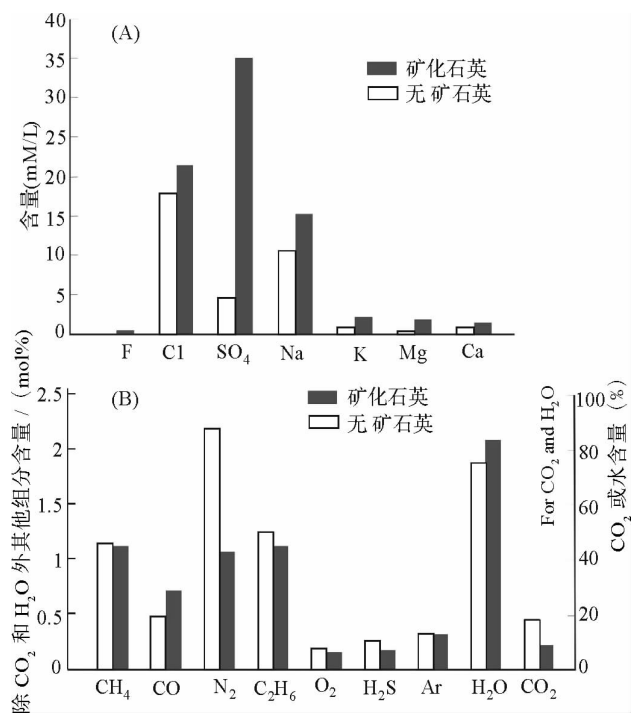


图 3 无矿与含矿石英流体包裹体液相 (A) 和气相 (B) 成分比较

Fig. 3 Aqueous (A) and gaseous (B) contents of FIs in barren and Au-bearing quartz separates

表2 萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体(群体)液相成分特征(mmol/L)

Table 2 Aqueous composition(mmol/L) of mass fluid inclusions of the Sawayardun deposit

样品	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl/SO <sub>4</sub>	M <sup>-</sup> /M <sup>+</sup>
I脉: 无石英	0.05	4.60	1.36	4.57	0.56	0.24	0.77	3.38	1.03
含石英	0.77	4.75	10.73	5.79	3.17	0.09	0.50	0.37	2.72
黄铁矿	b. d.	b. d.	<u>1282</u>	4.50	15.89	35.08	74.96	b. d.	6.6
II脉: 无石英	0.14	31.50	10.60	19.40	1.16	0.04	1.02	2.97	2.33
含石英	0.10	29.00	8.30	13.10	1.62	0.08	0.91	9.87	2.89
黄铁矿	b. d.	b. d.	<u>4950</u>	1.42	7.95	2.13	2.22	b. d.	548
IV脉: 无石英	0.14	24.40	3.98	12.30	0.64	0.07	0.72	6.13	2.10
含石英	0.33	29.60	66.72	23.13	1.41	0.25	2.12	1.88	5.67
黄铁矿	b. d.	11.10	<u>2900</u>	3.86	4.64	4.36	11.43	0.003	120
XI脉: 含石英	0.29	10.21	6.43	6.52	2.19	0.09	0.82	1.71	2.12
黄铁矿	b. d.	2.20	261	1.86	5.06	12.38	72.10	0.01	3.0

M<sup>+</sup>和M<sup>-</sup>分别为阳离子(团)和阴离子(团). b. d. 示低于测试最低限值。

作者于中国科学院地质地球物理研究所测试。下划线数据仅供参考。

表3 萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体(群体)气相成分(mol%)

Table 3 Gaseous composition(mol%) of mass fluid inclusions of the Sawayardun deposit

样品	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	N <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	Ar	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O/CO <sub>2</sub>	O/R
I脉: 无石英	1.72	80.06	0.29	0.94	1.51	0.27	0.14	0.37	14.71	8.55	5.56	3.23
含石英	1.17	85.86	1.35	0.55	2.15	0.19	0.19	0.45	8.01	7.85	11.1	1.37
II脉: 无石英	0.74	84.38	0	1.55	0.75	0.06	0.14	0.23	12.15	16.42	7.14	3.85
含石英	1.01	79.91	0	0.78	0.49	0.11	0.12	0.27	17.70	17.50	4.55	7.14
黄铁矿	0.22	82.58	0.80	0.79	0.51	1.18	0.12	0.10	13.71	62.32	5.88	6.25
IV脉: 无石英	0.71	55.48	0	2.22	0.63	0.03	0.18	0.27	40.48	57.01	1.37	11.1
含石英	0.93	89.49	0.54	1.18	0.71	0.13	0.17	0.24	6.63	7.17	12.5	1.89
黄铁矿	0.37	28.27	4.83	0.71	2.40	2.38	0.18	0.30	60.06	215.10	0.40	7.14
XI脉: 含石英	1.45	82.15	0	1.90	0.64	0.11	0.26	0.24	13.30	9.21	6.25	3.13
黄铁矿	0.63	71.34	5.55	0	3.39	0.8	0.13	0.32	17.84	28.32	4.00	1.92

