

甘肃阳山金矿载金黄铁矿硫同位素 Nano-SIMS 原位分析*

赵 静, 梁金龙**, 倪师军, 向启荣

(成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘 要 硫同位素示踪是矿床研究的重要手段之一,它在示踪成矿物质来源方面具有极其重要的作用。由于阳山金矿床的载金黄铁矿普遍发育环带结构,显示多期热液活动的特点,而前人研究往往得到整颗粒黄铁矿硫同位素的混和值,因而无法将不同阶段的硫同位素来源区分清楚。本次研究采用纳米二次离子质谱分析技术(Nano-SIMS)对不同阶段的黄铁矿的不同部位进行了原位硫同位素分析。结果表明,斜长花岗岩斑岩脉中载金黄铁矿的硫同位素分布基本表现为核部高、环带低的特点,其中,黄铁矿核部的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $0 \sim 1.3\text{‰}$,显示硫来自于深源岩浆,而环带的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-4.5\text{‰} \sim -1.3\text{‰}$,表明成矿过程中的硫主要来源于岩浆硫,同时可能还有部分沉积硫的混入;千枚岩中草莓状黄铁矿和自形黄铁矿核部的 $\delta^{34}\text{S}$ 值均较低(平均值分别为 -22.2‰ 和 -26.5‰),显示细菌还原海水硫酸盐过程所产生的硫同位素特征,而自形黄铁矿环带的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-5.1\text{‰} \sim 1.3\text{‰}$,同样显示硫来源于岩浆硫与一定程度沉积硫的混合。笔者综合研究区内岩浆活动与成矿的关系后认为,岩浆活动与成矿关系密切,岩浆活动的频发不仅为流体运移提供了足够的热源,同时还带来了丰富的成矿物质。

关键词 地球化学; Nano-SIMS 原位分析; 成矿物质; 岩浆活动; 阳山金矿床

中图分类号: P597+.2

文献标志码: A

In situ sulfur isotopic composition analysis of Au-bearing pyrites by using Nano-SIMS in Yangshan gold deposit, Gansu Province

ZHAO Jing, LIANG JinLong, NI ShiJun and XIANG QiRong

(College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract

Sulfur isotope plays an important role in the study of sulfide deposits in that it always provides useful information for tracing the origin of ore-forming materials. The Au-bearing pyrites in the Yangshan gold deposit exhibit zonal textures, which reflects multiple episodes of hydrothermal activities. However, based on the bulk analyses of pyrites, previous researches fail to identify different sulfur sources during the formation of pyrites, leading to an ambiguous understanding for ore fluids origin. This paper gives in situ sulfur isotopic data based on Nano-SIMS. The results reveal that the distribution of sulfur isotope in plagiogranite porphyry related to ore formation is characterized by high $\delta^{34}\text{S}$ values of cores relative to rims. Cores of pyrites in plagiogranite porphyry have a magmatic origin with $\delta^{34}\text{S}$ values ranging from 0 to 1.3‰ and $\delta^{34}\text{S}$ values of rims varying from -4.5‰ to -1.3‰ , suggesting that sulfur in rims is derived from the magma with contamination by sulfur in sedimen-

* 本文得到了中国地调局地调科研项目《西南地区主要成矿带铜铁金多金属找矿模式与勘探技术方法综合研究》(项目编号: 12120113095500)和国家自然科学基金项目(编号: 41273031)的联合资助

第一作者简介 赵 静,女,1991年生,硕士研究生,矿床地球化学专业。Email: 790993240@qq.com

** 通讯作者 梁金龙,男,1967年生,副教授,从事超高压变质作用和矿床地球化学研究。Email: richardlj104@aliyun.com

收稿日期 2015-06-27; 改回日期 2016-03-14。张绮玲编辑。

tary rocks. The sulfur isotopic compositions of framboidal pyrites and cores of euhedral pyrites in phyllites are characterized by high negative values, mainly due to the process of bacteria sulfate reduction (BSR) in ancient sea water. $\delta^{34}\text{S}$ values of rims in pyrites from phyllite, ranging from -5.1‰ to 1.3‰ , are similar to those of granite, which suggests that both of them had the same source of sulfur. Combined with a discussion on the relationship between the magma and mineralization, the authors hold that the regional magmatism contributed greatly to the formation of the Yangshan gold deposit. The magma not only offered enough heat for migration of Au-rich fluid but also provided a lot of ore-forming materials.

Key words: geochemistry, Nano-SIMS, ore-forming materials, regional magmatism, Yangshan gold deposit

微细浸染型金矿床是世界上最重要的金矿床类型之一,其主要产出在美国西部和中国滇黔桂、川甘陕两个“金三角”地区。阳山金矿床是中国川甘陕“金三角”地区储量最大的微细粒浸染型金矿床(陈衍景等, 2007),目前已发现金矿脉 109 条,金品位达 4.80×10^{-6} , 探明金资源量已达 340 t(李建忠等, 2011)。近年来的研究使得研究者们对阳山金矿床的基础地质和地球化学特征有了更加清楚的认识,但对于成矿物质来源、成矿机制以及矿床成因等问题仍存在着较大的争议。

硫是成矿溶液中最主要的矿化剂,硫同位素是矿床成因和成矿物理化学条件的指示剂,确定成矿流体中硫同位素组成以及判断硫的来源,对于讨论矿床成因具有重要意义(刘光智等, 2009)。在微细浸染型金矿床中,金属硫化物是金的主要载体(Simon et al., 1999; 付绍洪等, 2004; 梁金龙等, 2015),金主要以“不可见金”的形式赋存于黄铁矿和毒砂之中。因此,硫化物中的硫同位素组成可以有效地示踪成矿物质的来源。但是,载金硫化物(特别是黄铁矿)普遍发育环带结构(Almeida et al., 2010; Su et al., 2012; Liang et al., 2014),通常围绕成岩期黄铁矿的核部发育多期热液黄铁矿环带。而传统的硫同位素研究方法无法将不同来源和期次的黄铁矿区分开来,因而得到的黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值只能代表多来源硫同位素的混合值,这就给探讨成矿物质的来源带来了一定的难度,幸运的是当今的 Nano-SIMS(Nano Secondary Ion Mass Spectroscopy, 纳米二次离子质谱)测试技术正好解决了这个问题。因此,本文采用 Nano-SIMS 测试技术,对阳山金矿床中的载金黄铁矿的核部及不同环带进行了原位硫同

