1000-0569/2008/024(04)-0817-26 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

甘肃阳山金矿碳氢氧同位素与成矿流体来源*

李晶[1,2,3] 陈衍景[2**] 李强之[4] 毛世东[1,4] 秦艳[1] 郭俊华[4] 南争路[4] 杨荣生[2]

LI Jing[1,2,3], CHEN YanJing[2], LI QiangZhi[4], MAO ShiDong[1,4], QIN Yan[1], GUO JunHua[4], NAN ZhengLu[4] and YANG RongSheng[2]

1. 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
2. 北京大学造山带与地壳演化重点实验室, 北京 100871
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049
4. 武警黄金部队指挥部, 北京 100102

1. *Key Laboratory of Metallogenic Dynamics*, *Guangzhou Institute of Geochemistry*, *Chinese Academy of Scienses*, *Guangzhou* 510640, *China*
2. *Key Laboratory of Orogen and Crust Evolution*, *Peking University*, *Beijing* 100871, *China*
3. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*
4. *Headquarter of Gold Exploration Branch of Armed Police*, *Beijing* 100102, *China*

2008-02-06 收稿, 2008-04-04 改回.

Li J, Chen YJ, Li QZ, Mao SD, Qin Y, Guo JH, Nan ZL, and Yang RS. 2008. The C-H-O isotope systematics of the Yangshan gold deposit, Gansu and its implication for the ore-fluid origin. ***Acta Petrologica Sinica*****, 24(4):817-826**

Abstract The Yangshan gold deposit, Wenxian county, Gansu province, containing 308 t Au with average grade of 4.74g/t, is now ranked as the China's largest gold deposit. Locating in western Qinling Orogen, central China, it is a syn-collisionally formed Carlin-like gold deposit. Its orebodies are controlled by an east-trending shear-zone and hosted in the Devonian carbonaceous carbonate-phyllite-slate sequence or the granite-porphyry dikes intruding into the Devonian strata. The $\delta^{13}C_{CO_2(PDB)}$ and $\delta^{13}C_{CH_4(PDB)}$ ratios of fluid inclusions within quartz separates range −2.5‰ ~ −5.6‰ and −23.1‰ ~ −32.6‰, respectively, suggesting that the ore-fluids have been mainly sourced, through metamorphism and/or reworking, from the Devonian strata or/and similar lithologies which comprise carbonaceous phyllite, slate, chert and carbonate. This conclusion is strongly supported by the $\delta^{18}O$ values of the early- and main-stage ore fluids, which range from 9.5‰ to 15.3‰, with corresponding δD values between −86‰ ~ −73‰. Two $\delta^{18}O$ values of late ore-forming stage ore-fluids are 2.7‰ and 6.8‰, implying a significant input of meteoric water. In general, the ore-forming fluid-system varies from early, deep, metamorphic fluid to late, shallow, meteoric water. It is worthy of stating that the above results and understandings are consistent with conclusions drawn from our studies of fluid inclusions and ore geology.

Key words Yangshan gold deposit; C-H-O isotope systematics; Ore-fluid; Qinling Orogen

摘 要 甘肃文县阳山金矿的探明黄金储量已达308t,平均品位4.74g/t,是我国地质勘查储量最大的金矿床。该矿床产于西秦岭造山带,是一个同碰撞形成的类卡林型金矿床,矿体受EW向韧脆性剪切带控制,赋矿围岩为泥盆系碳质千枚岩-板岩-碳酸盐-硅质岩和侵入其中的花岗斑岩脉。热液石英的流体包裹体之$\delta^{13}C_{CO_2(PDB)}$值为−2.5‰~−5.6‰,$\delta^{13}C_{CH_4(PDB)}$值为−23.1‰~−32.6‰,说明成矿流体来源于碳酸盐地层或相似岩石建造的变质或/和改造脱水作用。该结论尚被流体氢氧同位素研究结果所证明,成矿早阶段和主阶段流体的$\delta^{18}O_W$值介于9.5‰~15.3‰,δD_W值为−86‰~−73‰。两件矿化晚阶段流体的$\delta^{18}O_W$氧分别为2.7‰和6.8‰,表明有强烈的大气降水热液混入。总体而言,成矿流体系统从早到晚、从深到浅,由变质热液演变为大气降水热液。特别补充说明,上述研究结果和认识与我们根据流体包裹体和矿床地质研究得出的结论相吻合。

关键词 阳山金矿; 碳氢氧同位素体系; 成矿流体; 秦岭造山带

中图法分类号 P597.2; P618.51

---

* 本文得到国家973计划2006CB403500项目、国家自然科学基金项目(No. 40703010、40730421、40425006)、科学院百人计划项目和武警黄金部队科研项目的资助

第一作者简介: 李晶, 女, 1981年生, 博士研究生, 矿床学专业, E-mail: crystalheibao@gmail.com

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

甘肃省文县阳山金矿位于西秦岭卡林型-类卡林型成矿省(陈衍景等,2004),该矿自武警黄金部队 1997 年发现以来,探明黄金储量已达 308t,平均品位 4.74×10^{-6},是目前我国地质勘探储量最大的独立金矿床。阳山金矿的地质地球化学特征复杂、独特,兼有卡林型金矿和造山型金矿的部分特征(李晶等,2007)。

成矿流体来源是研究矿床成因的重要问题之一,前人曾对阳山金矿的氢氧同位素进行了探讨(齐金忠等,2003,2006; 刘伟等,2003; 罗锡明等,2004),认为成矿流体由岩浆水和大气降水两个端元组分构成。然而,前人工作未能指明计算 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值的温度,也没有描述样品地质特征,因此结论不具有说服力。为了准确揭示成矿流体来源和矿床成因,本文在流体包裹体研究(李晶等,2007)基础上,进一步研究了成矿流体的碳氢氧同位素地球化学特征,获得了与前人不同的认识,认为成矿流体主要来自变质水,晚阶段演化为大气降水。

1 区域地质

西秦岭是世界第二大卡林-类卡林型金矿省(图 1),金矿床产于大陆内部的碰撞造山带,与美国西部位于大陆边缘盆岭省的卡林型金矿具有完全不同的大地构造背景。秦岭造山带最终隆起于中生代华北与华南古大陆的碰撞作用(陈衍景等,1992; 袁学诚,1997; Zhu *et al.*,1998)。可分为华北克拉通南缘、北秦岭造山带、南秦岭造山带和扬子克拉通北缘 4 个构造单元(如图 1),分别大致相当于碰撞大地构造相的仰冲基底推覆体、增生弧地质体、大洋台地复理石褶冲带和前陆带,其边界断裂由北向南分别是三门峡-宝鸡断裂、栾川断裂、商州-丹凤断裂、勉县-略阳断裂和龙门山-大巴山断裂。西秦岭卡林-类卡林型金矿集中于商州-丹凤断裂与龙门山-大巴山断裂之间(陈衍景,2004)。

阳山金矿位于川陕甘交界的"金三角"地带,大地构造位置处于西秦岭造山带的秦岭微陆块、松潘褶皱带(隐伏的阿坝地块)和碧口地体的结合带(图 1、2),即勉略构造混杂带(张国伟等,2001)北缘,属于碰撞造山带地区的矿床,亦是西秦岭卡林型-类卡林型金矿省(陈衍景等, 2004)的代表性矿床。

2 矿床地质

阳山金矿的赋矿地层为泥盆系三河口群,地层发生了强烈的构造变形和不均匀的低级变质,主要由(碳质)千枚岩、板岩、砂岩、碳酸盐岩、硅质岩和绿片岩等组成。据王学明等(1999)研究,砂质岩、泥质岩、碳质岩和碳酸盐类的金丰度分别为 7.8、3.3、4.5 和 2.6ppb,显著高于东秦岭不同时代的地层(陈衍景和富士谷,1992),有利于大型、超大型矿床的形成。控制阳山金矿产出的主要构造为文县弧形构造,它由一系列近 EW 向断裂及褶皱构成。其中,观音坝断裂为含矿构造,由一系列次级断裂及强变形带构成。阳山金矿田主要发育花岗岩脉和岩株,主要为黑云母花岗细晶岩、黑云母花

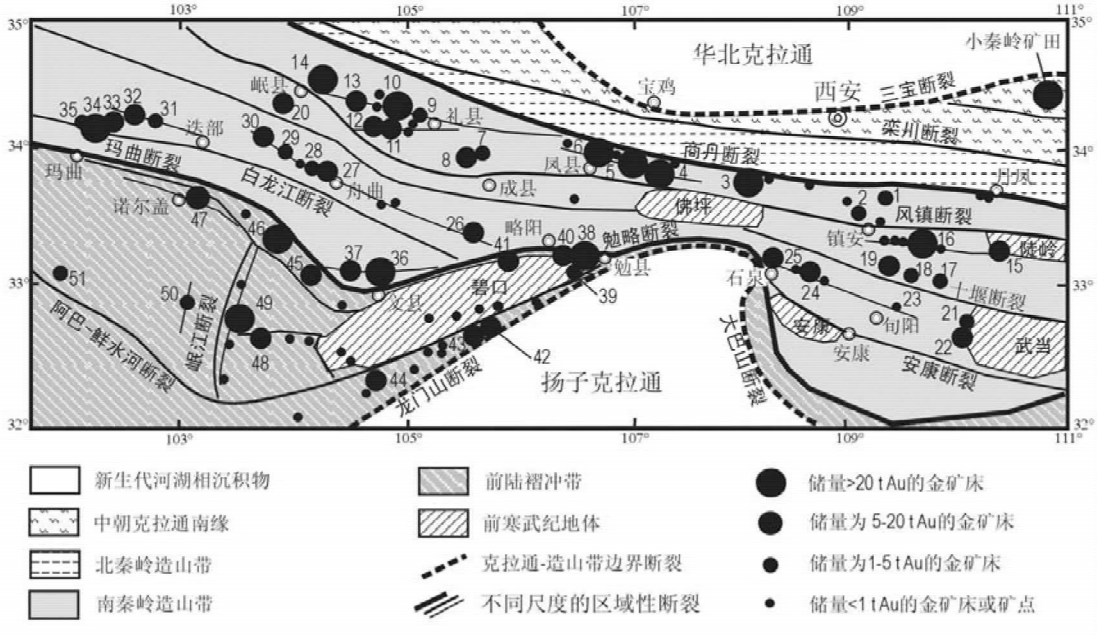


图 1 西秦岭构造格架和矿床分布 (编号矿床详细资料见陈衍景等,2004; 36 号为阳山金矿)