计量单位为摩尔百分含量. R为还原性气体,包括CH<sub>4</sub>、CO、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、H<sub>2</sub>S、N<sub>2</sub>; O为氧化性气体,包括O<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>。

表4 萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体(单体)拉曼光谱成分(%)

Table 4 Laser-Raman analyses (%) of fluid inclusions of the Sawayardun deposit

产状 包裹体类型	无石英		含石英			I脉	II脉	IV脉	XI脉
	A	C	A	B	C				
H <sub>2</sub> O	100	50	100	100	50	100	100	94	91
CO <sub>2</sub>	86	100	70	100	100	100	86	60	90
CH <sub>4</sub>	71	50	82	100	100	100	86	80	90
N <sub>2</sub>	16	0	14	40	0	0	14	33	20
CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> < 1	20	0	42	8	0	0	0	41	32

表格中数据为各类主要成分在不同包裹体和矿带中出现频率的百分数(共17件样品41个单包裹体)。



(陈华勇等,2004)以及激光拉曼光谱测试表明,无矿石英的包裹体富含  $\text{CO}_2$ (表4)。B型包裹体只见于含矿石英,含一定数量的  $\text{CH}_4$ 及  $\text{N}_2$ 。含矿石英的多数包裹体  $\text{CO}_2/\text{CH}_4 < 1$ ,无矿石英只有少数包裹体具有此特征(表4)。

#### 4.2 含矿石英与黄铁矿

黄铁矿是最重要的载金矿物,与含矿石英共生,但二者所含包裹体成分也有显著差别(图4,表2)。首先,黄铁矿包裹体的阴、阳离子总量显著高于石英包裹体(表2)。其次,黄铁矿包裹体  $\text{F}^-$ 和  $\text{Cl}^-$ 含量甚微,远低于石英包裹体。再次, $\text{SO}_4^{2-}$ 含量远高于含矿石英包裹体,即使考虑热爆过程中黄铁矿分解使测得的  $\text{SO}_4^{2-}$ 含量偏高的话,由于黄铁矿包裹体其它阴离子含量均低于石英包裹体,而黄铁矿包裹体  $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 含量和阳离子总量均远高于石英包裹体,认为黄铁矿包裹体  $\text{SO}_4^{2-}$ 含量确实远高于石英包裹体,否则,阴阳离子之间难于电荷平衡。最后,中,黄铁矿包裹体的  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ 比值明显高于石英(表3)。

总之,石英包裹体成分接近于 Na-Cl 型,而黄铁矿包裹

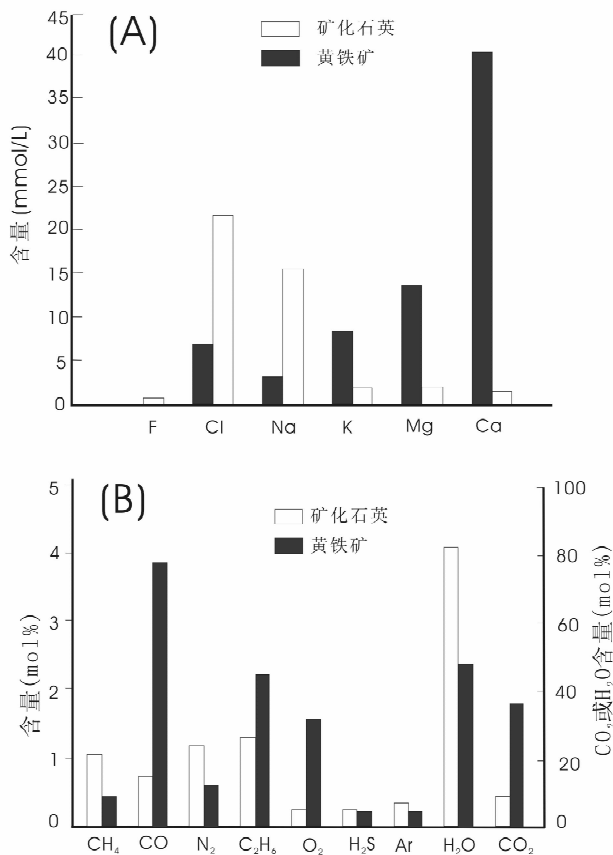


图4 含矿石英与黄铁矿流体包裹体液相(A)和气相(B)成分比较

Fig.4 Aqueous (A) and gaseous (B) contents of FIs in Au-bearing quartz and pyrite separates