位素分析,并结合矿区地质特征,探讨了阳山金矿床成矿物质的来源。

1 矿床地质特征

在大地构造位置上,阳山金矿床地处松潘-甘孜褶皱系以东、中朝板块以南、扬子板块以北的三角区内(齐金忠等, 2003),紧邻勉略褶皱带与松潘-甘孜褶皱带的分界线(图 1)。区内地层从泥盆系到侏罗系均有出露,其中泥盆系三口河组桥头岩段是主要的赋矿地层,岩性为绢云母千枚岩、粉砂质千枚岩、泥质千枚岩等。金矿体的形态和产状严格受构造控制,矿区自东向西依次可分为张家山、阳山(又称观音坝)、高楼山、安坝、葛条湾、泥山等 6 个金矿段(李建忠等, 2011)(图 1)。主矿体(305[#])主要呈脉状、透镜状产于安坝背斜翼部的断裂破碎带中,其余矿体则多赋存在安昌河-观音坝断裂所派生的次级断裂构造或层间破碎带中。区内原生矿石按原岩类型可分为蚀变砂岩型、粉砂质千枚岩型、蚀变灰岩型、蚀变花岗斑岩型和少量石英脉-黄铁矿型(梁金龙等, 2015)。矿石中金属矿物种类繁多,包括黄铁矿、毒砂、闪锌矿、辉锑矿、方铅矿、磁铁矿、褐铁矿、硫锑铅矿等。黄铁矿和毒砂是主要的载金矿物,金主要以晶格金(又称固溶体金)的形式赋存于载金黄铁矿和毒砂之中(赵静等, 2017)。阳山金矿的围岩蚀变主要有硅化、硫化物化(黄铁矿化和毒砂化)、碳酸盐化、黏土化以及绢云母化等,这与美国内华达州典型微细浸染型金矿床的围岩蚀变特征相一致(Bagby et al., 1985; Ye et al., 2003; Almeida et al., 2010; Hickey et al., 2014)。

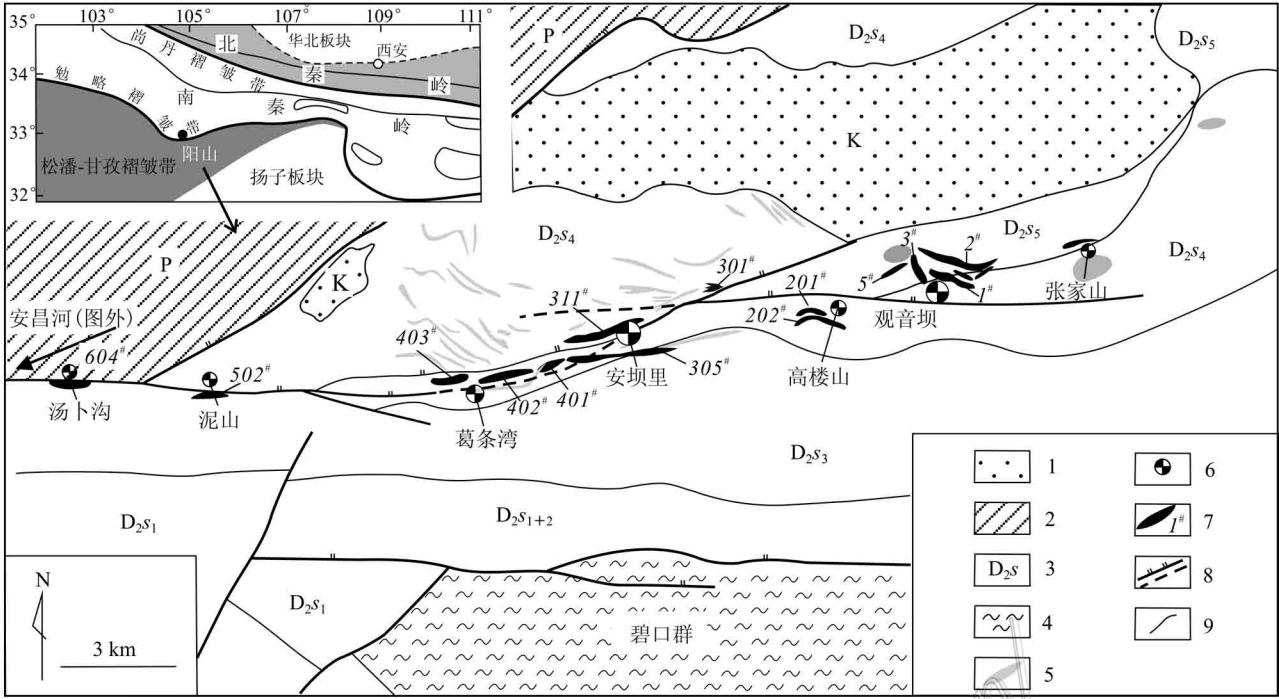


图 1 阳山金矿床地质简图(据梁金龙等, 2015)

1—白垩系砂岩; 2—二叠系板岩、灰岩; 3—中泥盆统三口河组, 由南至北又可细分为 5 个不同的岩性段, 用 $D_{2S1} \sim D_{2S5}$ 表示;
4—新元古界变质火山沉积岩; 5—晚古生代花岗岩岩; 6—矿段位置; 7—Au 矿脉及编号; 8—断裂带及推测断裂; 9—地质界线

Fig. 1 Geological map of the Yangshan Carlin-type gold deposit (after Liang et al., 2015)

1—Cretaceous sandstone; 2—Permian slate and mudstone; 3—Middle Devonian Sankouhe Formation, be divided into five members from south to north ($D_{2S1} \sim D_{2S5}$); 4—Neoproterozoic metamorphic volcanic-sedimentary rock; 5—Neopaleozoic granite porphyry; 6—Location of ore block;
7—Gold orebody and its serial number; 8—Fault; 9—Geological boundary

2 分析方法

本次研究在野外调研和显微岩相学研究的基础上, 选择代表性的黄铁矿样品送至中国科学技术大学进行背散射电子图像分析(Back Scattered Electron, BSE), 使用仪器为捷克 TESCAN MIRA 3 LMH FE-SEM(热场发射扫描电镜), 测试电压为 15 kV。原位硫同位素微区测试和元素面分布(Mapping)分析是在中国科学院地质与地球物理研究所纳米离子探针实验室完成的, 仪器型号为 CAMECA NanoSIMS 50L, 测试条件为轰击电压 16 kV, 计数时间 150 s。有关仪器和测试方法详细情况详见文献(Zhang et al., 2014)。原位硫同位素分析结果见表 1。

3 分析与讨论

3.1 载金黄铁矿中特征元素的分布

黄铁矿是国内外微细浸染型金矿床中的主要载金矿物(Arehart et al., 1993; 付绍洪等, 2004;

Cline et al., 2013), 它的形成与金的富集密切相关, 因而微细浸染型金矿中的黄铁矿的成分往往蕴藏着极其丰富的成岩成矿信息。阳山金矿的载金黄铁矿以富砷为特点(赵静等, 2017), 从形态上可分为草莓状黄铁矿、自形五角十二面体黄铁矿、不规则状黄铁矿(图 2a)等。阳山金矿中的黄铁矿, 除草莓状黄铁矿之外, 载金砷黄铁矿普遍发育环带结构。BSE 图像(图 2b)结合电子探针成分分析表明, 黄铁矿从核部到环带应分别形成于成岩期、成矿期和成矿期后热液活动期(Liang et al., 2014), 是多期热液活动的产物。

