

甘肃岗岔金矿床同位素地球化学特征 及成矿物质来源探讨

李杰^{1,3}, 申俊峰^{1*}, 李金春², 刘圣强¹, 王冬丽¹, 张弘¹

1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 惠天然矿业有限公司, 兰州 730000;
3. 内蒙古第九地质矿产勘查开发有限责任公司, 内蒙古 锡林浩特 026000

摘要: 岗岔金矿床为近年来新发现的中型受断裂构造控制的浅成低温热液矿床, 为了探讨其成矿物质来源, 对主矿脉 Au3 号脉矿体中的黄铁矿、赋矿围岩全岩的 S、Pb 同位素和矿脉中石英的 H、O 同位素进行了分析测试。结果显示, 矿体中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为 0.6‰~1.3‰, 均值为 0.975‰, 同位素组成比较均一, 具有明显的幔源硫特征; 矿体黄铁矿与赋矿围岩具有相近的 Pb 同位素组成, 其 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 17.935~18.208 (均值为 18.090), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.539~15.74 (均值为 15.568), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 38.093~38.478 (均值为 38.280); μ 值($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) 介于 9.39~9.53, ω 值为 36.81~38.14, 暗示其铅源为壳幔混合来源, 且受造山作用与岩浆作用影响较为明显。矿脉中石英 H、O 同位素测试获得: $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 -88.6‰~-76.7‰ (均值为 -80.92‰), $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 6.53‰~8.63‰ (均值为 7.46‰), 显示出岗岔金矿床成矿热液流体主要来自岩浆, 混有少量大气降水。上述 S、Pb、H、O 同位素特征表明岗岔金矿床成矿物质和流体来自壳幔混源且以幔源为主。

关键词: 稳定同位素; 地球化学; 成矿物质; 幔源; 金矿床; 甘肃省

中图分类号: P618.510.142 文章编号: 1007-2802(2016)05-0976-08 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.05.018

Stable Isotope Geochemical Characteristics and Ore-Forming Material Source of the Gangcha Gold Deposit, Gansu Province, China

LI Jie^{1,3}, SHEN Jun-feng^{1*}, LI Jin-chun², LIU Sheng-qiang¹, WANG Dong-li¹, ZHANG Hong¹

1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Hui Tian-ran Mining Limited, Lanzhou 730000, China;
3. Inner Mongolia Ninth Geology Mineral Exploration and Development Institute, Xilinhaote Inner Mongolia 026000, China

Abstract: The Gangcha gold deposit is a fault-controlled medium sized epithermal gold deposit which was recently discovered in Gansu Province. In order to discuss the ore-forming material source, S and Pb isotopes of pyrite from the Lode Au3 and of host rocks, and H and O isotopes of gangue quartz samples have been analyzed in this paper. The results indicate that $\delta^{34}\text{S}$ values of pyrites in ores change from 0.6‰ to 1.3‰, with average of 0.975‰, indicating that they have relatively homogeneous sulfur isotopic compositions and obvious features of mantle sourced sulfur. The pyrite and host rock have similar Pb isotopic compositions, with their $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values changing from 17.935 to 18.208 (average 18.090), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values changing from 15.539 to 15.74 (average 15.568), and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ values changing from 38.093 to 38.47 (average 38.280), respectively. The μ and ω ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) values of Pb isotopic compositions change from 9.39 to 9.53 and from 36.81 to 38.14, respectively. This indicates that Pb was derived from the mixed source of lower crust and mantle, with obvious influence of the magmatism and orogenesis. H, O isotopes of inclusion waters in quartz veins are analyzed with the $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ values varying from -88.6 to -76.7‰ (the average -80.92‰) and $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ values ranging from 6.53 to 8.63‰ (average 7.46‰). It shows that the ore-forming fluid of the Gangcha deposit is mainly originated from magmatic fluid with a minor input of meteoric water. Above features of the S, Pb, H, O isotopes indicate that the ore-forming materials and fluid of the Gangcha deposit were mainly derived from the mantle with minor input of crustal materials.

Key words: stable isotope; geochemistry; ore-forming materials; mantle; gold deposit; Gansu Province

收稿日期: 2015-11-16 收到, 2015-12-09 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41072070)

第一作者简介: 李杰 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 成因矿物学与找矿矿物学. E-mail: pengpeng1991j@126.com.

* 通讯作者简介: 申俊峰 (1962-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 成因矿物学与找矿矿物学. E-mail: shenj@cgub.edu.cn.

西秦岭地区是中国继胶东之后又一金矿重要产区,甘肃是西秦岭最大的金矿分布省。岗盆金矿床位于夏河-合作断裂带南侧的合作市北东 19 km 处,为近年来新发现的浅成中低温热液矿床。就整个西秦岭而言,前人在李坝金矿、金山金矿、寨上金矿、鹿儿坝金矿、枣子沟金矿、老豆金矿等进行 Pb、S 同位素测试,并基于同位素特征探讨了成矿物质来源(孙树浩和文国林,1993;何大伦,1995;张姚代等,2001;杨秉进和陈平,2004;冯建忠等,2004;路彦明等,2006;廖延福等,2009;吕新彪等,2009;陈耀宇和代文军,2012)。岗盆金矿床为新发现矿床,尚未见同位素研究。本文对该矿区的硫、铅、氢、氧同位素组成进行研究,并与上述矿床对比,进一步探讨该矿床成矿物质来源。

1 成矿地质背景

岗盆金矿床大地构造位置位于秦岭造山带北缘的夏河—岷县—礼县逆冲推覆构造带北东侧(图 1a)。沿此断裂带,已发现各类矿床(点)100 余处,主要以 Au、Cu、Hg、Sb 为主。其中较大的矿床有枣子沟金矿、早仁道金矿、老豆金矿床、渣滩金矿、德乌鲁铜金矿床、岗以铜矿床等。区内构造线总体