体成分为 K- $\text{SO}_4$ 型。此现象与东秦岭上宫金矿(Chen *et al.*, 2006)、破山银矿、银洞坡金矿(张静等, 2006)流体成分特征类似,穆龙套金矿也存在类似现象,即富矿脉体包裹体  $\text{SO}_4^{2-}$ 含量也高于贫矿或无矿脉体包裹体(Graupner *et al.*, 2001; Wilde *et al.*, 2001; Kotov and Poritskaya, 1992),充分显示其可能属于普遍规律。

## 5 讨论: 金富集机制和找矿预测

### 5.1 流体混合与金沉淀富集

实验证明, Au-S 及 Au-Cl 络合物是金在流体中的主要形式, Au-Cl 络合物可稳定于中高温热液, Au-S 络合物, 包括  $[\text{Au}(\text{HS})_2]^-$ 、 $[\text{AuHS}(\text{H}_2\text{S})_3]^\circ$ 、 $[\text{AuHS}]^\circ$ 、 $[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{-3}$ , 多稳定于中低温热液(Seward, 1973; Gibert *et al.*, 1998; Loucks and Mavrogenes, 1999; Ulrich *et al.*, 1999)。萨瓦亚尔顿金矿含矿石英与黄铁矿包裹体的  $\text{SO}_4^{2-}$ 含量远高于  $\text{Cl}^-$ 含量, 而无矿石英则相反(图3和4), 说明在无矿石英沉淀时, 金主要以 Au-Cl 络合物形式存在于流体, Au-S 络合物较少; 在含矿石英和黄铁矿沉淀时, 金主要以 Au-S 络合物存在于流体, 而 Au-Cl 络合物较少。与此相吻合, 矿床地质和包裹体热力学研究已证明无矿石英发育在早阶段的中高温条件, 而含矿石英和黄铁矿大量沉淀于中阶段的中低温环境(陈华勇等, 2004)。据此确定, 从成矿早阶段到中阶段, 成矿流体成分和金存在形式均发生了重要改变, 突出地表现为 S 增多。考虑到: (1) 黄铁矿流体包裹体的 K 和  $\text{C}_2\text{H}_6$  含量高于含矿石英, 含矿石英又高于无矿石英, 而 K 和  $\text{C}_2\text{H}_6$  在围岩沉积物中含量较高; (2) 黄铁矿流体包裹体中 Ca 含量显著高于石英流体包裹体, 而 Ca 很容易来自碳酸盐沉积物或钙质粉砂岩; (3) 黄铁矿流体包裹体中  $\text{CO}_2$ 、CO 和  $\text{O}_2$  均高于石英(图3和4), 而这些组分通常在大气和大气降水热液中含有较高; (4) 赋矿围岩是富含碳质的碎屑岩-碳酸盐建造, 有利于流体萃取  $\text{C}_2\text{H}_6$  等有机质成分和 Ca、K、S 等组分; 因此认为, 循环于赋矿建造的大气降水热液, 其 Ca、K、S、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、CO、 $\text{C}_2\text{H}_6$  含量较高, 在中阶段大量混入到流体成矿系统, 导致流体成分改变, 金、硫化物等成矿物质大量沉淀。

值得说明, 赋矿断裂经历了压扭向张扭转变、成矿深度较浅等事实(陈华勇等, 2004)与上述流体混合成矿机制可以相互支持, 而流体混合成矿机制已被大量矿床研究所确定(Graupner *et al.*, 2001; Brown, 1998; 陈衍景和富士谷, 1992; Chen, 1998; Chen *et al.*, 2000, 2004a, 2005, 2006; Sui *et al.*, 2000; 张静等, 2004, 2005, 2006)。

### 5.2 流体沸腾与金沉淀富集

与世界多数脉状中温热液矿床(Jia and Kerrich, 2000; Cox *et al.*, 1995; McCuaig and Kerrich, 1998; Sibson *et al.*, 1988; Sui *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2005, 2006; 张静等,

2004, 2005) 一样, 萨瓦亚尔顿金矿形成过程也发生了流体不混溶或沸腾 (详见陈华勇等, 2004)。与无石英相比, 含石英捕获了较多的 B、C 型包裹体 (表 1), 且  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2$  含量较高, 特别是 B、C 型包裹体中  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2$  更为富集 (表 4), 这些特征可见于澳大利亚 Bendigo 等众多著名的中温脉状金矿中, 并被解释为流体沸腾的结果 (Jia *et al.*, 2000)。流体沸腾时,  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等大量逃离流体成矿系统, 使成矿流体浓缩, 甚至过饱和, 成矿物质快速沉淀 (Sui *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2005, 2006; 张静等, 2004, 2005);  $\text{H}_2\text{S}$  与液相分离并进入气相时,  $\text{Au}(\text{HS})_2^-$  等络阴离子失稳破坏, 金析出沉淀 (Naden and Shepherd, 1989; Cox *et al.*, 1995)。