环带黄铁矿中 ^{56}Fe 、 ^{32}S 、 ^{34}S 、 ^{75}As 和 ^{197}Au 元素面分布图显示, 在颗粒尺度上, 元素分布极不均匀(图 2), 表现为从核部到最外层环带, 元素呈规律性分布。图 2e 和图 2f 显示 ^{197}Au 、 ^{75}As 元素含量分布基本呈同步变化, 两者在核部和最外层环带中含量均较低, 而在成矿期形成的中间环带中含量达到最高。

沉积草莓状黄铁矿中元素分布比较均匀, 在颗粒尺度上往往没有明显变化(图 3a、b、d、f)。 ^{80}Se 元素的分布图表现为草莓状黄铁矿内部存在有数个直

表 1 阳山金矿黄铁矿硫同位素分析结果

Table 1 Representative sulfur isotope analyses of pyrites from the Yangshan gold deposit

样品编号	赋存岩性	测试点位	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$ (VCDT)	$\pm \text{SE}/\text{‰}$
07cpl08-3-2	斜长花岗斑岩脉	环带	1.0	0.19
		环带	0.8	0.18
		环带	-7.3	0.17
		核部	-3.4	0.16
		核部	-4.4	0.17
		核部	-4.4	0.16
07cpl08-3-1	斜长花岗斑岩脉	环带	-1.6	0.18
		核部	1.3	0.15
07cpl24-1-b-1	斜长花岗斑岩脉	环带	-1.3	0.14
		环带	-2.6	0.21
		核部	0	0.14
07cpl24-1-b-2	斜长花岗斑岩脉	环带	-3.6	0.16
		环带	-4.5	0.18
		核部	0.4	0.15
09zk024-2-1	千枚岩	环带	-3.5	0.15
		核部	-26.3	0.17
		核部	-25.4	0.14
		环带	1.3	0.15
09zk024-2-3	千枚岩	环带	-5.1	0.14
		环带	-3.3	0.15
		核部	-26.5	0.17
		核部	-27.8	0.14
09zk024-2-4	千枚岩	草莓状黄铁矿	-23.8	0.14
		草莓状黄铁矿	-21.9	0.15
		草莓状黄铁矿	-20.9	0.15

注：表中每一个 $\delta^{34}\text{S}$ 值均为一个微区(20 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$)中所有测点的算术平均值， $\pm \text{SE}$ 是标准方差。

径约 1 μm 的高值微区(图 3e)。推测草莓状黄铁矿中可能存在数个纳米-微米级的富 Se 微包裹体。 ^{75}As 元素在草莓状黄铁矿内部含量很低,仅在颗粒外缘发育一圈极细的高值环带(图 3c),推测可能与草莓状黄铁矿形成以后受到后期热液活动的影响有关。

3.2 硫同位素特征及成矿物质来源

3.2.1 斜长花岗斑岩脉中黄铁矿的硫同位素特征

斜长花岗斑岩脉中的载金黄铁矿普遍发育环带结构(图 4),其 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 $-7.3\text{‰} \sim 1.3\text{‰}$,平均值为 -2.11‰ ,极差为 8.6‰。除样品 07cpl08-3-2 之外,载金黄铁矿中 S 同位素的分布基本表现为核部高、环带低的特点(图 4a~c),其中黄铁矿核部 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $0 \sim 1.3\text{‰}$,平均值为 0.57‰,极差为 1.3‰;而其环带的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-4.5\text{‰} \sim -1.3\text{‰}$,平均值为

-2.72‰ ,极差 3.2‰。

研究表明,热液系统含硫化合物的同位素组成受系统中温度、碱金属离子强度、全硫平均同位素组成、酸碱度、氧逸度等因素的制约,热液中全硫平均同位素组成应根据同位素平衡条件下实验测定、计算的温度值、离子强度 I 等参数分析而得到(Ohmoto et al., 1979; 尹观等, 2009)。由于阳山金矿中的主要载金矿物为黄铁矿,与金成矿关系密切,且矿床中其他硫化物或硫酸盐少见,同时,结合成矿的物理化学条件分析认为,黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值基本能够代表成矿热液中的硫同位素组成。

地球上的硫主要有 3 种来源:①地幔硫或岩浆硫, $\delta^{34}\text{S}$ 值接近 0,并且变化范围较小($0 \pm 3\text{‰}$);②沉积硫(或还原硫), $\delta^{34}\text{S}$ 值一般以较大的负值为特