Fig. 1 Tectonic framework and gold distribution in the western Qinling

(For details of the numbered deposits see Chen Yanjing *et al.*, 2004; No. 36 is the Yangshan deposit)

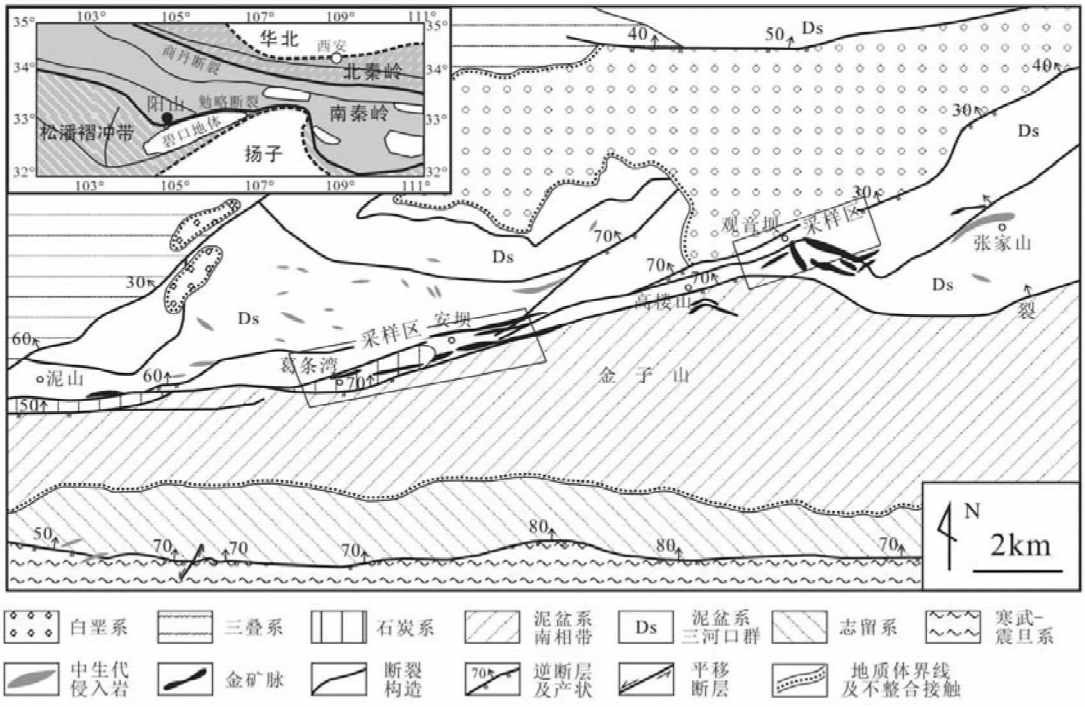


图 2　阳山金矿地质简图

Fig. 2　Simplified geologic map of Yangshan gold deposit

岗斑岩、黑云母斜长花岗斑岩，部分岩脉破碎、蚀变强烈，个别岩脉已经蚀变矿化构成金矿体。对金矿化花岗斑岩脉中独居石 U-Th-Pb 年龄电子探针测年（杨荣生等，2006b）显示，花岗斑岩的侵入年龄为 220 ± 3Ma，蚀变矿化年龄为 190 ± 3Ma，与前人（陈衍景和富士谷，1992；杜子图等，1998；张国伟等，2001；Zhang *et al.*，2002；Sun *et al.*，2002）确定的秦岭地区碰撞早期的构造岩浆事件发生时间相一致，也与西秦岭卡林-类卡林型金矿省开始发育的时间（陈衍景等，2004；雷时斌和齐金忠，2007；齐金忠等，2005）相吻合。

阳山金矿带的矿体赋存于切穿泥盆系三河口群的观音坝断裂带内，矿石主要为各类蚀变岩，局部为石英-碳酸盐脉，按原岩类型分为蚀变砂岩型、蚀变千枚岩型、蚀变灰岩型和蚀变斑岩型。其中，黄铁矿化蚀变千枚岩和黄铁矿化蚀变斜长花岗斑岩型是最主要矿石类型。矿体与围岩界限模糊，主要依靠化学分析确定矿体边界。阳山金矿硫化物含量较低，矿石矿物以黄铁矿、毒砂为主，脉石矿物以石英、方解石、绢云母和粘土矿物为主（杨荣生等，2006a）。

根据脉体之间的穿切关系、矿石组构和矿物组合及其特征，初步确定阳山金矿热液成矿过程包括早、主和晚三个阶段：（1）早阶段主要形成石英-绢云母-黄铁矿组合，以广泛发育的遭受构造变形的石英脉体为代表；（2）主阶段形成多金属硫化物组合，具体包括 M1、M2 和 M3 等 3 个亚阶段，分别相当于杨荣生等（2006a，b）划分的第 2、3、4 阶段。它们分别是：以黄铁矿为主的黄铁矿-毒砂-石英组合，以毒砂广泛发育为特征的毒砂-黄铁矿-石英组合，以及局部发育的自然金-辉锑矿-石英-碳酸盐组合。（3）晚阶段以发育透明度较高的碳酸盐-石英网脉为特征，充填于张性裂隙者具有梳状或晶簇构造。

3　样品地质和测试

本文测试了 13 件成矿期热液石英样品的矿物氧同位素组成及其流体包裹体的碳、氢同位素组成，并分析了 2 件成矿晚阶段方解石碳、氧同位素组成。所研究的 15 件样品的地质特征见表 1、图 3 和李晶（2006）。其中，成矿早阶段样品以遭受构造变形的石英脉体或扁豆体为代表（图 3A、B），部分破碎成角砾，通常蚀变千枚岩中的石英脉变形强于蚀变花岗斑岩中的石英脉，地层中的石英脉或透镜体形成于地层片理化和韧性剪切作用过程，它们的矿化程度不同，部分不含矿或弱矿化，如样品 Y-P-27、P-5 和 GT402-2；部分矿化强，如 Y-P-3A（图 3A）。显微观察表明，这些脉体的石英晶粒具有边缘细粒化、波状消光等现象。主成矿阶段石英样品的地质特征受围岩性质制约，产于花岗斑岩-地层接触破碎带的石英多呈细脉状（图 3D），乳白-灰白色，局部破碎；产于蚀变千枚岩中的石英颗粒细小，灰白-灰色，结晶度差，不透明，与环带状黄铁矿密切共生。晚阶段的代表性样品是透明度较高的碳酸盐-石英网脉，以碳酸盐为主（图 3E）。

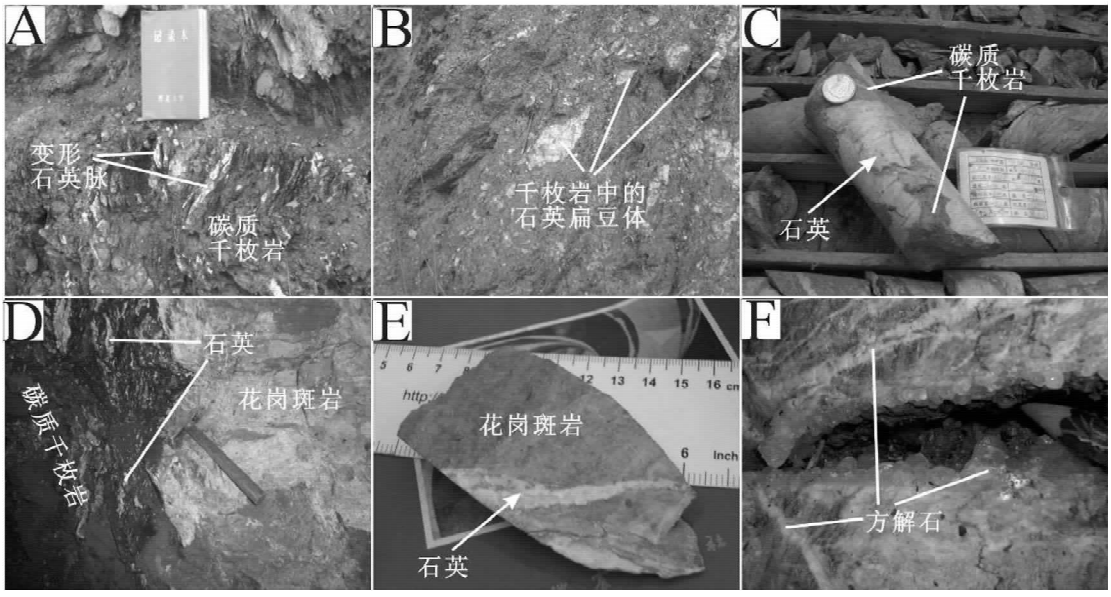


图 3 阳山金矿矿床地质和采样示意

(A)碳质千枚岩中的石英脉;(B)千枚岩中的石英脉扁豆体;(C)碳质千枚岩中的变形石英脉体;(D)石英脉体充填于花岗斑岩-千枚岩接触带;(E)石英脉体充填于花岗斑岩脉;(F)千枚岩型矿石中的晚阶段方解石脉

