

# 南天山萨瓦亚尔顿金矿床稀土微量元素特征及其成因意义\*

陈华勇<sup>1</sup> 张莉<sup>1</sup> 李登峰<sup>1</sup> 张增杰<sup>2</sup>

CHEN HuaYong<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, LI DengFeng<sup>1</sup> and ZHANG ZengJie<sup>2</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

2. 中国地质科学院矿床研究所, 北京 100037

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2012-08-20 收稿, 2012-11-30 改回.

Chen HY, Zhang L, Li DF and Zhang ZJ. 2013. Characteristics of rare earth and trace elements of the Sawayaerdun gold deposit, Southwest Tianshan: Implications for ore genesis. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 159–166

**Abstract** The Sawayaerdun gold deposit in Wujia, Xinjiang was discovered in the early 1990's and is considered the first Muruntau-type gold deposit in the Chinese Tianshan. Gold mineralization occurred in Triassic and associated with quartz veins, showing similarities to the Muruntau gold deposit. Three major hydrothermal events can be identified at Sawayaerdun: An early barren quartz vein stage, middle stage quartz veins with pyrite and mineralization and late carbonate (-quartz) veins. The contents of rare earth elements (REE) and trace elements in early barren quartz veins are lower than those of mineralized quartz. REE distribution patterns of the fluids trapped in mineralized quartz are generally consistent with LREE enrichment and Eu positive anomaly, which probably indicates high Ca in fluids or a relatively reduced environment. High Pb in ore-forming fluids and leaching of Ca and Pb from the host rock may suggest the reaction between fluids and host rock. The precipitation of metals may be associated with fluid mixing, which is not identified in early barren quartz due to the low contents of REE and trace elements. Fluids in mineralized quartz from the largest IV ore zone have higher REE and trace elements than those of other ore zones, probably indicating a stronger fluid mixing. The II ore zone shows more similarities to zone IV than others. Characteristics of REE and trace elements of the Sawayaerdun gold deposit indicate that host rock is an important source for ore-forming fluids and fluid mixing played a critical role during mineralization, which is consistent with previous fluid inclusion and isotope studies and comparable with the general characteristics of orogenic gold deposits.

**Key words** Rare earth and trace elements; Ore-forming fluids; Fluid compositions; Fluid mixing; Orogenic gold deposit

**摘要** 萨瓦亚尔顿金矿位于新疆乌恰县的南天山构造带中,是我国20世纪90年代发现的第一例“穆龙套型”金矿。矿床形成于印支期,矿化与石英脉密切相关,显示了与穆龙套金矿的相似性。成矿流体演化经历了早期高温无矿化石英阶段,中期中低温矿化石英阶段,晚期低温碳酸盐脉阶段。早期无矿石英的稀土及微量元素含量均低于矿化石英。矿化石英包体中流体的稀土元素配分模式显示较一致的轻稀土富集和Eu正异常,指示流体中较高的钙离子或相对还原环境;流体中Pb含量较高,而蚀变强烈的围岩则显示出明显的Ca和Pb流失,这表明成矿流体可能部分来源于与围岩发生交代作用的蚀变流体,矿质沉淀可能与流体混合作用相关。早期石英包体中流体的稀土和微量元素含量较低则指示早期阶段可能未发生流体混合。萨瓦亚尔顿IV号矿脉为最大矿带,其含矿石英包体中流体微量元素一般高于其它矿脉石英,可能显示较强的流体混合及成矿作用。II号矿脉在流体稀土及微量元素含量上显示与IV脉更为相似。萨瓦亚尔顿金矿稀土微量元素研究表明围岩组分可能为成矿流体主要来源之一,而流体混合则为成矿重要机制,这与前期流体包裹体及同位素研究结论一致,也符合造山型金矿的一般特征。

\* 本文受中国科学院百人计划项目(2012-2015)、国土资源部358项目“环塔里木前寒武纪成矿作用”(1212011140056)和国家支撑计划项目专题(96-915-03-05)联合资助。

第一作者简介:陈华勇,男,1976年生,博士,研究员,从事矿床成因研究, E-mail: huayongchen@gig.ac.cn

关键词 稀土及微量元素; 成矿流体; 流体成分; 流体混合; 造山型金矿  
中图法分类号 P595; P618.51

## 1 引言

中国周边地区南天山造山带中的穆龙套 (Muruntau) 金矿 (乌兹别克斯坦, 约 4300t 金; Goldfarb *et al.*, 2001) 和库姆托尔 (Kumtor) 金矿 (吉尔吉斯斯坦, 约 280t 金; Ivanove, 2000) 等超大型金矿的相继发现, 激发了我国地质学家在我国天山构造带寻找同类金矿 (富含碳质, 被称为穆龙套型) 的热情, 并直接导致 20 世纪 90 年代新疆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; Liu *et al.*, 1999; 刘家军等, 2001) 研究了萨瓦亚尔顿金矿的地质特征、成矿时代和矿床成因, 并初步认为它属于穆龙套型金矿。近年来流体包裹体和同位素的研究表明萨瓦亚尔顿金矿属于中温热液矿床 (110 ~ 340°C), 流体富含 CO<sub>2</sub> 并经历了多阶段流体演化 (陈华勇等, 2004, 2007; Liu *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2012a, b), 与穆龙套金矿类似 (Cole, 2000; Wilde *et al.*, 2001; Graupner *et al.*, 2001), 具有典型的造山带型金矿特征 (陈华勇等, 2004; 陈衍景等, 2007)。稀土及微量元素在成矿流体中含量虽少, 但由于其分布的特殊性及稳定的化学性质, 常能对物质来源及流体演化有重要的指示作用, 尤其是近年来, 稀土及微量元素分析越来越多地运用到成矿流体研究中, 并逐渐开拓出一些新的测试手段和方法, 如石英中群体包裹体稀土微量元素成分分析 (Su *et al.*, 1998; 范建国等, 2000) 及单包裹体成分测试 (Ulrich *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2006)。本文对萨瓦亚尔顿金矿的围岩、矿化石英及其所含包裹体中的成矿流体进行了系统的稀土-微量元素分析测试, 从而进一步揭示和完善萨瓦亚尔顿金矿的成因模式。