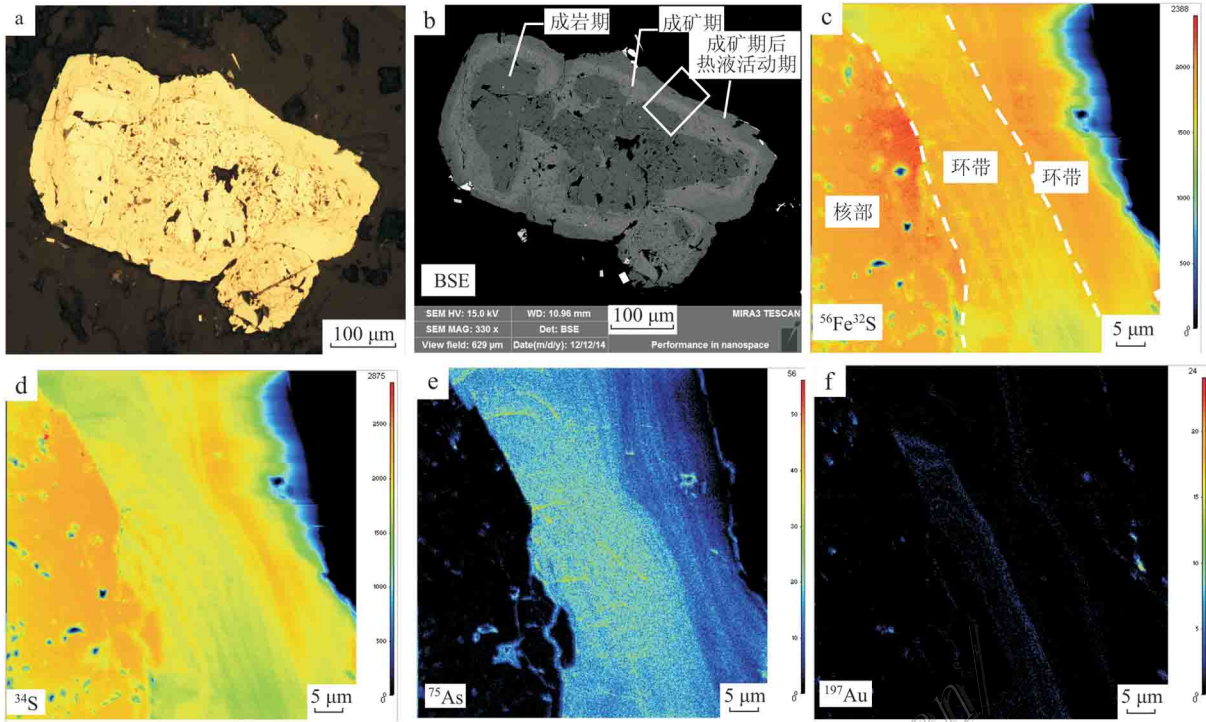


图 2 环带黄铁矿的显微特征和其中⁵⁶Fe ³²S、³⁴S、⁷⁵As、¹⁹⁷Au 的元素面分布图

a. 环带结构发育的黄铁矿的显微镜下特征(反射光); b. 黄铁矿的 BSE 照片显示清晰的环带结构,图中的方框表示 Mapping 分析的区域;
c~f 分别表示 SIMS 下的黄铁矿中⁵⁶Fe ³²S、³⁴S、⁷⁵As 和¹⁹⁷Au 元素面分布图,图中颜色从红到蓝色表示元素含量由高到低

Fig. 2 Microscopic characteristics and element map of ⁵⁶Fe ³²S, ³⁴S, ⁷⁵As and ¹⁹⁷Au in pyrites
a. Microscopic feature of the Au-bearing pyrite; b. BSE images showing that Au-pyrites usually have zonal textures, reflecting multiple episodes of hydrothermal activities; c~f. Element map exhibiting heterogeneous distributions of ⁵⁶Fe ³²S, ³⁴S, ⁷⁵As and ¹⁹⁷Au in pyrites. The white block represents the analytical area. The colors from red to blue in element map correspond to different values from high to low

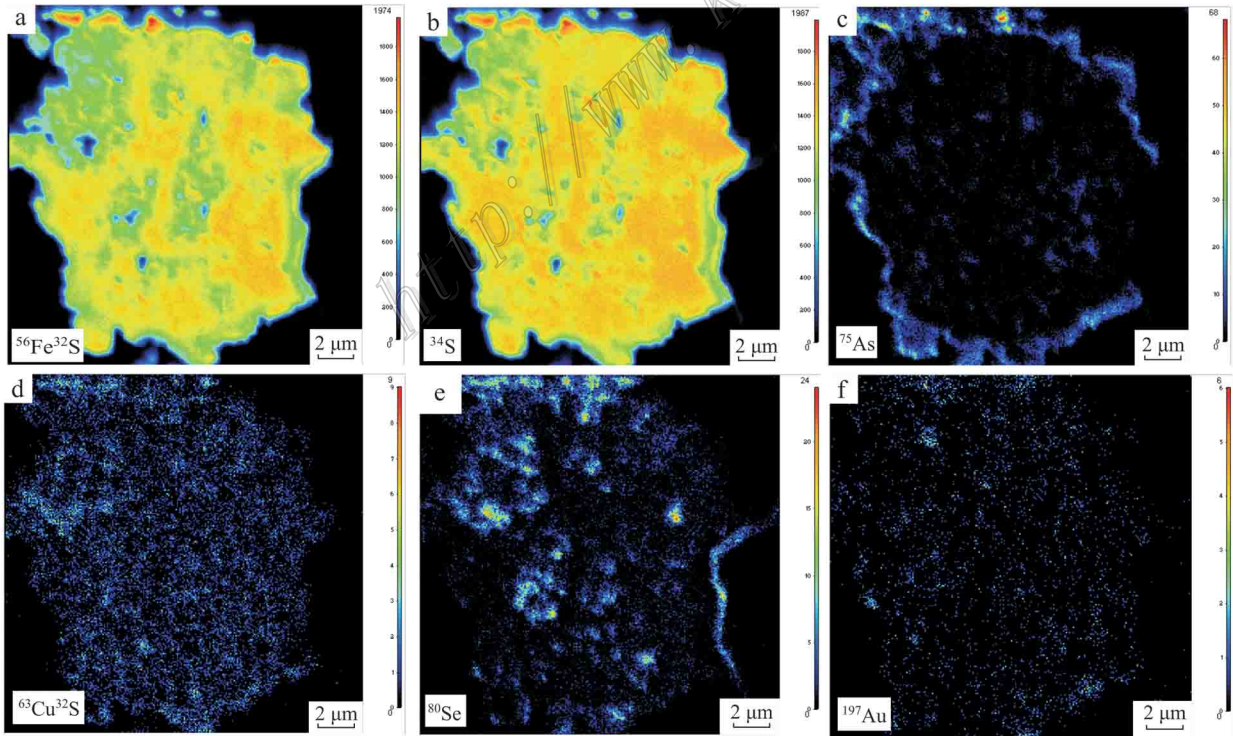


图 3 草莓状黄铁矿⁵⁶Fe ³²S (a)、³⁴S (b)、⁷⁵As (c)、⁶³Cu ³²S (d)、⁸⁰Se (e)、¹⁹⁷Au (f)元素面扫描图

Fig. 3 Element map of ⁵⁶Fe ³²S (a), ³⁴S (b), ⁷⁵As (c), ⁶³Cu ³²S (d), ⁸⁰Se (e) and ¹⁹⁷Au (f) in framboidal pyrites