为北西西走向,主要出露地层有下石炭统巴都组(C_{1bd}),中石炭统下加岭组(C_{2x}),下二叠统大关山组(P_{1dg}),下三叠统隆务河组(T_1l),以及新近系甘肃群(NG)等(图 1b)。区内构造线为北西西走向,多数学者认为该区域金成矿与北西-北西西向深大断裂关系密切,而且显著受印支期和燕山期岩浆活动的影响(周会武等,2003;王峰,2004;周俊烈等,2010;骆必继等,2012)。

岗盆金矿床位于著名的美武岩体与德乌鲁岩体之间靠近德乌鲁岩体一侧,其岩性主要为花岗闪长岩和石英闪长岩,锆石 U-Pb 年龄主要在为 239~245 Ma,个别年龄为 168 Ma(周俊烈等,2010;骆必继等,2012),属于早-中三叠世,为西秦岭的碰撞造山前期(Dong *et al.*, 2011)。早-中三叠世为勉略洋盆向秦岭微板块俯冲后随秦岭与扬子两陆块的碰撞,秦岭海相沉积在中生代早期退缩到南秦岭,主要集中在西秦岭一带。三叠纪后,由于陆内俯冲造山持续作用,形成了与造山带平行或垂直的中新生代断陷盆地及中生代陆相火山岩,这些事实说明西秦岭在陆内造山阶段构造活动依然很活跃,有多期构造-热事件和大规模成矿作用的发生(姚书振等,2002)。

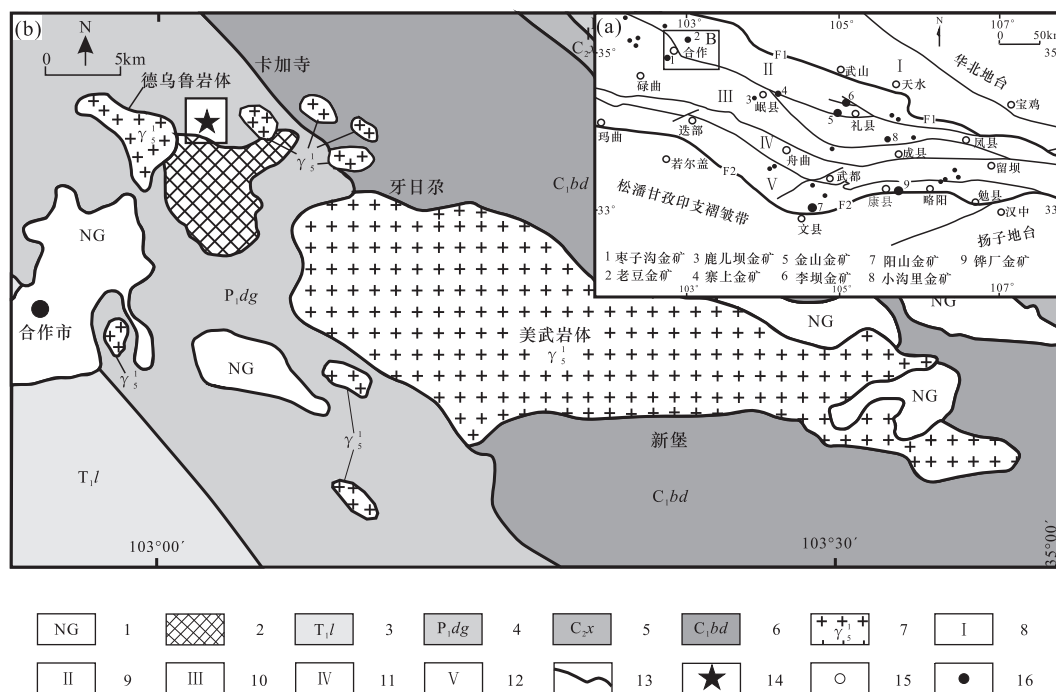


图 1 西秦岭金矿分布略图及区域地质图(据肖力等,2009;周俊烈等,2010)

Fig.1 Simplified map of regional geology and the distribution of gold deposits in the Western Qinling Mountains (modified after Xiao Li *et al.*, 2009; Zhou Junlie *et al.*, 2010)

2 矿床地质特征

岗岔矿区主要出露二叠系和三叠系地层,即下伏二叠系的一套浅变质砂板岩夹碳质板岩组合,其上不整合覆盖三叠系安山质火山碎屑岩(主要为凝灰岩和含角砾凝灰岩)和安山岩组合,呈典型的“二元结构”。第四系冲洪积层(Q_h)分布于洼地及河谷地带,矿区西南部出露少量花岗闪长岩(图2)。矿区断裂构造发育,走向以北北西方向为主,且金矿脉产出明显受控于断裂构造(图2),其中F1、F2、F3、F4和F6分别控制了Au1、Au2、Au3、Au4和Au5号金矿脉。矿区内花岗岩岩性为花岗闪长岩,前人(李金春,2015)对其测年,年龄为246 Ma。该侵入体呈灰白色、浅灰色,中细粒半自形粒状结构或斑状结构,块状构造。矿物粒度0.2~1.5 mm,矿物成分有斜长石(40%~60%)、钾长石(10%~20%)、石英(20%~30%)、角闪石(5%~10%)、黑云母(2%~5%)等。斜长石呈板状或板柱状,具钠长石双晶,有时具环带构造;角闪石呈柱状,为普通角闪石。岩石具轻微的绢云母化、绿泥石化。