## 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 1) 南天山造山带最终形成于晚古生代晚期塔里木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 (Liu *et al.*, 1999; 刘家军等, 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。

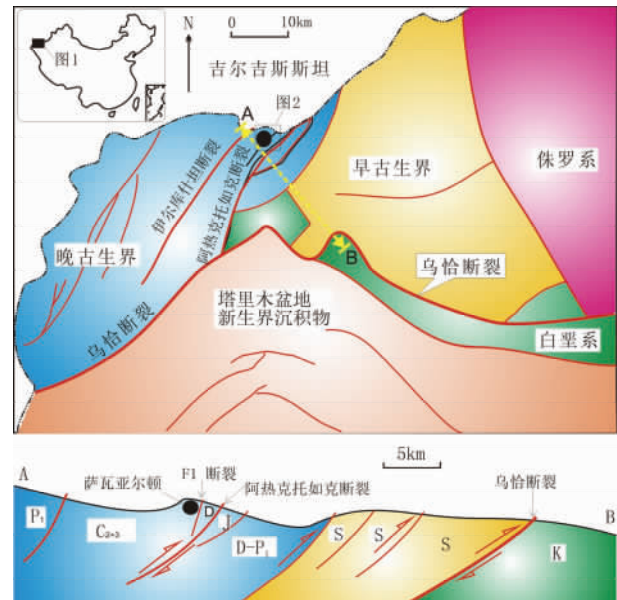


图 1 萨瓦亚尔顿金矿及邻区区域地质建造 (据陈华勇等, 2007)

K-白垩纪; J-侏罗纪; P<sub>1</sub>-早二叠纪; C-石炭纪; D-泥盆纪; S-志留纪

Fig. 1 Regional geology of the Sawayaerdun gold deposit (modified after Chen *et al.*, 2007)

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 1), 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 (郑明华等, 2001)。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、图 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)。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; 中阶段绢云母化 + 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 (陈华勇等, 2004)。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; 矿石结构以网脉状、角砾状和浸染状为主 (Liu *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2007)。<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 及 Rb-Sr 定年表明金矿化发生于晚印支期 (206 ~ 213Ma, Liu *et al.*,

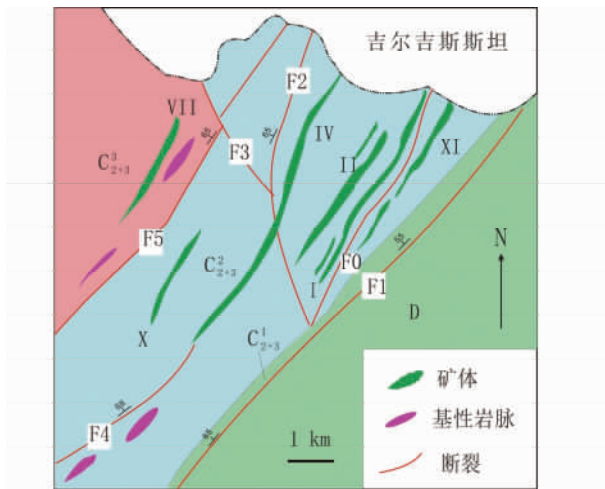


图2 萨瓦亚尔顿金矿地质简图 (据陈华勇等, 2007)

C<sub>2+3</sub>-中晚石炭纪含碳质沉积碎屑岩; D-泥盆纪结晶灰岩

Fig.2 Geological map of the Sawayaerdun gold deposit (modified after Chen *et al.*, 2007)

2007)。

### 3 样品采集及测试

进行稀土及微量元素成分研究的样品包括: 4 件来自 I, II, IV 及 XI 矿脉的石英样品。分别为一件早期无矿石英 SW57 (I 带); 三件矿化石英, SW17 (II 带), SW3 (IV 带) 及 SW80 (XI 带)。2 件砂岩-砂页岩质成矿围岩样品, SW24 (无蚀变) 及 SW43 (蚀变)。2 件灰岩质外层围岩样品, SW15 (F1 断层南侧泥盆纪结晶灰岩) 及 SW14 (赋矿岩层底部石炭纪生物碎屑灰岩)。

全岩样品先用蒸馏水清洗, 再粉碎, 缩分, 研磨至 200 目以下的粉末备用。矿化石英先由双目镜下挑出, 用 1:1 盐酸低温煮 30min, 清洗后用浓硝酸浸泡 12h, 清洗烘干后与分析纯酒精一起在玛瑙研钵中研磨至 200 目以下的粉末备用。全岩和石英样品前处理采用酸溶法。用于石英包裹体成分测试的样品先用 1:1 盐酸低温煮 30min, 清洗后用浓硝酸浸泡 12h, 然后在爆裂仪中以 500℃ 的温度爆裂 15min 左右, 用 2% 的稀硝酸提取包裹体的液相成分后在 ICP-MS 上进行分析测试。以 In 作内标, 分析精度可达 10<sup>-9</sup>。并以标准样品和重复测试的样品数据控制分析质量。所有分析工作中科院地质与地球物理研究所资源探查研究重点实验室完成。