Fig. 3 Ore Geology of the Yangshan gold deposit showing sample context

A. quartz-veins in carbonaceous phyllite; B. lenticular quartz-veins hosted in phyllite; C. distorted quartz-veins in carbonaceous phyllite; D. quartz-vein hosted in contact zone between phyllite and porphyry; E. quartz-veinlet in granite porphyry; F. late-stage calcite veins in altered phyllite ore

表 1 阳山金矿石英和碳酸盐样品地质特征

Table 1 Geology of quartz and calcite samples of the Yangshan gold deposit

采样地点	样品类型描述	样品编号	阶段划分
安坝	碳质蚀变千枚岩型矿石中的石英脉	PD112-1	早阶段
安坝	蚀变斑岩型矿石中的矿化石英脉	L-305-1(图 3E)	早阶段
安坝	斑岩与地层接触破碎带中的热液石英	Y-TC291、TC291	早阶段
安坝	千枚岩地层中的石英扁豆体,未矿化	Y-P-27、P-5 (图 3B)	早阶段
安坝	千枚岩地层中的石英扁豆体,矿化	Y-P-3A (图 3A)	主阶段
安坝	碳质蚀变千枚岩型矿石中的石英脉	ZK1716-1 (图 3C)	主阶段
安坝	斑岩与地层接触破碎带中的热液石英	PD112-5 (图 3D)、PD112-8	主阶段
安坝	成矿晚期的方解石脉	PD112-3	晚阶段
葛条湾	灰岩地层中的石英脉,未矿化	GT-402-2	早/主阶段
葛条湾	碳质蚀变千枚岩型矿石中的石英脉	YM621-1	主阶段
葛条湾	成矿晚期张性裂隙中的方解石	Gt (图 3F)	晚阶段
观音坝	碳质蚀变千枚岩型矿石中的石英脉	1309	主阶段

将通过显微镜薄片研究和流体包裹体研究(李晶等,2007)而选出的 15 件样品粉碎至 20 ~ 40 目或 40 ~ 60 目,经筛分、清洗晾干、磁选后,在双目镜下挑选,得到纯度为 99% 的单矿物样品。质谱分析样品的制备过程如下:

石英氧同位素分析。将挑选的石英样品研磨至 200 目,干燥后取样品 10 ~ 30mg,于 550 ~ 700℃ 与纯 BrF_5 恒温反应而获得氧气,用组合冷阱分离 SiF_4、BrF_3 等杂质组分获得纯净的 O_2。将纯化后的氧气在 700℃ 铂催化作用下与碳棒逐级反应,逐一收集反应生成的 CO_2 气体,然后送质谱测试。

石英矿物流体包裹体碳同位素测试。将石英样品烘干，置于真空系统，逐步加热，抽走次生包裹体爆裂产生的气体，然后加热至600℃使包裹体爆裂，用组合冷阱分离出甲烷、二氧化碳，然后送质谱测试。

石英矿物流体包裹体氢同位素测试。通过真空热爆法打开包裹体，分离获得水；将获得的水与锌反应，获得可供质谱测试的氢气。

方解石碳、氧同位素分析。将挑纯的碳酸盐矿物与磷酸反应，分离并收集产生的二氧化碳，然后送质谱测试。

质谱测试在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室稳定同位素实验室完成。石英氧同位素和包裹体氢同位素采用MAT252型质谱测试，包裹体碳同位素采用MAT253型质谱测试。碳同位素 $\delta^{13}C$ 以PDB标准报出，δD 和 $\delta^{18}O$ 均以SMOW标准报出。$\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 分析误差均优于 ±0.2‰，流体 δD 分析误差优于 ±2‰。分析结果列于表2。

表2 阳山金矿矿物和流体的 $\delta^{18}O$，δD 和 $\delta^{13}C$(‰)

Table 2 The $\delta^{18}O$, δD and $\delta^{13}C$ ratios in minerals and fluids of the Yangshan gold deposit (‰)

样品号	测试样品	$\delta^{18}O_{矿物}$	$\delta^{18}O_w$	δD_w	$\delta^{13}C_{CO_2}$	$\delta^{13}C_{CH_4}$	$\delta^{13}C_{\Sigma C}$	CO_2/CH_4	T(℃)
Y-P-27	安坝早阶段石英	19.2	12.3	-80	-4.8	-30.4	-4.5	93.28	300
P-5	安坝早阶段石英	19.0	11.8	-82	-4.7	-30.2	-4.3	60.20	290
L-305-1	安坝早阶段石英	22.5	15.3	-74	-4.7	-30.2	-4.2	48.59	290
Y-TC291	安坝早阶段石英	22.5	14.9	-74	-4.7	-30.3			280
TC291	安坝早阶段石英	22.0	14.7	-74	-5.1	-31.8	-4.7	61.28	290
PD112-1	安坝早阶段石英	21.9	13.9	-75	-3.9	-28.2	-3.5	55.29	270
平均		21.2	13.8	-77					
Y-P-3A	安坝主阶段石英	17.9	10.3	-85	-4.6	-30.0	-4.0	46.92	280
ZK1716-1	安坝主阶段石英	20.2	11.3	-78	-5.1	-31.9	-4.4	36.05	250
PD112-8	安坝主阶段石英	21.6	11.9	-76	-5.5	-32.3	-4.1	17.77	235
PD112-5	安坝主阶段石英	20.0	10.3	-78	-5.6	-32.6			235
平均		19.9	11.0	-79					
YM621-1	葛条湾石英	19.5	11.0	-80	-4.1	-29.5	-3.1	26.60	260
GT-402-2	葛条湾石英	17.6	9.5	-86	-5.1	-31.3	-3.6	17.11	270
1309	观音坝石英	22.7	14.4	-73	-2.5	-23.1	-1.6	20.98	265
PD112-3	安坝晚阶段方解石	18.0	6.8		-1.3*				170
Gt	葛条湾晚阶段方解石	13.9	2.7		2.3*				170

注：$\delta^{18}O_{水} = \delta^{18}O_{矿物} - 1000\ \ln\alpha_{矿物-水}$。$1000\ln\alpha_{Q-W} = \delta^{18}O_Q - \delta^{18}O_W = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.4$（Clayton *et al.*, 1972），$1000\ln\alpha_{Calc-W} = \delta^{18}O_{Calc} - \delta^{18}O_W = 2.78 \times 10^6 T^{-2} - 2.89$（O'Neil *et al.*, 1969）。

* 表示方解石矿物的 $\delta^{13}C$。CO_2/CH_4 为两种气体的摩尔比(据李晶等,2007)。

4 碳同位素地球化学与成矿流体性质

表3列出了主要地质体或碳储库的碳同位素组成，不同碳储库之间 $\delta^{13}C$ 差别较大，使碳同位素能够成为示踪流体来源的重要手段之一。然而，各类碳储库都是由初始地球物质分异演化而来的，初始地球物质与现今地幔物质或碳质球粒陨石类似，$\delta^{13}C$ 为 -5‰左右。当来自不同碳储库的 CO_2 混合在一起时，其 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 也往往集中在 -5‰左右(Ohmoto and Goldhaber, 1997)。如此以来，成矿流体 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 约为 -5‰时，成矿流体来源有如下两种可能：(1) 流体来自地幔

表3 主要碳储库的 $\delta^{13}C$ 组成

Table 3 The $\delta^{13}C$ values of main carbon reservoirs

碳储库类型	$\delta^{13}C$ ($_{PDB}$‰)	文献
有机质	-27	Schidlowski, 1998
大气 CO_2	-7 ~ -11	Hoefs, 1997
淡水 CO_2	-9 ~ -20	Hoefs, 1997
火成岩	-3 ~ -9	Taylor,1986
海相碳酸盐	0.5	Hoefs, 1997
地壳	-7	Faure, 1986
地幔	-5 ~ -7	Hoefs, 1997

或岩浆或岩浆岩;(2) 源自不同端元储库的流体混合(至少其一是碳酸盐)。因此,单凭 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 约为 -5‰而认定成矿流体来自地幔或岩浆,是武断而片面的,也是文献中常见的逻辑性错误。

阳山金矿石英流体包裹体的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 介于 -2.5‰ ~ -5.6‰之间,低于海相碳酸盐的 $\delta^{13}C$,高于其它类型碳储库的 $\delta^{13}C$(表 3),表明成矿流体中的 CO_2 具有混合来源的特征,而且,沉积碳酸盐是必须的流体 CO_2 来源之一。

据戴金星等(1995),无机成因甲烷 $\delta^{13}C > -30‰$,多数有机成因的甲烷 $\delta^{13}C < -30‰$。阳山金矿包裹体 $\delta^{13}C_{CH_4}$ 值为 -23.1‰ ~ -32.6‰(表 2),恰恰给出无机与有机成因甲烷并存的信息,表明有机质也是必须具备的成矿流体来源之一。

热液矿物碳同位素组成取决于流体系统的 $\delta^{13}C$、pH、Eh、温度(T)和离子强度(I)等物理化学参数(Ohmoto and Rye, 1979)。在 0 ~ 3000℃范围,$1000\ln\alpha_{calcite\text{-}CO_2} = -0.388 \times 10^9/T^3 + 5.538 \times 10^6/T^2 - 11.346 \times 10^3/T + 2.962$(Chacko *et al.*, 1991)。据此,170℃时 $1000\ln\alpha_{calcite-CO_2} = 1.11$。那么,安坝和葛条湾矿段晚阶段方解石 $\delta^{13}C$ 值分别为 -1.3‰和 2.3‰,其对应的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 分别为 -2.4‰或 1.2‰。如此高的 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值表明,晚阶段流体 CO_2 主要来自碳酸盐地层的分解,不可能主要来自地幔或岩浆,也很难主要来自有机质或大气 CO_2。