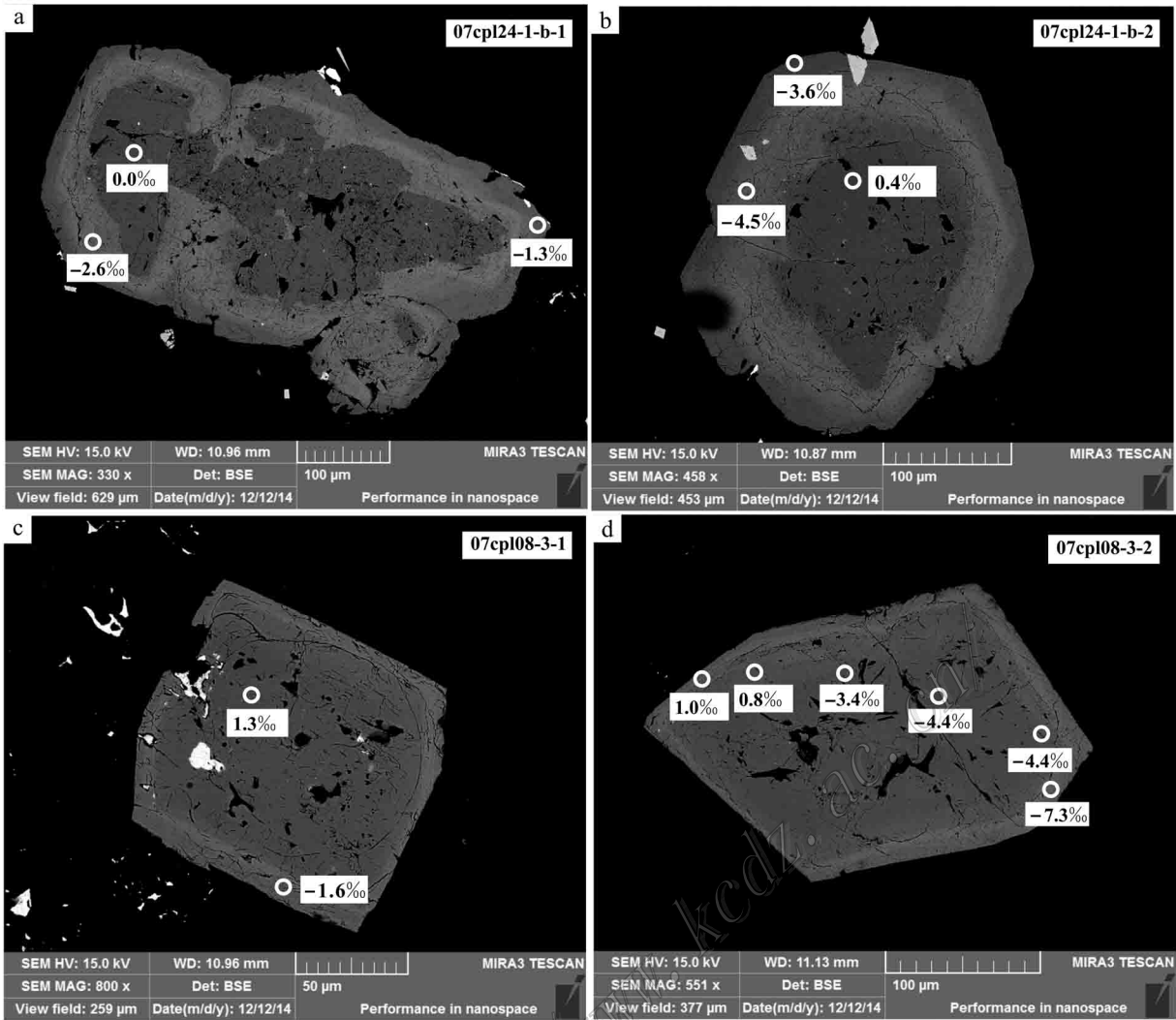


图 4 斜长花岗斑岩脉中黄铁矿硫同位素分布

a~c. 黄铁矿中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布基本表现为核部高、环带低的特点; d. 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值表现为核部低、环带高的特点

Fig. 4 The distribution of sulfur isotopes in pyrites from granite porphyry

a~c. The distribution of sulfur isotopes in plagiogranite porphyry, usually characterized by high $\delta^{34}\text{S}$ values of cores relative to rims; d. The $\delta^{34}\text{S}$ in the rim of this pyrite being higher than those in the core

征;③ 海水硫,地质历史时期的海水硫同位素组成,随时间发生变化,但普遍表现为 $\delta^{34}\text{S}$ 值为较大的正值(尹观等, 2009; 韩吟文等, 2003; 张瑜等, 2010; 陕亮等, 2009; 杨贵才等, 2007)。矿床中的硫可以是单一来源,也可以是多种不同来源硫的混合。由图 4 可知,斜长花岗斑岩脉中核部黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 0~1.3‰,平均值为 0.57‰,与岩浆同位素组成(接近 0)相似,暗示了其主要来自深源岩浆。黄铁矿环带的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -4.5‰~-1.3‰,平均值为 -2.72‰,表明黄铁矿环带中的硫主要为岩浆硫,可能还有部分沉积硫的混入。这种相对富集 ^{32}S 的黄铁矿环带可能与岩浆在上升侵位的过程中,与低 ^{34}S

(富集 ^{32}S)的地层相互作用有关,或者是下渗的大气降水淋滤了地层硫并最终与上升的岩浆流体发生混合的过程有关。这与齐金忠等(2006)、罗锡明等(2004)和杨贵才等(2007)认为矿床成矿流体来源以岩浆热液为主的认识相吻合。研究已经证明,秦岭地区岩浆活动频繁(齐金忠等, 2006; 雷时斌, 2011),多次大规模的岩浆活动不仅为成矿提供了必要的热能,并且还带来了丰富的硫源,同时矿区断裂构造的发育也不可避免地引发了大气降水的淋滤和下渗。

此外,样品 07cpl08-3-2 中黄铁矿的硫同位素大致表现为核部低,环带高的特点(图 4d),这与美国内华达州 Betze-Post-Screamer 微细浸染型金矿床中黄

铁矿的硫同位素分布一致(Kesler et al., 2005),暗示了其同样也以岩浆硫为主,同时含有部分沉积硫。它与其他环带黄铁矿中 $\delta^{34}\text{S}$ 值截然不同的分布特征可能是由其形成时物理化学条件的差异以及沉积硫不同程度的混入所引起。

3.2.2 千枚岩中黄铁矿的硫同位素特征

千枚岩中黄铁矿的硫同位素组成变化较大, $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $-27.8\text{‰} \sim 1.3\text{‰}$,平均值为 -16.65‰ ,极差为 29.1‰ ,显示了含矿粉砂质千枚岩中黄铁矿的硫具有多来源的特点。

其中草莓状黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 $-23.8\text{‰} \sim -20.9\text{‰}$ 之间,平均值为 -22.2‰ ,与岩浆硫(接近 0‰)完全不同,也与地质历史时期海水硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}$ 为较大正值的特点截然不同(Chang et al., 2008)。草莓状黄铁矿中 $\delta^{34}\text{S}$ 较大的负值可能与细菌还原海水硫酸盐(Bacterial Sulfate Reduction, BSR)的过程有关。在开放的海洋环境中,由于反应物供给充分,硫酸盐还原细菌会优先选择富 ^{32}S 的 SO_4^{2-} 进行还原,从而不断生成富集 ^{32}S 的硫化物,如海洋深部,海水的 SO_4^{2-} 供给不限量,其同位素组成保持不变,但沉积硫化物中的硫同位素组成要比海水 SO_4^{2-} 低 $40\text{‰} \sim 60\text{‰}$ (尹观等,2009)。同时,千枚岩中有机质含量偏高,这也为细菌活动创造了有利的条件。