### 4 分析测试结果

#### 4.1 石英矿物、流体包裹体及围岩稀土组分特征

稀土组分测试结果见表 1 及图 3。砂页岩质成矿围岩的稀土总量明显高于矿区外层灰岩。其中发生蚀变作用的成

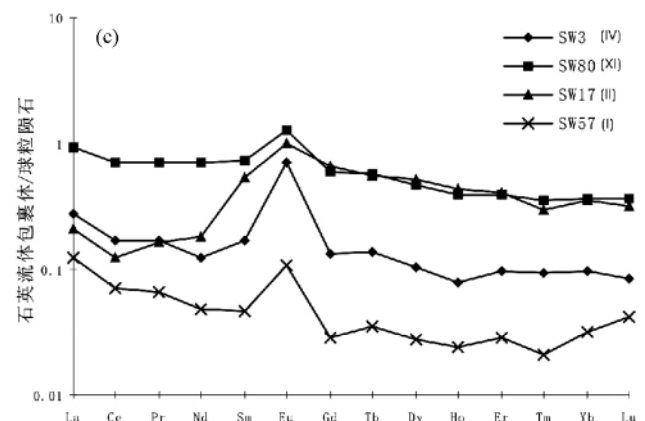
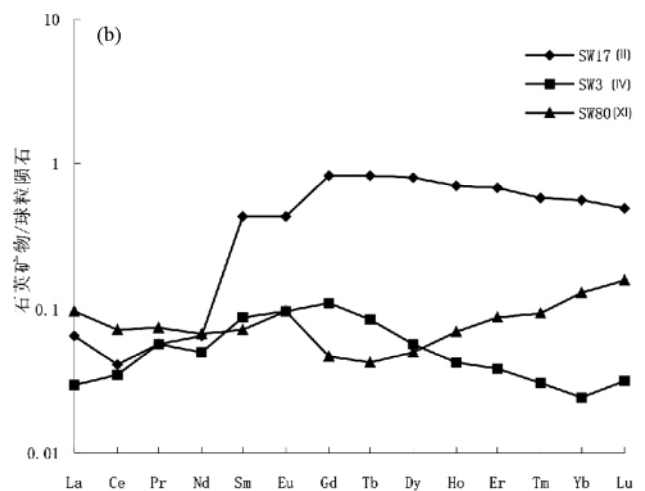
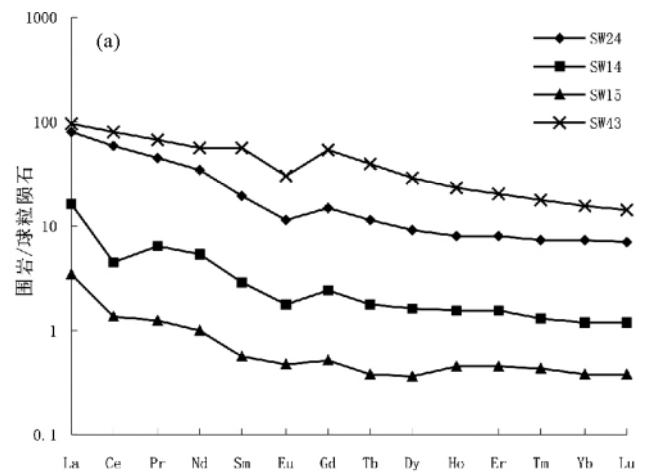


图3 萨瓦亚尔顿金矿围岩 (a)、石英 (b) 及石英包裹体所含流体 (c) 的稀土元素配分特征

Fig.3 REE distribution patterns of host rock (a), quartz (b) and fluids in quartz (c)

矿围岩 (SW43) 稀土含量最高, 而距矿体最远的 F1 断层南侧泥盆纪结晶灰岩 SW15 稀土含量最低 (图 3a)。所有围岩样品均显示轻稀土富集和弱 Eu 负异常的特点, 且成矿围岩比

表1 萨瓦亚尔顿金矿稀土及微量元素组分( $\times 10^{-6}$ )Table 1 REE and trace element compositions of the Sawayaerdun gold deposit ( $\times 10^{-6}$ )