此外,阳山金矿流体包裹体成分中 CH_4 含量较高(李晶等,2007),$\delta^{13}C_{CO_2}$ 值已不能近似代表成矿流体的总体碳同位素组成($\delta^{13}C_{\Sigma C}$)。根据热液体系碳同位素平衡公式(郑永飞等,2000),即,$\delta^{13}C_{CO_2} = \delta^{13}C_{\Sigma C} - \Delta^{13}C_{CO_2-CH_4}/(1+R)$,R 为 CO_2/CH_4 摩尔比,求得阳山金矿成矿流体的 $\delta^{13}C_{\Sigma C}$ 值为 -4.7‰ ~ -1.6‰(表 2),介于海相碳酸盐与其它碳储库之间(表 3),显示成矿流体具有多来源的特征,但沉积碳酸盐是不可缺少的重要源区。

总之,碳同位素特征显示,阳山金矿成矿流体绝非岩浆或地幔流体,而应来自地壳物质的改造或变质(陈衍景等,2007),且海相碳酸盐地层和有机质是不可缺少的源区物质成分。考虑到含矿围岩三河口群以及西秦岭晚元古代-三叠纪地层均由碳酸盐、(碳质)千枚岩、(碳质)板岩、粉砂岩、硅

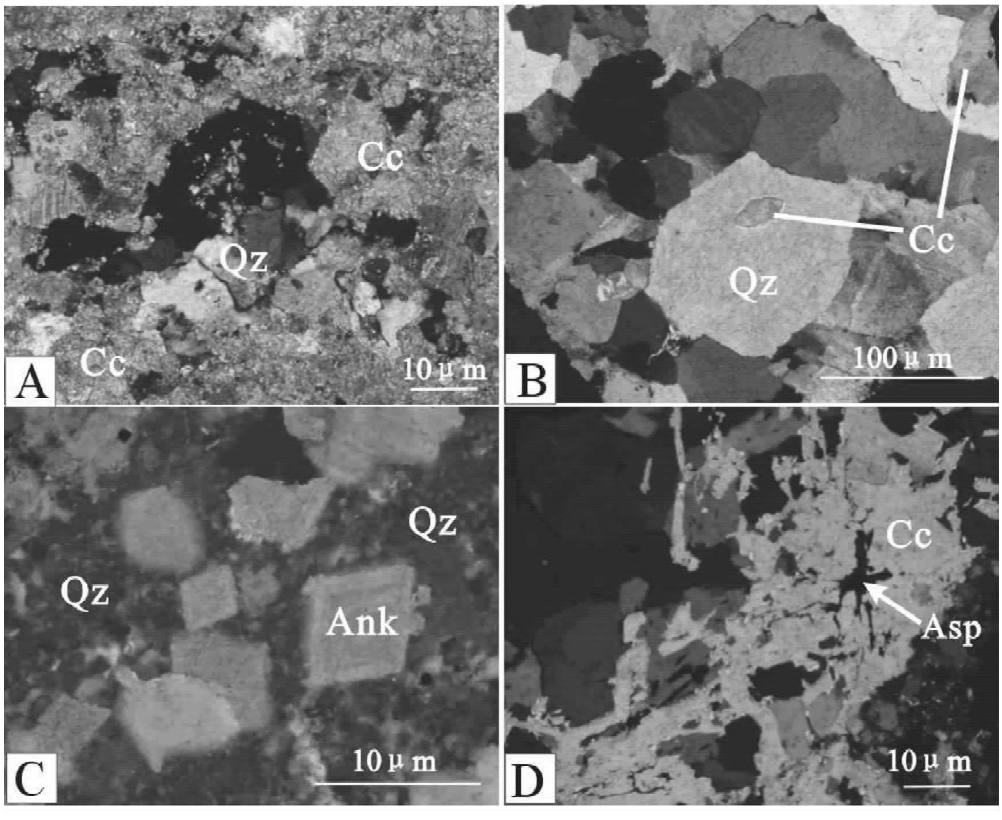


图 4 阳山金矿去碳酸盐化与成矿关系

(A) 碳酸盐(Cc)被石英(Qz)交代,即去碳酸盐化;(B) 晚阶段石英-碳酸盐细脉;(C) 碳酸盐矿物(Ank,铁白云石)被石英交代残留;(D) 碳酸盐矿物被石英、毒砂(Asp)所交代、渗透。

Fig. 4 Photomicrographs showing decarbonation and mineralization in the Yangshan ore-field

A, carbonate (Cc) replaced by quartz (Qz), implying for decarbonation; B, late-stage quartz-carbonate veinlet; C, carbonate relicts (Ank) enclosed and replaced by quartz; D, carbonate replaced, infilled and docked by quartz and arsenopyrite.

质岩等组成，与碳同位素研究所揭示的流体源区岩性一致，认为西秦岭晚元古代-三叠纪地层，特别是三河口群，可能是阳山金矿成矿流体的主要来源。

与上述结论相吻合，岩相学研究（杨荣生等，2006a；陈衍景等，2007）发现赋矿灰岩和钙质粉砂岩的硅化或去碳酸盐化作用（Decarbonation）强烈，表现为碳酸盐矿物破碎和被交代溶蚀（图 4A、D）、移位再结晶（图 4B、C），碳酸盐矿物被毒砂、石英等交代（图 4D）。不难理解，碳酸盐的溶蚀和运移导致大量 CO_2 从碳酸盐地层中释放出来并进入流体系统，释放出的 CO_2 具有较高的 $\delta^{13}C$ 值。同时，在含矿岩系遭受变形改造和变质时，有机质分解可产生 $\delta^{13}C$ 值较低的 CO_2 或 CH_4。流体成分的研究（李晶等，2007）证明它们在阳山金矿成矿流体中普遍存在，它们的加入降低了成矿流体的 $\delta^{13}C$，使流体 $\delta^{13}C$ 值介于海相碳酸盐与其它碳储库之间，即 $-2.5‰ \sim -5.6‰$。

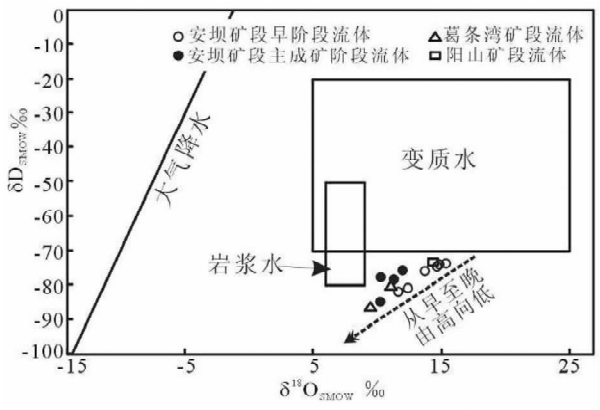


图 5　阳山金矿成矿早、主阶段流体的 $\delta^{18}O-\delta D$ 组成（底图据 Taylor，1974）

Fig. 5　The $\delta^{18}O-\delta D$ plot of ore-forming fluid in the early and main stage of Yangshan gold deposit (The base map from Taylor, 1974)

5　氢氧同位素地球化学与成矿流体演化

5.1　成矿流体的性质

如表 2 所示，根据流体包裹体均一温度（李晶等，2007）和石英-水体系氧同位素平衡分馏公式，求得平衡水的 $\delta^{18}O_w$ 值。其中，安坝矿段成矿早阶段石英 $\delta^{18}O$ 为 19.0‰ ~ 22.5‰，平均 21.2‰，其流体 $\delta^{18}O_w$ 变化于 11.8‰ ~ 15.3‰，平均 13.8‰；主成矿阶段石英 $\delta^{18}O$ 为 17.9‰ ~ 21.6‰，平均19.9‰，其平衡水 $\delta^{18}O_w$ 变化于 10.3‰ ~ 11.9‰，平均 11.0‰。葛条湾矿段主阶段石英 $\delta^{18}O$ 为 17.6‰ ~ 19.5‰，平均 18.5‰；平衡水 $\delta^{18}O$ 值为 9.5‰ ~ 11.0‰，平均 10.3‰。流体包裹体 δD 为 $-86‰ \sim -80‰$，平均 $-83‰$。观音坝矿段主阶段石英 $\delta^{18}O$ 值为 22.7‰，平衡水 $\delta^{18}O$ 值为 14.4‰。上述 $\delta^{18}O_w$ 数据均较高，投点落入岩浆水范围的右侧（图 5），各矿段早阶段和主阶段成矿流体主要为变质热液或地层改造热液。

安坝矿段成矿晚阶段方解石脉（PD112-3）和葛条湾矿段成矿后梳妆方解石（Gt）的 $\delta^{18}O$ 分别为 18.0‰和 13.9‰，其 $\delta^{18}O_W$ 分别为 6.8‰和 2.7‰，明显低于早阶段和主阶段流体的 $\delta^{18}O$，显示大气降水热液混入量增多和或流体温度的降低。

需要说明的是，前人曾认为成矿流体是岩浆热液，或大气降水热液，甚或二者的混合热液（齐金忠等，2003，2006；刘伟等，2003；罗锡明等，2004）。但是，本文的研究结果并不支持上述观点，具体解释如下：