千枚岩中自形黄铁矿环带结构发育(图 5),黄铁矿核部 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 $-27.8\text{‰} \sim -25.4\text{‰}$ 之间,平均值为 -26.5‰ ,与草莓状黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相近,指示了核部黄铁矿也属于沉积成因,其形成与细菌还原硫酸盐也有着密切的联系。而黄铁矿环带的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-5.1\text{‰} \sim 1.3\text{‰}$,平均值为 -2.65‰ ,与斜长花岗斑岩脉中的黄铁矿环带的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(-2.72‰)很接近,表明两者可能具有相同的硫来源,因此,可以认为千枚岩中黄铁矿环带中的硫以岩浆硫为主,同时混入了部分的沉积硫。

3.3 岩浆活动与成矿

为了探究阳山金矿的成矿作用与区域岩浆活动的关系,前人对此进行了大量的研究工作,主要集中在矿床地球化学特征及地质年代学方面。矿床的 C、H、O 同位素及微量元素的研究发现,成矿流体以岩浆热液为主,可能还有部分大气降水的参与(齐金忠等, 2006; 2008; 杨贵才等, 2007; 2008; 袁士松等, 2006; 罗锡明等, 2004)。同时,美国微细浸染型金矿的相关研究也表明,岩浆活动与成矿密切相关(Groff et al., 1997; Ressel et al., 2006; Henry et al., 1998)。这就说明在微细浸染型金矿中岩浆活动参与成矿的现象绝非偶然,岩浆活动是影响该类型金矿成矿过程的重要因素之一。杨荣生等(2006)对阳

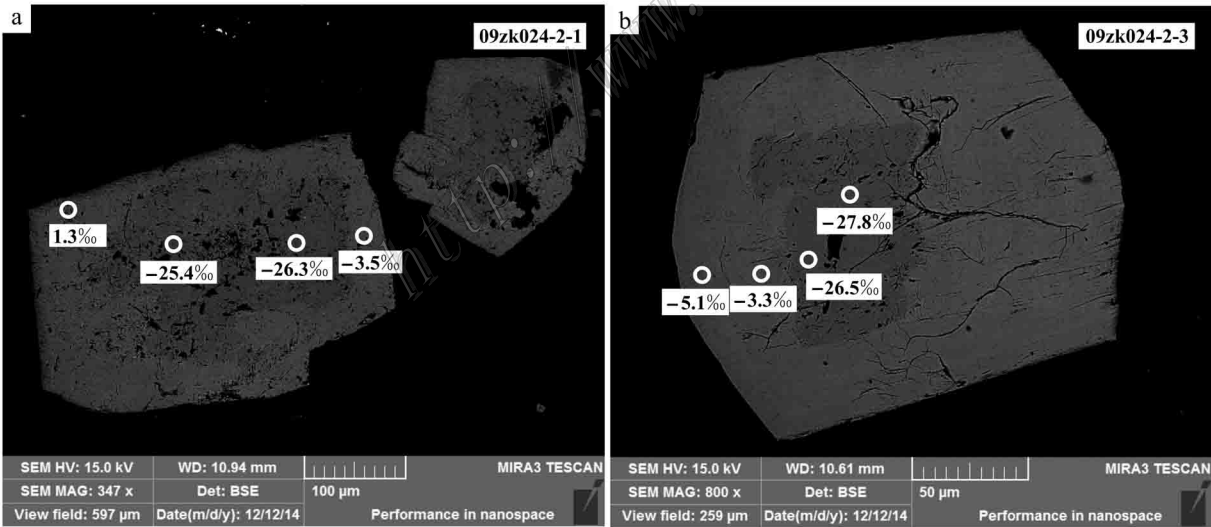


图 5 千枚岩中黄铁矿的硫同位素分布

图 a、b 显示千枚岩中黄铁矿核部是沉积成因,而环带黄铁矿的硫来自岩浆硫,也可能有一定程度的沉积硫混入

Fig. 5 The distribution of sulfur isotopes in pyrites from phyllite

The distribution of sulfur isotope in phyllite suggests that cores of pyrites have a sedimentary origin and sulfur in rims was derived from the magma contaminated by sulfur in sedimentary rocks

山金矿含矿花岗斑岩脉中独居石的 Th-U-Pb 化学年龄进行了测定,结果表明花岗斑岩侵入结晶的等时线年龄为 (220 ± 3) Ma,与西秦岭碰撞型花岗岩大规模发育的时间一致,阳山金矿床的成矿年龄则为 (190 ± 3) Ma。齐金忠等(2005)对不同类型石英脉中捕获的岩浆锆石进行了 SHRIMP U-Pb 年龄的精确测定,结果发现锆石中存在 (197.6 ± 1.7) Ma、 (126.9 ± 3.2) Ma、 (51.2 ± 1.3) Ma 三个年龄组,表明阳山金矿区曾受到侏罗纪早期、白垩纪早期及古近纪(原早第三纪)的 3 次岩浆-热液活动的影响,其最终的形成时代为古近纪。这个结果与路彦明等(2006)提出的西秦岭地区存在 220~170 Ma、130 Ma 前后和 50 Ma 左右的 3 个金成矿高峰期的认识相吻合。

本文研究中,硫同位素分析表明斜长花岗斑岩脉中载金黄铁矿的硫主要来源于岩浆硫,同时黄铁矿的环带结构发育,多数表现为成岩期黄铁矿的核部以及围绕其生长的 2 期次环带,这就与阳山地区的 3 次岩浆活动和 3 次成矿事件相对应,暗示了岩浆活动可能直接导致了矿床的形成。此外,本次研究和梁金龙等(2015)的研究均证明黄铁矿中金含量的低值点出现在核部和最外层环带,高值点则出现在两者之间的区域(即中间环带),从而表明阳山金矿床的形成时间应该为早白垩世,并不同程度地受到了古近纪岩浆事件的影响,而早侏罗世时期的岩浆活动仅形成了成岩期黄铁矿的核部。因此,可以认为区内多次岩浆活动不仅提供了足够的热源,还带来了丰富的成矿物质,为矿床的形成创造了有利的条件。考虑到阳山金矿区内地表出露的岩浆岩皆为规模较小的岩枝和岩脉,推测其深部可能还存在较大的隐伏岩浆岩基。

4 结 论

(1) 黄铁矿的显微分析和元素面分布图显示,阳山金矿床的载金黄铁矿普遍发育环带结构,在颗粒尺度上,元素分布不均匀,表现为 Au、As 含量在核部及最外层环带较低,而在成矿期形成的中间环带最高的特征。

(2) 斜长花岗斑岩脉中载金黄铁矿的硫同位素值基本表现为核部高、环带低的特点,其中黄铁矿核部的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $0 \sim 1.3\text{‰}$ (平均 0.57‰),显示硫来源于深源岩浆,而环带的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-4.5\text{‰} \sim -1.3\text{‰}$

(平均 -2.72‰),表明黄铁矿环带中的硫主要来源于岩浆硫,同时可能还有部分沉积硫的混入。

(3) 千枚岩中草莓状黄铁矿和自形黄铁矿核部的硫同位素均为较大的负值,与细菌还原海水硫酸盐过程所产生的硫同位素分馏有关,而自形黄铁矿环带的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-5.1\text{‰} \sim 1.3\text{‰}$ (平均 -2.65‰),同样显示出硫主要以岩浆硫为主,同时含有部分沉积硫。

(4) 岩浆活动与成矿关系密切,岩浆活动的频发不仅为流体运移提供了足够的热源,同时还为成矿带来了丰富的成矿物质。

志 谢 本次研究的 BSE 分析得到了中国科学技术大学夏梅老师的鼎力协助,硫同位素测试工作得到了中国科学院地质与地球物理研究所张建超和郝佳龙老师的大力帮助,论文写作过程中得到了成都理工大学尹观教授的悉心指导,在此衷心地表示感谢!同时感谢匿名审稿人对本文提出的宝贵意见!