Sample	SW3F	SW80F	SW17F	SW57F	SW24R	SW14R	SW15R	SW43R	SW17Q	SW57Q	SW3Q	SW80Q
La	0.085	0.286	0.063	0.038	24.47	5.089	1.063	30.26	0.021	0	0.009	0.030
Ce	0.134	0.576	0.098	0.058	47.561	3.644	1.09	64.96	0.033	0	0.028	0.058
Pr	0.020	0.084	0.020	0.008	5.532	0.799	0.151	8.095	0.007	0.001	0.007	0.009
Nd	0.073	0.421	0.108	0.029	20.31	3.175	0.610	34.23	0.039	0	0.031	0.040
Sm	0.033	0.144	0.104	0.009	3.811	0.554	0.112	10.98	0.083	0.001	0.017	0.014
Eu	0.052	0.093	0.073	0.008	0.838	0.133	0.034	2.188	0.032	0	0.007	0.007
Gd	0.033	0.153	0.171	0.007	3.838	0.623	0.133	13.98	0.217	0	0.028	0.012
Tb	0.006	0.027	0.026	0.002	0.539	0.086	0.018	1.863	0.042	0	0.004	0.002
Dy	0.032	0.151	0.168	0.009	2.987	0.514	0.116	9.179	0.255	0	0.018	0.016
Ho	0.005	0.028	0.031	0.002	0.585	0.114	0.032	1.677	0.051	0	0.003	0.005
Er	0.020	0.082	0.085	0.006	1.655	0.331	0.093	4.349	0.143	0.001	0.008	0.018
Tm	0.003	0.011	0.010	0.007	0.237	0.043	0.014	0.564	0.019	0	0.001	0.003
Yb	0.020	0.077	0.072	0.007	1.552	0.254	0.079	3.311	0.117	0	0.005	0.027
Lu	0.003	0.012	0.010	0.001	0.228	0.039	0.012	0.454	0.016	0	0.001	0.005
Li	6.807	1.316	3.804	1.225	20.25	1.060	0.404	32.03	1.161	0.654	0.592	2.405
Be	0.071	0.079	0.092	0.081	0.486	0	0	1.234	0	0	0	0.024
Sc	0.383	0.411	0.520	0.122	5.242	0.419	0.215	10.759	0.102	0	0.011	0.069
V	1.640	0.894	0.869	0.163	40.362	1.948	1.277	73.70	0.408	0.079	0.185	0.537
Co	0.889	0.572	0.097	0.157	3.365	0.774	0.661	15.12	0	0	0.112	0
Ni	3.624	0.821	0	0.154	8.758	5.344	5.615	33.19	0	0	0	0
Cu	4.905	4.084	22.411	6.860	8.509	2.34	2.567	20.39	0	0.387	2.526	0
Ga	0.162	0.120	0.264	0.044	7.869	0.333	0.193	15.41	0.158	0.007	0.034	0.094
Rb	7.799	3.081	7.202	1.099	39.27	1.593	0.688	118.5	1.621	0.159	0.464	0.851
Y	0.191	1.011	0.977	0.055	15.81	5.196	2.04	44.74	1.565	0.001	0.084	0.142
Zr	1.159	0.541	0.233	0.286	91.25	1.846	0.526	124.4	0	0	0	9.501
Nb	0.005	0.008	0	0	7.322	0.194	0.094	8.775	0.016	0.01	0.017	0.042
Cs	41.40	9.421	18.74	4.167	1.770	0.097	0.019	5.337	0.203	0.07	0.227	0.103
Ba	210.7	104.8	72.62	22.38	137.7	12.62	20.74	200.3	3.111	0	2.101	8.771
Hf	0.026	0.012	0.004	0.013	2.678	0.050	0.008	3.631	0	0	0	0.355
Ta	0.004	0.002	0.005	0.002	0.557	0.015	0.005	0.689	0.002	0.002	0.002	0.003
Tl	0.118	0.050	0.137	0.016	0.205	0.012	0.006	0.577	0.011	0.001	0.004	0.005
Pb	219.4	26.96	250.0	7.011	19.39	8.317	18.56	6.180	2.457	0.362	1.455	22.04
Bi	0.038	0.018	0.014	0.009	0.123	0.011	0.003	0.196	0	0	0	0.008
Th	0.045	0.140	0.030	0.025	8.094	0.253	0.093	9.721	0.023	0.001	0.034	0.046
U	0.031	0.072	0.014	0.027	1.428	0.399	0.343	2.034	0.009	0.005	0.006	0.084

注: F-石英流体包裹体; R-全岩; Q-石英

外围灰岩更为明显。矿化石英矿物的稀土配分模式变化较大,但都表现出不同程度的重稀土富集,无明显的Eu异常。其中IV和XI矿脉的石英稀土含量和配分模式较相似,而II矿脉石英的稀土含量明显高于其它矿脉,且显示极强的重稀土富集(图3b)。与石英矿物不同的是,石英所含的流体包裹体稀土配分模式较为一致,均显示轻稀土富集和较强的Eu正异常特征, I脉无矿石英所含流体的稀土含量最低(图3c)。

#### 4.2 石英矿物、流体包裹体及围岩微量元素组分特征

除稀土元素之外,还对Li、Cu、U等21种微量元素进行了测试。由于仪器及标样原因,部分微量元素,如Au、Ag、Sb和As等未能检测。测试结果见表1及图4。砂岩等成矿围岩的微量元素含量一般高于矿体外围的灰岩,尤其是V、Ni、Rb、Zr、Ba等(图4a),而具热液蚀变的砂岩(SW43)微量元素含量也高于未蚀变围岩(SW24)。来自4条主要矿脉的石英

微量元素含量较为一致,但Cu、Zr、Ba、Pb等差异明显(图4b)。IV带石英(样品SW3)这几种元素的含量远高于其他矿脉石英。I带无矿石英的各种微量元素含量均较低,与其稀土元素含量一致(多低于检测限,表1)。石英包体中流体的微量元素含量大都低于 $50 \times 10^{-6}$ (图4c)。各成矿带石英包体流体微量元素含量相近,但IV带流体具有较高的Ba和Pb,它们在I带早期无矿石英流体中则含量最低。

## 5 讨论

### 5.1 萨瓦亚尔顿金矿成矿流体及矿质来源

萨瓦亚尔顿金矿成矿围岩多为砂岩及砂页岩,其稀土含量高于外围的灰岩层(图3a),这与全球沉积岩的稀土含量特征是一致的,即泥质岩>砂岩>碳酸盐(王中刚等,1989)。两件砂岩围岩样品具有较为明显的Eu负异常,而两件灰岩样品则相对较弱或者没有出现Eu负异常(图3a)。自然界