按照同位素分馏原理以及实验获得不同矿物与水之间的氧同位素平衡分馏方程（参见郑永飞和陈江峰，2000），初始岩浆热液的 $\delta^{18}O_W$ 不可能高于岩浆岩的 $\delta^{18}O$。在岩浆岩中，随岩石酸性程度增高或 SiO_2 含量增高，岩石 $\delta^{18}O$ 增高，花岗岩类的 $\delta^{18}O$ 无疑在各类岩浆岩中最高。那么，初始花岗岩浆热液的 $\delta^{18}O_W$ 在各类岩浆流体中最高，更高于与超镁铁质岩石平衡的地幔流体。Taylor（1974）用各类岩浆岩氧同位素数据进行了计算，给出初始岩浆热液的 $\delta^{18}O_W$ 值为 6‰ ~ 9‰（图 5）。值得说明的是，由于最低共熔点温度为 573℃，因此初始花岗岩浆热液应在 600℃左右形成。由于阳山金矿的早、中阶段的成矿温度在 210 ~ 375℃，远低于初始岩浆热液温度，如果是岩浆热液或地幔流体成矿，则必须要求岩浆/地幔流体降温至 375℃或更低。然而，（1）矿区只有 <375℃的围岩蚀变和流体成矿现象；（2）根据矿物-水的氧同位素分馏方程（参见郑永飞和陈江峰，2000），在岩浆热液从 600℃降温至 375℃或更低时，一旦发生矿物沉淀，流体的 $\delta^{18}O_W$ 就进一步降低，即低于 6‰ ~ 9‰的初始岩浆热液的 $\delta^{18}O_W$ 范围（陈衍景等，2003；Chen *et al.*，2005，2006）。因此，在成矿流体的氢氧同位素判别图（图 5）中，一旦样品点位于岩浆水范围的右侧，就无法解释为岩浆水！如此以来，阳山金矿早、中阶段成矿流体 $\delta^{18}O_W$ 值高达 9.5‰ ~ 15.3‰，排除了岩浆热液主导流体成矿系统的可能性。

据张理刚（1985），大气降水的氢氧同位素组成是纬度和海拔高度的函数，且总低于海水的氢氧同位素比值；已知标准海水 $\delta^{18}O=0$，大气降水 $\delta^{18}O<0$，东秦岭中生代大气降水的 $\delta^{18}O$ 为 $-15\pm1‰$，δD 为 $-90‰ \sim -70‰$。如果阳山金矿由大气降水热液形成，则必须考虑如下约束条件：（1）计算获得的早阶段和中阶段流体 $\delta^{18}O>9.5‰$，与中生代大气降水的 $\delta^{18}O$ 相差甚远；（2）如果使大气降水通过水/岩作用不断从岩石中获得 ^{18}O 而使流体 $\delta^{18}O$ 升高，则必须要求系统为封闭体系，否则，大气降水的不断注入会使流体维持很低的 $\delta^{18}O$ 值，显然这种苛刻要求与大气降水热液活动只能发生在开放条件相矛盾；（3）即使大气降水热液通过水岩作用不断提高其 $\delta^{18}O_W$ 值，那么，流体 $\delta^{18}O_W$ 值以及水岩作用产物（如热液石英）的 $\delta^{18}O$ 值应该从早到晚逐渐增高，此与表 2 和图

5 中的实际情况相矛盾。显然,阳山金矿流体成矿系统,特别是早阶段和中阶段,很难由大气降水热液所主导。

由上可见,无论是岩浆热液还是大气降水热液,其 $\delta^{18}O_W$ 远低于阳山金矿成矿流体系统的 $\delta^{18}O$,无法作为主导性成矿流体。那么,岩浆热液与大气降水热液以任意比例混合,其混合流体的 $\delta^{18}O$ 仍然远低于阳山金矿流体系统。因此,阳山金矿早阶段和中阶段的成矿流体不可能是岩浆热液与大气降水热液的混合热液,只能属于变质流体或由沉积地层派生的改造热液(涂光炽,1988)。

事实上,流体包裹体研究(李晶等,2007)已证明成矿流体主体属于变质热液,而非岩浆热液。已经获得的包裹体盐度基本低于 5wt% NaCl. eqv,富含 CO_2,这是变质热液矿床的标志性特征(陈衍景等,2007; 李晶等,2007); 这种特征与岩浆热液矿床的包裹体特征截然不同,后者富含多种子晶矿物包裹体、盐度高; 也与改造型矿床流体包裹体特征有差别,因为典型的改造热液矿床基本不发育富 CO_2 包裹体(涂光炽,1988; 陈衍景等,2007)。因此,阳山金矿总体是变质热液作用的产物。

5.2 成矿流体的来源与演化

阳山金矿区未蚀变赋矿地层的 $\delta^{18}O$ 为 18.46‰ ~ 23.25‰,平均 21.39‰(表 4),不但远高于已知各类岩浆岩和多数变质岩,而且高于蚀变岩型矿石(表 4)。当地层发生改造作用或变质作用时,其派生成矿流体应有较高的 $\delta^{18}O$ 值,此与阳山金矿早阶段和中阶段成矿流体 $\delta^{18}O$ 值较高的特征相吻合,表明成矿流体可能来自赋矿围岩或其相似岩石建造的变质或改造。

表 4 阳山金矿地层、矿石的 $\delta^{18}O$ 值(据杨荣生,2006)

Table 4 The $\delta^{18}O$ value of strata and ores in Yangshan gold deposit

样品号	样品描述	$\delta^{18}O_R$
Y-G-P-3	千枚岩	22.45
AB	石灰岩	23.25
PD112	石灰岩	18.46
以上平均		21.39
Y-39	蚀变碎屑岩矿石	19.83
Y-27	含碳酸盐脉的千枚岩矿石	19.50
PD1309	含胶状黄铁矿矿石	18.58
PD461	蚀变碳质千枚岩矿石	18.53
YM621	蚀变泥质粉砂岩矿石	17.16

根据流体包裹体捕获温度为 210 ~ 375℃(李晶等,2007),设成矿流体在 210 ~ 375℃范围由类似于赋矿围岩的岩性经变质脱水产生,那么,根据 $1000\ln\alpha = \delta^{18}O_{Calc} - \delta^{18}O_W = 2.78 \times 10^6 T^{-2} - 2.89$(0 ~ 500℃)(O'Neil *et al.*, 1969),可求得由石灰岩(表 4)变质脱水所形成的流体 $\delta^{18}O$ 值的范围为 9.5‰ ~ 19.5‰。此范围恰与表 2 中的早阶段和中阶段流体 $\delta^{18}O$ 值相一致,而且温度区间也属于低级变质作用的范围,更与赋矿建造为千枚岩、板岩的特征相吻合。因此,可以认为阳山金矿成矿流体很有可能主要来自三河口群或与三河口群岩性相似的晚元古代-三叠纪地层的变质或改造脱水。事实上,阳山金矿形成于早侏罗世(杨荣生等,2006b; 齐金忠等,2005),而秦岭造山带的地壳缩短、加厚隆升、变质脱水熔融和大规模花岗岩发育等也主要发生晚三叠世-早白垩世,并以侏罗纪为高峰(陈衍景和富士谷,1992; 袁学诚,1997; Zhu *et al.*, 1998),二者时间一致。如此以来,我们有理由认为挤压造山作用导致了阳山金矿流体成矿系统的发育。而且,矿床地质(杨荣生,2006)和流体包裹体的研究(李晶等,2007)已经发现阳山金矿发育于韧性-脆性过渡、封闭-开放交替转换的构造体系,是变质流体主导的类卡林型金矿床。

在阳山矿区,主成矿阶段的流体 $\delta^{18}O_W$ 值低于早阶段流体 $\delta^{18}O_W$ 值,高于晚阶段流体 $\delta^{18}O_W$ 值,表明流体由变质热液或地层派生的改造热液向大气降水热液演化。岩相学和赋矿构造性质观察显示,从早到晚赋矿构造由压性向张性转换; 流体包裹体研究表明,从早到晚成矿流体系统的温度和压力都逐渐降低(李晶等,2007)。以上指示从早到晚成矿流体系统发育在区域压应力逐渐降低的构造背景,即减压伸展背景。

从观音坝→安坝→葛条湾矿段(如图 1),其主阶段流体的 $\delta^{18}O$ 依次为 14.4‰→11.0‰→10.3‰(表 2 中的 2 件样品平均),δD 依次为 -73‰→ -79‰→ -83‰(表 2 中的2 件样品平均),似显大气降水混入量依次增多,可能原因是成矿深度变浅、围岩压力降低,流体系统开放程度增大,导致大气降水混入量增多。

特别强调,上述流体来源与演化的特点在很多造山型金矿床、微细粒浸染型金矿床的研究中被发现(陈衍景和富士谷, 1992; 陈华勇等, 2004, 2007; 祁进平等, 2005, 2006, 2007; 张静等, 2004, 2005, 2006, 2007; Fan *et al.*, 2003; Pettke *et al.*, 2000),它们似可作为造山过程中流体成矿系统发育的普遍规律。

6 结论

阳山金矿碳-氢-氧同位素体系的地球化学特征表明,成矿流体系统不可能由岩浆热液或地幔流体所主导,也不可能由大气降水演化而成,而应来自赋矿地层或相似岩性组合的改造或变质脱水作用。从早到晚、从深到浅,成矿流体系统的大气降水热液混入量增多,晚阶段流体系统以大气降水热液为主。

致谢 研究工作得到武警黄金指挥部总工程师阎凤增教授的关心和指导,野外调研得到武警黄金部队第十二支队的大力支持和张复新教授指导,实验工作得到张福松老师的帮助,刘红杰、赵成海、陆丽娜等同学在实验准备中给予了帮助,特此致谢。

References

Chacko T, Mayeda TK, Clayton RN, and Goldsmith JR. 1991. Oxygen and carbon isotope fractionations between CO_2 and calcite. Geochim Cosmochim Acta, 55:2867 – 2882