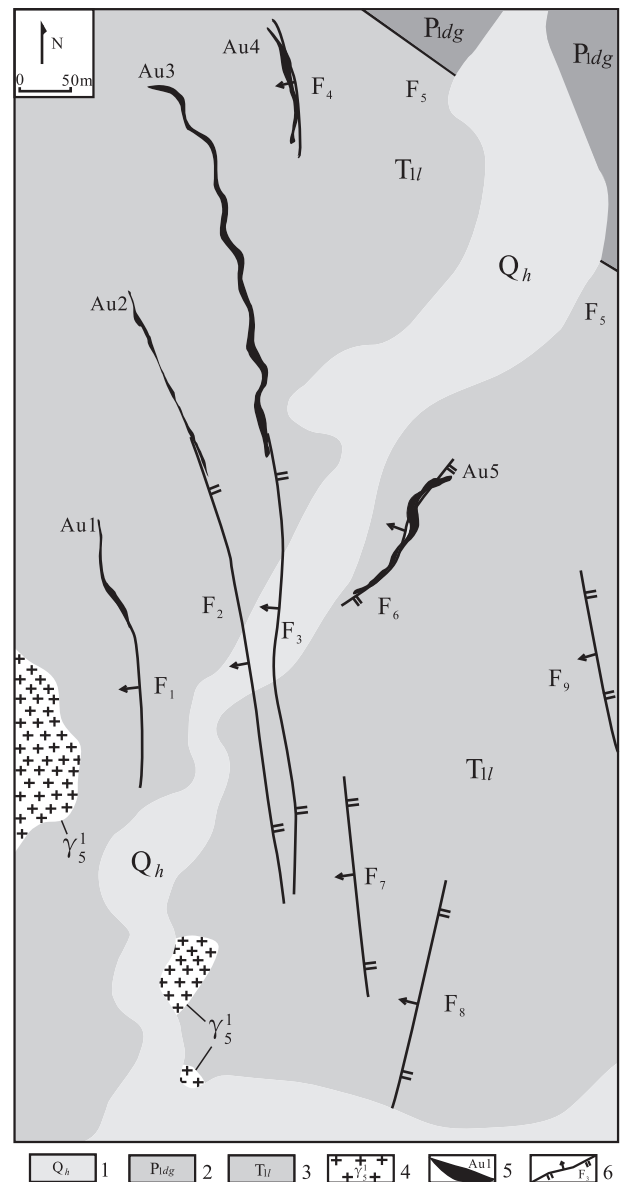
岗岔金矿床目前圈出5条含矿构造破碎带(图2),金矿体主要呈脉状、似脉状、透镜状和串珠状。Au3号矿脉是矿区主要的金矿脉,该矿脉明显受构造控制,倾向 $260^{\circ}\sim 270^{\circ}$,倾角 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。主要赋矿围岩为凝灰岩,其埋藏较深、剥蚀较浅。矿体规模较大,地面走向延伸超过1 km,厚度为0.83~8.04 m,平均厚度约为2.91 m,厚度变化系数为242.23%,矿石平均品位 $Au=2.99\times 10^{-6}$, $Ag=8.64\times 10^{-6}$ 。

Au3号金矿脉矿石结构有自形-半自形晶粒结构、他形晶粒状结构、碎裂结构、假像结构、包含结构、固溶体分离结构、压碎结构等。矿石构造主要为浸染状、细脉状、网脉状构造等。矿石组分较复杂,矿石矿物中氧化物主要有赤铁矿、褐铁矿;硫化物以黄铁矿为主,少量毒砂、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等。脉石矿物有石英、方解石、角闪石、斜长石、及少量黑云母、绿帘石和绿泥石等;金在氧化矿石中呈显微可见金($1\sim 4\ \mu\text{m}$),原生矿石中主要以“不可见金”形式存在。

3 稳定同位素地球化学特征

3.1 硫、铅同位素

S同位素示踪通常作为追踪成矿物质来源的重要方法(陕亮等,2009)。前人研究表明(Ohmoto, 1972),矿石中硫化物的S同位素组成与成矿流体中的S同位素组成基本一致。Pb同位素组成是示



1-第四系冲洪积层(Q_h); 2-下二叠统大观山组(P_{ldg}); 3-下三叠统隆务河组(T_{ll}); 4-印支期岩体; 5-金矿脉及编号; 6-断层

图2 甘肃岗岔矿区地质简图
Fig.2 Geological map of the Gangcha gold deposit, Gansu Province

踪成矿物质来源最直接、最有效的方法之一(张乾等,2000)。黄铁矿是岗岔金矿床中最主要的载金矿物,故对矿床中黄铁矿等金属硫化物进行S、Pb同位素测定。

3.1.1 样品采集与测试 本次用于S同位素测试的黄铁矿4件,采自矿区钻孔及平硐工程的Au3号金矿脉不同中段,编号分别为TW-2、TW-7-1、TW-7-2、PD2-1-CD1(E)-8。用于Pb同位素测试的样品9件,其中4件为Au3号金矿脉不同中段矿体中的黄铁矿、编号为TW-2、TW-7-1、TW-7-2、PD2-1-CD1(E)-8,5件为赋矿围岩(三叠系隆务河组凝灰岩),

编号分别为 TW-6-1、TW-6-3、TW-8、TW-12、PD2-1-CD1(E)-1。

S 同位素测试在核工业北京地质研究院分析测试中心完成,测试按照 DZ/T0184.14-1997《硫化物中硫同位素组成的测定》标准进行,Delta v plus 质谱仪测定,分析精度优于 2%。Pb 同位素由 ISO-PROBE-T 热电离质谱仪获得,误差以 2σ 计。μ: 初始 ²³⁸U/²⁰⁴Pb ; ω: 初始 ²³²Th/²⁰⁴Pb ; μ, ω, V1, V2, Δβ, Δγ 参数均由 Geokit 软件计算获得。