与含石英相比, 黄铁矿流体包裹体中的  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  等含量较低 (图 4B),  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{Na}^+$  含量也明显较低, 但  $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  含量则明显较高 (表 3, 图 4), 表明黄铁矿沉

淀时的流体沸腾作用不如含石英沉淀时强烈, 似显含石英英沉淀于流体沸腾过程中, 而黄铁矿尾随含石英, 沉淀于流体沸腾后的“浓缩”溶液 (Matthai *et al.*, 1995)。事实上, 部分矿石样品可见含石英与钠长石共存, 含石英包裹体  $\text{Na}^+$  含量高于黄铁矿包裹体, 均证明含石英略早于黄铁矿沉淀的生成顺序。此外, 流体  $\text{H}_2\text{O}$  与围岩碳质的反应, 如,  $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$  (Cox *et al.*, 1995; Naden and Shepherd, 1989), 气体逸失即可造成流体“浓缩”。

尚需特别说明, 前面分别揭示黄铁矿主要沉淀于流体沸腾后的“浓缩”阶段和流体混合阶段, 这就在一定程度上显示流体混合略滞后于流体沸腾。此结论与一些矿床流体包裹体热力学和同位素地球化学研究结果一致 (Chen *et al.*, 2006; 陈华勇等, 2004; 张静等, 2004), 并可由图 5 示意, 详细阐释见陈衍景等 (2004) 和李晶等 (2004)。

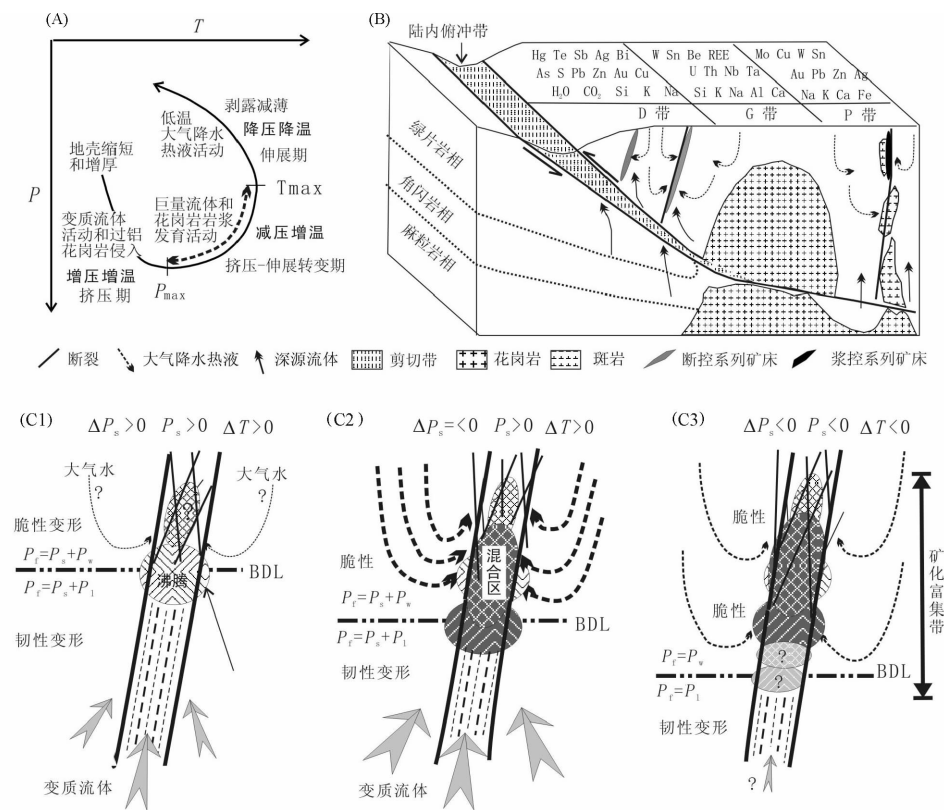


图 5 造山型矿床成矿流体系统沸腾-混合模型及其构造约束 (引自陈衍景等, 2004)