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 ands exploration. Journal of Mineralogy and Petrology, 24(3): 46 – 54. (in Chinese with English abstract)

Chen HY, Chen YJ, Ni P, and Zhang ZJ. 2007. Chemical composition of fluid inclusions of the Sawayardun gold deposit, Xinjiang and its implications for metallgeny and exploration. Acta Petrologica Sinica, 23: 2189 – 2197 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ and Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan. Beijing: Seismological Press, 234 (in Chinese with English abstract)

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: 2085 – 2108 (in Chinese with English abstract)

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

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: 99 – 116

Chen YJ, Sui YH, and Pirajno F. 2003. Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits: Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit, east Qinling orogen. Acta Petrologica Sinica, 19: 551 – 568 (In Chinese with English abstract)

Chen YJ, Zhang J, Zhang FX, Pirajno F, and Li C. 2004. Carlin and Carlin-like gold deposits in Western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model. Geological Review, 50: 134 – 152 (in Chinese with English Abstract)

Clayton RN, O'Neil JR, and Mayeda TK. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water. Journal of Geophysical Research, 77: 3057 – 3067

Dai JX, Song Y, Dai CS, Chen AF, Sun ML, and Liao YS. 1995. Inorganic Gases and the Formative Conditions of the Inorganic Gas Pools in Eastern China. Beijing: Science Press, 214 (in Chinese with English abstract)

Du ZT and Wu GG. 1998. Tectonic Dynamics and Tectono-metallogenic Dynamics of Gold Deposits in West Qinling. Beijing: Geological Publishing House, 145 (in Chinese)

Fan HR, Zhai MG, Xie YH, and Yang JH. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. Mineralium Deposita, 38: 739 – 750

Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology (Second Edition). New York: John Wiley & Sons, 589

Hoefs J. 1997. Stable Isotope Geochemistry (Forth Edition). Berlin: Springer-Verlag, 201

Lei SB and Qi JZ. 2007. Geodynamics system and multi-factor coupling mineralization in the Yangshan gold belt, Gansu. Geology and Prospecting, 43(2): 33 – 39 (in Chinese with English Abstract)

Li J, Chen YJ, Li QZ, Lai Y, Yang RS and Mao SD. 2007. Fluid inclusion geochemistry and genetic type of the Yangshan gold deposit, Gansu, China. Acta Petrologica Sinica, 23: 2144 – 2154 (in Chineae with English abstract)

Li J. 2006. Study on hydrothermal metallogeny of the Yangshan gold deposit, Gansu province. MS Thesis, Peking University, 54 (in Chinese with English Abstract)

Liu W, Fan YX, Qi JZ, and Yu JY. 2003. Fluid inclusion geochemistry characteristics of the Yangshan gold deposit in Wen county, Gansu province China. Geoscience, 17(4): 444 – 452 (in Chinese with English abstract)

Luo XM, Qi JZ, Yuan SS, and Li ZH. 2004. Geological and microelement geochemical study of Yangshan gold deposit, Gansu province. Geoscience, 18(2): 203 – 209 (in Chinese with English abstract)

O'Neil JR, Clayton RN, and Mayeda TK. 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates. The Journal of Chemical Physics, 51: 5547 – 5558

Ohmoto H and Goldhaber MA. 1997. Sulfur and Carbon Isotopes. In: Barnes HL(ed.). Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 3th Edition. New York: John Wiley & Sons, 517 – 611

Ohmoto H and Rye RO. 1979. Isotopes of sulfur and carbon. In: Barnes HL (ed.). Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 2nd edition, New York, John Wiley, 509 – 567

Pettke T, Diamond LW and Kramers JD. 2000. Mesothermal Au lodes in the north-western Alps: A review of genetic constraints from radiogenic isotopes. Eur. Jour. Mineral., 12: 213 – 230

Qi JP, Chen YJ, Ni P, Lai Y, Ding JY, Song YW and Tang GJ. 2007. Fluid inclusion constraints on the origin of the Lengshuibeigou Pb-Zn-Ag deposit, Henan province. Acta Petrologica Sinica, 23(9): 2119 – 2130 (in Chinese with English abstract)

Qi JP, Lai Y, Ren KX and Tang GJ. 2006. Sr-isotope constraint on the origin of the Xiaoqinling gold field. Acta Petrologica Sinica, 22: 2543 – 2550 (in Chinese with English abstract)

Qi JP, Zhang J and Tang GJ. 2005. Carbon and oxygen isotope composition of the Meso-Neoproterozoic strata south of the Xiong'er Terrane: Evidences of the CMF model. Acta Petrologica Sinica, 21(5): 1365 – 1372 (in Chinese with English abstract)

Qi JZ, Li L, Yuan SS, Liu ZJ, Liu DY, Wang YB, and Li ZH. 2005. A SHRIMP U-Pb chronological study of zircons from quartz veins of Yangshan gold deposit, Gansu province. Mineral Deposits, 24: 141 – 150 (in Chinese with English Abstract)

Qi JZ, Yang GC, Li L, Fan YX, and Liu W. 2006. Isotope geochemistry, chronology and genesis of the Yangshan gold deposit, Gansu. Geology in China, 33(6): 1345 – 1353 (in Chinese with English abstract)

Qi JZ, Yuan SS, Li L, Fan YX, Liu W, Gao QB, Sun B, Guo JH and Li ZH. 2003. Geological and Geochemical studies of Yangshan gold deposit, Gansu province. Mineral Deposits, 22(1): 24 – 31 (in Chinese with English abstract)

Schidlowski M. 1998. Beginning of terrestrial life: problems of the early record and implications for extraterrestrial scenarios. Instruments, Methods, and Missions for Astrobiology. SPIE, 3441: 149 – 157

Sun WD, Li SG, Chen YD and Li YJ. 2002. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, Central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt. Journal of Geology, 110: 457 – 468

Taylor BE. 1986. Magmatic volatiles: Isotope variation of C, H and S reviews in mineralogy. Mineralogical Society of America, 16: 185 – 226

Taylor HP. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problem of hydrothermal alteration and ore deposition. Economic Geology. 69: 843 – 883

Tu GZ. 1988. Geochemistry of Stratabound Ore Deposits in China (Vol. 3). Beijing: Science Press, 388 (in Chinese)

Wang XM, Shao SC, Wang DP, Chen Y and Lin GF. 1999. Metallogenic geologic feature and prospecting criteria of gold deposits in the Wenxian-Kangxian area, Gansu province. Geological Exploration for Non-ferrous Metals, 8(4): 220 – 226 (in Chinese with English abstract)

Yang RS. 2006. Geology, Geochemistry and Genesis of Yangshan Gold Deposit, Gansu Province. Ph. D degree thesis of Peking University, 179 (in Chinese with English Abstract)

Yang RS, Chen YJ, Zhang FX, Li J, Liu HJ, Zhao CH, Li ZH and Mao SD. 2006a. Geological study and genesis type of Yangshan gold deposit, Gansu. In: Papers presented to the eighth all-China symposium on mineral deposits. Beijing: Geological Publishing House, 72 – 75 (in Chinese)

Yang RS, Chen YJ, Zhang FX, Li ZH, Mao SD, Liu HJ and Zhao CH. 2006b. The chemical Th-U-Pb ages of monazite from the Yangshan gold deposit, Gandu province and their geologic and metallogenic implications. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2603 – 2610 (in Chinese with English Abstract)

Yuan XC. 1997. The crustal structure of the Qinling orogen and wedging mountain building. Acta Geologica Sinica, 71(3): 227 – 235 (in

Chinese with English abstract)
Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC and Xiao QH. 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics. Beijing: Science Press, 855 (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, 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, Shu GM, Zhang FX and Li C. 2002. Compositional study of minerals within the Qinlingliang granite, Southwestern Shaanxi and discussions on the related problems. Science in China (Series D), 45: 662 – 672
Zhang J, Yan GP, Ye L, Li GP, Li ZL and Wang ZG. 2005. The C-H-O isotope systematics of the Yindonggou Ag-dominated poly-metals deposit in the Neixiang county, Henan province. Acta Petrologica Sinica, 21(5): 1359 – 1364 (in Chinese with English abstract)
Zhang J, Qi JP, Qiu JJ, You SN and Li GP. 2007. Compositional study on ore fluid of the Yindonggou silver deposit in Neixiang county, Henan province, China. Acta Petrologica Sinica, 23: 2217 – 2226 (in Chinese with English abstract)
Zhang LG. 1985. Geological Applicance for the Stable Isotope: the Hydrothermal Mineralization of Metal Activation and It's Prospecting. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 267 (in Chinese with English abstract)
Zheng YF and Chen JF. 2000. Stable Isotope Geochemistry. Beijing: Science Press, 316 (in Chinese)
Zhu RX, Yang ZY, Ma XH, Wu HN, Meng ZF, Fang DJ and Huang BC. 1998. Paleomagnetic constraints on the tectonic history of he major blocks of China during the Phanerozoic. Science in China (Series D), 41(sup.2): 1 – 19