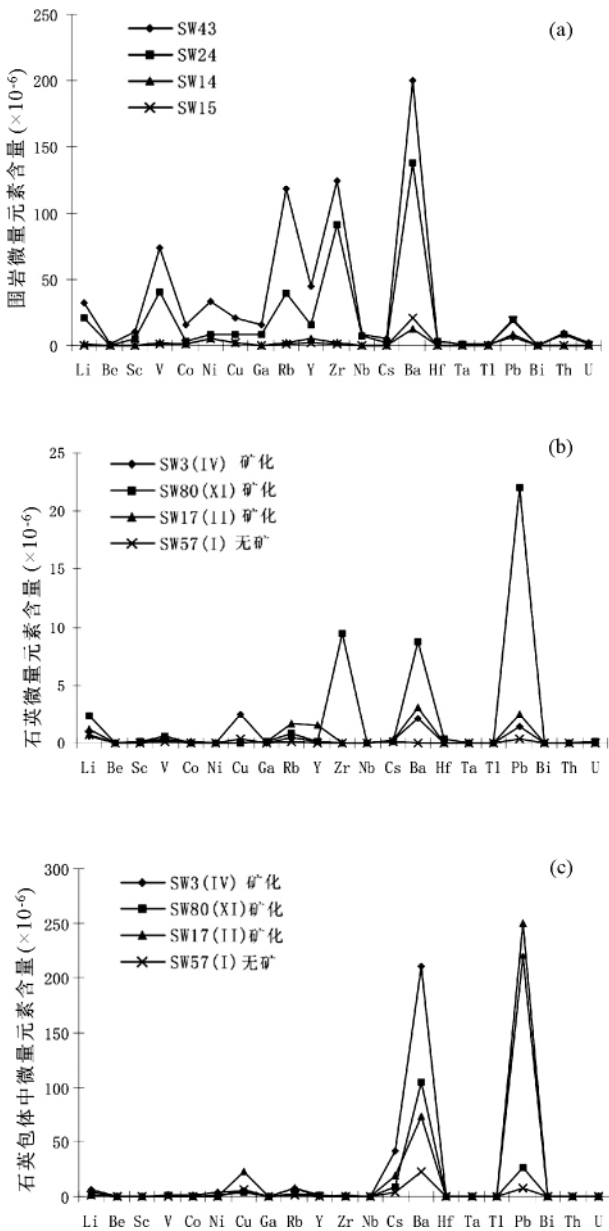


图4 萨瓦亚尔顿金矿围岩(a)、石英(b)及石英包体所含流体(c)的微量元素含量特征

Fig. 4 Trace element compositions of host rock (a), quartz (b) and fluids in quartz (c)

中的Eu一般有两种离子状态:  $\text{Eu}^{2+}$  和  $\text{Eu}^{3+}$ , 后者与其它稀土元素性质相似, 而  $\text{Eu}^{2+}$  却相对活跃, 常进入含钙矿物的钙离子晶格, 使得矿物呈Eu正异常, 如斜长石(王中刚等, 1989)。相对砂岩样品, 灰岩样品所呈现出的弱或无Eu负异常可能与后者富含钙离子相关。同为砂岩样品, 热液蚀变较强烈的SW43比未明显蚀变的SW24具有更显著的Eu负异常(图3a)。手标本及镜下观察显示SW43发育强烈的绢云母化蚀变, 该蚀变过程可能同时对应大量的钙流失, 从而使得  $\text{Eu}^{2+}$  失去载体而进入蚀变流体中, 导致SW43具相对较强的Eu负异常。与此对应的是, 石英包体中流体的稀土元素

特征总体与围岩类似, 显示一定的轻稀土富集(除SW17外), 但区别于围岩的是其明显的Eu正异常(图3c)。萨瓦亚尔顿成矿流体具Eu正异常可能与其富含钙离子相关, 这已为石英包裹体流体成分研究所证明( $\text{Ca}^{2+}$  可达  $2.1\text{mol/L}$ , Chen *et al.*, 2012b), 而围岩蚀变过程中所产生的富钙流体则可能成为成矿流体的主要来源之一。由成矿流体沉淀的石英本身则由于其不含Ca离子而不具有相应的Eu正异常(图3b)。另外, Eu正异常也可能代表流体处于相对还原环境(Chen and Zhao, 1997)。值得注意的是, 石英矿物所含稀土及微量元素均远小于对应石英包裹体中的含量(表1及图4), 这表明在成矿过程中, 石英可能并非成矿物质载体。

萨瓦亚尔顿金矿围岩砂岩的微量元素含量一般高于外围灰岩(图4a)。相对于未蚀变的SW24, 具强绢云母化的SW43含更高的V、Rb、Zr、Ba等, 而Pb含量相对较低(图4a)。这表明可能在围岩的热液蚀变过程中, V、Ba等元素从流体中进入到相对含量较低的砂岩-砂页岩中, 而原本围岩沉积地层中较为富集的原生黄铁矿则被淋滤, 从而使得Pb大量进入流体中, 而围岩中的Pb含量则显著降低。石英包体中所含流体微量元素一般含量很低, 但Cu、Ba、Pb则相对含量较高(图4c), 尤其是Pb, 其在流体中的含量要远高于其他微量元素。结合流体稀土元素特征, 成矿流体中较高的Pb很可能来自经围岩交代作用的蚀变流体。萨瓦亚尔顿成矿阶段硫化物Pb同位素及其它稳定同位素研究表明, 赋存矿体的变质围岩是成矿物质及流体的重要来源(Chen *et al.*, 2012a)。在造山带金矿中, 成矿流体受围岩交代作用影响十分普遍, 并得到多方例证, 如阿拉斯加的Juneau金矿(Goldfarb *et al.*, 1991), 澳大利亚的Bendigo金矿(Jia *et al.*, 2001)和我国的银洞坡金矿(Zhang *et al.*, 2011)等。