图 (A) 示碰撞造山带  $P$ - $T$ - $t$  轨迹, 显示碰撞过程包括 3 个地球动力学阶段及其  $P$ - $T$  条件; 图 (B) 示造山型矿床的成矿构造模式, 显示陆内俯冲、赋矿构造、花岗岩和斑岩之间的关系; 图 (C) 示 D 带矿床的流体成矿演化与 BDL 和构造附加压力的关系, 图 C1、C2 和 C3 分别表示挤压、挤压向伸展转变和伸展阶段的流体活动情况。BDL 为脆韧性转换面 (带);  $P_f$  为流体压力,  $P_s$  为应力或构造附加压力,  $P_1$  为静岩压力,  $P_w$  为静水压力。  $\Delta T$  和  $\Delta P_s$  分别表示温度和构造附加压力随时间的变化值; D 带为脉状造山型热液矿床, G 带为花岗岩基及其有关热液矿床, P 带为斑岩及其有关矿床

Fig. 5 The boiling-mixing model for orogenic type metallogenic fluid-system and its tectonic control (from Chen *et al.*, 2004)

(A) The  $P$ - $T$ - $t$  path for collisional orogen showing three-stage geodynamic process and their  $P$ - $T$  conditions. (B) The tectonic model for orogenic type deposit (CMF model), showing the relationships between A-type subduction, ore-hosting structures, granitoids and porphyries. (C) Cartoons showing relationships between fluid flow in D-zone, BDL and structural superpressure. C1, C2 and C3 show the scenarios of three stages of  $T$ - and  $P$ -increasing,  $T$ -increasing and  $P$ -decreasing, and  $T$ - and  $P$ -decreasing, respectively. BDL stands for brittle-ductile transition level.  $P_f$  is fluid pressure;  $P_s$  is tectonic superpressure;  $P_1$  is lithostatic pressure;  $P_w$  is the hydrostatic pressure;  $\Delta T$  and  $\Delta P_s$  stand for changes in temperature and tectonic superpressure with time, respectively. D, orogenic-mesothermal deposits zone; G, granite batholith and associated deposits zone; P, porphyry and associated deposits zone

### 5.3 不同矿脉成矿性差异及勘探意义

萨瓦亚尔顿矿区的 I、II、IV 和 XI 矿化带目前被认为是最主要的含矿带(图 2)。已有勘探工程表明,IV 带规模最大,品位最高;其他 3 条矿化带尚未钻探,深部情况不清。包裹体热力学研究显示,XI 带与 IV 带近似,而 I 矿化带则偏离较大(陈华勇等,2004)。本文研究显示,IV 带流体包裹体中  $\text{SO}_4^{2-}$  明显高于其他矿化带,多数阳离子含量也较高(图 6A),表明其含矿性优于其他带;IV 带含石英流体包裹体气液相成分与 XI 及 II 带近似,与 I 带相差较大(图 6,表 4),表明 XI、II 带含矿性也较好。通常,包裹体  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  等含量高时,指示流体沸腾作用较强,IV 带含石英英中包裹体  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  等含量并不太高,表明流体沸腾并非萨瓦亚尔顿金矿最重要的成矿机制;黄铁矿包裹体  $\text{CO}_2$  含量高、 $\text{H}_2\text{O}$  含量低(图 7),指示外来富碳流体混入较多,有利于金等成矿物质富集沉淀。XI 带黄铁矿和含石英英包裹体气相成分与 IV 带相似,液相成分中  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等离子含量高于 IV 带,表明 IV 带具有较好的勘探前景。各矿化带含石英英及黄铁矿所含成矿流体成分的比较显示:II 带与 IV 带最相似,应有勘探前景。相对而言,I 带成矿流体多方面的特征与 IV 带差别较大,尽管其已被前人作为含矿带,但我们认为不宜作为勘探重点。

## 6 主要认识

(1) 萨瓦亚尔顿金矿流体系统在早阶段为 Na-Cl 型,中晚阶段为 K- $\text{SO}_4$  型,且中晚阶段 Ca、 $\text{C}_2\text{H}_6$  等含量增高,总体显示从早期中高温变质流体向晚期中低温大气降水热液演化的特征;金在早阶段流体系统中主要以 Au-Cl 络合物存在,中晚阶段以 Au-S 络合物存在。

(2) 含石英英与无石英英的包裹体成分存在明显差异,前者富 S 和多种阳离子。流体成分差异与矿物特征的差异相结合,可作为寻找含石英英脉的标志。

(3) 黄铁矿和含石英英都是重要赋金矿物,但其包裹体成分不同,前者气相组分含量低、离子浓度高,表明二者沉淀时间有差异,捕获了不同性质的成矿流体;含石英英形成于流体沸腾过程,而黄铁矿由沸腾后的浓缩流体形成,且沉淀时伴随了流体混合作用。即,黄铁矿尾随含石英英沉淀,大气降水热液大量混入尾随于流体系统沸腾。