3.1.2 测试结果及成矿物质来源探讨

(1) Au3 号矿脉 4 件黄铁矿单矿物同位素测试结果见表 1。从表 1 可看出,岗岔金矿床矿体中黄铁矿 δ³⁴S 值为 0.6‰~1.3‰,均值为 0.975‰,极差为 0.7‰,变化范围极窄,其硫同位素组成比较稳定,硫源均一。岗岔金矿床硫同位素值与陨硫和地幔硫 (0‰ ± 3‰) 非常接近 (Chaussidon and Lorand,1990; Rollison,2000)。与西秦岭地区其他金矿床(表 2)具有明显不同的硫同位素组成,在霍夫斯硫同位素图解上(图 3)可以看出,西秦岭地区的大多数金矿床硫同位素值主要落于花岗岩范围内,说明其硫源主要与岩浆活动有关(肖力等,2009)。岗岔金矿床硫同位素值为 0.6‰~1.3‰,因此,岗岔金矿床成矿热液硫源可能来自混有深源硫的混合硫源。

表 1 岗岔金矿床样品 δ³⁴S 测试结果表

Table 1 δ ³⁴ S results of samples from the Gangcha gold deposit			
序号	样品编号	样品类型	δ ³⁴ S _{V-CDT} /‰
1	TW-2	矿体(黄铁矿)	0.6
2	TW-7-1	矿体(黄铁矿)	1.1
3	TW-7-2	矿体(黄铁矿)	0.9
4	PD2-1-CD1(E)-8	矿体(黄铁矿)	1.3

(2) 本次对岗岔金矿床 Au3 号脉中 4 件矿体黄铁矿铅同位素及 5 件赋矿围岩铅同位素测试结果及相关参数见表 3。

岗岔金矿床 Au3 号脉中矿体黄铁矿的 Pb 同位素分析结果表明,其 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 值为 17.935~18.095,均值为 18.032; ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 值为 15.559~15.584,均值为 15.568; ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 值为 38.093~38.273,均值为 38.191。显然,各组比值变化范围较小,Pb 同位素组成稳定,说明区内成矿物质来源较为一致。其 μ (²³⁸U/²⁰⁴Pb) 值为 9.42~9.47, ω (²³²Th/²⁰⁴Pb) 值为 37.15~37.44,说明其来源可能

表 2 西秦岭地区部分金矿床硫同位素组成

Table 2 S isotopic data of some gold deposits in the western Qinling Mountains

产地	采样位置	测试矿物	δ ³⁴ S/‰	资料来源
铍厂沟金矿	矿石黄铁矿	黄铁矿	-2.7~+4.55	何大伦,1995
小沟里金矿	石英脉黄铁矿	黄铁矿	+5.16~+14.6	冯建忠等,2004
李坝金矿	Ⅱ阶段黄铁矿	黄铁矿	+2.5~+10.6	张姚代等,2001
金山金矿	矿石黄铁矿	黄铁矿	+3.5~+6.9	杨秉进和陈平,2004
寨上金矿	19#0、19#6 线黄铁矿	硫化物	+3.0~+9.2	路彦明等,2006
鹿儿坝金矿	矿石黄铁矿	黄铁矿	+7.5	路彦明等,2006
阳山金矿	安坝段黄铁矿	黄铁矿	-2.2~-0.7	齐金忠等,2006
枣子沟金矿	矿体 3 件辉锑矿 2 件黄铁矿	辉锑矿、黄铁矿	-9.03~-8.59	吕新彪等,2009
老豆金矿	矿石辉锑矿	辉锑矿	+4.5~+5.3	王峰,2004
岗岔金矿	矿石黄铁矿	黄铁矿	0.6~1.3	本文

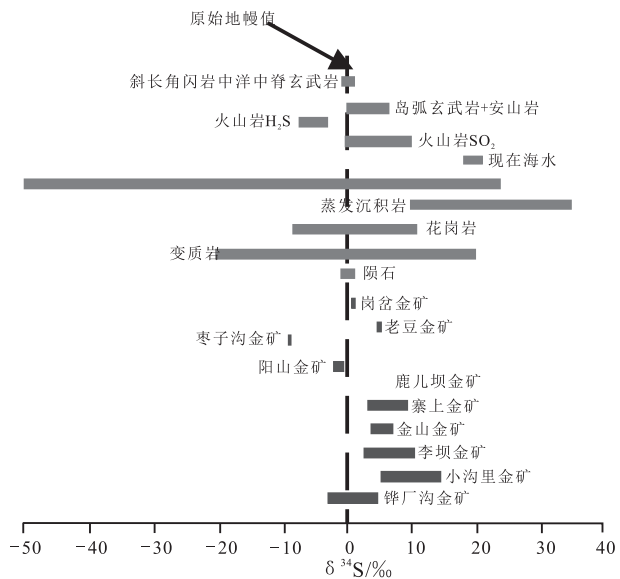


图 3 岗岔金床中黄铁矿硫同位素分布图解 (底图据霍夫斯,1993)

Fig.3 S isotopes of pyrite of the Gangcha gold deposit comparing those of references(modified after Hofstede,1993)

为下地壳或上地幔。赋矿围岩分析结果表明,其 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 值为 17.987~18.208,均值为 18.147; ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 值为 15.539~15.74,均值为 15.567; ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 值为 38.175~38.478,均值为 38.368。μ 值为 9.39~9.53,ω 值为 36.81~38.14。矿体中黄铁矿铅同位素各组比值、μ 值、ω 值与赋矿围岩结果基本一致,说明矿石铅来源与赋矿围岩铅来源具有很好的对应性,二者铅具有相同来源或者矿体成矿物质来自赋矿围岩本身。

将测试结果投点 Zartman 铅构造环境图上(图 4),矿石、赋矿围岩铅落点主要分为 2 个区域,一是比较集中落于地幔演化线与造山带演化线之间,靠

表 3 岗岔金矿床矿体及围岩黄铁矿样品铅同位素组成及相关参数表

Table 3 Pb isotopic compositions and their relative parameters of pyrite samples from ore bodies and of country rocks of the Gangcha gold deposit