### 5.2 萨瓦亚尔顿金矿成矿机制

萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体研究表明金矿化可能与流体沸腾及流体混合作用紧密相关(陈华勇等, 2004, 2007; Yang *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2012b)。相对于成矿石英(SW17、SW3和SW80), 早期无矿石英(SW57)多捕获高温( $>300^\circ\text{C}$ )、低盐度的流体, 无显著流体沸腾或流体混合现象, 而矿化石英所含流体则捕获于成矿阶段, 具有中温( $250^\circ\text{C}$ )、盐度变化大的特征(陈华勇等, 2004)。两阶段石英捕获流体的气相及液相成分也有显著差异(陈华勇等, 2007; Chen *et al.*, 2012b)。本文研究表明, 早期无矿石英SW57所含流体的稀土含量低于其他矿化石英(图3c), 其较为明显的Eu正异常可能来自流体中含量较高的  $\text{Ca}^{2+}$ , 但与矿化石英流体中富含钙离子及显示Eu正异常不同的是, 早期流体中的钙可能来自深部碳酸盐地层的变质作用, 这与萨瓦亚尔顿流体包裹体及同位素的研究结果是一致的(陈华勇等, 2007), 也符合造山带型金矿变质流体来源的一般特征(Kerrick, 1999)。早期无矿石英及所含流体的微量元素含量明显低于矿化石英及所捕获的流体(图4b, c)。这些均表

明流体在成矿阶段经历显著的化学及物理性质变化,尤其是富含稀土及微量元素的外部流体加入可能是导致此差别的主因。矿化石英所含流体的 Pb 含量远高于无矿石英流体(图 4c),而围岩地层中富含原生黄铁矿且蚀变围岩成分表明 Pb 经淋滤进入流体(图 4a),因此我们推断,流体在成矿阶段很可能捕获了外部与围岩发生交代作用的富 Pb 流体,即流体混合,这也印证了流体包裹体和同位素的研究(Chen *et al.*, 2012a, b)。值得说明的是,流体混合机制已经在很多造山带型金矿中得到证实(陈衍景和富士谷, 1992; Chen, 1998; Brown, 1998; Chen *et al.*, 2000, 2004, 2006; Sui *et al.*, 2000; Graupner *et al.*, 2001; 张静等, 2006)。图 4c 还显示 II 带与最大的矿化带 IV 带具有最高的 Pb 含量,可能表示两带之间的相似性,这与其他研究的结果是一致的(陈华勇等, 2004, 2007; Chen *et al.*, 2012b)。

### 5.3 萨瓦亚尔顿金矿成矿模式

前人研究表明萨瓦亚尔顿金矿成矿流体经历了多阶段的演化(Yang *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2007),尤其是早期无矿阶段和中期成矿阶段,虽然均主要发育石英脉,其赋存流体却差异很大,代表了不同的地质过程和流体演化(陈华勇等, 2004, 2007)。结合本文稀土及微量元素的研究,并总结流体包裹体和同位素研究的最新成果(Chen *et al.*, 2012a, b),萨瓦亚尔顿金矿的成矿流体演化过程大致推测如下:

古生代晚期,随南天山大洋的俯冲消减,洋盆逐渐闭合,塔里木板块与哈萨克斯坦板块在石炭纪末开始接触碰撞,二叠纪-三叠纪南天山地区地壳挤压、缩短、增厚、隆升(Chen *et al.*, 2007, 2012c)。在挤压隆升过程中,萨瓦亚尔顿金矿赋矿围岩(砂岩及矿区东侧的灰岩等,图 2)发生变形、断裂破碎和变质。变质脱水产生了大量早期流体,流体沿断裂构造运移,并被碳质板岩等地层或推覆构造圈闭,形成早阶段的无矿石英脉(图 5a)。伴随造山带隆升和剥蚀,早阶段石英脉及含矿构造带埋藏变浅,围岩压力和温度降低;同时,区域挤压应力消退或减弱使容矿构造带发生走滑-剪切和减压扩容,早阶段石英脉产生变形及破碎。此时,围岩压力和构造附加压力的降低可能使流体产生沸腾作用;同时,循环于浅层构造带和地层中,并与围岩发生交代作用的流体,也快速涌入含矿构造带,与“深源高压”流体混合,快速沉淀各自携带的成矿物质(图 5b; 陈衍景和富士谷, 1992; 李晶等, 2004),并捕获多种类型、盐度差别较大的中低温流体包裹体(陈华勇等, 2004)。在中阶段矿化之后,区域热异常快速消失,地壳深部活动组分快速亏损,流体成矿作用迅速衰竭,矿区只发育少量低温碳酸盐-石英网脉(图 5c)。

萨瓦亚尔顿金矿的成矿构造背景和成矿时间与南天山碰撞构造演化一致,成矿过程具 3 阶段特征,成矿物质主要沉淀于由挤压向伸展构造转变的中阶段,符合碰撞造山体流体制成矿模式,即 CMF 模式(陈衍景和富士谷, 1992; Chen, 1998; Chen *et al.*, 2004, 2005, 2006; Zhang *et al.*, 2012a, b;