References

- Almeida C M D, Olivo G R, Chouinard, Weakly C and Poirier G. 2010. Mineral paragenesis, alteration, and geochemistry of the two types of gold ore and the host rocks from the Carlin-type deposits in the southern part of the Goldstrike property, northern Nevada: Implications for sources of ore-forming elements, ore genesis, and mineral exploration[J]. *Econ. Geol.*, 105: 971-1004.
- Arehart G B, Chrysosoulis S and Kesler S E. 1993. Gold and arsenic in iron sulfides from sediment-hosted micron gold deposits: Implications for depositional processes[J]. *Econ. Geol.*, 88: 171-185.
- Bagby W C and Berger B R. 1985. Geologic characteristics of sediment-hosted, disseminated precious-metal deposits in the western United States[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2: 169-202.
- Chang Z S, Large R R and Maslennikov V. 2008. Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: evidence for an early timing and a seawater sulfur source [J]. *Geology*, 36(12): 971-974.
- Chen Y J, Ni P, Fan H R, Pirajno F, Lai Y, Sun W C and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085-2108 (in Chinese with English abstract).
- Cline J S, Muntean J L, Gu X X and Xia Y. 2013. A comparison of Carlin-type gold deposits: Guizhou Province, gold triangle, southwest China, and northern Nevada, USA[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(1): 1-18.
- Fu S H, Gu X X, Wang Q, Xia Y, Zhang X C and Tao Y. 2004. The

- typomorphic characteristics of gold-bearing pyrites from Shuiyindong gold deposit, SW Guizhou[J]. *Acta Mineralogical Sinica*, 24(1): 75-80 (in Chinese with English abstract).
- Groff J A, Heizler M T, McIntosh W C and Norman D I. 1997. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating and mineral paragenesis for Carlin-type gold deposits along the Getchell Trend, Nevada: Evidence for Cretaceous and Tertiary gold mineralization[J]. *Econ. Geol.*, 92: 601-622.
- Han Y W and Ma Z D. 2004. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-370(in Chinese).
- Henry C D and Boden D R 1998. Eocene magmatism: The heat source for Carlin-type gold deposits of northern Nevada[J]. *Geology*, 26(12): 1067-1070.
- Hickey K A, Ahmed A D, Barker S L L and Leonardson R. 2014. Fault-controlled lateral fluid flow underneath and into a Carlin-type gold deposit: Isotopic and geochemical footprints[J]. *Econ. Geol.*, 109: 1431-1460.
- Kesler S E, Riciputi L C and Ye Z. 2005. Evidence for a magmatic origin for Carlin-type gold deposits: Isotopic composition of sulfur in the Betze-Post-Screamer deposit, Nevada, USA[J]. *Mineralium Deposita*, 40: 127-136.
- Lei S B. 2011. Tectonic and magmatic constraints on mineralization and gold prospecting of Yangshan gold belt, Gansu Province (dissertation for doctor degree)[D]. Supervisor: Deng J. Beijing: China University of Geosciences. 1-138 (in Chinese with English abstract).
- Li J Z, Yu J Y, Hu Q X, Nan Z L, Mao S D and Wang Y M. 2011. Exploration progress and prospecting potential of Yangshan gold belt, Gansu Province[J]. *Gold Science and Technology*, 19(6): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- Liang J L, Sun W D, Zhu S Y, Li H, Liu Y L and Zhai W. 2014. Mineralogical study of sediment-hosted gold deposits in the Yangshan ore field, Western Qinling Orogen, Central China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 85: 40-52.
- Liang J L, Sun W D, Nan Z L and Ding D J. 2015. Geology and geochemistry characteristics of Yangshan gold deposit and the occurrence of gold[M]. Beijing: Science Press. 1-93(in Chinese).
- Luo X M, Qi J Z, Yuan S S and Li Z H. 2004. Geological and microelement geochemical study of Yangshan gold deposit, Gansu[J]. *Geoscience*, 18(2): 203-209(in Chinese with English abstract).
- Lu Y M, Li H G, Chen Y G and Zhang G L. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of alteration minerals from Zhaishang gold deposit in Minxian County, Gansu Province, and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 25(5): 590-597(in Chinese with English abstract).
- Liu G Z, Liu J J and Liu X H. 2009. Geochemical characteristics and genetic model of the Zhaishang gold deposits in West Qinling[J]. *Geology and Exploration*, 45(3): 27-37(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon[A]. In: Barnes H L, ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* [C]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons. 509-567.
- Qi J Z, Yuan S S, Li L, Fan Y X, Liu W, Gao Q B, Sun B, Guo J H and Li Z H. 2003. Geological and geochemical studies of Yangshan gold deposit, Gansu Province[J]. *Mineral Deposits*, 22(1): 24-31 (in Chinese with English abstract).
- Qi J Z, Li L, Yuan S S, Liu Z J, Liu D Y, Wang Y B and Li Z H. 2005. A SHRIMP U-Pb chronological study of zircons from quartz veins of Yangshan gold deposit, Gansu Province[J]. *Mineral Deposits*, 24(2): 141-150(in Chinese with English abstract).
- Qi J Z, Yang G C and Luo X M. 2006. Tectonic-magmatic evolution and gold mineralization in Yangshan gold belt Gansu Province, China[J]. *Geoscience*, 20(4): 565-572(in Chinese with English abstract).
- Qi J Z, Li L and Yang G C. 2008. Genesis and metallogenic model of Yangshan gold deposit in Gansu Province[J]. *Mineral Deposits*, 27(1): 81-87(in Chinese with English abstract).
- Ressel M W and Henry C D. 2006. Igneous geology of the Carlin Trend, Nevada: Development of the Eocene Plutonic complex and significance of Carlin-type gold deposit[J]. *Econ. Geol.*, 101: 347-383.
- Simon G, Kesler S E and Chrysosoulis S. 1999. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada: Implication for deposition of gold in Carlin-type deposits[J]. *Econ. Geol.*, 94: 405-422.
- Shan L, Zheng Y Y, Xu R K, Cao L, Zhang Y L, Lian Y L and Li Y H. 2009. Review on sulfur isotopic tracing and hydrothermal metallogenesis[J]. *Geology and Resources*, 18(3): 197-203(in Chinese with English abstract).
- Su W C, Zhang H T, Hu R Z, Ge X, Xia B, Chen Y Y and Zhu C. 2012. Mineralogy and geochemistry of gold-bearing arsenian pyrite from Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: Implications for gold depositional processes[J]. *Mineralium Deposita*, 47: 653-662.
- Yang G C and Qi J Z. 2008. Geological characteristics and ore-forming material source of Yangshan gold deposit, Gansu[J]. *Gold Science and Technology*, 16(4): 20-24(in Chinese with English abstract).
- Yang G C, Qi J Z, Dong H F, Guo J H and Li Z H. 2007. Geology and isotope characters of Yangshan gold deposit, Gansu[J]. *Geology and Prospecting*, 43(3): 37-41(in Chinese with English abstract).
- Yang R S, Chen Y J, Zhang F X, Li Z H, Mao S D, Liu H L and Zhao C H. 2006. Chemical Th-U-Pb ages of monazite from the Yangshan gold deposit, Gansu Province and their geologic metallogenic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2603-2610(in Chinese with English abstract).
- Ye Z J, Kesler S E, Essene E J, Zohar P B and Borhauer J L. 2003. Relation of Carlin-type gold mineralization to lithology, structure and alteration: Screamer zone, Betze-Post deposit, Nevada[J]. *Mineralium Deposita*, 38: 22-38.
- Yin G and Ni S J. 2009. *Isotope geochemistry*[M]. Beijing: Geological