样品号	测定对象	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	ω	ν1	ν2	Δβ	Δγ
TW-2	矿体中黄铁矿	18.095	15.584	38.273	9.47	37.44	65.43	50.84	18.01	37.78
TW-7-1	矿体中黄铁矿	18.044	15.559	38.195	9.42	37.16	62.72	48.96	16.41	35.97
TW-7-2	矿体中黄铁矿	18.055	15.561	38.202	9.43	37.15	62.76	49.19	16.51	35.91
PD2-1-CD1(E)-8	矿体中黄铁矿	17.935	15.567	38.093	9.46	37.44	64.07	49.44	17.43	37.12
TW-6-1	凝灰岩	18.119	15.614	38.401	9.53	38.14	70.57	52.24	20.07	42.07
TW-6-3	凝灰岩	18.192	15.568	38.397	9.42	37.26	64.23	49.35	16.5	37.16
TW-8	凝灰岩	18.184	15.56	38.478	9.41	37.56	65.69	47.66	15.96	39.17
TW-12	凝灰岩	18.208	15.571	38.444	9.43	37.39	65.19	49.28	16.66	38.08
PD2-1-CD1(E)-1	凝灰岩	18.094	15.574	38.247	9.45	37.24	63.92	50.28	17.29	36.57

测试者：中国地质科学院矿产资源研究所分析测试中心（样号 TW-2、TW-7-1、TW-7-2、TW-6-1、TW-6-3、TW-8、TW-9、TW-12、PD2-1E 凝灰岩），测试时间：2010 年；核工业北京地质研究院分析测试中心（样号 PD2-1E 黄铁矿、NO.1、NO.6），测试时间：2013 年。

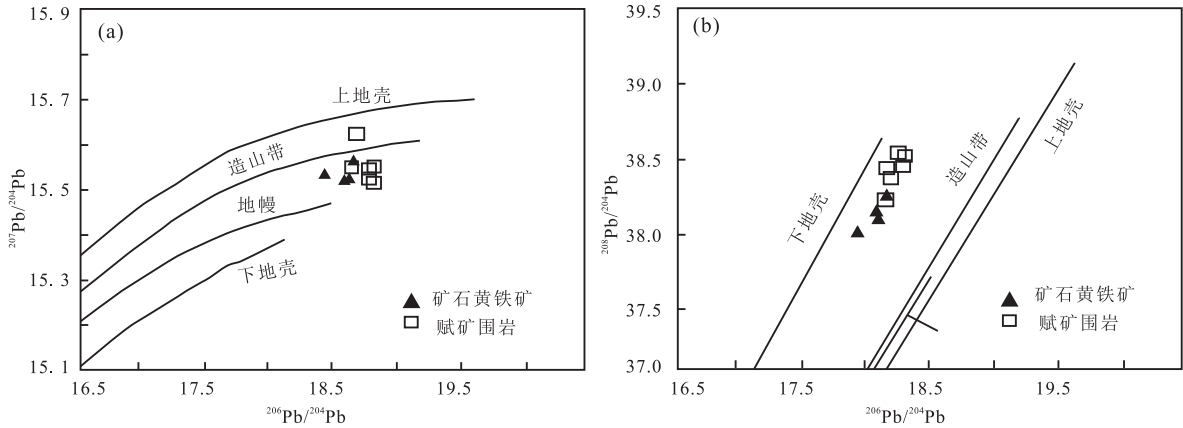


图 4 岗岔金矿床矿石黄铁矿及赋矿围岩中 Pb 同位素构造模式图(底图据朱炳泉,1998)

Fig.4 Pb isotopic compositions of pyrites in ore bodies and of host rocks from the Gangcha gold deposit (base map cited from Zhu Bingquan,1998)

近造山带演化线一侧(图 4a)；二是主要落于下地壳与造山带之间,靠近下地壳一侧(图 4b)。整体看来,矿石铅与赋矿围岩铅落点具有相似性,表明它们的铅源均具有壳幔混合特点,这与前人(肖力等,2009)对西秦岭成矿带中段金多金属矿床铅同位素统计结果相一致。

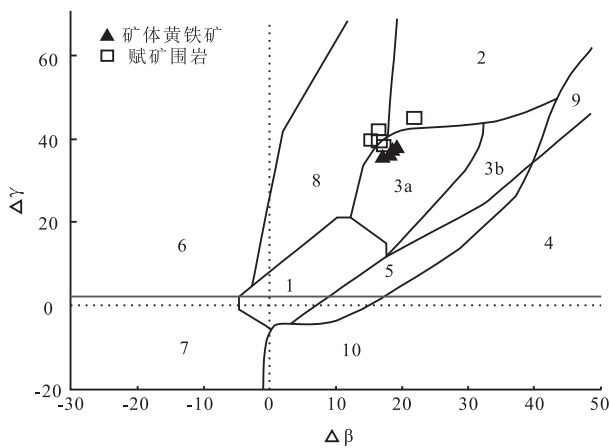
钍铅的变化以及钍铅与铀铅同位素组成的相互关系(即 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 之间变化关系)对于地质过程与物质来源能提供更丰富的信息(朱炳泉,1998)。因此,将该矿区所测铅数据投影在 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 变化范围图解上(图 5),可以看出矿石铅全部落于上地壳与地幔混合的俯冲带的岩浆作用区域,说明矿石铅来源为壳幔混合源,且受岩浆作用明显;赋矿围岩铅主要落在上地壳与地幔混合之俯冲带和造山带的分界线上,部分落在造山带、岩浆作用区域。综上所述,岗岔金矿床矿体与赋矿围岩(凝灰岩)有着相同