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, 张增杰. 2007. 新疆萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体成分及其成矿和勘探意义. 岩石学报, 23: 2189 – 2197
陈衍景,富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京:地震出版社,234
陈衍景, 倪培, 范洪瑞, 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. 岩石学报, 23: 2085 – 2108
陈衍景, 隋颖慧, Pirajno F. 2003. CMF 模式的排他性证据和造山型银矿的实例: 铁炉坪银矿同位素地球化学. 岩石学报, 19: 551 – 568
陈衍景, 张静, 张复新, Pirajno F, 李超. 2004. 西秦岭地区卡林—类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式. 地质论评, 50: 134 – 152
戴金星, 宋岩, 戴春森, 陈安福, 孙明良, 廖永胜. 1995. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件. 北京: 科学出版社, 214
杜子图, 吴淦国. 1998. 西秦岭地区构造体系及金成矿构造动力学. 北京: 地质出版社, 145
雷时斌, 齐金忠. 2007. 甘肃阳山金矿带地球动力学机制与多因耦合成矿作用. 地质与勘探, 43(2): 33 – 39
李晶, 陈衍景, 李强之, 赖勇, 杨荣生, 毛世东. 2007. 甘肃阳山金矿流体包裹体地球化学和矿床成因类型. 岩石学报, 23: 2144 – 2154
李晶.2006. 甘肃阳山金矿成矿流体研究,北京大学硕士学位论文,54
刘伟, 范永香, 齐金忠, 余金元. 2003. 甘肃省文县阳山金矿床流体包裹体的地球化学特征. 现代地质, 17(4): 444 – 452
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地球化学研究. 现代地质, 18(2): 203 – 209
祁进平, 陈衍景, 倪培, 赖勇, 丁俊英, 宋要武, 唐国军. 2007. 河南冷水北沟铅锌银矿床流体包裹体研究及矿床成因. 岩石学报, 23(9): 2119 – 2130
祁进平, 赖勇, 任康绪, 唐国军. 2006. 小秦岭金矿田成因的锶同位素约束. 岩石学报, 22: 2543 – 2550
祁进平, 张静, 唐国军. 2005. 熊耳地体南侧中晚元古代地层碳氧同位素组成: CMF 模式的证据. 岩石学报, 21(5): 1365 – 1372
齐金忠, 李莉, 袁士松, 刘志杰, 刘敦一, 王彦斌, 李志宏. 2005. 甘肃省阳山金矿床石英脉中锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究. 矿床地质, 24: 141 – 150
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
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. 矿床地质, 22(1): 24 – 31
涂光炽等. 1988. 中国层控矿床地球化学(第三卷). 北京: 科学出版社, 388
王学明, 邵世才, 汪东波, 陈源, 林国芳. 1999. 甘肃文康地区金矿地质特征与找矿标志. 有色金属矿产与勘查, 8(4): 220 – 226
杨荣生. 2006. 甘肃阳山金矿地质地球化学特征及成因研究. 北京大学博士学位论文, 179
杨荣生, 陈衍景, 张复新, 李晶, 刘红杰, 赵成海, 李志宏, 毛世东. 2006a. 甘肃阳山金矿地质特征及成因类型. 见: 第八届全国矿床会议论文集, 北京: 地质出版社, 72 – 75
杨荣生, 陈衍景, 张复新, 李志宏, 毛世东, 刘红杰, 赵成海. 2006b. 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. 岩石学报, 22(10): 2603 – 2610
袁学诚. 1997. 秦岭造山带地壳构造与楔入成山. 地质学报, 71: 227 – 235
张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 855
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
张静, 祁进平, 仇建军, 尤世娜, 李国平. 2007. 河南省内乡县银洞沟银矿床流体成分研究. 岩石学报, 23: 2217 – 2226
张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用——金属活化热液成矿作用及找矿. 西安: 陕西科学技术出版社, 267
郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学. 北京: 科学出版社, 316

甘肃阳山金矿碳氢氧同位素与成矿流体来源

万方数据 WANFANG DATA 文献链接

作者： LI Jing， 陈衍景， LI QiangZhi， 毛世东， QIN Yan， 郭俊华， NAN ZhengLu， 杨荣生， LI Jing， CHEN YanJing， LI QiangZhi， MAO ShiDong， QIN Yan， GUO JunHua， NAN ZhengLu， YANG RongSheng

作者单位：

刊名： 岩石学报 ISTIC SCI PKU

英文刊名： ACTA PETROLOGICA SINICA

年，卷(期)： 2008，24(4)

被引用次数： 12次

参考文献(81条)

1. Chacko T. Mayeda TK. Clayton RN. Goldsmith JR Oxygen and carbon isotope fractionatioos between CO2 and calcite 1991

2. Chen HY. Chen YJ. Ni P. Zhang ZJ Fluid inclusion study of the Sawayardun Au deposit in southern Tiaashan,China:implication for ore genesis ands exploration[期刊论文]-Journal of Mineralogy and Petrology 2004(03)

3. Chan HY. Chen YJ. Ni P. Zhang ZJ Chemical composition of fluid inclusions of the Sawayardun gold deposit,Xinjiang and its implications for metaUgeny and exploration 2007

4. Chen YJ. Fu SG Gold Mineralization in West Henan 1992

5. Chen YJ. Ni P. Fan HR. Pirajno F Lai Y Su WC Zhang H Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[期刊论文]-Acta Petrologica Sinica 2007

6. Chen YJ. Pirajno F. Sui YH Geology and D-O-C isotope systematics of the Tieluping silver deposit,Henan,China:Implications for ore genesis[期刊论文]-Acta Geologica Sinica 2005

7. Chen YJ. Pirajno F. Qi JP. Li J and Wang HH Ore geology,fluid geochemistry and genesis of the Shanggong gold deposit,eastern Qinliag Orogen,China 2006

8. Chen YJ. Sui YH. Pirajno F Exclusive evidences for CMF model and a case of orogenic silver deposits:Isotope geochemistry of the Tieluping silver deposit,east Qinling orogen[期刊论文]-Acta Petrologica Sinica 2003

9. Chen YJ. Zhang J. Zhang FX. Pirajno F and Li C Carlin and Carlin-like gold deposits in Western Qinling Mountains and their metallogenic time,tectonic setting and model[期刊论文]-Geological Review 2004

10. Clayton RN. O' Neil JR. Mayeda TK Oxygen isotope exchange between quartz and water 1972

11. Dai JX. Song Y. Dai CS. Chen AF Sun ML and Liao YS Inorganic Gases and the Formative Conditions of the Inorganic Gas Pools in Eastern China 1995

12. Du ZT. Wu GG Tectonic Dynamics and Tectono-metallogenic Dynamics of Gold Deposits in West Qinling 1998

13. Fan HR. Zhai MG. Xie YH. Yang JH Ore-forming fluids associated with granite-hestod gold mineralization at the Sanshandao deposit,Jiaodong gold province,China 2003

14. Faure G Principles of Isotope Geology (Second Edition) 1986

15. Hoers J Stable Isotope Geochemistry 1997

16. Lei SB. Qi JZ Geodynamies system and multi-factor coupling mineralization in the Yangshan gold belt, Gansu[期刊论文]-Geology and Prospecting 2007(02)

17. Li J. Cben Y J. Li QZ. Lai Y Yang RS Man SD Fluid inclusion geochemistry and genetic type of the Yangshan gold deposit, Gansu, China (in Chineae with English abstract) 2007

18. Li J Study on hydrothermal metallogeny of the Yangshan gold deposit, Gansu province 2006

19. Liu W. Fan YX. Qi JZ. Yu JY Fluid inclusion geochemistry characteristics of the Yangshan gold deposit in Wen county, Gansu province China[期刊论文]-Geoscience 2003(04)

20. Luo XM. Qi JZ. Yuan SS. Li ZH Geological and mieroelement geochemical study of Yaagshan gold deposit, Ganan province[期刊论文]-Geoscience 2004(02)

21. O' Neil JR. Clayton RN. Mayeda TK Oxygen isotope fractionation in divalent metal carbonates 1969

22. Ohmoto H. Goldhaber MA Sulfur and Carbon Isotopes 1997

23. Ohmoto H. Rye RO Isotopes of sulfur and carbon 1979

24. Pettke T. Diamond LW. Kramers JD Mesothermal Au lodes in the north-westero Alps:A review of genetic constraints from radiogenic isotopes 2000

25. Qi JP. Cben YJ. Ni P. Lai Y Ding JY Song YW Tang GJ Fluid inclusion constraints on the origin of the Lengabuibeigou PbZn-Ag deposit, Henan province[期刊论文]-Acta Petrologica Sinica 2007(09)

26. Qi JP. Lai Y. Ren KX. Tang GJ Sr-isotope eonstraint on the origin of the Xiaoqinling gold field[期刊论文]-Acta Petrologica Sinica 2006

27. Qi JP. Zhang J. Tang GJ Carbon and oxygen isotope composition of the Meso-Neoproterozoie strata south of the Xiong' er Terrane:Evidences of the CMF model[期刊论文]-Acta Petrologica Sinica 2005(05)

28. Qi JZ. Li L. Yuan SS. Liu ZJ Liu DY Wang YB and Li ZH A SHRIMP U-Pb chronological study of zircons from quartz veins of Yangshan gold deposit, Gansu province[期刊论文]-Mineral Deposits 2005

29. Qi JZ. Yang GC. Li L. Fan YX and Liu W Isotope geochemistry, chronology and genesis of the Yangshan gold deposit, Gansu[期刊论文]-Geology in China 2006(06)

30. Qi JZ. Yuan SS. Li L. Fan YX Liu W Gap QB Sun B Guo JH and Li ZH Geological and Geochemical studies of Yangshan gold deposit, Gansu province[期刊论文]-Mineral Deposits 2003(01)

31. Schidlowski M Beginning of terrestrial life:problems of the early record and implications for extraterrestrial scenarios. Instruments, Methods, and Missions for Astrobiology 1998

32. Sun WD. Li SG. Chen YD. Li YJ Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, Central China:Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt 2002

33. Taylor BE Magmatic volatiles:Isotope variation of C, H and S reviews in mineralogy 1986

34. Taylor HP The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problem of hydrothermal alteration and ore deposition 1974

35. Tu GZ Geochemistry of Stratabound Ore Deposits in China 1988

36. Wang XM. Shao SC. Wang DP. Chen Y and I, in GF Metallogenic geologic feature and prospecting criteria of gold deposits in the Wenxian-Kangxian area, Gansu provinee 1999(04)