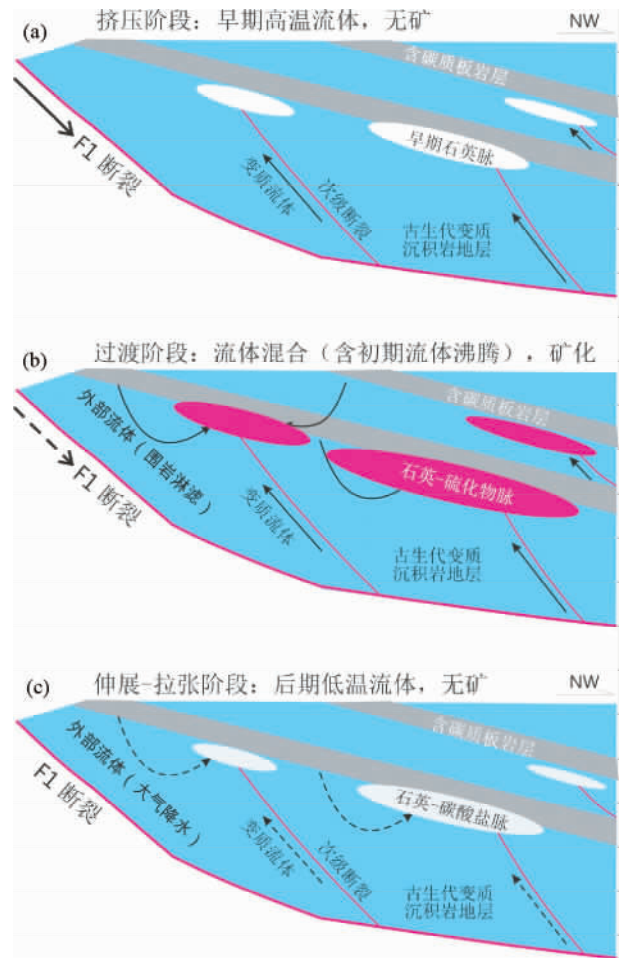


图 5 萨瓦亚尔顿金矿成矿模式

Fig. 5 Ore modeling of the Sawayaerdun gold deposit

Zheng *et al.*, 2012) 表明萨瓦亚尔顿金矿是陆陆碰撞体制形成的中温热液脉状金矿床,即造山型金矿。

## 6 结论

萨瓦亚尔顿金矿围岩、石英及石英中流体包裹体的稀土、微量元素特征表明:萨瓦亚尔顿金矿成矿流体可能部分来源于围岩组分;

初始流体与矿化阶段的流体成分差异较大;在成矿阶段来自外部的与围岩的流体与深源的初始流体发生混合,导致成矿物质大量沉淀。本文研究结果与已有流体包裹体、同位素等研究结果一致,指示萨瓦亚尔顿金矿属于造山型金矿。进一步表明流体混合及水岩作用围岩组分的参与,也印证了前期流体包裹体和同位素的研究结果。

致谢 此项研究得到国家 305 项目办公室的大力支持;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;实验室研究得到王莉娟、朱和平老师

的协助; 作者表示衷心谢意。

## References

- 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. Isotopic 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 (Suppl.): 155 – 166
- Chen HY, Chen YJ, Ni P and Zhang ZJ. 2004. Fluid inclusion study of the Sawayaerdun 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 HY, Chen YJ, Ni P, Zhang L and Zhang ZJ. 2007. Chemical composition of fluid inclusions of the Sawayaerdun gold deposit, Xinjiang: Implications for orogenesis and prediction. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2189 – 2197 (in Chinese with English abstract)
- Chen HY, Chen YJ and Baker M. 2012a. Isotopic geochemistry of the Sawayaerdun gold deposit, Northwest China: Implications for ore genesis and mineral exploration. *Chemical Geology*, 310 – 311: 1 – 11
- Chen HY, Chen YJ and Baker M. 2012b. Evolution of ore-forming fluids in the Sawayaerdun gold deposit in the southwestern Chinese Tianshan metallogenic belt, Northwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 131 – 144
- Chen YJ and Fu SG. 1992. *Gold Mineralization in West Henan*. Beijing: Seismological Press, 1 – 234 (in Chinese)
- Chen YJ and Zhao YC. 1997. REE Geochemical characteristics and evolution of Early Precambrian sediments: Evidence from the southern margin of the North China Craton. *Episodes*, 20: 109 – 116
- Chen YJ. 1998. Fluidization model for continental collision in special reference to study on ore-forming fluid of gold deposits in the eastern Qinling Mountains, China. *Progress in Natural Science*, 8(4): 385 – 393
- Chen YJ, Pirajno F and Sui YH. 2004. Isotope geochemistry of the Tieluping silver-lead deposit, Henan, China: A case study of orogenic silver-dominated deposits and related tectonic setting. *Mineralium Deposita*, 39(5 – 6): 560 – 575
- Chen YJ, Pirajno F and Qi JP. 2005. Origin of gold metallogeny and sources of ore-forming fluids, Jiaodong province, eastern China. *International Geology Review*, 47(5): 530 – 549
- 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, Chen HY, Zaw K, Pirajno F and Zhang ZJ. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 31(1 – 4): 139 – 169
- Chen YJ, Ni P, Fan HR, Pirajno F, Lai Y, Su WC and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085 – 2108 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Pirajno F, Wu G, Qi JP and Xiong XL. 2012c. Epithermal deposits in North Xinjiang, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, 101(4): 889 – 917
- Cole A, Wilkinson JJ, Halls C and Serenko TJ. 2000. Geological characteristics, tectonic setting and preliminary interpretations of the Jilau gold-quartz vein deposit, Tajikistan. *Mineralium Deposita*, 35(7): 600 – 618
- Fan JG, Ni P, Su WC, Qi L and Tian JH. 2000. Characteristics and significance of rare earth elements in quartz of Sidaogou hydrothermal gold deposit, Liaoning. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 587 – 590 (in Chinese with English abstract)
- Goldfarb RJ, Newberry RJ, Pickthorn WJ and Gent CA. 1991. Oxygen, hydrogen, and sulfur isotope studies in the Juneau gold belt, southeastern Alaska: Constraints on the origin of hydrothermal fluids. *Economic Geology*, 86(1): 66 – 80
- Goldfarb RJ, Groves DI and Cardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18(1 – 2): 1 – 75
- Graupner T, Kempe U, Spooner ETC, Bray CJ, Kremenetsky AA and Imer G. 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. Constraints on the fluid evolution at Kumtor deposit. GSA 2000 presentation. <http://homepage.usask.ca/~smi454/project/articles/GSA2000.htm>
- Jia YF, Li X and Kerrich R. 2001. Stable isotope (O, H, S, C and N) systematics of quartz vein systems in the turbidite-hosted Central and North Deborah gold deposits of the Bendigo gold field, Central Victoria, Australia: Constraints on the origin of ore-forming fluids. *Economic Geology*, 96(4): 705 – 721
- Kerrich R. 1999. Nature's gold factory. *Science*, 284(5423): 2101 – 2102
- 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 and Gu T. 1999. Reidentification of the ore-hosted strata age of the Sawaya'erdun gold deposit in Xinjiang, southwestern Tianshan. *Chinese Science Bulletin*, 44(19): 1811 – 1814
- Liu JJ, Zheng MH and Long XR. 2001. The metallogenic characteristics of the Sawayaerdun 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: Seismological Press, 177 – 187 (in Chinese)
- Liu JJ, Zheng MH, Cook NJ, Long XR, Deng J and Zhai YS. 2007. Geological and geochemical characteristics of the Sawaya'erdun gold deposit, southwestern Chinese Tianshan. *Ore Geology Reviews*, 32(1 – 2): 125 – 156
- Rui ZY, Goldfarb RJ, Qiu YM, Zhou TH, Chen RY, Pirajno F and Yun G. 2002. Paleozoic-Early Mesozoic gold deposits of the Xinjiang Autonomous Region, northwestern China. *Mineralium Deposita*, 37(3 – 4): 393 – 418
- Su WC, Qi L, Hu RZ and Zhang GP. 1998. Analysis of rare-earth elements in fluid inclusions by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). *Chinese Science Bulletin*, 43(22): 1922 – 1927
- 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 (Suppl. 1): 108 – 121
- Ulrich T, Günther D and Heinrich CA. 1999. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposit. *Nature*, 399(6737): 676 – 679
- Wang LJ, Wang YW, Wang JB, Zhu HP and Günther D. 2006. Fluid mineralization of the Dajing Sn-polymetal deposit: Evidence from LA-ICP-MS analysis of individual fluid inclusions. *Chinese Science Bulletin*, 51(22): 2781 – 2788
- Wang ZG, Yu XY and Zhao ZH. 1989. *Rare Earth Elements Geochemistry*. Beijing: Science Press, 1 – 535 (in Chinese)
- Wilde AR, Layer P, Mernagh T and Foster J. 2001. The giant muruntau gold deposit: Geologic, geochronologic, and fluid inclusion constraints on ore genesis. *Economic Geology*, 96(3): 633 – 644
- Yang FQ, Mao JW, Wang YT, Bierlein FP, Ye HS, Li MW, Zhao CS and Ye JH. 2007. Geology and metallogenesis of the Sawayaerdun gold deposit in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, China. *Resource Geology*, 57(1): 57 – 75
- Ye JH, Ye QT, Wang J, Wu YP, Yang FQ and Fu XJ. 1999. Geochemistry and metallogenic mechanism of the sawayaerdun gold-