的铅来源,均为壳幔混合源,且受造山作用、岩浆作用影响较为明显。

3.2 氢、氧同位素

3.2.1 样品采集与测试

用于测定 H、O 同位素组成测试的 5 个石英样品采自岗岔金矿床钻孔及矿区地表,样品编号为 ZK07-6-518、ZK07-6-598、ZK07-6-626、ZK23-5-282、T143。测试工作在核工业北京地质研究院稳定同位素实验室完成,分析仪器为 MAT-235 质谱仪。对硅酸盐样品的 O 同位素分析采用传统的 BrF_5 分析方法, BrF_5 与含氧矿物在真空和高温条件下反应提取矿物氧,并与灼热电阻石墨棒燃烧转化成 CO_2 气体,分析精度优于 0.2‰,相对于标准为 V-SMOW。选取 40~60 目的纯净石英样品,在 150℃ 低温下真空去气 4 h 以上,以彻底除去表面吸附水和次生包裹体水,然后在 400℃ 高温下爆裂取水,并与金属锌



1-地幔源铅; 2-上地壳源铅; 3-上地壳与地幔混合的俯冲铅(3a, 岩浆作用; 3b, 沉积作用); 4-化学沉积型铅; 5-海底热水作用铅; 6-中深变质作用铅; 7-深变质下地壳铅; 8-造山带铅; 9-古老页岩上地壳铅; 10-蜕变质铅

图5 铅同位素的 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因分类图解
Fig.5 The $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ diagram of Pb isotopes

反应生成 H_2 , 分析精度好于 $\pm 2\text{‰}$, 相对标准为V-SMOW。

3.2.2 测试结果及成矿物质来源探讨 5件石英H、O同位素测试结果见表4。表4中的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 为计算值,石英和水之间氧同位素分馏方程: $1000\ln\alpha_{Q-H_2O} = 3.38 \times 10^6 / t^2 - 3.4$ 计算得出 (Zhang, 1989)。从表4可以看出,岗岔金矿床的H、O同位素数据相差不大,其中 δD_{H_2O} 值变化范围为 $-88.6\text{‰} \sim -76.7\text{‰}$,均值为 -80.92‰ ; $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值变化范围为 $6.53\text{‰} \sim 8.63\text{‰}$,均值为 7.46‰ 。由 $\delta^{18}O_{H_2O}$ - δD_{H_2O} 同模式图上(图6)可见,岗岔金矿床区成矿流体的H、O同位素投影点主要落在标准的岩浆水区域内,部分点向岩浆水区域下部漂移。而西秦岭成矿带上其他典型造山型金矿床,如李坝(冯建忠等,2003; 温志亮等,2008)、八卦庙(冯建忠等,2004)、马鞍桥(朱赖民等,2009)、小沟里(冯建忠等,2002,2004)、丝毛岭(李霞等,2010)和卡林型金矿床,大水(韩春明等,2004)、拉尔玛(刘家军等,2000)、寨上(于岚,

2004)、枣子沟(曹晓峰等,2012)、阳山(罗锡明等,2004; 李晶等,2008; 杨贵才和齐金忠,2008)、夏家店(高菊生等,2006)、干河坝(任小华等,2007)、煎茶岭(任小华,2008)、丘陵(张复新等,2000)的H、O同位素值与卡林型金矿床的相近(图6)。西秦岭典型造山型金矿床的 δD_{H_2O} 值相对于卡林型金矿分布要偏重一些,有从岩浆水和变质水向大气降水的演化趋势。毛景文等(2005)据现有成矿年代学数据,认为这2类型金矿床几乎同时形成,均为后碰撞造山过程中热系统的产物。本次研究的结果表明,岗岔金矿床成矿热流体主要为岩浆水并混有少量大气降水,相对于区域典型矿床,该矿床与岩浆活动关系较为密切。

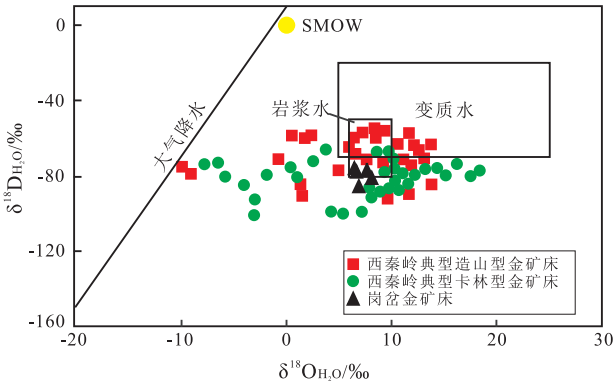


图6 岗岔金矿床与典型金矿床 δD - $\delta^{18}O$ 图解
Fig.6 Plot of δD values vs. $\delta^{18}O$ values of the fluids of the Gangcha gold deposit and other respective gold deposits in the western Qinling Mountains

4 成矿流体、物质来源及矿床成因探讨

岗岔金矿床 $\delta^{34}S$ 值为 $0.6\text{‰} \sim 1.3\text{‰}$, 均值为 0.975‰ , 接近0, 指示硫源可能混有深源硫。 $\delta^{34}S$ 值变化幅度较小, 说明成矿流体中硫组成稳定不变, 较为均一。矿体黄铁矿铅同位素比值、 μ 值、 ω 值与赋矿围岩(凝灰岩)结果基本一致, 2种铅具有内在的成因联系, 均来自于壳幔混合源区, 且受造山作

表4 岗岔金矿床石英脉中流体包裹体的氢、氧同位素组成

Table 4 δD and $\delta^{18}O$ values of inclusion fluids in quartz veins from the Gangcha gold deposit

样品号	产状	样品名称	$\delta D_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V-PDB}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{H_2O(V-SMOW)}/\text{‰}$	$t/^\circ\text{C}$
T143	地表	石英	-77.7	-11.6	18.9	7.99	212.8
ZK7-6-598	钻孔	石英	-82.8	-13.0	17.5	8.63	251.7
ZK7-6-626	钻孔	石英	-78.8	-14.8	15.6	6.94	256.2
ZK7-6-518	钻孔	石英	-88.6	-13.1	17.4	7.20	225.3
ZK23-5-282	钻孔	石英	-76.7	-13.9	16.5	6.53	229.6