Publishing House. 1-409(in Chinese).

Yuan S S, Qi J Z, Ge L S and Lu Y M. 2006. Elemental geochemistry and significance of prospecting for Yangshan super-large gold deposit, Gansu[J]. *Northwestern Geology*, 39(3): 20-27(in Chinese with English abstract).

Zhang J C, Lin Y T, Yang W, Shen W J, Hao J L, Hu S and Cao M J. 2014. Improved precision and spatial resolution of sulfur isotope analysis using NanoSIMS[J]. *J. Anal. At. Spectrom*, 29: 1934-1943.

Zhang Y, Xia Y, Wang Z P, Yan B W, Fu Z K and Chen M. 2010. Re and stable isotope geochemical characteristics of Bojitian gold deposit, Guizhou Province[J]. *Earth Science Frontier*, 17(2): 385-395(in Chinese with English abstract).

Zhao J, Liang J L and Han B. 2017. The component analyses of Au-bearing minerals and the occurrence of gold in Shuiyindong and Yangshan Carlin-type gold deposits, China[J]. *Bulletin of Science and Technology*, (in Press).

附中文参考文献

陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 23(9): 2085-2108.

付绍洪, 顾雪祥, 王乾, 夏勇, 张兴春, 陶琰. 2004. 黔西南水银洞金矿床载金黄铁矿型特征[J]. *矿物学报*, 24(1): 75-80.

韩吟文, 马振东, 主编. 2003. 地球化学[M]. 第一版. 北京: 地质出版社. 1-370.

雷时斌. 2011. 甘肃阳山金矿带构造-岩浆成矿作用及勘查找矿方向(博士论文)[D]. 导师: 邓军. 北京: 中国地质大学. 1-138.

李建忠, 余金元, 胡琴霞, 南争路, 毛世东, 王以明. 2011. 甘肃阳山金矿带地质勘查进展与找矿远景[J]. *黄金科学技术*, 19(6): 1-6.

梁金龙, 孙卫东, 南争路, 丁德建. 2015. 阳山金矿地质地球化学特征及金赋存状态[M]. 第一版. 北京: 科学出版社. 1-93.

刘光智, 刘家军, 刘新会. 2009. 西秦岭寨上金矿床地球化学特征及成因机制研究[J]. *地质与勘探*, 45(2): 27-37.

路彦明, 李汉光, 陈勇敢, 张国利. 2006. 西秦岭寨上金矿床中石英和绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar定年[J]. *矿床地质*, 25(5): 590-597.

罗锡明, 齐金忠, 袁士松, 李志宏. 2004. 甘肃阳山金矿床微量元素及稳定同位素的地球化学研究[J]. *现代地质*, 18(2): 203-209.

齐金忠, 袁士松, 李莉, 范永香, 刘伟, 高秋斌, 孙彬, 郭俊华, 李志宏. 2003. 甘肃省文县阳山金矿床地质地球化学研究[J]. *矿床地质*, 22(1): 24-31.

齐金忠, 李莉, 袁士松, 刘志杰, 刘敦一, 王彦斌, 李志宏. 2005. 甘肃阳山金矿床石英脉中锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究[J]. *矿床地质*, 24(2): 141-150.

齐金忠, 杨贵才, 罗锡明. 2006. 甘肃阳山金矿带构造岩浆演化与金矿成矿[J]. *现代地质*, 20(4): 564-572.

齐金忠, 李莉, 杨贵才. 2008. 甘肃省阳山金矿床成因及成矿模式[J]. *矿床地质*, 27(1): 81-87.

陕亮, 郑有业, 许荣科, 曹亮, 张雨莲, 连永牢, 李闫华. 2009. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究[J]. *地质与资源*, 18(3): 197-203.

杨贵才, 齐金忠, 董华芳, 郭俊华, 李志宏. 2007. 甘肃省文县阳山金矿床地质及同位素特征[J]. *地质与勘探*, 43(3): 37-41.

杨贵才, 齐金忠. 2008. 甘肃省文县阳山金矿床地质特征及成矿物质来源[J]. *黄金科学技术*, 16(4): 20-24.

杨荣生, 陈衍景, 张复新, 李志宏, 毛世东, 刘红杰, 赵成海. 2006. 甘肃阳山金矿独居石 Th-U-Pb 化学年龄及其地质和成矿意义[J]. *岩石学报*, 22(10): 2603-2610.

尹观, 倪师军, 编著. 2009. 同位素地球化学[M]. 第一版. 北京: 地质出版社. 1-409.

袁士松, 齐金忠, 葛良胜, 路彦明. 2006. 甘肃文县阳山特大型金矿田微量元素特征及其找矿意义[J]. *西北地质*, 39(3): 20-27.

张瑜, 夏勇, 王泽鹏, 闫宝文, 付芝康, 陈明. 2010. 贵州簸箕田金矿单矿物稀土元素和同位素地球化学特征[J]. *地学前缘*, 17(2): 385-395.

赵静, 梁金龙, 韩波. 2017. 水银洞金矿与阳山金矿载金矿物成分分析 & 金的赋存状态[J]. *科技通报*, 已录用, 待发表.