- antimony deposit. *Mineral Deposits*, 18(1): 63–72 (in Chinese)
- Ye QT, Wu YP, Fu XJ, Chen MY, Ye JH, Zhuang DZ, Yang FQ and Bai HH. 1999. Ore-forming Conditions and Metallogenic Prognosis of Gold and Nonferrous Metallic Resources in the Southwestern Tianshan Mountain. Beijing: Geological Publishing House, 1–201 (in Chinese)
- 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(10): 2551–2560 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Chen YJ, Yang Y and Deng J. 2011. Lead isotope systematics of the Weishancheng Au-Ag belt, Tongbai Mountains, central China: Implication for ore genesis. *International Geology Review*, 53(5–6): 656–676
- Zhang L, Chen HY, Chen YJ, Qin YJ, Liu CF, Zheng Y and Jansen N. 2012a. Geology and fluid evolution of the Wangfeng orogenic-type gold deposit, western Tian Shan, China. *Ore Geology Reviews*, 49: 85–95
- Zhang L, Zheng Y and Chen YJ. 2012b. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Tiemurt Pb-Zn-Cu deposit, Altay, Xinjiang, China: A case study of orogenic-type Pb-Zn systems. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 69–79
- Zheng MH, Zhang ST, Liu JJ, Long XR and Song XY. 2001. The Forming Setting of Muruntau-Type Gold Deposit in the Southwestern Tianshan Mountains and Metallogenic Exploration. Beijing: Geological Publishing House, 1–131 (in Chinese)
- Zheng Y, Zhang L, Chen YJ, Qin YJ and Liu CF. 2012. Geology, fluid inclusion geochemistry and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of the Wulasigou Cu deposit in Altay, Xinjiang, China and their implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 49: 128–140
- 2189–2197
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 1–234
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同热液金矿系统的流体包裹体特征. *岩石学报*, 23(9): 2085–2108
- 范建国, 倪培, 苏文超, 漆亮, 田京辉. 2000. 辽宁四道沟热液金矿床中石英的稀土元素的特征及意义. *岩石学报*, 16(4): 587–590
- 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. 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, 赖勇主编. 大陆动力学与成矿作用. 北京: 地震出版社, 177–187
- 王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1–535
- 叶锦华, 叶庆同, 王进, 吴益平, 杨富全, 傅旭杰. 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, 陈明勇, 叶锦华, 庄道泽, 杨富全, 白洪海. 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, 1–201
- 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): 2552–2560
- 郑明华, 张寿庭, 刘家军, 龙训荣, 宋谢炎. 2001. 西南天山穆龙套型金矿床产地地质背景与成矿机制. 北京: 地质出版社, 1–131

#### 附中文参考文献

- 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: 矿床成因和勘探意义. *矿物岩石*, 24(3): 46–54
- 陈华勇, 陈衍景, 倪培, 张莉, 张增杰. 2007. 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. *岩石学报*, 23(9):