(4) 以勘探程度高、矿化较好的 IV 矿化带作为参照,发现 XI 及 II 矿化带与 IV 带的成矿流体特征类似,值得详细勘探评价;相反, I 矿化带与 IV 带存在显著差异,不宜作为勘探重点。

(5) 萨瓦亚尔顿金矿成矿流体成分与穆龙套金矿十分相似,也与东秦岭银洞坡金矿类似,应为碳质层控的造山型金矿床或穆龙套型金矿。萨瓦亚尔顿金矿与、库姆托尔、吉老、穆龙套等金矿一起,共同构成了规模巨大的“南天山穆龙套型金矿带”或碳质层控造山型金矿带。

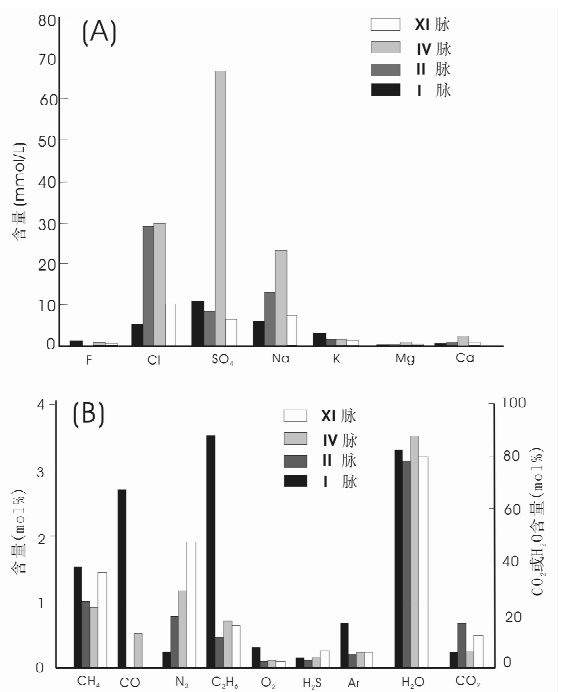


图 6 不同矿脉含石英英流体包裹体液相(A)和气相(B)成分比较

Fig. 6 Aqueous (A) and gaseous (B) contents of FIs in Au-bearing quartz separates of various veins

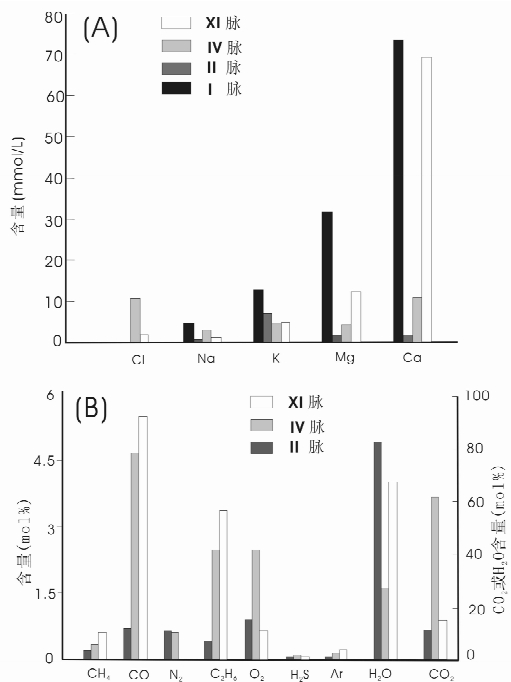


图 7 不同矿脉黄铁矿流体包裹体液相(A)和气相(B)成分比较

Fig. 7 Aqueous (A) and gaseous (B) contents of FIs in pyrite separates of various veins