用、岩浆作用影响较为明显。石英的 H、O 同位素指示成矿流体主要为岩浆流体,部分样品有向岩浆区域下部漂移的趋势,也说明成矿流体中混入有大气降水。与西秦岭典型造山型金矿床、卡林型金矿床对比,岗盆金矿床与岩浆活动关系更加密切。

岗盆金矿床属于浅成中低温热液矿床,成矿年龄为 225 Ma,火山岩成岩年龄为 239~245 Ma,与德乌鲁岩体年龄较为一致。岗盆金矿床成矿模式: 早中三叠世的印支运动,使秦岭微板块向北俯冲碰撞,隆升成陆。伴随陆内造山活动,俯冲板块发生断离,强烈的断裂构造活动造成软流圈物质上涌,幔源岩浆注入下地壳底部,使壳源物质发生部分熔融。晚三叠世,早期加厚的下地壳发生拆沉作用,形成印支晚期的岩浆活动。强烈的岩浆活动使成矿热液、成矿物质沿着深部大断裂运移并对围岩进行萃取逐渐富集,在有利的成矿条件、成矿部位富集叠加成矿,致使岗盆金矿床形成。

5 结论

(1) 矿床的成矿硫源可能为混有深源硫(幔源硫)的混合硫源,这与西秦岭地区大多数金矿床硫源明显不同,暗示成矿流体来源较深。

(2) 矿体黄铁矿、赋矿围岩的 Pb 同位素分析结果表明,二者具有近似的铅同位素组成,表明其具有共同的来源,并均为壳幔混合来源,且受造山作用与岩浆作用影响较为明显。

(3) S、Pb 同位素组成共同指示成矿物质来源与深部岩浆(壳幔混合来源)上侵有关,这类岩浆可能为上地壳拆沉形成的。

(4) 岗盆金矿床成矿热液流体主要为岩浆水,且混有少量大气降水,反映本区金矿床与岩浆活动关系较为密切。

参考文献 (References):

- Chaussidon M, Lorand J P. 1990. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariege (North-Eastern Pyrenees, France): An ion microprobe study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(10): 2835-2846
- Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, Liu X M, Genser J, Hauzenberger C. 2011. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 213-237
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 67(5): 551-578
- Rollison H R. 2000. 岩石地球化学. 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜, 译. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 235-242
- White D E. 1974. Diverse origins of hydrothermal ore fluids. *Economic*

- Geology*, 69(6): 954-972
- Zhang L G. 1989. Lead isotopic compositions of feldspars and ores and their geologic significance. *Chinese Journal of Geochemistry*, 8(1): 25-36
- 曹晓峰, Sanogo M L S, 吕新彪, 何谋春, 陈超, 朱江, 唐然坤, 刘智, 张彬. 2012. 甘肃枣子沟金矿床成矿过程分析——来自矿床地质特征、金的赋存状态及稳定同位素证据. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(4): 1039-1054
- 陈耀宇, 代文军. 2012. 枣子沟金矿地质特征及成矿模式探讨. *新疆地质*, 30(1): 90-94
- 冯建忠, 汪东波, 邵世才, 王学明, 林国芳. 2002. 西秦岭小沟里石英脉型金矿床成矿地质特征及成因. *矿床地质*, 21(2): 159-167
- 冯建忠, 汪东波, 王学明, 邵世才. 2004. 西秦岭 3 个典型金矿床稳定同位素地球化学特征. *中国地质*, 31(1): 78-84
- 冯建忠, 汪东波, 王学明, 邵世才, 林国芳, 史建军. 2003. 甘肃礼县李坝大型金矿床成矿地质特征及成因. *矿床地质*, 22(3): 257-263
- 高菊生, 王瑞廷, 张复新, 齐亚林, 梁小勇. 2006. 南秦岭下寒武系黑色岩系中夏家店金矿床地质地球化学特征. *中国地质*, 33(6): 1371-1378
- 韩春明, 袁万明, 于福生, 汤云晖, 保增宽. 2004. 甘肃省玛曲县大水金矿床地球化学特征. *地球学报*, 25(2): 127-132
- 何大伦. 1995. 陕西省略阳县铍厂沟细碧岩浆热液金矿床及地幔射气成矿机制. *四川地质学报*, 15(4): 295-303
- 霍夫斯. 1993. 稳定同位素地球化学. 丁梯平, 译. 北京: 中国科学技术大学出版社, 235-242
- 李晶, 陈衍景, 李强之, 毛世东, 秦艳, 郭俊华, 南争路, 杨荣生. 2008. 甘肃阳山金矿碳氢氧同位素与成矿流体来源. *岩石学报*, 24(4): 817-826
- 李霞, 王义天, 王瑞廷, 李建华, 王长安, 汶博, 王胜利. 2010. 西秦岭凤太矿集区丝毛岭金矿床地球化学特征. *岩石学报*, 26(3): 717-728
- 廖延福, 李鹏飞, 牟银才, 贾三石. 2009. 甘肃寨上金矿床地质特征与成因分析. *有色矿冶*, 25(1): 5-8
- 刘家军, 郑明华, 刘建明, 周德安. 2000. 西秦岭寒武系金矿床中硫同位素组成及其地质意义. *长春科技大学学报*, 30(2): 150-156
- 路彦明, 李汉光, 陈勇敢, 张国利, 张玉杰, 李振华. 2006. 甘肃岷县寨上金矿地质地球化学特征及成因. *地质与勘探*, 42(4): 25-31
- 骆必继, 张宏飞, 肖尊奇. 2012. 西秦岭印支早期美武岩体的岩石成因及其构造意义. *地学前缘*, 19(3): 199-213
- 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. *现代地质*, 18(2): 203-209
- 吕新彪, 曹晓峰, Sanogo M L S, 何谋春, 李亮, 张彬. 2009. 枣子沟金矿地质特征、控矿构造及物质来源探讨. *矿物学报*, (S1): 447-448
- 毛景文, 李厚明, 王义天, 张长青, 王瑞廷. 2005. 地幔流体参与胶东金矿成矿作用的氢氧碳硫同位素证据. *地质学报*, 79(6): 839-857
- 齐金忠, 杨贵才, 李莉, 范永香, 刘伟. 2006. 甘肃省阳山金矿床稳定同位素地球化学和成矿年代学及矿床成因. *中国地质*, 33