37. Yang RS Geology, Geochemistry and Genesis of Yangshan Gold Deposit, Gansu Province 2006

38. Yang RS. Chen YJ. Zhang FX. Li J, Liu HJ, Zhao CH, Li ZH and Map SD Geological study and genesis type of Yangshan gold deposit, Gansu 2006

39. Yang RS. Chen YJ. Zhang FX. Li ZH Man SD Liu HJ Zhan CH The chemical Th-U-Pb ages of monazite from the Yangshan gold deposit, Gandu province and their geologic and metallogenie implications 2006(10)

40. Yuan XC The crustal structure of the Qinling orogen and wedging mountain building (inChinese with English abstract) 1997(03)

41. Zhang GW. Zhang BR. Yuan XC. Xiao QH Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics 2001

42. Zhang J. Chen YJ. Chen HY. Wan SQ Zhang G Wang JM Isotope geochemistry of the Yindangpo gold deposit, Tongbai County, Henan Province, China[期刊论文]-Acta Petrologica Sinica 2006(10)

43. Zhang J. Chen YJ. Li GP. Li ZL and Wang ZG Characteristics of ore geology and fluid inclusion of the Yindonggou silver deposit, Neixiang county, Henan province:implication for metallogenic type[期刊论文]-Journal of Mineralogy and Petrology 2004(03)

44. Zhang J. Chen Y J. Shu GM. Zhang FX and Li C Compositional study of minerals within the Qinlingliang granite, Southwestern Shaanxi and discussions on the related problems[期刊论文]-Science in China(Series D) 2002

45. Zhang J. Yan GP. Ye L. Li GP Li ZL Wang ZG The C-HO isotope systematics of the Yindonggou Ag-dominated poly-metals deposit in the Neixiang county, Henan province[期刊论文]-Acta Petrologica Sinica 2005(05)

46. Zhang J. Qi JP. Qiu jj. You SN Li GP Compositional study on ore fluid of the Yindonggou silver deposit in Neixiang county, Henan province, China[期刊论文]-Acta Petrologica Sinica 2007

47. Zhang LG Geological Applicance for the Stable Isotope:the Hydrothermal Mineralization of Metal Activation and It’s Prospecting 1985

48. Zheng YF. Chen JF Stable Isotope Geochemistry 2000

49. Zhu RX. Yang ZY. Ma XH. Wu HN, Meng ZF, Fang DJ and Huang BC Paleomagnetic constraints on the tectonic history of he major blocks of China during the Phanerozoic 1998(z2)

50. 陈华勇. 陈衍景. 倪培. 张增杰 南天山萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体研究:矿床成因和助探意义[期刊论文]-矿物岩石 2004(03)

51. 陈华勇. 陈衍景. 倪培. 张增杰 新疆萨瓦亚尔顿金矿流体包裹体成分及其成矿和勘探意义[期刊论文]-岩石学报 2007

52. 陈衍景. 富士谷 豫西金矿成矿规律 1992

53. 陈衍景. 倪培. 范洪瑞. Pirajno F 赖勇 苏文超 张辉 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[期刊论文]-岩石学报 2007

54. 陈衍景. 隋颖慧. Pirajno F CMF模式的排他性证据和造山型银矿的实例:铁炉坪银矿同位素地球化学[期刊论文]-岩石学报 2003

55. 陈衍景. 张静. 张复新. Pirajno F 李超 西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[期刊论文]-地质论评 2004

56. 戴金星. 宋岩. 戴春森. 陈安福. 孙明良. 廖永胜 中国东部无机成因气及其气藏形成条件 1995

57. 杜子图. 吴淦国 西秦岭地区构造体系及金成矿构造动力学 1998

58. 雷时斌. 齐会忠 甘肃阳山金矿带地球动力学机制与多因耦合成矿作用[期刊论文]-地质与勘探 2007(02)

59. 李晶. 陈衍景. 李强之. 赖勇. 杨荣生. 毛世东 甘肃阳山金矿流体包裹体地球化学和矿床成因类型[期刊论文]-岩石学报 2007

60. 李晶 甘肃阳山金矿成矿流体研究 2006

61. 刘伟. 范永香. 齐金忠. 余金元 甘肃省文县阳山金矿床流体包裹体的地球化学特征[期刊论文]-现代地质 2003(04)

62. 罗锡明. 齐金忠. 袁士松. 李志宏 甘肃阳山金矿床微量元素及稳定同位素地球化学研究[期刊论文]-现代地质 2004(02)

63. 祁进平. 陈衍景. 倪培. 赖勇. 丁俊英. 宋要武. 庸国军 河南冷水北沟铅锌银矿床流体包裹体研究及矿床成因[期刊论文]-岩石学报 2007(09)

64. 祁进平. 赖勇. 任康绪. 唐国军 小秦岭金矿田成因的锶同位素约束[期刊论文]-岩石学报 2006

65. 祁进平. 张静. 唐国军 熊耳地体南侧中晚元古代地层碳氧同位素组成:CMF模式的证据[期刊论文]-岩石学报 2005(05)

66. 齐金忠. 李莉. 袁士松. 刘志杰. 刘敦一. 王彦斌. 李志宏 甘肃省阳山金矿床石英脉中锆石SHRIMP U-Pb年代学研究[期刊论文]-矿床地质 2005

67. 齐金忠. 杨贵才. 李莉. 范永香. 刘伟 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[期刊论文]-中国地质 2006(06)

68. 齐金忠. 袁士松. 李莉. 范永香. 刘伟. 高秋斌. 孙彬. 郭俊华. 李志宏 甘肃省文县阳山金矿床地质地球化学研究[期刊论文]-矿床地质 2003(01)

69. 涂光炽 中国层控矿床地球化学 1988

70. 王学明. 邵世才. 汪东波. 陈源. 林国芳 甘肃文康地区金矿地质特征与找矿标志 1999(04)

71. 杨荣生 甘肃阳山会矿地质地球化学特征及成因研究 2006

72. 杨荣生. 陈衍景. 张复新. 李晶. 刘红杰. 赵成海. 李志宏. 毛世东 甘肃阳山金矿地质特征及成因类型 2006

73. 杨荣生. 陈衍景. 张复新. 李志宏. 毛世东. 刘红杰. 赵成海 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[期刊论文]-岩石学报 2006(10)

74. 袁学诚 秦岭造山带地壳构造与楔入成山 1997

75. 张国伟. 张本仁. 袁学诚. 肖庆辉 秦岭造山带与大陆动力学 2001

76. 张静. 陈衍景. 陈华勇. 万守全. 张冠. 王建明 河南省桐柏县银洞坡金矿床同位素地球化学[期刊论文]-岩石学报 2006(10)

77. 张静. 陈衍景. 李国平. 李忠烈. 王志光 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[期刊论文]-矿物岩石 2004(03)

78. 张静. 燕光谱. 叶霖. 李国平. 李忠烈. 王志光 河南内乡县银洞沟银多金属矿床碳-氢-氧同位素地球化学[期刊论文]-岩石学报 2005(05)

79. 张静. 祁进平. 仇建军. 尤世娜. 李国平 河南省内乡县银洞沟银矿床流体成分研究[期刊论文]-岩石学报 2007

80. 张理刚 稳定同位素在地质科学中的应用--金属活化热液成矿作用及找矿 1985

81. 郑永飞. 陈江峰 稳定同位素地球化学 2000

引证文献(12条)

1. 张瑜. 夏勇. 王泽鹏. 闫宝文. 付芝康. 陈明 贵州簸箕田金矿单矿物稀土元素和同位素地球化学特征[期刊论文]-地学前缘 2010(2)

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

3. 钟日晨. 李文博 内蒙古白乃庙矿田十四万金矿床流体包裹体研究[期刊论文]-岩石学报 2009(11)

4. 张莉. 杨荣生. 毛世东. 鲁颖淮. 秦艳. 刘红杰 阳山金矿床锶铅同位素组成特征与成矿物质来源[期刊论文]-岩石学报 2009(11)

5. 秦艳. 周振菊 甘肃省阳山超大型金矿床的有机地球化学特征研究[期刊论文]-岩石学报 2009(11)

6. 杨荣生. 陈衍景. 谢景林 甘肃阳山金矿床含砷黄铁矿及毒砂的XPS研究[期刊论文]-岩石学报 2009(11)

7. 毛世东. 杨荣生. 秦艳. 郭俊华 甘肃阳山金矿田载金矿物特征及金赋存状态研究[期刊论文]-岩石学报 2009(11)

8. 陈衍景. 翟明国. 蒋少涌 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[期刊论文]-岩石学报 2009(11)

9. 郭俊华. 毛世东. 陈衍景. 秦艳. 杨福立. 李建忠. 南争路 甘肃文县阳山金矿田地质特征及控矿地质因素分析[期刊论文]-大地构造与成矿学 2009(2)

10. 朱赖民. 张国伟. 李犇. 郭波. 康磊. 吕拾零 陕西省马鞍桥金矿床地质特征、同位素地球化学与矿床成因[期刊论文]-岩石学报 2009(2)

11. 朱赖民. 张国伟. 李犇. 郭波. 康磊. 吕拾零 陕西省马鞍桥金矿床地质特征、同位素地球化学与矿床成因[期刊论文]-岩石学报 2009(2)

12. 刘红杰. 陈衍景. 毛世东. 赵成海. 杨荣生 西秦岭阳山金矿带花岗斑岩元素及Sr-Nd-Pb同位素地球化学[期刊论文]-岩石学报 2008(5)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ysxb98200804021.aspx
授权使用：西北大学(xaxbdx)，授权号：d0382155-341a-4d5f-8e18-9dfc00c90421

下载时间：2010年9月25日