**致谢** 野外工作得到郑明华、刘家军、龙训荣等教授和新疆地质二大队尹怀信高工的帮助；实验室研究得到倪培、凌鸿飞、魏綺英、吕新彪等教授和高秀丽老师、朱和平、何谋春高级工程师的指导；叶锦华、王立本研究员提供了部分资料；表示衷心谢意！

## References

- Berger B. 1998. The Muruntau gold deposit, Uzbekistan. In: Porter, TM (ed). Porphyry and Hydrothermal Copper and Gold Deposits ( A Global Perspective. Adelaide: PGC Publishing, 213 – 221
- Brown PE. 1998. Fluid inclusion modeling for hydrothermal systems. *Reviews in Economic Geology*, 10: 151 – 171
- Chen HY, Bao JX, Zhang ZJ, Liu YL, Ni P and Ling HF. 2000. Isotope indication to source of ore materials and fluids of the Wangfeng gold deposit in Tianshan; A case study of metallogenesis during collisional orogenesis. *Science in China, Series D*, 43 ( supplement ): 156 – 166
- Chen HY, Chen YJ, Ni P and Zhang ZJ. 2004. Fluid inclusion study of the Sawayardun Au deposit in southern Tianshan, China; Implication for ore genesis and exploration. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 46 – 54 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 1998. Fluidization model for continental collision in special reference to study on oreforming fluid of gold deposits in the eastern Qinling mountains, China. *Progress in Natural Sciences*, 8: 385 – 393
- Chen YJ and Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan. Beijing: Chinese Seismological Press, 234 (in Chinese)
- Chen YJ, Lin ZJ, Pirajno F, Li J and Wang HH. 2004b. Hydrothermal metallogeny of the Shanggong gold deposit: Study on the stable isotope geochemistry. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 13 – 21 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Pirajno F, Qi JP, Li J and Wang HH. 2006. Ore geology, fluid geochemistry and genesis of the Shanggong gold deposit, eastern Qinling Orogen, China. *Resource Geology*, 56(2): 99 – 116
- Chen YJ, Pirajno F and Sui YH. 2004a. Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, Henan, China: a case study of orogenic silver deposits. *Mineralium Deposita*, 39: 560 – 575
- Chen YJ, Pirajno F and Sui YH. 2005. Geology and D-O-C isotope systematics of the Tieluping silver deposit, Henan, China: Implications for ore genesis. *Acta Geologica Sinica*, 79: 106 – 119
- Cole A, Wilkinson JJ, Halls C *et al.* 2000. Geological characteristics, tectonic setting and preliminary interpretation of Jilau gold-quartz vein deposit, Tajikistan. *Mineralium Deposita*, 35: 600 – 618
- Cox SF, Sun SS, Etheridge MA *et al.* 1995. Structural and geochemical controls on the development of turbidite-hosted gold quartz vein deposits, Wattle Cully mine, central Victoria, Australia. *Economic Geology*, 90: 1722 – 1746
- Gibert F, Pascal ML and Pichavant M. 1998. Gold solubility and speciation in hydrothermal solutions; experimental study of the stability of hydrosulphide complex of gold (AuHS<sup>o</sup>) at 350 to 450°C and 500 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 2931 – 2947
- Graupner T, Kempe U, Spooner ETC *et al.* 2001. Microthermometric, Laser Raman Spectroscopic, and volatile-ion chromatographic analysis of hydrothermal fluids in the Paleozoic Muruntau Au-bearing quartz vein ore field, Uzbekistan. *Economic Geology*, 96: 1 – 23
- Ivanove S. 2000. Constrains on the fluid evolution at Kumtor deposit. GSA 2000 presentation. (<http://homepage.usask.ca/~smi454/project/articles>)
- Jia Y, Li X and Kerrich R. 2000. A fluid inclusion study of Au-bearing quartz vein systems in the central and north Deborah deposits of the Bendigo gold field, Central Victoria, Australia. *Economic Geology*, 95: 467 – 495
- Kotov NV and Poritskaya LG. 1992. The Muruntau gold deposits: Its geological structure, metasomatic mineral associations and origin. *International Geology Review*, 34: 77 – 87
- Li J, Chen YJ and Liu YX. 2004. Typomorphic characteristics of pyrite from lode gold deposits in North China craton: implications for fluid mineralization. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 93 – 102. (in Chinese with English abstract)
- Liu JJ, Zheng MH, Long XR *et al.* 1999. R-dating the host strata of the Sawayardun gold deposit, Xinjiang and its significance. *Chinese Science Bulletin*, 44(6): 653 – 656 (In Chinese)
- Liu JJ, Zheng MH, Long XR *et al.* 2001. The metallogenic characteristics of the Sawayardun gold deposit, Xinjiang and its comparison with the Muruntau gold deposit. In: Chen YJ, Zhang J and Lai Y (eds). *Continental Geodynamics and Metallogeny*. Beijing: China Seismological Press, 177 – 187 (in Chinese)
- Loucks RR and Mavrogenes JA. 1999. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions. *Science*, 284: 2159 – 2163
- Matthai SK, Hendy RW and Heinrich CA. 1995. Gold precipitation by fluid mixing in Bedding-parallel fractures near carbonaceous slates at the Cosmopolitan Howley gold deposit, Northern Australian. *Economic Geology*, 90: 2123 – 2141
- McCuaig TC and Kerrich R. 1998. P-T-t-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: Evidence from alteration systematics. *Ore Geology Reviews*, 12: 381 – 453
- Naden J and Shepherd TJ. 1989. Role of methane and carbon dioxide in gold depositions. *Nature*, 342: 793 – 795
- Rui ZY, Goldfarb RJ, Qiu YM *et al.* 2002. Paleozoic-early Mesozoic gold deposits of the Xinjiang Autonomous Region, northwestern China. *Mineralium Deposita*, 37: 393 – 418.
- Seward TM. 1973. Thio complexes of gold and the transport of gold in hydrothermal ore solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37: 370 – 399
- Sibson RH, Robert F and Poulsen H. 1988. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, 16: 551 – 555
- Sui YH, Wang HH, Gao XL, Chen HY and Li Z. 2000. Ore fluid of the Tieluping silver deposit of Henan Province and its illustration of the tectonic model for collisional petrogenesis, metallogenesis and fluidization. *Science in China Series D*, 43 ( supplement ): 108 – 121
- Ulrich T, G nther D and Heinrich CA. 1999. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits. *Nature*, 399: 676 – 679
- Wilde AR, Layer P, Mernagh T *et al.* 2001. The giant Muruntau gold deposit: Geologic, geochronologic, and fluid inclusion constraints on ore genesis. *Economic Geology*, 96: 633 – 644
- Ye JH, Ye QT, Wang J *et al.* 1999. Study of the geological and geochemical characteristics and metallogenic dynamics of the Sawayardun gold (Sb) deposit. *Mineral Deposits*, 18: 63 – 72 (in Chinese)
- Ye QT, Wu YP, Fu XJ *et al.* 1999. Metallogenic Conditions and