- (6): 1345-1353
- 任小华, 金文洪, 王瑞廷, 侯俊富, 钱壮志, 刘莉霞. 2007. 南秦岭略阳干河坝金矿床地质地球化学特征. 中国地质, 34(5): 878-886
- 任小华. 2008. 陕西勉略宁地区金属矿床成矿作用与找矿靶区预测研究. 博士学位论文. 西安: 长安大学
- 陕亮, 郑有业, 许荣科, 曹亮, 张雨莲, 连永华, 李闫华. 2009. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究. 地质与资源, 18(3): 197-203
- 孙树浩, 文国林. 1993. 微细浸染型联合村式金矿的地质和地球化学特征. 地质找矿论丛, 8(4): 9-22
- 王峰. 2004. 甘肃老豆村金矿成矿地质条件及形成机理浅析. 甘肃冶金, 26(2): 16-18
- 温志亮, 郭周平, 杨鹏飞, 吴金刚. 2008. 西秦岭李坝式金矿床地球化学特征及找矿方向研究. 地质与勘探, 44(6): 1-7
- 肖力, 赵玉锁, 张文钊, 邹依林, 潘爱军, 韩先菊, 崔龙, 张峰, 张勇. 2009. 西秦岭成矿带中东段金(铅锌)多金属矿成矿规律及资源潜力评价. 北京: 地质出版社
- 杨秉进, 陈平. 2004. 甘肃礼县金山金矿床成矿地质特征及成因探讨. 甘肃冶金, 26(2): 19-22
- 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. 黄金科学技术, 16(4): 20-24
- 姚书振, 丁振举, 周宗贵, 陈守余. 2002. 秦岭造山带金属成矿系统. 地球科学-中国地质大学学报, 27(5): 599-604
- 于岚. 2004. 甘肃岷县寨上金矿床地质地球化学特征与成因探讨. 硕士学位论文. 西安: 西北大学
- 张复新, 陈衍景, 李超, 张静, 马建秦, 李欣. 2000. 金龙岗-丘岭金矿床地质地球化学特征及成因: 秦岭式卡林型金矿成矿动力学机制. 中国科学(D 辑), 30(增刊): 73-81
- 张乾, 潘家永, 邵树勋. 2000. 中国某些金属矿床矿石铅来源的铅同位素诠释. 地球化学, 29(3): 231-238
- 张姚代, 王争鸣, 董新. 2001. 岩体与金矿的关系——以李坝式金矿为例. 甘肃地质学报, 10(2): 52-65
- 周会武, 王伟, 张发荣. 2003. 甘肃夏河——合作地区金矿特征及找矿思路. 甘肃地质学报, 12(1): 63-69
- 周俊烈, 随风春, 张世新. 2010. 甘肃省合作市德乌鲁岩体及外围金多金属成矿区成矿地质特征. 地质与勘探, 46(5): 779-787
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用-兼论中国大陆壳幔演化. 北京: 科学出版社
- 朱赖民, 张国伟, 刘家军, 姚安平, 杨涛, 王飞, 李桦, 郭波. 2009. 西秦岭——松潘构造结中的卡林型-类卡林型金矿床: 成矿构造背景、存在问题 and 研究趋势. 矿物学报, (增刊): 201-204

(本文责任编辑:刘莹)

·亮点速读·

中国科学院地球化学研究所建立高精度镓同位素分析方法

镓具有独特的地球化学性质和重要的经济价值,可用来模拟自然界中单一同位素元素铝的地球化学性质,结合铝来模拟海洋、河流、风化过程中痕量元素的地球化学行为,也可与硼共同表征陆生和海生的环境变化。镓还几乎存在于所有植物中,并表现出生物选择性。此外,单质镓被广泛应用于电子、航空、导弹工业等高科技领域,因此,供不应求的镓需求量迫切地需要探索除铝土矿、闪锌矿外的其它资源,或者开发新的从地质样品中浓缩或提炼镓的方法。也正是因为人类的大量使用,环境中镓的地球化学行为还可能受到人为干扰。然而,由于研究方法的限制,目前对镓元素地球化学性质的认知还十分有限,国际上新近发展起来的同位素方法可能有助于进一步了解镓的地球化学行为和循环。

近期,中国科学院地球化学研究所研究员陈玖斌课题组建立了利用双树脂从地质(生物)样品中 100% 提纯镓、并利用 MC-ICP-MS 精确检测镓稳定同位素比值($\delta^{71}\text{Ga}$)的方法。经过验证,镓的回收率为 $99.8\pm 0.8\%$ ($2\text{SD}, n=23$), $\delta^{71}\text{Ga}$ 的测试精度优于 0.05‰ (2SD)。用该方法对 10 个样品进行了分析,结果显示镓同位素变化范围可达 1.83‰ ,且工业生产标准的 $\delta^{71}\text{Ga}$ ($1.74\text{‰} \sim 1.83\text{‰}$) 显著高于地质样品 $\delta^{71}\text{Ga}$ ($0.02\text{‰} \sim 0.11\text{‰}$),预示着镓同位素在镓地球化学研究领域具有广泛的应用前景(例如,区分镓的人为源与自然源)。

该研究开辟了地球化学领域一个新的同位素体系,为探索天体演变、壳幔分异、气候变迁、表层风化等地质难题提供了新的研究工具,将大大推动地球化学相关领域研究发展。

[研究成果以 Precise Analysis of Gallium Isotopic Composition by MC-ICP-MS 为题发表在《Analytical Chemistry》杂志上,来源于中国科学院地球化学研究所网页]

(周新华 摘编)