- Prediction of Gold and Nonferrous Metal Deposits in Southwest Tianshan. Beijing: Geological Publishing House, 201 (in Chinese)
- Zhang J, Chen YJ, Li GP, Li ZL and Wang ZG. 2004. Characteristics of ore geology and fluid inclusion of the Yindonggou silver deposit, Neixiang county, Henan Province: implication for metallogenic type. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 55 - 64 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Chen YJ, Chen HY, Wan SQ, Zhang G and Wang JM. 2006. Isotope geochemistry of the Yindongpo gold deposit, Tongbai County, Henan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 2551 - 2560 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Yan GP, Ye L, Li GP, Li Z L and Wang ZG. 2005. The C-D-O isotope systematics of the Yindonggou Ag-dominated poly-metals deposit in the Neixiang county, Henan province. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 1359 - 1364. (in Chinese with English abstract)
- Zhu HP and Wang LJ. 2000. Determining gaseous composition of fluid inclusions with Quadrupole Mass Spectrometer. *Science in China Series D*, 31: 586 - 590 (in Chinese)
- 陈华勇, 陈衍景, 倪培, 张增杰. 2004. 南天山萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体研究. *矿物岩石*, 24(3): 46 - 54
- 陈衍景, 林治家, Pirajno F, 李晶, 王海华. 2004. 东秦岭上宫金矿流体成矿作用: 稳定同位素地球化学研究结果. *矿物岩石*, 24(3): 13 - 21
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 234
- 李晶, 陈衍景, 刘迎新. 2004. 华北克拉通若干脉状金矿的黄铁矿标型特征与流体成矿过程. *矿物岩石*, 24(3): 93 - 102
- 刘家军, 郑明华, 龙训荣等. 2001. 新疆萨瓦亚尔顿金矿床成矿特征及其与穆龙套型金矿床的异同性. 见: 陈衍景, 张静, 赖勇编. 大陆动力学与成矿作用. 北京: 地震出版社, 177 - 187
- 刘家军, 郑明华, 龙训荣等. 1999. 新疆萨瓦亚尔顿金矿赋矿地质时代的重新厘定及其意义, *科学通报*, 44(6): 653 - 656
- 叶锦华, 叶庆同, 王进等. 1999. 萨瓦亚尔顿金(锑)矿床地质地球化学特征与成矿机理探讨, *矿床地质*, 18(1): 63 - 72
- 叶庆同, 吴一平, 傅旭杰等. 1999. 西南天山金和有色金属矿床成矿条件和成矿预测. 北京: 地质出版社, 201
- 张静, 陈衍景, 陈华勇, 万守全, 张冠, 王建明. 2006. 河南省桐柏县银洞坡金矿床同位素地球化学. *岩石学报*, 22(10): 2551 - 2560
- 张静, 陈衍景, 李国平, 李忠烈, 王志光. 2004. 河南内乡县银洞沟银矿地质和流体包裹体特征及成因类型. *矿物岩石*, 24(3): 55 - 64
- 张静, 燕光谱, 叶霖, 李国平, 李忠烈, 王志光. 2005. 河南内乡县银洞沟银多金属矿床碳-氢-氧同位素地球化学. *岩石学报*, 21(5): 1359 - 1364
- 朱和平, 王莉娟. 2000. 四级质谱测定流体包裹体中的气相成分. *中国科学 D 辑*, 31: 586 - 590

#### 附中文参考文献